Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE
Abteilung Internationales, Strategie und Politik

11/2006

Grenzkosten bei forcierten Energie-Effizienz-Massnahmen und optimierter Gebäudetechnik bei Wirtschaftsbauten

Autoren:
Martin Jakob, Eberhard Jochem, Andrea Honegger, Center for Energy Policy and Economics, ETHZ
Andreas Baumgartner, Amstein&Waltert, Zürich
Urs-Peter Menti, Iwan Plüss, Hochschule für Technik und Architektur HTA, Luzern

Mitarbeit (Beleuchtung)
Stefan Gasser, eTeam, S.A.F.E., Zürich

401 - Forschungsprogramm EWG 003779018

Auftraggeber:
Bundesamt für Energie BFE, Forschungsprogramm Energiewirtschaftliche Grundlagen, 3003 Bern
ewz-Stromsparfonds der Stadt Zürich (Co-Finanzierung)
Stromspar-Fonds Basel, Amt für Umwelt und Energie, Basel (Co-Finanzierung)
Service Cantonal de l'Energie (ScanE), Genève (Co-Finanzierung)

Auftragnehmer:
Centre for Energy Policy and Economics (CEPE), ETH Zürich, Zürichbergstrasse 18, 8032 Zürich
Amstein + Waltert (A+W), Zürich

Autoren:
Martin Jakob (CEPE – Projektleitung)
Eberhard Jochem, CEPE
Andrea Ott, CEPE
Urs-Peter Menti (A+W / HTA Luzern)
Andreas Baumgartner (A+W)
Stefan Gasser (eTEam)
Iwan Plüss (HTA Luzern)

Begleitgruppe:
C.U. Brunner (CUB)
O. Brückner (Karl Steiner AG)
H.P. Bürgi (Minergie)
Th. Bürki (EnAW)
L. Dolecek (BFE)
A. Eckmanns (BFE, korrespondierendes Mitglied)
R. Meier, Forschungsprogramm Energiewirtschaftliche Grundlagen, Leitung
L. Gutzwiller, Forschungsprogramm Energiewirtschaftliche Grundlagen, Bundesamt für Energie)
P. Hofer (Prognos)
M. Tremp (CRB)
A. Trier (AWEL, Kt. ZH)
E. Schadegg (Grünberg & Partner), bis Mitte 2004
J. van der Maas (Kanton GE), ab Mitte 2004

Impressum:
Dieser Bericht kann unter www.ewg-bfe.ch bezogen werden.

Diese Studie wurde im Rahmen des Forschungsprogramms "Energiewirtschaftliche Grundlagen" des Bundesamts für Energie BFE erstellt. Für den Inhalt ist allein der/die Studiennehmer/in verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

Danke ... 6
Résumé succinct ... 7
Executive Summary ... 15
Zusammenfassung ... 23
Ausgangslage, Zielsetzung und methodisches Vorgehen ... 23
Energiebedarf der Gebäudetypen und energetische Wirkung der Massnahmen ... 24
Gebäudesimulationen für Energie- und Komfortbetrachtungen ... 27
Kosten- und Nutzenbetrachtung unter Berücksichtigung des Komforts ... 33
Erhebung der technischen Kennwerte und der spezifischen Kosten ... 40
Schlussfolgerungen und Empfehlungen ... 41
Empfehlungen für Wirtschaft, Intermediäre, Politik und Verwaltung ... 42

1 Einführung, Problemstellung und Methodisches Vorgehen ... 45

1.1 Ausgangslage und Problemstellung ... 45
1.2 Zielsetzung ... 46
1.3 Methodisches Vorgehen im Überblick ... 46
1.3.1 Gebäudekategorien ... 47
1.3.2 Methodischer Ansatz der Grenzkostenberechnung ... 48
1.3.3 Projektumfang und Abgrenzung ... 49

2 Abgrenzung, Relevanzanalyse, Referenzfälle und Massnahmenspektrum ... 51

2.1 Thematische Abgrenzung ... 51
2.2 Bezug zu Energieperspektiven ... 52
2.2.1 Energiebezugsflächen ... 52
2.2.2 Energiekennzahlen am Beispiel des Dienstleistungssektors ... 53
2.3 Relevanzanalyse: Gebäudekategorien inkl. energiewirtschaftliche Bedeutung ... 56
2.4 Referenzfälle und Energie-Effizienzmassnahmen ... 59
2.4.1 Bauweise Gebäudeform, Geometrie ... 60
2.4.2 Kennwerte der opaken Gebäudehülle ... 61
2.4.3 Kennwerte der transparenten Gebäudehülle ... 62
2.4.4 Beleuchtung ... 63
2.4.5 Sonnenschutz ... 65
2.4.6 Luftwechsel, Kühlung ... 66
2.4.7 Kälteerzeugung und –verteilung ... 68
2.4.8 Wärmeerzeugung und -verteilung ... 69
2.4.9 Interne Lasten und EKZ Elektrizität im Ist-Zustand und im Referenzfall ... 70
2.4.10 EKZ Wärme im Ist-Zustand und Referenzfall ... 71

3 Energie- und Komfortberechnungen ... 73

3.1 Stand der Forschung und Anwendung ... 73
3.1.1 Wärmebedarf der Wirtschaftsbauten ... 73
3.1.2 Elektrizitätsbedarf der Wirtschaftsbauten ... 74
3.1.3 Gleichzeitige Modellierung des Wärme- und Strombedarfs für Luftwechsel, Kühlungs- und Beleuchtung bei SIA 0176 ... 74
3.2 Fragestellungen ... 76
3.2.1 Wärmebedarf in Funktion zunehmenden Wärmeschutzes ... 76
3.2.2 Glasanteil, Glasqualität, Sonnenschutz und Auswirkungen auf Komfort, Wärme und Kühlungsbedarf ... 76
3.2.3 Kühlung ... 76
3.2.4 Beleuchtung ... 77
3.3 Vorstudie am Beispiel Bürogebäude der Bauperiode 1947-1975 ... 78
3.3.1 Energetischer Vergleich verschiedener Fassaden-U-Werte ... 82
3.3.2 Komfortvergleich verschiedener Fassaden-U-Werte ... 83

3.3.3 Energetischer Vergleich unterschiedlicher Fenstertypen 84
3.3.4 Komfortvergleich unterschiedlicher Fenstertypen 85
3.3.5 Energetischer Vergleich unterschiedlicher Luftwechselkonzepte 87
3.3.6 Erneuerung der Lüftungsverteilung und Effizienz der Ventilatormotoren 94
3.3.7 Fazit der energetischen Berechnungen der Vorstudie für die Bürogebäude 94
3.4 Energetische Berechnungen für konkrete Gebäudetypen und stufenweise weitergehende Energie-Effizienzmassnahmen 95
3.4.1 Charakterisierung des thermischen Komforts 97
3.4.2 Gegenüberstellung von Energiebedarf und thermischem Komforts bei Neubauten 100
3.4.3 Energiebedarf und thermischer Komfort im Gebäudebestand 111
3.4.4 Volllaststunden bei der Beleuchtung 123
3.4.5 Sensitivität Fensteröffnung 126
3.4.6 Sensitivität Sonnenschutzeinsatz 130
3.5 Interpretation der Simulationsergebnisse 133
3.5.1 Sonnenschutz und Beleuchtung: 133
3.5.2 Automatische Fensteröffnung 134
3.6 Zusammenfassung und Fazit aus den Gebäudesimulationen für Energie- und Komfortbetrachtungen 134

4 Kostenerhebungen und Beschrieb der Einzelmassnahmen 141

4.1 Methodik 141
4.2 Marktmechanismen bei der Preisgestaltung 142
4.3 Fassaden 143
4.3.1 Neue Gebäude 143
4.3.2 Bestehende Bauten 144
4.4 Fenster und Verglasungen 145
4.4.1 Verglasungen 145
4.4.2 Fenster bei Neubauten und Gebäudeerneuerung 146
4.5 Sonnenschutz 150
4.6 Wärmeerzeugung und -verteilung 152
4.6.1 Investitionskosten der Wärmeerzeugung 152
4.6.2 Betrieb- und Unterhaltskosten der Wärmeerzeugung 155
4.6.3 Wärmeverteilung 155
4.7 Lüftungsanlagen und automatisierte Fensterlüftung 157
4.7.1 Mechanische Lüftungssysteme 158
4.7.2 Wärmerückgewinnungsanlagen (WRG) 160
4.7.3 Dezentrale Lüftungsanlagen 162
4.8 Kälteerzeugung und -verteilung 162
4.8.1 Zentrale Kälteerzeugung 162
4.8.2 Kälteabgabe 167
4.8.3 Dezentrale Kleinklimageräte 167
4.9 Hybride Wärme-, Kälte- und Lüftungssysteme 169
4.10 Beleuchtung 170
4.10.1 Technische Grundlagen und potenzielle Massnahmemöglichkeiten zur Steigerung der Energieeffizienz 172
4.10.2 Laufender Unterhalt 176
4.10.3 Sofortmassnahmen 177
4.10.4 Instandsetzung: Leuchtenumbau und Leuchten umrüsten 179
4.10.5 Leuchtenersatz 180
4.10.6 Beleuchtungen mit Leuchtstofflampen: Erhebung von Kosten und technischen Kennwerten im Vergleich 184
4.10.7 Detailhandel 188
4.11 Betriebsoptimierung (BO) 189
4.11.1 BO bei der Wärmeerzeugung- und verteilung 189
4.11.2 BO bei der Warmwasseraufbereitung und -verteilung 190
4.11.3 BO bei Kälteerzeugung und -verteilung 192
4.11.4 BO bei Lüftungs- und Klimaanlagen 192

4.11.5 BO bei Beleuchtungsanlagen ... 193
4.11.6 Übergreifende Betriebsoptimierung (BO) und Inbetriebnahme ... 193
4.12 Fazit der Kostenerhebungen ... 194

5 Kosten-Nutzenanalyse und Grenzkostenbetrachtung auf Element- und Anlagenebene ... 195

5.1 Fassaden ... 195
5.1.1 Neubau ... 195
5.1.2 Bestehende Bauten ... 196
5.2 Fenster und Verglasungen ... 198
5.2.1 Verglasungen ... 198
5.2.2 Fenster bei neuen Gebäuden ... 200
5.2.3 Fenster bei bestehenden Gebäuden ... 203
5.3 Lüftungsanlagen ... 205
5.3.1 Einbau einer Lüftungslage mit Wärmerückgewinnung ... 205
5.3.2 Gekoppelte Steigerung der Elektrizitäts- und Wärme-Effizienz bei Lüftungsanlagen im Neubau ... 206
5.3.3 Gekoppelte Steigerung der Elektrizitäts- und Wärme-Effizienz bei Erneuerungen von Lüftungsanlagen im Gebäudebestand ... 207
5.3.4 Einbau einer Wärmerückgewinnungsanlage im Gebäudebestand ... 209
5.3.5 Erneuerung von WRG-Anlagen in alten Lüftungsanlagen ... 211
5.3.6 Verbesserung des thermischen Wirkungsgrades bei Wärmerückgewinnungsanlagen ... 212
5.4 Komfortkühlung ... 212
5.4.1 Effizientere Kältemaschinen ... 212
5.4.2 Kälteerzeugung bei geringerem Temperaturhub oder alternativem Kältemittel ... 213
5.4.3 Rückkühlung mit Free-Cooling ... 215
5.4.4 Adiabatische Kühlung der Zuluft ... 216
5.4.5 Kälteabgabe ... 218
5.4.6 Integrale Planung und Konzeption ... 219
5.5 Beleuchtung ... 220
5.5.1 Wirkung von Lichtregelungen bei Beleuchtungen mit Leuchtstofflampen ... 220
5.5.2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen bei Beleuchtungen mit Leuchtstofflampen ... 223
5.5.3 Detailhandel ... 230
5.6 Wärmeerzeugung ... 232
5.6.1 Neue Gebäude ... 232
5.6.2 Bestehende Bauten ... 234

6 Kosten-Nutzen auf Gebäudeebene ... 235

6.1 Neubau ... 235
6.2 Erneuerung des Gebäudebestandes ... 243
6.3 Fazit ... 252

7 Schlussfolgerungen und Empfehlungen ... 255

7.1 Inhaltliche Schlussfolgerungen ... 255
Zum Zielkonflikt von Energieeffizienz und Komfort in Wirtschaftsgebäuden ... 255
Zur Kostenstruktur und den Kosten- und Nutzenbetrachtungen von Energieeffizienzmassnahmen ... 259
Zu Marktstrukturen und zum aktuellen Stand der Energie- und Kostenplanung ... 260
7.2 Methodische Anmerkungen ... 261
Grenzen des Grenzkostenansatzes ... 261
Grenzen der Modellierung von Energiebedarf und Komfort - Tools für Planer ... 261
7.3 Empfehlungen an Wirtschaft, Intermediäre, Politik und Verwaltung ... 262
Wirtschaft, insbesondere Immobilienwirtschaft und Planer ... 262
Intermediäre, insbesondere Normengebung, Aus- und berufliche Fortbildung ... 263
Politik und Verwaltung ... 265
Forschung und Entwicklung ... 266

8 Literatur 267

9 Anhang 271
9.1 EKZ als Funktion der Gebäudegrösse 271
9.2 SIA Dokumentation D 0176 271
9.3 Modelltechnische Spezifikationen 273
9.3.1 Behaglichkeit 273
9.3.2 Positionierung der Personen innerhalb des Raums. 273
9.3.3 Luftwechsel 274
9.3.4 Zeitlicher Verlauf der Raumbelegung 275
9.4 Anhang zum Kapitel 3.3 276
9.5 Anhang zum Kapitel 3.4 280
9.5.1 Charakterisierung des thermischen Komforts anhand von drei Komfortmassen 283
9.5.2 Gegenüberstellung von Energiebedarf und thermischem Komforts 284
9.5.3 Sensitivität Fensteröffnung bei Energiebedarf und thermischem Komfort 296
9.5.4 Sensitivität Sonnenschutzeinsatz 297
9.6 Anhang zum Kapitel 4 300
9.6.1 Liste der Daten und Informationen liefernden Unternehmen und Institutionen 300
9.6.2 Lichtausbeute verschiedener Lampentypen im Vergleich 301
9.6.3 Erhebungsraster Beleuchtungen 303
9.7 Anhang zum Kapitel 5 308
9.7.1 Fenster und Verglasungen 308
9.7.2 Lüftungsanlagen 310
9.7.3 Komfortkühlung 312
9.7.4 Beleuchtungen 313
9.7.5 Wärmeerzeugung 316
9.8 Anhang zum Kapitel 6 317
9.8.1 Struktur der Kapitalkosten 317
9.8.2 Struktur der Jahreskosten für weitere Fallbeispiele 329
9.8.3 Jahreskosten, EKZ Elektrizität und thermischer Komfort als Funktion der Brennstoff-EKZ335

Danke

Der vorliegende Bericht wurde ermöglicht durch die externe Finanzierung des BFE, der Kantone BS und GE und des EZW der Stadt Zürich (siehe auch Impressum) sowie durch Eigenmittel von Amstein+Walthert (A+W), der HTA Luzern sowie des CEPE der ETH Zürich. Das Projektteam spricht diesen Institutionen ein grosses Danke aus. Inhaltlich wurde das Projekt insbesondere durch Beiträge von Daten und Informationen zahlreicher Unternehmen und Institutionen ermöglicht (siehe dazu auch die Liste der Daten liefernden Unternehmen, S. 300). Diesen Unternehmen und Institutionen sind wir zu grossem Dank verpflichtet und allen beteiligten Personen sei an dieser Stelle herzlich gedankt. Ein herzliches Danke geht namentlich an die Damen und Herren Aerne, Bachmann, Baumann, Bebie, Binda, Brückner, Brunner, Bucher, Buchholz, Burger, Camenisch, Canali, Columberg, Dittrich, Frank, Gasser, Gertsch, Ch. Gmür, H. Gmür, Gubler, Haefliger, Hegi, Heiz, Heusser, Hoch, Hofstetter, Hubacher, Jeangros, Joerg, Kaeslin, Kaufmann, Keel, Kegel, Kissel, Koch, Koller, Lenzlinger, Lüdi, Ménard, Mettler, Meyer, Michel, Mom, Moor, Mühlheim, W. Pluess, Prochaska, Rammelt, Rhyner, Ruosch, Schierz, Schmitz, Schönbächler, Schüller, Seifert, Simmler, Sokolean, Sollberger, Stahel, Stähli, Steinemann, Strasser, Sueess, Trösch, Vogt, Volpe, Wellig, Wenger, Widmann, Widmer, Wittlin und Zimmermann.

Sehr wertvoll waren auch die Inputs und Diskussionsbeiträge der Begleitgruppe; auch ihren Mitgliedern sei an dieser Stelle nochmals herzlich gedankt. Last but not least dankt die Projektleitung dem Projektteam herzlich für sein Engagement und seine Kompetenz, namentlich Andrea Honegger-Ott, Andreas Baumgartner, Stefan Gasser, Eberhard Jochem, Urs-Peter Menti und Iwan Plüss, sowie seinen Kollegen B. Aebischer, A. Altenburger, U. Flückiger, R. Mielebacher, B. Schrader, J. Staufer, R., D. Tschudy, R. Uetz, R. Schmitz, G. Zweifel.

Résumé succinct

Le projet vise à mettre à jour empiriquement la connaissance des coûts des mesures prises en faveur de l'efficacité énergétique dans les principales catégories de bâtiments du secteur public et commercial. L'étude devait porter sur la protection thermique en hiver et en été, sur les techniques de chauffage, de ventilation et de climatisation ainsi que sur l'éclairage. Il s'agissait d'examiner aussi bien la construction neuve que la rénovation, en distinguant entre la consommation d'électricité et celle de chaleur, et en considérant les interactions éventuelles. On a également souhaité évaluer (et si possible chiffrer) de possibles bénéfices additionnels. Ceux-ci ont été identifiés d'après les déclarations relatives à des modifications du confort induites par les mesures d'efficacité énergétique. Enfin, il s'agissait de formuler des recommandations à l'adresse des intéressés: investisseurs et concepteurs de nouveaux bâtiments, exploitants et propriétaires de bâtiments existants, professionnels de l'enveloppe et des installations du bâtiment et enfin, responsables de la recherche en techniques et en économie énergétiques.

Demande d'énergie et potentiels d'efficacité

Même si les travaux se sont centrés sur les bâtiments de bureaux, leurs résultats étant exprimés sous forme désagrégée peuvent être appliqués à d'autres catégories de bâtiments du secteur des services: écoles, hôpitaux, surfaces de vente. En l'absence de mesures particulières, la consommation spécifique de combustible des constructions neuves se situe entre 140 et 280 MJ/m^2_{SRE}a, celle des bâtiments existants entre 430 et 1000 MJ/m^2_{SRE}a, voire au-dessus de 1500 MJ/m^2_{SRE}a dans certains cas isolés. Dans les bâtiments neufs où les charges internes sont élevées (appareils nécessitant 120 MJ_{el}/m^2_{SRE}a), la demande d'électricité est du même ordre (180 à 350 MJ_{el}/m^2_{SRE}a), alors qu'elle varie entre 180 et plus de 500 MJ_{el}/m^2_{SRE}a dans les bâtiments existants (Tableau R. 1). Or des interventions affectant le bâtiment et ses installations permettent de ramener l'indice de dépense d'énergie électrique dans les bâtiments existants et dans les constructions neuves à un niveau de 170 à 220 MJ_{el}/m^2_{SRE}a, selon le train de mesures et la stratégie adoptée (p.ex. avec accent sur le combustible ou sur l'électricité). En vue de réduire de façon significative la demande de courant, il conviendrait d'agir aussi sur la consommation des appareils de bureau, qui représente souvent une part élevée des charges internes. Le potentiel d'économies y relatif se situe entre 40 et 80 MJ_{el}/m^2_{SRE}a. Il est possible de faire en sorte que la demande de chaleur atteigne tout juste de 90 à 140 MJ/m^2_{SRE}a dans les bâtiments neufs et de 100 à quelque 300 MJ_{el}/m^2_{SRE}a dans les bâtiments existants, selon le genre de construction. Enfin le recours à la récupération de chaleur et à la pompe à chaleur permet d'éliminer complètement les besoins de combustible restants.

Ces gains ne résultent pas d'un seul type d'interventions, mais d'**un ensemble de mesures combinées**:

- L'isolation thermique, les fenêtres et vitrages à faible valeur U se traduisent par une réduction des besoins de chaleur pouvant atteindre 100 MJ/m^2a dans les bâtiments neufs et jusqu'à 400 MJ/m^2a dans les bâtiments rénovés, tandis que la ventilation avec récupération de chaleur «vaut » jusqu'à 150 MJ/m^2a (tous bâtiments confondus). Quant à l'optimisation de l'exploitation, elle produit entre quelques dizaines et environ 100 MJ/m^2a, selon les circonstances.
- Pour l'électricité, un éclairage axé sur l'efficacité énergétique, incluant une modulation liée à la lumière du jour et à la présence de personnes permet des gains d'environ 40 MJ_{el}/m^2_{SRE}a dans les bâtiments neufs et de 60 à 120 MJ_{el}/m^2_{SRE}a dans la rénovation. On peut obtenir des gains comparables en prenant des mesures directes ou indirectes touchant la ventilation et le refroidissement, par exemple en réduisant les pertes de charge, en adaptant les réglages aux besoins (p.ex. en fonction du CO_2), en maintenant à moins de 70% la proportion des vitrages, en réglant l'action des pare-soleil (p.ex. par température extérieure dépassant 16 à 20°C), en limitant le refroidissement (temp. idéale non inf. à 26°C), en rendant plus efficace la production et la distribution de froid grâce à une différence de température modeste (coeff. performance annuel >5), en tirant parti de l'inertie thermique du bâtiment et en ouvrant les fenêtres pour le rafraîchir.

		Bâtiments neufs				Bâtiments existants			
		Standard		Good practice		Avant		Après rénov.	
		de	à	de	à	de	à	de	à
Electricité	Charges int. (app., sans éclairage)	40	120	30	60	40	120	30	60
	Eclairage	60	100	25	40	100	160	40	80
	Ventilation (air pulsé)	25	45	15	25	160	290	15	30
	Refroidissement	30	110	10	30	20	50	10	30
	Total sans pompe à chaleur (*)	100	350	80	140	180	530	90	150
	Chauffage (PAC)	30	100	20	35	-	-	25	40
Combustible.	Chauffage air pulsé	50	100	15	30	260	400	20	35
	Autres besoins de chaleur	90	280	70	120	380	600	80	140
	Total combustibles (*)	140	280	85	140	430	1000	100	150
(*) Le total ne correspond pas à la somme des éléments parce que toutes les catégories ne sont pas représentées partout et que les valeurs minimales et maximales ne se combinent pas forcément.									

Tableau R. 1 Plages des indices de dépense d'énergie (consommation finale; MJ/m²a)

Interactions entre besoins de chaleur et d'électricité

Dans l'optique du confort, la réduction des besoins d'électricité et de combustible engendre parfois des conflits d'objectifs, mais elle peut aussi offrir des possibilités de synergie:

- *La synergie* résulte fréquemment du réglage amélioré des équipements de ventilation (en fonction de la production de CO_2 ou de la présence de personnes) et de refroidissement d'un bâtiment (élimination des excès de refroidissement), car ces mesures diminuent tant les besoins de chaleur que ceux d'électricité. La modernisation de l'éclairage accroît certes les besoins de chauffage et éventuellement d'énergie fossile, mais cela dans une mesure relativement modeste; il y a en tous cas gain d'énergie primaire. Il en va généralement de même avec une pompe à chaleur efficace.
- L'isolation thermique poussée de l'enveloppe du bâtiment a des effets tant positifs que négatifs en termes de confort thermique. D'une part celui-ci s'améliore en période froide, notamment en comparaison avec les bâtiments existants non isolés et de façon générale dans les bâtiments à forte proportion de vitrages, parce qu'il y a moins de surfaces froide et de courants d'air glacial. D'autre part, l'isolation thermique d'une façade qui en était privé risque d'en aggraver la surchauffe, surtout dans des locaux déjà critiques, privés de refroidissement actif et passif, et dont il est difficile ou impossible d'ouvrir les fenêtres (ceci n'est pas forcément le cas pour l'isolation thermique des toiture, car l'isolation thermique prévient aussi les gain de chaleur qui ont une importance beaucoup plus élevée aux toitures). Il faut alors recommander le recours à des verres sélectifs (valeur g modeste, comprise entre 0,35 et 0,42, mais bonne transmission de la lumière) et la combinaison des mesures d'isolation thermique de l'enveloppe du bâtiment avec d'autres interventions touchant l'énergie et le confort (refroidissement passif ou actif, réduction des charges internes, notamment au moyen d'un éclairage efficace et bien réglé).
- La protection accrue vis-à-vis du soleil accroît certes le confort thermique et réduit les besoins de refroidissement, mais réclame davantage d'éclairage. On peut largement y remédier au moyen d'un système de refroidissement très efficace, réglé en fonction de la saison. Lorsqu'il ne fait pas très chaud, il faut préférer l'éclairage naturel au détriment de la protection solaire. Si les fenêtres à gain solaire ayant une valeur g élevée (en comparaison du standard à valeur U du verre correspondant) augmentent les gains solaires en période de chauffage, elles ne sont pourtant pas recommandées pour les bâtiments de services, car elles aggravent le risque de surchauffe en été. De leur côté, les fenêtres à protection solaire (faible valeur g) améliorent certes le confort estival, mais elles réclament plus de chauffage et plus d'électricité (éclairage).

*Rentabilité des mesures pour **plus** d'efficacité*

La principale conclusion à retenir d'emblée est que la rentabilité de ces mesures dépendra moins du niveau d'efficacité énergétique que **des options prises à l'échelon de l'architecture et de la conception, ainsi que du niveau de confort recherché**. Mentionnons la taille du bâtiment (effets d'échelle), sa forme, les matériaux choisis, le type de façade, la proportion de vitrages, le type de pare-soleil et leur répartition, la ventilation et / ou le refroidissement (ou leur absence). Ainsi la modification de la part de vitrages peut entraîner des surcoûts de 10 CHF/m^2_{SRE}a et davantage, cela pour des retombées relativement modestes sur les besoins d'électricité et de combustible. De même, l'amélioration du confort au moyen du refroidissement et de la ventilation entraîne des surcoûts pouvant atteindre 15 CHF/m^2_{SRE}a.

Dans les bâtiments existants, la rentabilité des mesures touchant le bâtiment et les installations dépend non seulement de leur coût et de leur effet énergétique, mais encore – facteur important – **de la situation initiale et de la base de comparaison des coûts**. La comparaison fréquemment faite avec les dépenses courantes (pour l'énergie) n'est pas appropriée, parce que les investissements consentis accroissent la valeur réelle du bâtiment (et la productivité des personnes qui y travaillent). Objectivement, il vaut mieux comparer la rentabilité de deux options, la "réfection" et le "renouvellement énergétique standard", si difficile que soit la définition de leurs bases économiques. L'une et l'autre option révèlera des investissements rentables, comme l'indiquent la présentation synoptique Tableau R. 2 et les remarques qui suivent. On a comparé les coûts annuels nets et les coûts spécifiques bruts en se référant à des constructions neuves typiques et à la rénovation énergétique, parfois à la réfection. Il existe des différences importantes entre les divers types de mesures, voire à l'intérieur de chacun d'eux, notamment selon la situation de référence[1].

Une ***protection thermique plus poussée*** de l'enveloppe (isolation renforcée, fenêtres à valeur U réduite) est un facteur décisif d'efficacité énergétique du bâtiment. Avec les prix actuels de l'énergie (0,07 à 0,08 CHF/kWh), les mesures prises à cet effet sont généralement rentables ou du moins, peu onéreuses (surcoûts n'atteignant pas 1–2 CHF/m^2_{SRE}a) jusqu'à des valeurs U de 0,2 W/m^2K ou une épaisseur d'isolation de 20 cm. C'est vrai aussi bien pour la construction neuve que pour les bâtiments existants, notamment si une réfection s'impose de toute façon, et même, si la façade est simple, en comparaison des dépenses courantes pour l'énergie. Avec une façade complexe, la rénovation énergétique est également rentable par rapport à une rénovation onéreuse, mais non en comparaison de simples mesures d'entretien.

Des éclairages énergétiquement efficaces (réglage compris) sont un facteur décisif d'efficacité énergétique et de confort. Surtout après rénovation d'un bâtiment existant, ils contribuent à la qualité ergonomique de la lumière (pas de scintillement, puissance, couleur de l'éclairage et fidélité dans le rendu des couleurs) et dégagent moins de chaleur. Les mesures à prendre pour cela sont généralement rentables ou n'engendrent que des surcoûts modérés, ne dépassant pas 2 CHF/m^2a, dans la règle, aussi bien dans la construction que dans la réfection. Par contre, si l'on s'appuie sur les dépenses courantes pour l'énergie, leur réduction ne compense pas le prix du renouvellement complet de l'éclairage, ce qui explique peut-être la rareté de l'opération.

Le coût élevé de l'utilisation du bâtiment provoque le plus souvent ***une forte densité d'occupation et de dotation en appareils***. Il en résulte ***d'importantes charges thermiques internes*** (p. ex. éclairage moyennement efficace: env. 80 à 100 MJ/m^2_{SRE}a, appareils: jusqu'à 120 MJ/m^2_{SRE}a). Plus les charges internes résiduelles sont élevées et la protection thermique du bâtiment poussée, plus il est difficile de maintenir un niveau de confort acceptable pendant les périodes estivales ensoleillées et entre-saisons. Les techniques de **refroidissement passif** (*ouverture automatisée des fenêtres ou*

---

[1] Le Tableau R. 2 fait la part belle aux mesures de rénovation, qui rapportent davantage. Mais les résultats obtenus dans la construction neuve peuvent être relativement tout aussi significatifs. Pour mieux comprendre les écarts constatés, on se référera au tableau Z.4 du résumé plus détaillé, p.30.

dispositifs de parapet avec ouvertures pour l'aération) apportent de substantielles améliorations du confort sans nécessiter des équipements de ventilation et de refroidissement. Leurs coûts annuels se situent entre quelque 5 et 10 CHF/m^2_{SRE}. Toutefois le refroidissement passif n'est pas toujours possible (selon la situation initiale et l'emplacement du bâtiment) et bien souvent il est insuffisant pour répondre à des exigences élevées de confort thermique (conform. au à la révision de la norme SIA 382/1). Dans certains cas, il conviendrait par conséquent de réexaminer ces exigences lorsqu'elles s'appliquent à des bâtiments non ventilés ni refroidis.

	Electricité Δind. én.$_{el}$ MJ/m^2_{SRE}a	Chaleur (consom. final) Δind. én.$_{comb.}$ MJ/m^2_{SRE}a	Coûts annuels nets (1, 2) CHF/m^2_{SRE}a	Coûts spécifiques bruts (1) CHF/kWh$_{comb}$ | CHF/kWh$_{el}$	Effets confort; heures de surchauffe selon limite de la révision de la norme SIA 382/1 (espaces sud)
Architecture (3)	+15 bis +25	-50 bis -60	-15 bis +20	Non examiné	Non examiné
Charges internes: densité d'occupation, appareils plus efficaces	-40 bis -80	+10 bis +40	+ 30 bis +40 (taux d'occupation) (4)	Non examiné	Surchauffe: jusqu'à –200 h
Isolation thermique	Négligeable	-100 bis –150	-0.5 bis +1	0.05 bis 0.13 | *	Meilleur confort thermique en hiver; surchauffe: +50 à +200 h
Fenêtres / vitrages, protection solaire	-20 bis +15	+20 bis -400	-1 bis+5	0.03 bis 0.2 | *	Meilleur confort thermique en hiver;surchauffe: -120 à + 800 h
Eclairage	-20 bis –110	+10 bis +60	-1 bis +2.5	* | -0.05 bis +0.4	Meilleure ergonomie éclairage; surchauffe: jusqu'à –200 h
Ventilation/refroidissement(efficacté énergétique)	-10 bis –160	-50 bis –250	-10 bis + 1.5	* | -0.25 bis + 0.4 (5)	Meilleure qualité de l'air, moindre concentration de CO_2surchauffe: + quelques 10 h
Ventil./refroid. (confort)	+10 bis +100	-50 bis +5	+3 bis +15	*0.17 bis 0.3* (5) | *	Surchauffe: jusqu'à –900 h (-1200 h)
Production de chaleur					
PAC et non én. fossile	+30 bis + 80	-30% -100%	-0.5 bis +1	n.a.	- avec des sondes terrestres, quelques centaines d' heures
Bois et non én. fossile	Négligeable	En. renouv. et non fossile	+1 bis +2	n.a.	

* néant (1) constr. neuve standard ou rénovation énergétique (réfection partielle), intérêt réel 3%
(2) coût combustible 7 ct./kWh, coût électricité 17 ct./kWh (3) part vitrages, choix du matériau, conception
(4) appareils supposés sans effets / coûts (5) coûts nettement inférieurs si le confort amélioré était pris en compte
Important: on ne peut pas directement additionner les potentiels d'efficacité énergétique des différents secteurs (interactions)

Tableau R. 2 Vue agrégée de l'effet énergétique, des modifications de confort, des coûts spécifiques bruts (CHF/kWh) et des coûts et bénéfices nets (CHF/m^2a) des différents types de mesures (sans évaluation économique du gain de confort). Source CEPE et al., tableau Z.4, p. 30

Le refroidissement (actif ou passif) des bâtiments ne peut que prendre de l'importance, notamment *du fait du réchauffement prévisible du climat en Suisse au cours des trois à cinq décennies à venir*. Il conviendrait de tenir compte plus systématiquement de cette perspective dans la construction et dans les investissements en faveur des immeubles existants, afin d'éviter d'avoir à consentir d'inutiles réinvestissements ou d'être confronté à des dépenses d'électricité exagérées ou encore à des blocages sociaux. Le refroidissement actif (air pulsé, éléments de construction thermoactifs, plafond réfrigérant, refroidissement de l'air frais, refroidissement nocturne par ventilation) entraîne des surcoûts qui sont dans la règle de 3 à 15 CHF/m^2_{SRE}a. Il importe donc d'axer le système sur une efficacité élevée (avec p.ex. une faible charge de chaleur pour l'eau de refroidissement), ce qui est rentable ou n'engendre que des surcoûts modestes (0 à 2 CHF/m^2_{SRE}a) et permet un refroidissement très efficace (<30 MJ_{el}/m^2_{SRE}a, en combinaison avec les mesures indirectes citées plus haut). Ainsi le refroidissement ne jouera pas un rôle excessif par rapport aux autres applications de l'électricité (éclairage, air pulsé, appareils) comme on le croit souvent. Il faut toutefois relever ici que la consommation d'énergie de re-

froidissement réagit vivement (augmentation à plus de 100 $MJ_{el}/m^2_{SRE}a$) si l'on néglige les mesures directes et indirectes qui ont été mentionnées.

L'installation de ventilation est à considérer avant tout comme un équipement de confort et d'hygiène de l'air. Dotée d'un récupérateur de chaleur, elle réduit certes la demande nette de chauffage mais ne saurait se justifier économiquement dans la seule perspective de l'efficacité énergétique (coûts marginaux sensiblement supérieurs aux coûts de production de chaleur). L'une des raisons en est que même si sa conception privilégie les impératifs d'hygiène de l'air, la renouvellement de l'air est généralement plus rapide qu'avec l'ouverture des fenêtres (le plus souvent certes insuffisante dans l'optique de l'hygiène de l'air), ce qui réduit l'effet net de cet équipement et des pompes à chaleur alimentées à l'air vicié. Le bien-être exige un refroidissement approprié de l'air frais, sans lequel le confort diminue (menace de surchauffe). Le choix du *forced free cooling* (taux de renouvellement de l'air plus élevé et/ou périodes de fonctionnement plus longues, en particulier pendant les nuits) peut se justifier dans certains cas isolés pour des raisons de coût (possibilité de renoncer à la distribution hydraulique de froid). Cette solution doit toutefois être adoptée après mûre réflexion seulement, car ses besoins de courant risquent de dépasser rapidement ceux d'un bon refroidissement hydraulique. Le coût annuel de l'installation de refroidissement atteint en règle générale 10 CHF/m^2a, un montant plus ou moins indépendant du niveau d'efficacité énergétique atteint. Il importe donc de veiller à avoir de faibles pertes de charge (<700 Pa), avec des ventilateurs et des moteurs électriques très efficaces, soit un taux d'efficacité élevé (<0,3Wh/(m^3/h)) ainsi que des réglages adaptés aux besoins (en fonction du CO_2). Ces mesures permettent de réduire la consommation d'électricité des bâtiments neufs (gain de 20 à plus de 30 MJ/m^2a, soit jusqu'à deux tiers en moins) comme des bâtiments rénovés (gain de 70 à 130 MJ/m^2a), avec des gains pouvant dépasser 250 MJ/m^2a dans certains cas. Le recours à des équipements de récupération de chaleur au coefficient de performance amélioré (plus de 85%) est également rentable.

Dans bien des cas, p.ex. dans les bâtiments aux façades complexes ou protégées, aux espaces exigus, la **pompe à chaleur** ou la PAC alimentée à l'air vicié constitue une solution intéressante du point de vue énergétique et technique, permettant d'abaisser la consommation de combustible pour le chauffage. A condition de réaliser une installation très efficace ou de tirer parti des synergies avec le refroidissement du bâtiment, on pourra compenser l'investissement supplémentaire en comprimant les dépenses pour l'énergie et l'exploitation.

Les coûts nets pourraient se trouver sensiblement réduits, voire devenir des bénéfices si la comptabilisation ajoutait aux moindres dépenses d'énergie le **gain de confort,** évalué économiquement (voir sous-chapitre suivant). Inversement, il faut presque toujours s'attendre à des coûts nets et à des coûts bruts plus élevés si la comparaison se base uniquement sur les dépenses courantes pour l'énergie. Sont rentables les mesures dont le coût spécifique brut est inférieur à la moyenne des prix du combustible ou de l'électricité (moyenne calculée sur la durée de la mesure prise).

Conclusions de l'analyse économique

(1) Dans les bâtiments utilitaires neufs ou rénovés, il est possible d'**améliorer le confort** et de **réduire sensiblement les besoins de combustible et d'électricité du bâtiment** en prenant des mesures appropriées. Pour abaisser de manière significative l'ensemble de la demande d'électricité, on doit étendre l'effort aux **appareils de bureau**, dont la consommation représente généralement une part importante des charges internes. Des projets bien conçus permettent de réaliser tant des immeubles neufs peu gourmands d'énergie que, dans les immeubles existants, la modernisation énergétique des équipements et de l'enveloppe dans des conditions rentables ou au prix d'un surcoût modeste (0 à quelques CHF/m^2a).

(2) Les dépenses annuelles (brutes) pour l'énergie sont bien plus fortement influencées par les exigences de confort et les équipements supplémentaires (refroidissement actif, ventilation) et par les choix fondamentaux de l'architecte (type de façade, emplacement du pare-soleil, design archi-

tectonique extérieur et intérieur). Les coûts qui y sont liés atteignent entre 10 et quelques dizaines de CHF/m^{2}a. A titre de comparaison: les coûts annuels intégraux des éléments d'un bâtiment du secteur public et commercial (avec les installations) qui déterminent la dépense d'énergie atteignent 50 à 100 CHF/m^{2}a, les coûts totaux de capital et d'exploitation 300 à 400 CHF/m^{2}a et les coûts de personnel approximativement 5000 à 10000 CHF/m^{2}a. Il suffit que des locaux surchauffés ou trop refroidis, ou encore l'air vicié, réduisent la productivité des personnes qui y travaillent pour qu'il faille mesurer à cette aune la valeur de toute intervention touchant la protection thermique ou la demande d'énergie. Le très important bénéfice à attendre des mesures à caractère énergétique dans ces bâtiments est une réalité largement négligée, peut-être parce qu'elle est trop peu connue et n'a par conséquent guère été prise en compte dans l'appréciation des investissements pour l'énergie et des mesures d'organisation.

Conclusions touchant la politique de l'énergie et de la construction

La saisie des coûts et la définition de leurs éléments déterminants n'intéresse pas seulement l'appréciation économique des mesures pour l'efficacité énergétique, mais aussi la politique de l'énergie. Les concepteurs et les entrepreneurs appelés à travailler à la construction ou à la réfection et à la modernisation des bâtiments travaillent le plus souvent chacun de leur côté. Le maître de l'ouvrage désireux de faire les meilleurs choix énergétiques perd beaucoup de temps à s'informer et à chercher pour finalement décider. Les nombreuses interfaces empêchent la transparence et la compréhension d'ensemble, rendant impossible la comparaison des possibilités d'investissement du fait des délimitations différentes et des coûts connexes souvent non négligeables. Tant la subdivision du travail que la pression de la concurrence font que les prestations doivent coûter le moins cher possible. Cette tendance est toutefois contraire à la nécessité de réduire les coûts du cycle de vie (et partant, de préférer les solutions efficaces au plan énergétique).

Une amélioration plus poussée de l'efficacité énergétique se heurte obstinément à des entraves d'organisation du marché. Ces entraves diffèrent selon les **groupes-cibles** qui en sont affectés.

- *L'amélioration des connaissances* que possèdent les investisseurs, les concepteurs et les entrepreneurs au sujet des possibilités d'investissement passe par beaucoup d'information, une plus grande transparence du marché et la réduction des coûts des transactions. Cinq aspects en particulier méritent d'être encouragés ; ce sont :
  1° *les services de conseil au démarrage et à la mise en œuvre* fournis aux propriétaires immobiliers (aspects financiers et conceptuels),
  2° *les campagnes ciblées de mesure et d'information émanant des producteurs d'équipements techniques, à l'intention des concepteurs et des utilisateurs* (comme la campagne « Druckluft » 2006),
  3° *les offres classiques de formation et de perfectionnement professionnel,* 4° *le développement des réseaux locaux d'acquisition de connaissances* (analogues aux modèles AEnEC et à energho) pour les sociétés immobilières et les propriétaires de bâtiments administratifs, et
  5° *l'adoption plus fréquente du label MINERGIE* et la mise en œuvre du *passeport bâtiment* en Suisse. Il faut recommander avant tout le financement initial des réseaux locaux, particulièrement payant. Les mesures citées devront être préparées et mises en œuvre par l'administration fédérale et les cantons, en collaboration avec les associations professionnelles, notamment par le biais des normes SIA (adoption et application). A l'ordre du jour, la question de savoir comment accroître l'efficacité des moteurs électriques, ventilateurs, équipements cryogènes, pompes et plans d'installations, et comment promouvoir la conception intégrée, l'optimisation de l'exploitation et la gestion des immeubles.
- **Les professionnels de l'efficacité énergétique, c-à-d les concepteurs et les fournisseurs de technologies** sont interpellés à l'échelon de l'organisation (du marché), à celui du *développement technique*, de la *diffusion de technologie et de savoir-faire* ainsi que du *marketing*: il importe de faire plus largement connaître les méthodes et standards régissant les commandes et réglages adaptatifs (autodidactiques) pour les bâtiments (p.ex. la ventilation liée à la concentration en CO_2, l'optimisation précoce et complète des besoins de chauffage, de refroidissement et

d'éclairage avec recours aux prévisions météorologiques) ainsi que le refroidissement haute-performances pour le bâtiment. En termes de marketing, les concepteurs et les fournisseurs doivent associer les solutions proposées à du vécu, à des formes de vie plus saine, à un confort accru (hygiène de l'air, bien-être thermique, ergonomie améliorée de l'éclairage), à une meilleure productivité au travail et à une sorte de prestige. Il faut encore familiariser les investisseurs avec des notions telles que la protection améliorée contre le bruit et contre l'effraction, les moins longues périodes d'attente d'une location ou d'une location-vente, ainsi que la qualité améliorée et les intérêts du crédit diminués du fait de la convention de Bâle.

- On sous-estime parfois le rôle des **intermédiaires,** qui font baisser les coûts des transactions par *l'adoption de normes et la standardisation* ou qui éliminent d'importantes lacunes du savoir au moyen de la formation et du perfectionnement professionnels. Les normes, standards et benchmarks (p.ex. des normes comme SIA 380/4 ou SIA 382/1 et les exigences MINERGIE) constituent des instruments de décision dans le domaine technique, dont la principale qualité est de distinguer entre les solutions standard et les options axées sur l'efficacité. Normes et benchmarks peuvent s'appliquer aussi bien au système (besoin annuel d'énergie ou coûts spécifiques de l'énergie par m^2 et par année) qu'au composant isolé (cela pour des raisons d'exécution et pour tenir compte d'un marché où la division du travail et la spécialisation sont très poussées et où dominent les petites entreprises). Normes et recommandations (p.ex. sur les valeurs-limites et les valeurs-cibles) ont une valeur pratique pour les professionnels, qui y trouvent des éléments d'information, des bases de conception et le fondement de contrats de droit civil entre maîtres d'ouvrage et fournisseurs de prestations. Voilà pourquoi il conviendrait que la normalisation, qui relève largement du droit privé (p.ex. les Energycodes SIA) obtienne de l'Etat une aide tendanciellement plus élevée qu'aujourd'hui. Les normes ne doivent pas nécessairement être ancrées dans la loi, mais peuvent s'inscrire dans *des instruments de conception et des « tools » d'un emploi relativement facile*. Il faut tendre aussi à multiplier les *publications spécialisées* (comme en a produites jadis le programme RAVEL) fournissant des contenus techniques et des appréciations économiques (p.ex. des coûts sur tout un cycle de vie et des considérations coûts/bénéfices) ainsi que le développement de b*enchmarks intégrés* et d'*instruments de conception, de travail et de mise en œuvre* qui facilitent *une vue globale*, qui révèlent les rapports coûts/bénéfices essentiels et sont souvent la condition première de l'optimisation.

Toutes les activités qui viennent d'être recommandées devraient certes relever principalement des organisations économiques elles-mêmes et de certaines entreprises, mais une initiative des pouvoirs publics et l'appui financier et moral de la Confédération, des cantons et des plus grandes communes leur seraient sans doute très bienvenus, car lesdites activités sont d'intérêt public et elles constituent des apports à l'économie globale (emploi, potentiels d'exportation, efficience économique).

- **Législation**: les prescriptions techniques et architecturales dans le domaine de la construction, surtout dans le neuf, ont révélé être des instruments tout-à-fait utiles (p.ex. pour l'isolation thermique avec SIA 380/1 et MoPEC). **Il y a un retard à combler dans le domaine de l'électricité.** Les normes 380/4 et 382/1 pourront servir de base. De telles prescriptions influencent indirectement aussi la rénovation de bâtiments et d'installations, où le progrès technique qu'elles induisent est bien souvent pris en compte. Des benchmarks et des standards pourraient valoir des facilités à l'exportation de produits destinés à l'équipement technique des bâtiments. Quant à la mise en œuvre, elle doit être simple et efficace (les travaux en cours pour SIA 380/4 sont à intensifier). De plus, **la mise en œuvre** doit se doubler d'**éléments à caractère incitatif**, par exemple des procédures d'autorisation souples. Mentionnons les modèles pour gros consommateurs (MoPEC module 8) ainsi qu'une démarche duale (cf. norme SIA 382/1, ZH, GE): lorsque des valeurs aisément mesurables (p.ex. puissance installée, vitesse d'écoulement, ou pour un bâtiment existant, indice énergétique) se situent en dessous d'un certain seuil, on peut se passer de présenter la preuve du besoin ou une autorisation, d'installer le DIFC ou d'établir un plan des mesures à prendre. Il faut examiner aussi l'opportunité d'un renouvellement obligatoire, au terme de périodes de réinvestissement spécifiques pour chaque technologie. La coordination des mesures de mise en œuvre, si possible dans tout le pays, serait de nature à produire des effets d'échelle dans le perfectionne-

ment professionnel et à créer des conditions générales semblables dans les cantons, ce dont le marché libre ne peut que profiter.

- Les **collectivités publiques** (Confédération, cantons et communes) sont propriétaires d'une bonne partie des bâtiments utilitaires. Il conviendrait qu'elles procèdent dans chaque canton à la rénovation ciblée de certains types de bâtiments (p.ex. écoles, bureaux) à titre de **démonstration d'un comportement exemplaire**, condition première d'une politique crédible pour faire passer des exigences élevées dans les domaines de l'énergie et du climat. De leur côté, les entreprises d'approvisionnement en électricité pourraient offrir des tarifs incitatifs (cf. p.ex. EWZ) au moins jusqu'au niveau d'un least cost planning.

Quant aux composants de la bureautique, qui contribuent largement aux charges internes mais qui sont commercialisés dans le monde entier, leur efficacité énergétique devrait figurer plus souvent à l'ordre du jour des organes compétents de l'AIE, des instances de normalisation et de l'UE.

Enfin il incombe aux institutions actives dans *la recherche et le développement* de produire des instruments de conception simples et rapides intégrant les rapports complexes entre protection thermique, charges internes, installations du bâtiment et solutions peu onéreuses que la présente étude a mis en évidence au moyen de simulations d'envergure (p.ex. compléter l'outil SIA pour la ventilation et la climatisation ou le configurateur d'éclairage par des indices de coûts et des modules de rentabilité Good practice). De même, les thèses qui se dégagent de cette étude doivent rapidement trouver place dans les modèles actuels d'économie énergétique: ces thèses sont le bien-être lorsque les charges thermiques augmentent du fait des appareils de bureautique, les températures extérieures qui tendent elles aussi à augmenter (évolution du climat), les besoins croissants de confort des utilisateurs, et les gains de productivité souhaités par les employeurs tant publics que privés.

Executive Summary

Das Projekt verfolgte das Ziel, die Kenntnisse zu den Kosten von Energieeffizienz-Massnahmen für die wichtigsten Kategorien von Wirtschaftsbauten auf eine aktuelle empirische Basis zu stellen. Abzudecken war der winterliche und sommerliche Wärmeschutz, die Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik sowie die Beleuchtung. Hierbei war zwischen Neubau und Erneuerung sowie zwischen Elektrizitäts- und Wärmeanwendungen zu unterschieden und den Interaktionseffekten der Massnahmen Rechnung zu tragen. Qualitativ und – so weit möglich – quantitativ darzustellen waren zudem die möglichen Zusatznutzen. Diese wurden über Aussagen zur Komfortveränderung infolge von Energieeffizienz-Massnahmen ermittelt. Schliesslich sollten auch Handlungsempfehlungen zuhanden der relevanten Akteure wie Investoren und Planer von Neubauten, Betreiber und Besitzer von bestehenden Gebäuden, sowie zuhanden der Baubranche im Bereich Gebäudehülle und Gebäudetechnik und der energietechnischen und -wirtschaftlichen Forschung formuliert werden.

Stand des Energiebedarfs und Effizienzpotenziale

Wenngleich die Bürogebäude im Fokus der Analysen lagen, können die Ergebnisse aufgrund ihrer disaggregierten Form einzeln oder als Ganzes auf weitere Gebäudekategorien des Dienstleistungssektors wie Schulen, Spitäler, Verkaufsflächen übertragen werden. In der Ausgangslage beträgt der spezifische Heizenergiebedarf (Brennstoffbedarf) bei Neubauten zwischen 140 und 280 MJ/m^2_{EBF}a und im Gebäudebestand zwischen 430 und 1000 MJ/m^2_{EBF}a, in Einzelfällen über 1500 MJ/m^2_{EBF}a. In Neubauten liegt der Elektrizitätsbedarf betragsmässig bei Gebäuden mit hohen internen Lasten (Arbeitshilfen 120 MJ_{el}/m^2_{EBF}a) in einer ähnlichen Grössenordnung (180 bis 350 MJ_{el}/m^2_{EBF}a), während er im Gebäudebestand zwischen 180 und über 500 MJ_{el}/m^2_{EBF}a variiert (Tabelle Z.1). Durch Gebäude- und Gebäudetechnikmassnahmen lässt sich die Elektrizitäts-Energiekennzahl sowohl bei Neubauten wie auch im Gebäudebestand netto auf 170 bis 220 MJ_{el}/m^2_{EBF}a reduzieren, je nach Massnahmenbündel und der damit verfolgten Strategie (z.B. Schwerpunktsetzung Brennstoff- bzw. Elektrizitätsmassnahmen). Um den gesamten Strombedarf markant zu reduzieren, wäre auch der Bürogeräte-Elektrizitätsbedarf, der oft einen hohen Anteil am Gesamtstrombedarf verursacht, mit in die Massnahmen einzubeziehen. Das entsprechende Energie-Effizienzpotenzial beträgt 40 bis 80 MJ_{el}/m^2_{EBF}a. Der Wärmeenergiebedarf lässt sich bei Neubauten auf knapp 90 bis 140 MJ/m^2_{EBF}a und im Gebäudebestand auf 100 bis rund 300 MJ_{el}/m^2_{EBF}a reduzieren, je nach baulichen Voraussetzungen. Unter Verwendung von Wärmerückgewinnung und Wärmepumpen lässt sich der verbleibende Brennstoffbedarf vollständig substituieren.

		Neubau				Gebäudebestand			
		Standard		Good practice		Ausgangslage		Erneuert	
		von	bis	von	bis	von	bis	von	bis
Elektrizität	Interne Lasten (ohne Beleuchtung): Arbeitshilfen, Geräte)	40	120	30	60	40	120	30	60
	Beleuchtung	60	100	25	40	100	160	40	80
	Lüftung (Luftförderung)	25	45	15	25	160	290	15	30
	Kühlung	30	110	10	30	20	50	10	30
	Gesamt ohne Wärmepumpen (*)	100	350	80	140	180	530	90	150
	Heizen (WP)	30	100	20	35	k.A.	k.A.	25	40
Brennstoffe	Lufterwärmung in Lüftungsanlagen	50	100	15	30	260	400	20	35
	Übriger Heizwärmebedarf	90	280	70	120	380	600	80	140
	Gesamt Brennstoffe (*)	140	280	85	140	430	1000	100	150
(*) Da nicht alle Kategorien bei allen Gebäuden vorkommen und sich jeweils nicht alle je Minimal- und je alle Maximalwerte kombinieren, entspricht der Gesamtwert nicht der Summe der jeweiligen Spalten									

Tabelle Z.1 Bereiche der Energiekennzahlen (Endenergie) bei Neubau und Gebäudebestand (MJ/m²a)

Erreicht werden diese Effizienzgewinne nicht durch einen einzigen Massnahmentyp, sondern durch ein **Zusammenspiel von Massnahmen**:

- Wärmedämmung, Fenster und Verglasungen mit geringeren U-Werten tragen bei Neubauten mit bis zu 100 MJ/m^{2}a und bei Gebäudeerneuerungen mit bis 400 MJ/m^{2}a zur Wärmebedarfsreduktion bei, Lüftungen mit Wärmerückgewinnung mit bis zu 150 MJ/m^{2}a (Neubau und Bestand). Betriebsoptimierungen ermöglichen einen Effizienzgewinn zwischen einigen 10 bis wenigen 100 MJ/m^{2}a, je nach Ausgangslage.
- Elektrizitätsseitig ermöglichen energie-effiziente Beleuchtungen inkl. tageslicht- und präsenzbasierte Regelungen Effizienzgewinne von rund 40 MJ_{el}/m^2_{EBF}a bei Neubauten und von 60 bis 120 MJ_{el}/m^2_{EBF}a bei Erneuerungen im Gebäudebestand. Betragsmässig ähnliche Effizienzgewinne lassen sich mit direkten oder indirekten Massnahmen in den Bereichen Lüftungen und Kühlung erzielen, z.B. durch geringere Druckverluste, bedarfsorientierte Regelungen (z.B. CO_2-basiert), Glasanteilen geringer als 70%, geregeltem Sonnenschutzeinsatz (z.B. bei Aussentemperaturen über 16 bis 20°C), moderater Kühlung (Sollwert nicht unter 26°C), hoch effiziente Kälteerzeugung und -verteilung mittels geringem, d.h. variablen Temperaturhub (Jahres-Arbeitszahl>5), Nutzung der thermischen Gebäudemasse und der freien Kälte durch Fensteröffnung und Erdsonden.

Wechselwirkungen zwischen Heiz- und Strombedarf

Zwischen der Reduktion des Elektrizitäts- und des Brennstoffbedarfs bestehen bei der Erfüllung von Komfortanforderungen zum Teil Zielkonflikte und zum Teil können Synergieeffekte genutzt werden:

- *Synergieeffekte* können typischerweise durch bedarfsgerechte Regelungen bei Lüftungsanlagen (CO_2- oder präsenzbasiert) und Gebäudekühlung (Vermeidung von übermässiger Kühlung) genutzt werden, denn diese Massnahmen reduzieren sowohl den Wärme- wie den Elektrizitätsbedarf. Beleuchtungserneuerungen erhöhen zwar den Wärme- und damit u. U. den fossilen Heizenergiebedarf, dies jedoch verhältnismässig geringfügig, so dass netto auf jeden Fall ein Primärenergiegewinn resultiert. Ein solcher ergibt sich auch bei effizienten Wärmepumpen.
- Der weitergehende Wärmeschutz der Gebäudehülle hat sowohl positive wie negative Effekte auf den thermischen Komfort. Zum einen wird dieser während den kalten Perioden deutlich verbessert, insbesondere im Vergleich zum ungedämmten Gebäudebestand und allgemein bei Gebäuden mit hohem Glasanteil, da kalt strahlende Flächen, Kaltluftströme und Zuglufterscheinungen vermindert werden. Zum anderen verschärft der Wärmeschutz bei bisher ungedämmten Fassaden potenziell die Überhitzung[2], v. a. bei bereits vor der Massnahme kritischen Räumen ohne aktive oder passive Kühlung und bei eingeschränkter oder fehlender Möglichkeit der Fensteröffnung. Als Folge ist zu empfehlen, selektive Gläser zu verwenden (geringer g-Wert von 0.35 bis 0.42, aber hohe Lichttransmission) und Gebäudehüllen-Wärmeschutzmassnahmen mit weiteren Energie- und Komfortmassnahmen zu kombinieren (passive oder aktive Kühlung, Reduktion der internen Lasten, insbesondere durch energie-effiziente und geregelte Beleuchtungen).
- Ein verstärkter Sonnenschutz erhöht zwar den thermischen Komfort und vermindert den thermischen Kühlbedarf, aber er erhöht den Beleuchtungsbedarf. Der Zielkonflikt kann durch eine sehr effiziente Kühlung und saisonvariable Regelungen weitgehend entschärft werden; während Perioden mit geringem Kühlbedarf ist die Tageslichtnutzung dem Sonnenschutzeinsatz vorzuziehen, dies umso mehr, je energie-effizienter der Kühlbedarf gedeckt wird. Solargewinnfenster mit höherem g-Wert (im Vergleich zum Standard bei jeweiligem Glas-U-Wert) erhöhen zwar die solaren Gewinne während der Heizperiode, sind aber in Dienstleistungsgebäuden nicht ratsam, denn sie erhöhen die Überhitzungsgefahr im Sommerhalbjahr. Sonnenschutzfenster (mit geringem g-Wert) verbessern zwar den sommerlichen Komfort, erhöhen jedoch netto den Wärme- und Strombedarf wegen des höheren Beleuchtungsbedarfs.

---

[2] Dies gilt bei Dämmungen im Dachbereich unter Umständen nicht, da im Dachbereich der Wärmeeintrag über die opaken Flächen eine markant höhere Bedeutung hat im Vergleich zu Fassaden, bei denen ein Grossteil des Wärmeeintrags über die transparenten Flächen erfolgt

Zur Rentabilität der Effizienzmassnahmen

Als wichtigstes Fazit sei vorneweg festgehalten, dass die Wirtschaftlichkeit der Massnahmen weniger vom Energieeffizienz-Niveau als viel mehr von **grundsätzlichen architektonischen und konzeptionellen Entscheiden sowie vom angestrebten Komfortniveau** bestimmt wird. Zu nennen sind Gebäudegrösse (Skaleneffekte). Gebäudeform, Materialwahl, Fassadengestaltung, Glasanteil, Sonnenschutztyp- und -platzierung, Lüftung und/oder Kühlung ja oder nein. Eine Veränderung des Glasanteils kann beispielsweise mit Mehr- oder Minderkosten von 10 CHF/m^2_{EBF}a und mehr verbunden sein, und dies bei relativ geringen Auswirkungen auf den Elektrizitäts- und Brennstoffbedarf. Auch die Komfortmassnahmen Gebäudekühlung oder -lüftung sind mit Zusatzkosten von bis zu 15 CHF/m^2_{EBF}a verbunden.

Im Gebäudebestand hängt die Wirtschaftlichkeit von gebäude- und anlagenbezogenen Massnahmen zudem nicht nur von den Kosten der Massnahmen und ihrer energetischen Wirkung ab, sondern erheblich auch von der **Ausgangslage und der Kosten-Vergleichsbasis**. Die nicht selten verwendete Vergleichsbasis der laufenden (Energie-)Kosten ist nicht sachgerecht, weil durch die investiven Massnahmen neue Sachwerte für die Gebäudebewertung (und die Produktivität der dort Arbeitenden) geschaffen werden. Wenngleich die ökonomische Bezugsbasis von zwei Fällen, nämlich die "Instandsetzung" oder die "energetische Standard-Erneuerung", aufwändig zu definieren ist, ist das Vorgehen als Vergleichbasis sachlich angemessen, d.h., beide Fälle führen zu der Identifikation rentabler Investitionsoptionen bzw. Investitionsbündeln, wie die zusammenfassende Übersichts-Tabelle Z.2 und die folgenden Ausführungen zeigen. Vergleichsbasis der Netto-Jahreskosten und der spezifischen Bruttokosten sind typische Standardneubauten bzw. energetische Erneuerung, teilweise auch Instandsetzungen. Die Variation zwischen den verschiedenen Massnahmentypen und auch innerhalb eines einzelnen Massnahmentyps ist beträchtlich, abhängig u. a. auch vom Referenzfall[3].

Der ***weitergehende Wärmeschutz der Gebäudehülle,*** d.h. verstärkte Wärmedämmungen und Fenster mit geringeren U-Werten, ist ein zentrales Element für energie-effiziente Gebäude. Die entsprechenden Massnahmen sind bei Annahme heutiger Wärmeenergiepreise (0.07 bis 0.08 CHF/kWh) bis zu U-Werten von 0.2 W/m^2K bzw. Dämmstärken von 20 cm meist rentabel oder mit nur geringen Mehrkosten verbunden (weniger als 1 bis 2 CHF/m^2_{EBF}a). Dies gilt sowohl für den Neubaufall wie für den Gebäudebestand, bei letzterem insbesondere zum Zeitpunkt von ohnehin durchzuführenden Instandsetzungen, bei einfachen Fassaden sogar im Vergleich zu laufenden Energiekosten. Bei komplexen Fassaden sind energetische Erneuerungen im Vergleich zu aufwändigen Instandsetzungen ebenfalls wirtschaftlich, nicht jedoch im Vergleich zu einfachen Unterhaltsmassnahmen.

Energie-effiziente Beleuchtungen und Beleuchtungsregelungen sind zentrale Elemente für energie-effiziente und komfortable Gebäude. Sie steigern – v.a. bei Erneuerungen im Gebäudebestand – die ergonomische Qualität der Beleuchtung (Flimmerfreiheit, Beleuchtungsstärke, Lichtfarbe, Farbwiedergabe) und tragen zudem weniger zur Wärmeentwicklung bei. Die entsprechenden Effizienz-Massnahmen sind meist rentabel oder mit nur geringen Mehrkosten von typischerweise 0 bis 2 CHF/m^2a verbunden sowohl im Neubau als auch im Vergleich zu Instandsetzungen. Im Vergleich zu den laufenden Energiekosten kann ein kompletter Beleuchtungsersatz jedoch nicht vollständig über geringere Energiekosten amortisiert werden, was die geringen Erneuerungsraten mit erklären mag.

Der Kostendruck der Gebäudenutzung führt meist zu einer ***dichten Personenbelegung und einer hohen Gerätedichte***. Dies führt zu hohen ***internen Wärmelasten*** (Arbeitshilfen und Geräte: bis 120 MJ/m^2_{EBF}a). Je höher die (nicht mehr verminderbaren) internen Wärmelasten und je vollständiger die Gebäudehülle wärmegeschützt ist, desto schwieriger ist es, während sonniger Perioden in akzep-

---

[3] Die Ergebnisse in Tabelle Z.2 sind stark von den Erneuerungsmassnahmen im Gebäudebestand dominiert, weil diese betragsmässig eine höhere Wirkung aufweisen. Relativ gesehen können die Wirkungen im Neubau ebenso bedeutend sein. Für ein tieferes Verständnis der festgestellten Bandbreiten sei auf die detailliertere Tabelle Z.4 der ausführlicheren Zusammenfassung verwiesen, S. 38).

tables Komfort-Niveau halten zu können, selbst in der Übergangszeit. Massnahmen der ***passiven Kühlung*** *(automatisierte Fensteröffnung, Brüstungsgeräte, Nachströmöffnungen)* ermöglichen deutliche Komfortverbesserungen ohne den Einsatz von Lüftungs- oder Kühlanlagen. Die Jahreskosten solcher Massnahmen liegen bei ca. 5 bis 10 CHF/m^2_{EBF}a. Passive Kühlung ist jedoch nicht in allen Fällen anwendbar (je nach Ausgangslage und Gebäudestandort) und in vielen Fällen nicht ausreichend, um die anspruchsvollen Anforderungen an den thermischen Komfort (gem. Entwurf SIA 382/1) zu erfüllen. Andererseits zeigen Untersuchungen, dass in nicht belüfteten und gekühlten Gebäuden mit Fensteröffnungsmöglichkeit höhere Temperaturen akzeptiert werden, so dass die genannten Anforderungen für solche Gebäude unter Umständen zu überdenken sind.

Massnahmenbereich	Elektrizität ΔEKZ_{el} MJ/m^2_{EBF}a	Wärme-Endenergie ΔEKZ_{Brst} MJ/m^2_{EBF}a	Netto-Jahreskosten (1, 2) CHF/m^2_{EBF}a	Spezifische Bruttokosten (1) CHF/kWh_{brst} | CHF/kWh_{el}	Komfortauswirkung; Anzahl Stunden mit Überhitzung; Grenzwerte Entwurf SIA 381/1 (Südraum)
Architektur (3)	+15 bis +25	-50 bis -60	-15 bis +20	Nicht untersucht	Nicht untersucht
Interne Lasten: Belegungsdichte, effizientere Geräte	-40 bis -80	+10 bis +40	+ 30 bis +40 (Belegung), (4)	Nicht untersucht	Überhitzung: bis –200 h
Wärmedämmungen	Vernachlässigbar	-100 bis –150	-0.5 bis +1	0.05 bis 0.13 | *	Verbesserung therm. Komfort Winter; Überhitzung: +50 bis +200 h
Fenster/Verglasungen, Sonnenschutz	-20 bis +15	+20 bis -400	-1 bis+5	0.03 bis 0.2 | *	Verbesserung therm. Komfort Winter; Überhitzung: -120 bis + 800 h
Beleuchtung	-20 bis –110	+10 bis +60	-1 bis +2.5	* | -0.05 bis +0.4	Verbesserung Beleuchtungsergonomie; Überhitzung: bis –200 h
Lüftung/Kühlung (Energie-Effizienz)	-10 bis –160	-50 bis –250	-10 bis + 1.5	* | -0.25 bis + 0.4 (5)	Verbesserte Luftqualität, geringere CO_2-Konzentration Überhitzung: + einige 10 h
Lüftung/Kühlung (Komfort)	+10 bis +100	-50 bis +5	+3 bis +15	*0.17 bis 0.3* (5) | *	Überhitzung: bis –900 h (-1200 h)
Wärmeerzeugung WP statt fossile WE Holz statt fossile WE	 +30 bis + 80 Vernachlässigbar	 -30% -100% Erneuerbar statt fossil	 -0.5 bis +1 +1 bis +2	 k.A. k.A.	 - einige 100 h bei Erdsonden-Nutzung

* Nicht zutreffend (1) Vergleichsbasis Standardneubau oder energetische Erneuerung (teilweise Instandsetzung), 3% Realzins
(2) Brennstoffpreis 7 Rp/kWh, Elektrizitätspreis 17 Rp/kWh (3) Glasanteil, Materialisierung, Konzeption
(4) Geräte mutmasslich kostenneutral (5) Markant tiefer, wenn Komfortnutzen (bedeutend) miteinbezogen würde
Wichtig: die Energie-Effizienzpotenziale der einzelnen Bereiche sind nicht direkt addierbar (Interaktionseffekte)

Tabelle Z.2 Übersicht über die energetische Wirkung, die Komfortveränderungen, die spezifischen Bruttokosten (CHF/kWh) und die Netto-Kosten bzw. Nutzen (CHF/m²a) der verschiedenen Massnahmenbereich (ohne ökonomische Bewertung des Komfortnutzens). Quelle CEPE at al 2006 (dieser Bericht), Tabelle Z.4.

Auch wegen der *absehbaren Klimaerwärmung in der Schweiz binnen der kommenden drei bis fünf Jahrzehnte* wird die ***passive und aktive Gebäudekühlung*** zunehmende Bedeutung erlangen. Diese Entwicklung sollte bei Neubauten und Re-Investitionen im Gebäudebestand mehr beachtet werden, um unnötige Nachinvestitionen oder unnötig hohe Elektrizitätskosten oder Akzeptanzprobleme zu vermeiden. Aktive Kühlung (Umluftkühler, TABS, Kühldecken, Zuluftkühlung, Nachtauskühlung über Lüftung) ist mit Mehrkosten von typischerweise 3 bis 15 CHF/m^2_{EBF}a verbunden. Die aktive Kühlung sollte in der Folge möglichst effizient ausgelegt werden (z.B. geringer Temperaturhub zwischen Kühlwasser und Rückkühlung), was rentabel oder zu geringen Mehrkosten realisiert werden kann (0 bis 2 CHF/m^2_{EBF}a) und energetisch sehr effiziente Gebäudekühlungen ermöglicht (<30 MJ_{el}/m^2_{EBF}a, in Kombination mit den oben erwähnten indirekten Massnahmen). Damit nimmt die effiziente Kühlung im Vergleich zu den anderen Elektrizitätsanwendungen wie Beleuchtung, Luftförderung oder Geräte keine überragende Rolle ein, wie immer wieder vermutet wird. Anzumerken ist an dieser Stelle allerdings, dass der Kühlenergiebedarf stark sensitiv auf das Nichteinhalten der erwähnten direkten und

indirekten Massnahmen (Anstieg auf über 100 $MJ_{el}/m^2_{EBF}a$) und auf die Klimaerwärmung reagiert (siehe auch Frank, 2005 und Brunner, Steinmann et al., 2006).

Lüftungsanlagen sind primär als lufthygienische Komfortmassnahme zu verstehen. Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung (WRG) vermögen zwar den spezifischen Heizwärmebedarf netto zu vermindern, machen jedoch aus Gründen der Energieeffizienz allein keinen ökonomischen Sinn (deutlich über den Wärmegestehungskosten liegende Grenzkosten). Mit ein Grund ist, dass selbst bei Auslegung auf den lufthygienischen Bedarf der Luftwechsel meistens höher ist als bei typischer (wenn auch meist aus lufthygienischer Sicht ungenügender) Fensterlüftung, was die Netto-Wirkung von WRG-Anlagen oder Abluft-WP vermindert. Aus Komfortgründen ist die Zuluft bedarfsgerecht zu kühlen, denn ohne Zuluftkühlung droht eine Komfortverschlechterung (Überhitzung). Die Möglichkeit des forced free cooling (höhere Luftwechselraten und/oder längere Betriebszeiten, insbesondere nachts) für die Gebäudekühlung kann im Einzelfall aus Kostengründen angezeigt sein (möglicher Verzicht auf hydraulische Kälteverteilung). Diese Form der Kühlung ist aber aus energetischen Gründen mit Bedacht einzusetzen, da der Elektrizitätsbedarf rasch denjenigen einer effizienten hydraulischen Kühlung übersteigen kann. Die Jahreskosten von Lüftungsanlagen betragen typischerweise 10 CHF/m^2a, mehr oder weniger unabhängig vom erreichten Energieeffizienzlevel. Entsprechend ist auf tiefe Druckverluste (<700 Pa), hocheffiziente Ventilatoren und Elektromotoren bzw. eine hohe Gesamteffizienz (<0.3Wh/(m^3/h)) und bedarfsgerechte Regelungen zu achten (CO_2-basierte Regelung). Die genannten Massnahmen vermögen den Elektrizitätsbedarf bei Neubauten um 20 bis über 30 MJ/m^2a (bis zu minus zwei Drittel) und bei Erneuerungen um 70 bis 130 MJ/m^2a, in Einzelfällen um über 250 MJ/m^2a zu reduzieren. Ebenfalls rentabel ist der Einsatz von Wärmerückgewinnungs-Anlagen mit höherem Wirkungsgrad (über 85%).

In vielen Fällen, z.B. bei Gebäuden mit komplexen oder denkmalgeschützten Fassaden, engen Raumverhältnissen, sind ***Wärmepumpen*** oder Abluft-WP energetisch und technisch sinnvolle Lösungen, um Brennstoffe zu Heizzwecken zu substituieren. Höhere Investitionskosten können bei sehr effizienten Anlagen oder bei der Nutzung von Synergien mit der Gebäudekühlung durch günstigere Energie- und Betriebskosten amortisiert werden.

Im ***Gebäudekontext*** werden die Jahreskosten werden weniger vom Energie-Effizienzlevel als vielmehr vom angestrebten Komfortlevel bestimmt. Die Fälle mit geringer EKZ Elektrizität weisen sogar eher geringere Jahreskosten auf als diejenigen mit mittlerer und hoher Elektrizitäts-EKZ (Abbildung Z. 1) und zwar bei beiden unterschiedenen Komfortlevels (weniger bzw. mehr als 200 h mit im Vergleich zur Anforderung erhöhter Raumtemperatur). Bei gegebener Elektrizitäts-EKZ und bei gegebenem Komfort-Niveau ist der Verlauf der Jahreskosten als Funktion geringerer Brennstoff-EKZ als mehr oder weniger konstant zu bezeichnen, d.h. entsprechende Massnahmen sind - im Gebäudekontext – rentabel (bei 3% Realzinssatz, 7 Rp/kWh Brennstoffpreis, 17 Rp/kWh Elektrizitätspreis.).

Die Netto-Kosten könnten markant tiefer liegen oder sich in Netto-Nutzen verwandeln, wenn auf der Nutzenseite nebst den geringeren Energiekosten auch die **Komfortnutzen wirtschaftlich bewertet** würden (siehe nächstes Unterkapitel). Umgekehrt ist in den meisten Fällen mit höheren Nettokosten und höheren Bruttokosten zu rechnen, falls als Vergleichsbasis lediglich die laufenden (Energie-)kosten herangezogen werden. Wirtschaftlich sind diejenigen Massnahmen, deren spezifische Bruttokosten unter dem gemittelten künftigen Brennstoff- bzw. Elektrizitätspreis liegen (gemittelt über die Lebensdauer der Massnahme).

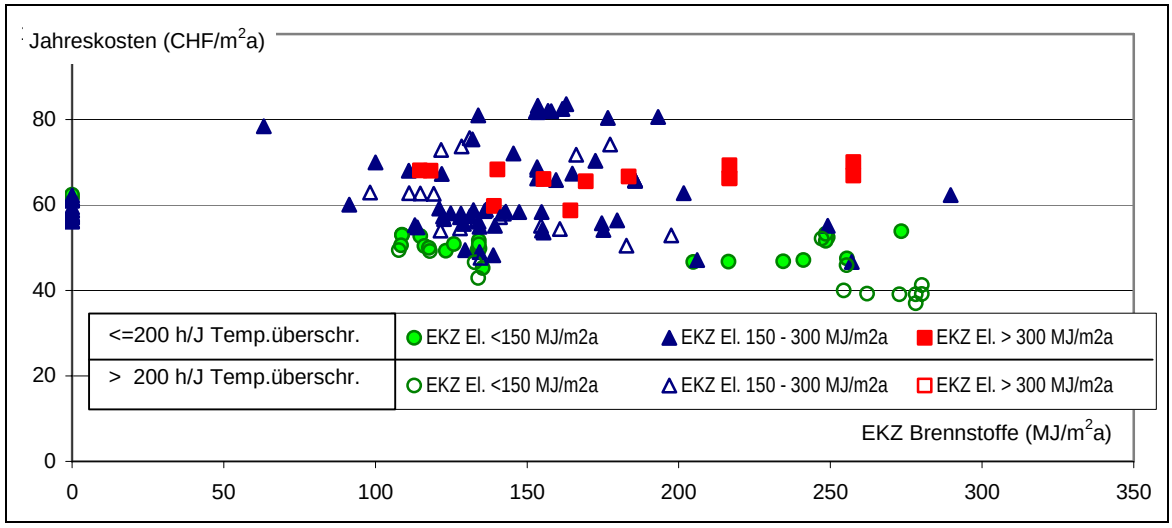


Abbildung Z. 1 Jahreskosten als Funktion der EKZ Brennstoffe für verschiedene EKZ Elektrizität und Komfortlevels (gemessen als Anzahl Stunden mit erhöhten Temperaturen in Südräumen) bei Neubauten

Fazit aus der ökonomischen Analyse

(1) Bei Nutzbauten können sowohl im Gebäudebestand wie im Neubaufall Komfortniveau, Brennstoffbedarf und gebäudebezogener Elektrizitätsbedarf durch geeignete Massnahmen erheblich verbessert bzw. vermindert werden. Um den gesamten Strombedarf markant zu reduzieren, ist auch der Elektrizitätsbedarf der Arbeitshilfen (Bürogeräte) mit seinem meist hohen Anteil der internen Lasten und des Elektrizitätsbedarfs in die Massnahmen einzubeziehen. Energie-effiziente Lösungen im Neubau oder energetische Erneuerungen von Anlagen und Gebäudehülle im Gebäudebestand sind bei richtiger Planung entweder rentabel oder mit geringen Mehrkosten verbunden (0 bis wenige CHF/m²a).

(2) Gleichzeitig mit einer hohen Brennstoff- und einer hohen Elektrizitätseffizienz kann auch ein hohes Komfortniveau erreicht werden. Komfort-Anforderungen oder Zusatznutzen erzeugende Installationen (aktive Kühlung, Lüftung) oder grundsätzliche architektonische Entscheide (Fassadentyp, Platzierung des Sonnenschutzes, architektonisches Design) haben weit grössere Auswirkungen auf die (brutto) Jahreskosten als Energie-Effizienzmassnahmen. Diese Auswirkungen betragen 10 bis einige wenige 10 CHF/m²a. Zum Vergleich: die jährlichen Vollkosten der energierelevanten Bauteile und Anlagen betragen bei Wirtschaftsgebäuden 50 bis 100 CHF/m²a, die gesamten Kapital- und Betriebskosten 300 bis 400 CHF/m²a und die Personalkosten etwa 5000 bis 10000 CHF/m²a. Wenn die Produktivität der in den Wirtschaftsgebäuden arbeitenden Menschen nur um wenige Promille durch überhitzte oder unterkühlte Räume oder unzureichende Luftqualität leidet, wird sich jede Wärmeschutz- oder energietechnische Massnahme am Erhalt der Arbeits-Produktivität orientieren müssen. Dies erhöht zum einen den Druck nach zusätzlichen Energiedienstleistungen (Kühlung, Lüftung) und verbessert zum anderen aufgrund der Zusatznutzen die Wirtschaftlichkeit von Energie-Effizienzmassnahmen markant. Die sehr grossen Zusatz-Nutzens energietechnischer Massnahmen in Wirtschaftsgebäuden werden derzeit weitgehend übersehen, vielleicht nicht zuletzt deshalb, weil diese Effekte weitgehend unbekannt sind und deshalb in der ökonomischen Bewertung energietechnischer Investitionen und organisatorischer Massnahmen bisher kaum Eingang gefunden haben.

Energie- und baupolitische Schlussfolgerungen

Die Kostenerhebungen und die Erarbeitung der Kostenkennwerte sind nicht nur zur ökonomischen Bewertung der Energieeffizienzmassnahmen an Wirtschaftsgebäuden von Interesse, sondern sie sind auch für die Energiepolitik aufschlussreich: Die beim Neubau und bei der Instandsetzung und Erneuer-

ung des Gebäudebestandes involvierten Planer und Gewerke arbeiten meist sehr arbeitsteilig. Dies führt für die Bauträger beim Anstreben von energie-effizienten Lösungen zu hohen Informations-, Such- und Entscheidungskosten. Die Vielzahl von Schnittstellen vermindert die Kostentransparenz und erschwert einen Systemblick sowie die Vergleichbarkeit von verschiedenen Investitionsoptionen infolge der unterschiedlichen Abgrenzungen und der oft nicht vernachlässigbaren „bauseitigen" Kosten. Die Arbeitsteilung und der Wettbewerb in den Einzelleistungen führen dazu, die Leistungen mit möglichst geringen Investitionskosten zu erbringen. Die Investitionskostenminimierung steht aber mit der Minimierung der Lebenszykluskosten (und damit energie-effizienten Optionen) meist im Konflikt.

Einer weitergehenden Energieeffizienz stehen in erheblichem Umfang strukturelle und marktorganisatorische Hemmnisse im Weg. Diese sind **zielgruppenspezifisch** unterschiedlich.

- *Eine Erhöhung der Kenntnisse* auf Seiten der **Investoren, Planer und Baugewerke** über die rentablen Investitionsmöglichkeiten erfordert einen Abbau der Informationsasymmetrie, die Erhöhung der Markttransparenz und die Verminderung der Transaktionskosten. Zu fördern sind insbesondere *Initialberatungen und Umsetzungsberatungen* für Immobilienbesitzer (finanziell und ideell gestützt), *gezielte Mess- und Informationskampagnen seitens der Technologiehersteller für Planer und Technologienutzer* (vgl. Druckluftkampagne 2006, *klassische Aus- und berufliche Weiterbildungsangebote,* der *Ausbau der örtlichen*, *lernenden Netzwerke* (ähnlich den Modellen der EnAW und der energho) für Immobiliengesellschaften und Besitzer von Wirtschaftsgebäuden sowie *stärkere Verbreitung des Minergie-Labels* und die Umsetzung des Ge*bäudepasses* in der Schweiz. Anschubfinanzierungen von örtlichen Netzwerken sind wegen der hohen Kosteneffizienz sehr empfehlenswert. Die genannten Massnahmen müssten von der Bundesverwaltung und den Kantonen in Zusammenarbeit mit den Berufsverbänden vorbereitet und umgesetzt werden, u.a. über die SIA-Normengebung und -anwendung. Abzudecken sind insbesondere die Themen hocheffiziente Beleuchtung, Elektromotoren, Lüfter, Kälteanlagen, Pumpen und sowie gesamtheitliche Anlagenkonzeption, integrierte Planung, Betriebsoptimierung und Gebäudemanagement.
- **Energieeffizienz-Anbieter, d.h. die Planer und Technologie-Lieferanten** sind auf der (markt-) organisatorischen Ebene, auf der Ebene der *technischen Entwicklung, der Technologie- und Know-how-Diffusion* und des *Marketings* angesprochen: Weiter zu verbreiten sind Methoden und Standards für intelligente (lernende) dynamisierte Steuerungen und Regelung von Wirtschaftsgebäuden (z.B. CO_2-konzentrationsgeführte Lüftung, dynamische antizipierende und übergreifende Optimierung von Wärme-, Kühl- und Beleuchtungsbedarf inkl. Nutzung von Wettervorhersagen) sowie die hoch-effiziente Gebäudekühlung. Marketingseitig müssten Planer und Technologie-Lieferanten ihre technischen Lösungen mit Erlebniswerten, gesunderen Lebensformen, erhöhtem Komfort (Lufthygiene, thermische Behaglichkeit, verbesserte Ergonomie bei Beleuchtungen), verbesserte Arbeitsproduktivität und sozialem Prestige verknüpfen. Auch Aspekte wie verbesserter Schall- und Einbruchschutz, geringere Leerstände bei Vermietung und Leasing, sowie verbesserte Bonität und geringere Kreditzinsen wegen des Basler Abkommens sind den Investoren bewusst zu machen.
- Die Rolle der **Intermediäre** wird zuweilen unterschätzt, denn diese reduzieren durch *Normengebung oder Standardisierung* die Transaktionskosten oder beseitigen durch die Aus- bzw. die berufliche Fortbildung erhebliche Kenntnismängel. Normen, Standards und Benchmarks (z.B. Normen wie SIA 380/4 oder SIA 382/1 und Minergie-Anforderungen) bieten Entscheidungshilfen im technischen Bereich, besonders weil sie zwischen Standard- und zielorientierten Effizienzlösungen unterscheiden. Normen und Benchmarks können sowohl auf der Systemebene ansetzen (jährlicher Energiebedarf oder spezifische Energiekosten je m^2 und Jahr) wie auch auf der Ebene der Einzelkomponenten (letzteres, aus Gründen des Vollzugs und um den gegebenen Marktstrukturen mit hoher Arbeitsteilung und Spezialisierung und klein strukturierten Unternehmen Rechnung zu tragen). Normen und Empfehlungen (z.B. zu Grenz- und Zielwerten) dienen den Fachleuten in der Praxis als Orientierungshilfe, Planungsgrundlage und Basis für zivilrechtliche Verträge zwischen Bauträgern und Bauleistungserbringern. Das weitgehend privatrechtlich organisierte Normenwesen (z.B. SIA-Energycodes) sollte deshalb von staatlicher Seite eher stärker als bisher gestützt werden. Die Normen müssen nicht vollumfänglich gesetzgeberisch verankert, sondern können in *relativ einfach handhabbare Planungshilfen und Tools* umgesetzt werden. Zu empfehlen sind auch

die vermehrte Veröffentlichung von *spezifischen Fachpublikationen* (wie z.B. durch das frühere Programm RAVEL) mit technischen Inhalten und wirtschaftlichen Bewertungen (z.B. Lebenszykluskosten- und Kosten-Nutzenbetrachtungen) sowie die Entwicklung *integrierter Benchmarks* und *integrierender Planungswerkzeuge, Arbeitsunterlagen und Tools,* welche wesentliche Kosten-Nutzen-Relationen ermitteln und Optimierungsansätze häufig erst ermöglichen.

Wenngleich in allen dieser empfohlenen Aktivitäten die Selbstorganisationen der Wirtschaft und einzelne Unternehmungen die Hauptverantwortung übernehmen sollten, so mag eine öffentliche Initiative und finanzielle und ideelle Unterstützung seitens des Bundes, der Kantone oder grösserer Gemeinden sehr förderlich sein, weil diese Aktivitäten ein öffentliches Gut darstellen oder gesamtgesellschaftliche Vorteile mit sich bringen (Beschäftigung, Exportpotenziale, ökonomische Effizienz).

- **Gesetzgebung**: Technische und bauliche Vorschriften haben sich im Gebäudebereich, insbesondere beim Neubau, als effizientes und effektives Instrument erwiesen (z.B. Wärmeschutz mittels SIA 380/1 und MuKEn). Der **Elektrizitätsbereich weist diesbezüglich einen Nachholbedarf auf.** Die Normen 380/4 und 382/1 bieten hierzu eine Grundlage. Indirekt entfalten solche Vorschriften auch eine nicht zu vernachlässigende Wirkung im Gebäudebestand, indem der induzierte technische Fortschritt auch bei Gebäude- und Anlagenerneuerungen zum Tragen kommt. Bei den Produkten der technischen Gebäudeausstattung könnten Benchmarks und Standards Exportvorteile erbringen. Der **Vollzug** ist effektiv, effizient und einfach zu gestalten (Umsetzungsarbeiten für die SIA 380/4 sind im Gang und zu intensivieren) und **mit anreizorientierten Komponenten**, z.B. flexiblen Bewilligungsverfahren, zu kombinieren. Zu nennen sind Grossverbrauchermodelle (MuKEn Modul 8) sowie ein duales Vorgehen (vgl. Norm SIA 382/1, ZH, GE): bei Unterschreiten von Schwellenwerten von einfach zu messenden Grössen (z.B. installierte Leistung, Strömungsgeschwindigkeit, EKZ im Bestand) entfallen Bedarfsnachweis, Bewilligungspflicht VHKA oder Massnahmenplanung. Zu prüfen ist auch die Einführung einer Erneuerungspflicht für jeweils technikspezifisch festzulegende Re-Investitionsperioden. Mit einer möglichst schweizweiten Koordination der Vollzugsaspekte können Skaleneffekte bei der Fortbildung und gleiche Rahmenbedingungen in den Kantonen erreicht werden, was letztlich Markthemmnisse beseitigt.
- Die **öffentliche Hand** (Bund, Kantone, Gemeinden) hat einen erheblichen Teil des Bestandes der Nutzgebäude in ihrem eigenen Besitz. Gezielte Demonstrationsvorhaben bei der Gebäudeerneuerung für bestimmte Gebäudetypen (z.B. Schulen, Bürogebäude) sollten in jedem Kanton als ***beispielhaftes Vorangehen der öffentlichen Hand*** durchgeführt werden, um die grossen Anforderungen der Energie- und Klimapolitik glaubwürdig politisch vertreten zu können. Zudem könnten Elektrizitätsversorgungsunternehmen anreizorientierte Preismodelle anbieten (siehe z.B. EWZ), zumindest bis zum Mass eines least cost plannings.

Da die Komponenten der Büroautomation in erheblichem Umfang zu den internen Lasten beitragen, aber international gehandelt werden, sollte ihre erforderliche Energieeffizienz in geeigneten Gruppen der IEA, des internationalen Normenschaffens und der EU intensiver thematisiert werden.

Aufgabe von *Forschung und Entwicklung* sollte es sein, die Zusammenhänge zwischen Wärmeschutz, internen Lasten, Gebäudetechnik und kostengünstigen Lösungen – in dieser Arbeit mit aufwändigen Simulationsrechnungen erstellt –, in einfache, schnell rechnende Planungswerkzeuge umzugiessen (z.B. Ergänzen des SIA Lüftung und Klima-Tools oder des Lichtkonfigurators mit Good practice Kostenkennwerten und Wirtschaftlichkeitsmodulen). Ebenfalls schnell aufzugreifen sind die hier erarbeiteten Ergebnisse in vorhandenen energiewirtschaftlichen Modellen (insbesondere den Komfortaspekt bei steigenden internen Wärmelasten durch Büroautomation, die tendenziell steigenden Aussentemperaturen (Klimawandel) und die zunehmenden Komfortansprüche von Gebäudenutzern und gewünschte Produktivitätsfortschritte privater und öffentlicher Arbeitgeber).

Zusammenfassung

Ausgangslage, Zielsetzung und methodisches Vorgehen

In der Schweiz liegen u.a. grosse Energieeffizienzpotenziale in der Verminderung des Energiebedarfs im Gebäudebereich. Für die Wohngebäude ist der Stand der Kenntnisse zu den Potenzialen, Kosten und begleitenden Nutzen in der Schweiz durch jüngere Untersuchungen vergleichsweise differenziert und informativ (Jakob u.a. 2002, Jakob 2003). Die Informationen für Gebäude des *Dienstleistungs-, Gewerbe- und Industriesektors* (im Nachfolgenden Wirtschaftsgebäude genannt) sind noch sehr gering bzw. veraltet (Basler und Hofmann, 1992); die für die Wohngebäude erarbeiteten Ergebnisse sind jedoch nur bedingt auf die Wirtschaftsgebäude übertragbar. Insbesondere kommt bei den meisten Gebäudetypen der Wirtschaftsgebäude dem *sommerlichen Wärmeschutz und den Komfortaspekten* eine wesentlich grössere Bedeutung zu, weil hohe interne Wärmelasten, die Produktivität der in den Wirtschaftsgebäuden arbeitenden Menschen und der Nutzerkomfort (z.B. Kunden, Patienten, Tagungsteilnehmer) erhöhte Anforderungen an den Komfort stellen. Dies führt zu anderen energetischen Referenzwerten, zu vielfältigeren Massnahmemöglichkeiten und entsprechenden Interaktionen, insbesondere im Bereich des sommerlichen Wärmeschutzes und der Kühlung, Klimatisierung und Beleuchtung.

Ausgehend von dieser Ausgangslage verfolgte das Projekt folgende *Hauptziele*:

- Grenzkosten mit heutigem Kostenstand: Die Grenz- und Durchschnittskosten für die Anwendung energieeffizienter Massnahmen (winterlicher und sommerlicher Wärmeschutz sowie Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik und Beleuchtung) sollten für die wichtigsten Kategorien von Wirtschaftsbauten auf eine aktuelle empirische Basis gestellt werden. Hierbei sollte zwischen Neubau und Erneuerung unterschieden werden.
- Zusatznutzen: Für einige typische Fälle sollten die möglichen Zusatznutzen qualitativ und – so weit möglich – auch quantitativ (in Einzelfällen auch monetär) dargestellt werden. Als Mass dienten Aussagen zur Komfortveränderung beim Ergreifen von Energie-Effizienzmassnahmen.
- Als Projektergebnis sollten schliesslich Handlungsempfehlungen zuhanden der relevanten Akteure formuliert werden. Dazu gehören Investoren und Planer von Neubauten, Betreiber und Besitzer von bestehenden Gebäuden, die Baubranche im Bereich der Gebäudehülle und der Haustechnik, Akteure im Bereich energietechnischer und -wirtschaftlicher Forschung.

Methodisch behandelte die Analyse den gebäudebezogenen Energiebedarf sowie Massnahmen zu dessen Reduktion auf der Ebene von Einzelkomponenten (Wärme- und Sonnenschutz bei der Gebäudehülle, Beleuchtung, Lüftung, Kühlung, diverse Technik, z.B. Heizungspumpen) und für den jeweiligen Gebäudetyp als Ganzes. Die *Gebäudetypen* unterscheiden sich bzgl. ihrer Architektur, Nutzung, Bauweise und Gebäudetechnik-Ausstattungsgrad. Unterschieden werden insbesondere Gebäude mit hohen und geringen internen Lasten, hohen und geringen Glasanteilen sowie solche ohne und mit Lüftung und/oder aktiver Kühlung. Ausgangspunkt für die Kostenbetrachtungen bilden Referenzfälle, welche vom gesetzlich vorgeschriebenen Baustandard und der aktuellen typischen Bauweise (beim Neubau), vom heute üblicherweise anzutreffenden Zustand des Gebäudebestandes (vor einer Erneuerung) und von heute üblichen Instandsetzungs- und Erneuerungsmassnahmen ausgehen.

Um die *Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Gebäude- und Technikkomponenten* adäquat abzubilden, wurden für die definierten Gebäude- und Massnahmenkombinationen Ganzjahressimulationen mittels des *Simulationsprogramms IDA-ICE* durchgeführt, welches zu jedem Zeitschritt die gebäudephysikalischen Phänomene abbildet (Wärmeverluste, -gewinne, und -speicherung, Beleuchtungsbedarf, Elektrizitätsbedarf für Kühlung, Luftförderung). Hieraus resultiert der jährliche Energiebedarf, aufgeteilt auf die verschiedenen Formen (Elektrizität, Wärme) und die verschiedenen Nutzenergieformen (Gebäudeheizung, Lüftung, Kühlung, Beleuchtung) und interne Lasten. Anhand der

Simulationsergebnisse lässt sich auch das Niveau des thermischen Diskomforts, der Dauer des Überschreitens angenehmer Temperaturen ermitteln (jährliche Stundenzahl mit Innentemperaturen oberhalb eines definierten Grenzwertes gemäss Entwurf SIA 382/1).

Die erforderlichen Kostenerhebungen für Energieeffizienzmassnahmen im Bereich Fenster, Verglasungen, Wärmedämmungen, Beleuchtung, Lüftung, Klimatisierung, Sonnenschutz, Steuerung/Regelung, wurden bei Ingenieur-, Planungs- und Bauleistungsunternehmen in Form von Kostenkennwerten erhoben. Bei den gebäudetechnischen Anlagen wurden auch technische Alternativen berücksichtigt (z.B. Lampen und Leuchten unterschiedlicher Effizienz, Lichtregelung, „klassische" Rückkühlung, hybride Rückkühler, Kleinklimageräte, Zuluftkühlung, Umluftkühler, Kühldecken, TABS).

Abschliessend erfolgten die Grenzkostenrechnungen und Kosten-Nutzendarstellungen für die definierten Gebäude- und Massnahmenkombinationen. Die Jahreskosten und deren Struktur (Kapital-, Unterhalts- und Energiekosten) wurden basierend auf den erhobenen Investitionskosten (Annuitätenmethode) und der spezifischen Energie- und Leistungsbedarfswerte (Gebäudesimulationen) berechnet. Zur Beurteilung der verschiedenen Massnahmen wurden die Jahreskosten den Komfortwerten gegenüber gestellt, dies unter Berücksichtigung der sich ergebenden Interdependenzen, insbesondere zwischen Wärme- und Überhitzungsschutz bzw. zwischen Wärme- und Strombedarf.

Energiebedarf der Gebäudetypen und energetische Wirkung der Massnahmen

Die Gebäudetypen wurden derart definiert, um der Vielfalt der Gebäude in den Bereichen Neubau und Bestand gerecht zu werden und weisen demzufolge markante Unterschiede bzgl. Energiebedarfsstruktur auf, je nach ihrer architektonischen und gebäude- und energietechnischen Konfiguration. Ausgehend vom Referenzfall wurden Massnahmenbündel definiert und zwar dergestalt, um die Auswirkungen verschiedener Strategien sichtbar machen zu können (z.B. Gebäudehüllen- gefolgt von Gebäudetechnikmassnahmen oder umgekehrt, Brennstoff- gefolgt von Elektrizitätsmassnahmen oder umgekehrt). Gemäss der Simulationsergebnisse variieren die resultierenden Energiekennzahlen (EKZ) Heizen bzw. Brennstoffe und Elektrizität beträchtlich (Brennstoffe; 100 bis 1000 MJ/m^{2}a; Elektrizität; 80 bis gut 500 MJ/m^{2}a; vgl. Tabelle Z.3).

		Neubau				Gebäudebestand			
		Standard		Good practice		Ausgangslage		Erneuert	
		von	bis	von	bis	von	bis	von	bis
Elektrizität	Interne Lasten (Geräte, ohne Bel.)	40	120	30	60	40	120	30	60
	Beleuchtung	60	100	25	40	100	160	40	80
	Lüftung (Luftförderung)	25	45	15	25	160	290	15	30
	Kühlung	30	110	10	30	20	50	10	30
	Gesamt ohne Wärmepumpen (*)	100	350	80	140	180	530	80	160
	Heizen (WP)	30	100	20	35	k.A.	k.A.	25	40
Brennstoffe	Lufterwärmung in Lüftungsanlagen	50	100	15	30	260	400 (**)	20	35
	Übriger Heizwärmebedarf	90	280	70	120	380	600	80	140
	Gesamt Brennstoffe (*)	140	280	85	140	430	1000 (**)	100	150

(*) Da nicht alle Kategorien bei allen Gebäuden vorkommen und sich jeweils nicht alle je Minimal- und je alle Maximalwerte kombinieren, entspricht der Gesamtwert nicht der Summe der jeweiligen Spalten
(**) Bei 24h-Betrieb während 7 Tagen pro Woche bis 1200 MJ/m^{2}a (LA) bzw. bis 1750 MJ/m^{2}a (Gesamt Brennstoffe)

Tabelle Z.3 Bereiche der Energiekennzahlen (Endenergie) bei Neubau und Gebäudebestand (MJ/m^{2}a)

Auch die Struktur der Energiekennzahl weist grosse Unterschiede zwischen den verschiedenen Gebäudetypen auf. Je nach Konstellation kann es dabei zu Verschiebungen in der Rangfolge der einzelnen Energiedienstleistungen kommen. Insbesondere ist darauf hinzuweisen, dass die Gebäudekühlung mit einem Bedarf von 10 bis 30 MJ/m^{2}a bei guter Konzeption, Ausführung und Betrieb im Vergleich zu den anderen Stromanwendungen keine überragende Rolle beim Elektrizitätsbedarf einnimmt. Der Bedarf für Beleuchtung oder Luftförderung kann grösser sein, v.a. im Gebäudebestand.

Entsprechend der Gebäudevielfalt sind auch die möglichen Energieeffizienzmassnahmen sehr vielfältig. Je nach Typ und Eingriffstiefe unterscheiden sich die einzelnen Massnahmen stark in ihrer energetischen Wirkung (Abbildung Z.2). Zwischen der Reduktion des Elektrizitäts- und des Brennstoffbedarfs (und der Erfüllung der Komfortanforderungen oder von Komfortverbesserungen) bestehen zum Teil Zielkonflikte, zum Teil können aber auch Synergieeffekte genutzt werden. Aufgrund der unterschiedlichen exergetischen und energiewirtschaftlichen Wertigkeit der Energieträger Brennstoffe und Elektrizität wurde die energetische Wirkung der Massnahmen hinsichtlich des entsprechenden Substitutionsverhältnisses analysiert, um es dem entsprechenden Verhältnis der Elektrizitätserzeugung gegenüber stellen zu können. Für letztere beträgt dieses in Europa typischerweise rund 3, könnte sich jedoch künftig – je nach Erneuerung des europäischen Kraftwerkparks – dem Wert 2 annähern. Vorzuziehen sind Massnahmen, die sich unterhalb der entsprechenden Trennlinie befinden (siehe Abbildung Z.2). Folgende sechs Bereiche werden unterschieden:

- Quadrant Q3: Sowohl der Brennstoff- wie der Elektrizitätsbedarf werden reduziert. Massnahmen in diesem Bereich können aus energetischer und exergetischer Sicht vorbehaltlos empfohlen werden. Typische Beispiele für diesen sehr energieeffizienten Bereich sind bedarfsgerechte Betriebsweisen bei Gebäudelüftung und -kühlung (Betriebszeiten, bedarfsgerechte Luftmengen, nicht zu geringe Solltemperaturen bei der Kühlung) sowie selektivere Wärmeschutzfenster (tieferer U-Wert bei konstantem oder höherer g-Wert und entsprechender Lichttransmission) oder entsprechender Sonnenschutz.
- Quadrant Q2.2: Einige Effizienzmassnahmen bei Elektrizitätsanwendungen erhöhen den Heizwärmebedarf wegen geringerer Sonnenenergienutzung oder wegen geringerer freigesetzter Wärme in der Heizperiode (z.B. Beleuchtung). Hierbei ist allerdings der Anstieg des Heizwärmebedarfs betragsmässig höchstens etwa halb so hoch wie der Stromrückgang. Die Reduktion einer kWh Elektrizität kann also mit einem zusätzlichen Brennstoffeinsatz von 0.5 kWh oder weniger erreicht werden. Dies ist primärenergieseitig netto um einen Faktor drei bis vier weniger; d.h. solche Massnahmen sind sehr energieeffizient. Auch einige Fenster-, Verglasungs- oder Sonnenschutzmassnahmen liegen im günstigen Bereich Q2.2.
- Quadrant Q2.1: Bei einigen anderen hingegen ist der in Kauf zu nehmende Brennstoffbedarf mindestens 2 bis 3-mal höher als der Rückgang des Strombedarfs. Diese Massnahmen sind aus rein exergetischer Sicht nicht zu empfehlen, sind teilweise jedoch erforderlich, um die Anforderungen des thermischen Komforts einhalten zu können.
- Quadrant Q4.1: Umgekehrt wird bei einigen gebäudehüllen- und gebäudetechnischen Massnahmen Wärme- bzw. Brennstoffenergie durch Elektrizität substituiert. Typische Beispiele für Massnahmen im empfehlenswerten Bereich unterhalb der Trennlinie mit kritischem Substitutions-Verhältnis sind Wärmepumpen anstelle von brennstoffbasierter Wärmeerzeugung, wobei bei Planung, Ausführung und Betrieb auf eine entsprechende hohe Qualität zu achten ist (JAZ>3). Ein Fensterersatz liegt im Gebäudebestand in aller Regel ebenfalls im Quadrant Q4.1 und aufgrund der mittlerweile erreichten hohen Selektivität bei den Verglasungen gilt dies meistens auch beim Neubau. An der Grenze liegt die architektonische Massnahme eines geringeren Fensteranteils, bei welcher der Heizwärmebedarf markant reduziert wird, der Strombedarf aufgrund des höheren Beleuchtungsbedarfs netto zunimmt. Ebenfalls an der Grenze und teilweise darüber liegen (zusätzliche) Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung (WRG) oder Abluft-WP. Lüftungsanlagen sind aus exergetischer Sicht also nur bei sehr hoher Elektrizitätseffizienz inkl. bedarfsgerechter Regelung zu empfehlen (Druckverlust möglichst < 700 Pa, Elektrizitätsbedarf <0.34 Wh/(m^3/h)).

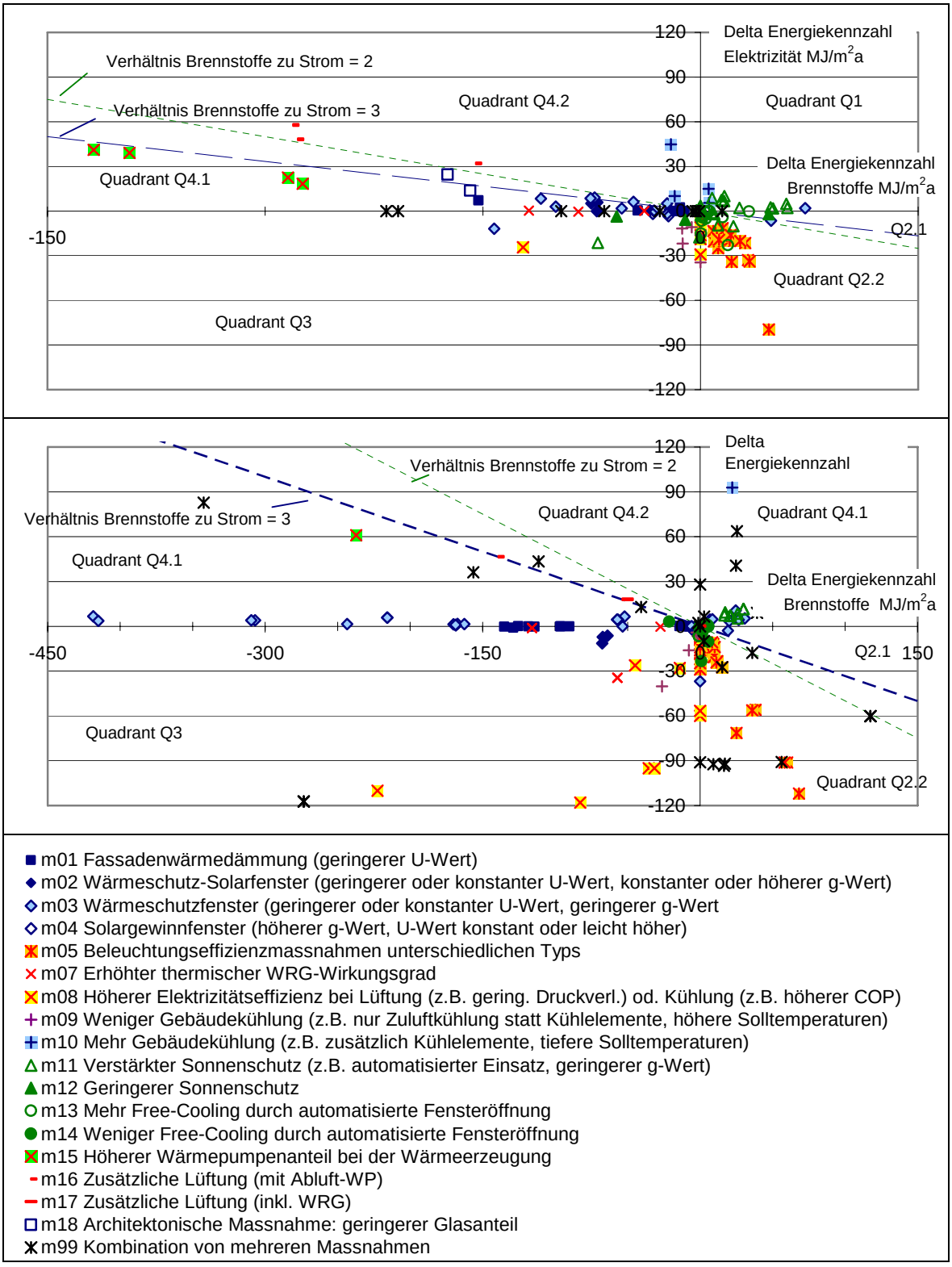


Abbildung Z.2 Energetische Wirkung der Massnahmen (Delta Energiekennzahl Elektrizität und Energiekennzahl Brennstoffe) im Bereich Neubau (oben) und Gebäudeerneuerung (unten).

- Quadrant Q1: Bei einem Teil der Massnahmen nehmen sowohl Brennstoff- als auch Strombedarf zu. Es sind dies typischerweise Komfortmassnahmen, z.B. zusätzliche Kühlung oder Sonnenschutzmassnahmen, welche insbesondere in Gebäuden ohne Kühlung erforderlich sind, um den Komfortanforderungen Rechnung zu tragen (betragsmässig meistens unter 30 MJ/m²a).

- Zu guter Letzt sind die Massnahmen mit klarer Wirkung zu nennen, welche im Wesentlichen entweder nur den Brennstoffbedarf reduzieren (z.B. erhöhter thermischer Wirkungsgrad der WRG) oder nur den Strombedarf (z.B. effizientere Ventilatoren, Pumpen, geringere Druckverluste, höhere JAZ bei der Gebäudekühlung); diese liegen auf der x- oder der y-Achse.

Pro Gebäudetyp stellen die definierten Massnahmenbündel eine kumulierte Folge von zunehmend mehr und/oder zunehmend weitergehenden Massnahmen dar, d.h. die Wirkung der einzelnen Massnahmen kumuliert sich mit den jeweils vorangehenden Massnahmen. Jedes dieser Bündel (und der Referenzfall) ist durch die Energiekennzahl Brennstoff und die Energiekennzahl Elektrizität charakterisiert (siehe Abbildung Z.3, wobei jedes Kürzel bzw. jede Signatur einen Gebäudetyp darstellt). Die erkennbaren strukturellen Verläufe weisen markante Unterschiede auf. Während bei einigen Gebäudetypen bei der Energiekennzahl Elektrizität als Funktion der abnehmenden Energiekennzahl Brennstoffe eine Abnahme zu verzeichnen ist, nimmt bei anderen Gebäudetypen der Strombedarf als Funktion der abnehmenden Brennstoff-EKZ zu.

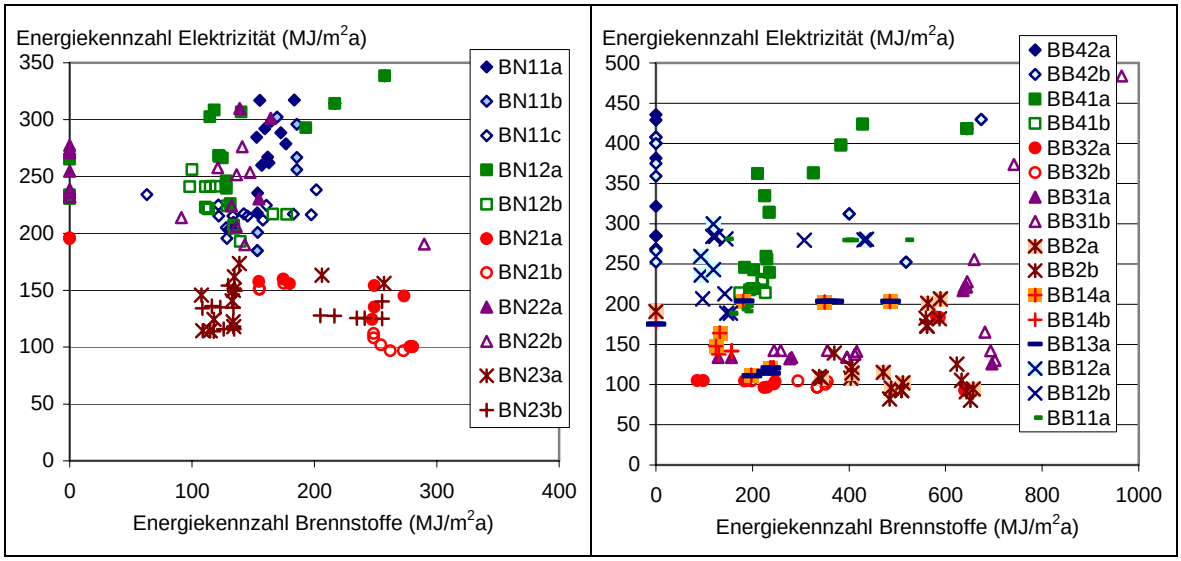


Abbildung Z.3 **Energiekennzahl Elektrizität als Funktion der Energiekennzahl Brennstoffe für die verschiedenen Gebäudetypen im Bereich Neubau (links) und Gebäudeerneuerung (rechts). Die Abkürzungen in der Legende beziehen sich auf die Definition der Gebäudetypen gem. Tabelle 96**

Gebäudesimulationen für Energie- und Komfortbetrachtungen

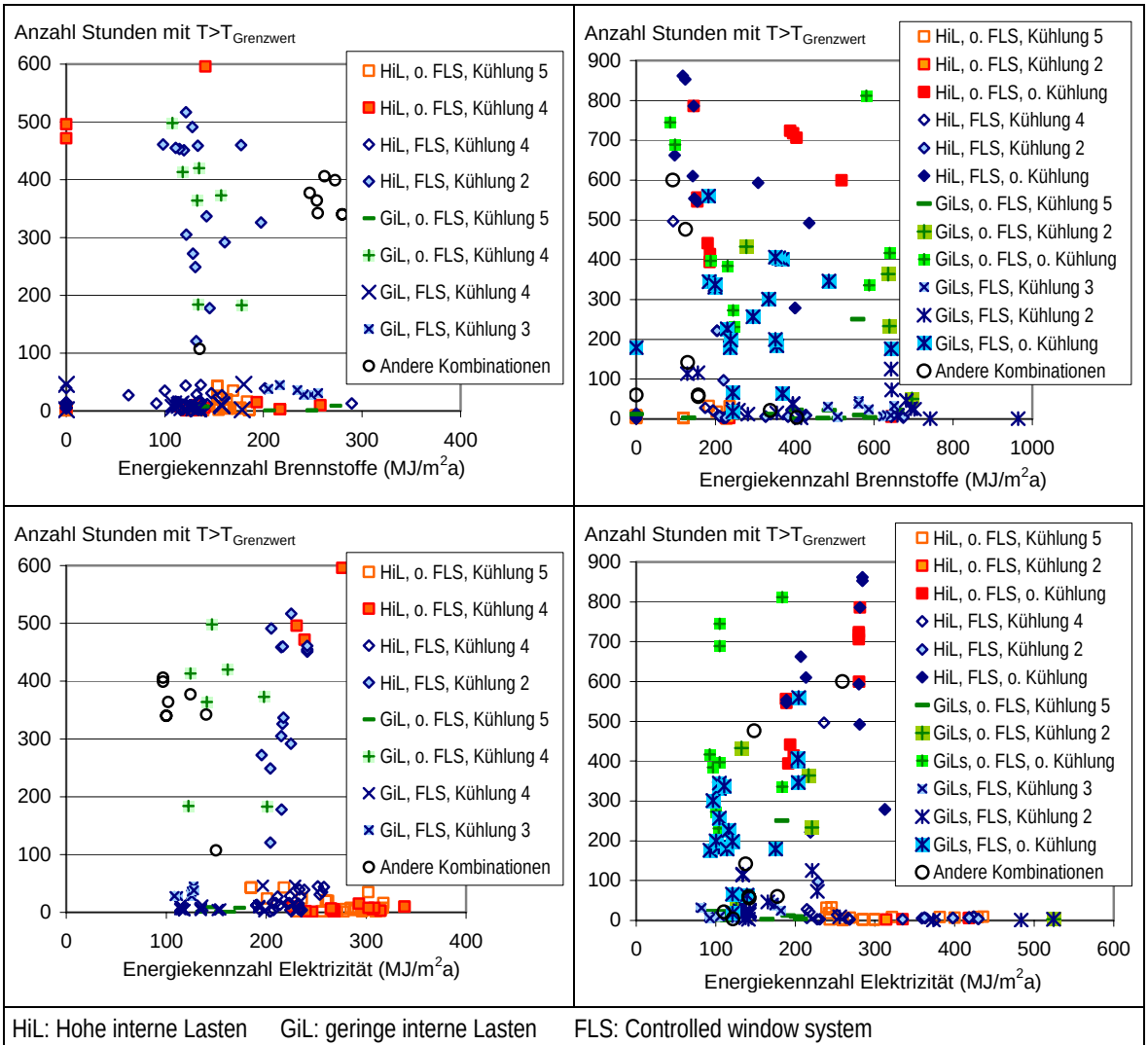
Das Gebäude als Ganzes

A priori könnte man vermuten, dass zur Vermeidung von Überhitzung im Sommerhalbjahr allenfalls ein höherer Elektrizitätsbedarf in Kauf genommen werden muss (Gebäudekühlung, evtl. Lüftung) und dass die Überhitzung mit verbesserter Wärmedämmung oder mit neuen Wärmeschutz-Fenstern abnimmt. Die Auswertung der Simulationsergebnisse zeigt jedoch, dass Überhitzung und der Elektrizitätsbedarf weit stärker von der Konfiguration bzgl. interner Lasten sowie aktiver und passiver Kühlung bestimmt werden (vgl. Abbildung Z.4):

- Bei vollständiger Kühlung (Kühlung der Zuluft und Kühlelemente) und genügend tiefen Solltemperaturen (z.B. 23°C) werden die Komfortanforderungen eingehalten). Ohne Kühlung ist der Grenzwert der Stundenzahl zu hoher Raumtemperaturen deutlich überschritten, sowohl bei hohen wie bei geringen internen Lasten, sowohl bei hohem wie bei tiefem Elektrizitätsbedarf.
- Bei gegebener Konfiguration bzgl. interner Lasten sowie aktiver und passiver Kühlung steigt die Stundenzahl überhöhter Raumtemperaturen mit erhöhtem Wärmeschutz aufgrund Überhitzung

an, zumindest für die Konfigurationen ohne vollständige Kühlung. Bei Situationen ohne Free Cooling (z.B. durch Fensteröffnung) und bei Gebäuden mit hohen internen Lasten ist dies ausgeprägter als bei solchen mit geringen internen Lasten.

Fazit: Ohne Kühlung oder Free Cooling (z.B. durch Fensteröffnung, Brüstungsgeräte, Luftklappen etc.) kann der thermische Komfort auch in Fällen mit geringen internen Lasten häufig nicht sichergestellt werden. Eine Zuluftkühlung ist bei den angenommenen Luftwechselraten, die sich am lufthygienischen Bedarf orientieren, weder bei hohen noch bei geringen internen Lasten zur vollständigen Erfüllung der Komfortanforderungen ausreichend, es sei denn in Kombination mit Free Cooling.



HiL: Hohe interne Lasten GiL: geringe interne Lasten FLS: Controlled window system
Kühlung 5: Kühlung der Zuluft und Kühlelemente, Solltemperatur 23°C
Kühlung 4: Kühlung der Zuluft und Kühlelemente, Solltemperatur 25°C (*)
Kühlung 3: Nur Kühlelemente (Solltemperatur 25°C)
Kühlung 2: Nur Kühlung der Zuluft
(*) bei Kühlung 4 kann die Anzahl Stunden relativ hoch sein, der Diskomfort aber trotzdem gering, denn die Innentemperatur liegt nur 0.5°C oder weniger über dem Anforderungswert

Abbildung Z.4 Anzahl Stunden mit Überhitzung (Anforderungen gemäss Entwurf SIA 382/1) als Funktion der Energiekennzahlen Brennstoffe (obenstehende Diagramme) und Elektrizität (unten stehende Diagramme) für Neubau (links) und Gebäudeerneuerung (rechts)

Die **internen Wärmelasten** durch Personen und Elektrogeräte haben einen hohen Einfluss auf die Komfortbedingungen, und zwar nicht nur während des Hochsommers, sondern auch während langer Perioden der Übergangszeit. Dies gilt nicht nur für Gebäude mit hohem Fensterflächenanteil, sondern auch für den Gebäudebestand mit Bauweise und geometrischen Verhältnissen ähnlich denjenigen von Wohngebäuden. Zur Reduktion der unkomfortablen, d.h. produktivitätsvermindernden Zustände kommt der Reduktion der internen Lasten eine sehr hohe Bedeutung zu (z.B. sehr energie-effiziente Beleuchtungen, effiziente PCs und andere Bürogeräte). Bei dichter Personenbelegung und damit verbundener hoher Gerätedichte sind akzeptable Komfortzustände jedoch nur durch kompensatorische Massnahmen zu erreichen: aktive Kühlung, Lüftungsanlagen inkl. Nachtauskühlung, Nachströmöffnungen und Brüstungsgeräte, automatische oder evtl. manuelle Fensteröffnung).

Die Massnahmen im Einzelnen

Wie oben erläutert, sind Interaktionseffekte zwischen verschiedenen elektrizitätsbezogenen Energiedienstleistungen (z.B. Beleuchtung. Bürogeräte und Kühlen) sowie zwischen Wärmeschutz und Komfort derart gross, dass das primäre Ziel der Massnahme in ihr Gegenteil verkehrt werden kann. Im Einzelnen können folgende Fazits festgehalten werden:

Fassadenwärmedämmungen und die damit verbundenen geringeren U-Werten führen zu einer deutlichen Reduktion des Wärmeenergiebedarfs, besonders bei der Erneuerung des zuvor nicht wärmegeschützten Gebäudebestandes (je nach Flächenverhältnis zur EBF und Dämmstandard um 10 bis 25 MJ/m^{2}a im Neubaubereich und 100 bis 150 MJ/m^{2}a im Gebäudebestand). Der Preis für diese Wärmeenergiebedarfsreduktion ist eine Verschlechterung der sommerlichen Komfortsituation, sofern im Gebäude keine kompensatorischen Massnahmen bereits installiert sind (z.B. Kühlung) oder getroffen werden (Reduktion der internen Lasten, Lüftung, automatisierte Fensteröffnung, Nachtauskühlung, verbesserter Sonnenschutz, Verglasungen mit geringeren g-Werten). Die Anzahl Stunden mit Temperaturgrenzwertüberschreitung kann um einige duzend bis zu wenigen hundert Stunden ansteigen (siehe Abbildung Z.5). Derartige Wirkungen können auch im Neubaufall auftreten.

Fenster oder Verglasungen: qualitativ lassen sich die oben gemachten Aussagen bzgl. Heizwärmebedarf und Komfort auf den Fensterersatz bzw. auf Verglasungen mit geringeren U-Werten (und einigermassen konstanten g-Werten) übertragen (Wärmeenergiebedarfsreduktion bis zu 50 MJ/m^{2}a beim Neubau und gut 400 MJ/m^{2}a beim Fensterersatz, Erhöhung der Stunden mit zu hohen Temperaturen um einige hundert Stunden/Jahr). Der Anstieg der Stundenzahl mit überhöhten Raumtemperaturen kann verringert oder vermieden werden, indem Gläser mit geringeren g-Werten eingesetzt werden. Massnahmen im Fenster- bzw. Verglasungsbereich haben zudem Auswirkungen auf den Beleuchtungs- und den Kühlbedarf Der Netto-Effekt auf den Elektrizitätsbedarf ist jedoch relativ gering und kann je nach Konstellation positiv oder negativ sein (mit -15 bis +12 MJ$_{el}$/m^{2}a). Ausgeprägte Solargewinnfenster (g-Wert>55%) und ausgeprägte Sonnenschutzfenster (g-Wert<40%) sind nur in speziellen Fällen zu empfehlen (letztere z.B. aus Gründen der Elektrizitätseffizienz bei Gebäuden mit hohen Glasanteilen, ungenügendem variablen Sonnenschutz oder aus Gründen des Überhitzungsschutzes bei Gebäuden ohne Kühlung).

Auch der **Verglasungsanteil** hat Auswirkungen auf den Beleuchtungs- und den Kühlenergiebedarf sowie auf den Wärmebedarf und die sommerliche Überhitzung. Als Funktion des höheren Glasanteils nimmt der Wärmeenergiebedarf in der Regel markant zu (z.B. um 50 bis 60 MJ/m^{2}a bei einer Erhöhung des Fensteranteils von 50% auf 80% wegen der schlechteren Wärmedämmeigenschaften der Fenster und zusätzlicher Wärmebrückeneffekte). Der Netto-Elektrizitätsbedarf hingegen nimmt mit zunehmendem Glasanteil in der Regel ab (15 bis 25 MJ$_{el}$/m^{2}a), da die Reduktion des Beleuchtungsenergiebedarfs betragsmässig grösser ist als der zunehmende Kühlenergiebedarf (siehe auch SIA D0176). Voraussetzung dafür sind der bedarfsgerechte Einsatz der Beleuchtung (manuell oder geregelt), zwischen- oder aussen liegender Sonnenschutz und mittel- bis sehr effiziente Gebäudekühlung. Bei sehr hohen Glasanteilen (70% und mehr) kann es allerdings dann zur sehr hohen Energiemehrverbräuchen führen, wenn Abweichungen vom Sollverhalten von Sonnenschutz und Fensteröffnung (z.B. durch Benutzereinflüsse) oder beim Betrieb von Kühl- und Lüftungsanlagen zu beobachten sind. Hohe Glasanteile verursachen zudem wenig komfortable Situationen, auch wenn die Raum-

temperatur die gestellten Anforderungen erfüllt, weil übermässig warm (Sonnentage) oder kalt strahlende Flächen und damit verbundene Kaltluftströme als unangenehm empfunden werden.

In der Schnittmenge zwischen Kühlenergie- und Beleuchtungsbedarf steht der **Sonnenschutz**, welcher indirekt zudem den Wärmebedarf beeinflusst. Dabei ist zwischen statischem Sonnenschutz (Verglasungen mit tiefen g-Werten) und dynamischem Sonnenschutz (Storen, Lamellen) zu unterscheiden. Der statische Sonnenschutz hat den Vorteil, dass der Sichtkontakt gegen aussen besser und länger gewährleistet ist und die Auswirkungen von – evtl. unabsichtlich – offen stehendem dynamischem Sonnenschutz auf Energiebedarf und Komfort geringer sind. Ein dynamischer Sonnenschutz hat den Vorteil, dass dieser besser auf wechselnde (äussere oder innere) Bedingungen zu reagieren vermag, reduziert aber häufiger den Sichtkontakt gegen aussen. Sonnenschutzmassnahmen reduzieren die Anzahl Stunden überhöhter Raumtemperaturen in nicht gekühlten oder ungenügend gekühlten Gebäuden (typischerweise um bis zu 200 h/Jahr). In gekühlten Gebäuden mit hohem Glasanteil wird der thermische Komfort aufgrund geringerer Strahlung verbessert. Bzgl. Elektrizitätsbedarf bewirkt ein verstärkter Sonnenschutz (geringere g-Werte, geringere Schwellenwerte) je nach Gebäudekonstellation einen geringen Anstieg (0 bis 10 MJ/m^{2}a) bei nicht oder sehr effizient gekühlten Gebäuden, da in diesen Fällen der höhere Beleuchtungsbedarf den geringeren Kühlelektrizitätsbedarf überwiegt. Bei aktiv gekühlten Gebäuden mit hohem Kühlenergiebedarf und mit mittlerer oder geringer Kühlungseffizienz resultiert eine geringe Reduktion (0 bis -20 MJ/m^{2}a, siehe auch Abbildung Z.2). Der zusätzliche Wärmeenergiebedarf beträgt typischerweise 10 bis 20 MJ/m^{2}a (bei Annahme von über das ganz Jahr konstanten Sonnenschutz-Einsatzkriterien). Fazit: der Sonnenschutzeinsatz sollte dynamisch reguliert werden mit Priorität der Tageslichtnutzung und Reduktion des Beleuchtungsbedarfs im Winter und während der Übergangszeit (Voraussetzung sind geregelte Beleuchtungssysteme oder sehr bewusst agierende Nutzende) und mit Priorität stark abschirmender Sonnenschutz bei lang aneinanderfolgenden Sonnentagen im Hochsommer). Im Bereich des dynamischen Sonnenschutzes sind beträchtliche Effizienz- und Komfortpotenziale zu erwarten, wobei es der weiteren Forschung und Entwicklung und der Verbreitung entsprechender Kenntnisse in die Praxis bedarf.

Die Beleuchtung ist ein typisches Beispiel einer multifunktionalen Energiedienstleistung: der primäre Zweck der Beleuchtung ist eine angemessene Beleuchtungsstärke, harmonische Leuchtdichteverteilung, natürliche Schattigkeit, geeignete Lichtfarbe, befriedigende Farbwiedergabe, aber auch die zu erfüllenden Anforderungen (z.B. Schutz vor störender Reflexbildung und Direktblendung, Flimmerfreiheit); sekundäre Zwecke sind innenarchitektonische Ziele (z.B. Repräsentativität, Design-Qualitäten, optische Akzente). Die Beleuchtung hat zudem multidimensionale energetische Auswirkungen (Lichtqualität, Wärmeabgabe, Kühlbedarf). Aus energetischer Sicht und hinsichtlich des thermischen Komforts kommt der Beleuchtung besonders in Bürogebäuden und weiteren Gebäudetypen eine erhebliche Bedeutung zu.[4] Dies gilt besonders bei alten Beleuchtungen und bei vergleichsweise geringem Tageslichtangebot (Elektrizitätsbedarf für Beleuchtung 100 bis 150 MJ/m^{2}a). Der Elektrizitätsbedarf kann dank des technischen und fachlichen Fortschritts (Planung, effizientere Leuchten, Lampen und Vorschaltgeräte, bedarfsgerechten Konzepten und Lichtregelungen) markant reduziert werden, sowohl im Neubau (gesamthaft, in Zusammenspiel mit geeignetem Sonnenschutz, um 25% bis 70% bzw. um 20 bis 60 MJ/m^{2}a) als auch insbesondere bei Erneuerungen (gesamthaft um 40% bis 70% bzw. 40 bis 80 MJ/m^{2}a). Mittels Einzelmassnahmen lassen sich Gewinne von 15 bis 35 MJ/m^{2}a (Neubau) bzw. von 15 bis gut 50 MJ/m^{2}a erzielen. Erreicht wird dies durch geringere installierte spezifische Leistungen (weniger als 10 W/m^2 statt 15 bis 18 W/m^2), durch geringere Volllaststunden (Reduktion um einige hundert Stunden pro Jahr) oder durch eine Kombination der beiden. Energie-effiziente Beleuchtungen erzeugen zudem indirekte energetische Nutzen, indem sie den Elektrizitätsbedarf für Kühlung reduzieren (daraus ergibt sich eine Zusatzwirkung der Beleuchtungsmassnahmen von 10% bis 30%). Der thermische Komfort verbessert sich bei Beleuchtungsmassnahmen erheblich, v.a. bei nicht gekühlten Gebäuden: die Anzahl Belegungsstunden mit erhöhten Temperaturen wird um 50 bis zu 300 h/Jahr reduziert (d.h. eine Arbeitswoche bis mehr als ein Arbeitsmonat.

---

[4] Bei Gebäuden mit ansonsten tiefen internen Lasten macht die Beleuchtung einen hohen Anteil aus und bei Gebäuden mit hohen internen Lasten ist der marginale Beitrag der Beleuchtung zu kritischen Komfortsituationen von besonderer Bedeutung.

Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung: Der primäre Nutzen von Lüftungsanlagen besteht im Sicherstellen der Raumluftqualität, insbesondere in Fällen mit geringer Eignung für Fensterlüftung (Gruppen- oder Grossraumbüro, Hörsäle, evtl. Schulräume, lärm- oder schadstoffbelastete Lage), der sekundäre Nutzen in der Verringerung des Wärmebedarfs (typischerweise um 50 bis 80 MJ/m^{2}a). Bei geeigneter Regelung können Lüftungsanlagen auch zur Verringerung der Stundenzahl mit überhöhten Raumtemperaturen beitragen. Während langer Perioden der Übergangszeit und während eines Teils des Sommers ist dies auch ohne aktive Zuluftkühlung der Fall. Der typische Elektrizitätsbedarf von neuen Anlagen beträgt bei angepasstem Luftwechsel und Betriebszeiten für die Luftförderung 20 bis 40 MJ/m^{2}a, bei effizienten Anlagen weniger als 10 bis 20 MJ/m^{2}a und für die Zuluftkühlung 7 bis 20 MJ/m^{2}a. Eine Erhöhung des Luftwechsels über das lufthygienisch Erforderliche hinaus ist aus energetischer und regelungstechnischer Sicht kritisch zu beurteilen. Es ist im Einzelfall zu prüfen, ob wasserbasierte Kühlsysteme oder mit Bedacht eingesetzte Kleinklimageräte energetische Vorteile aufweisen. Generell ist auf möglichst geringe Druckverluste, bedarfsgerechte Regelung (CO_2-Konzentration oder Präsenz basiert) und auf hocheffiziente Ventilatoren zu achten, auch bei Neuanlagen beträgt allein dieses technische Effizienzpotenzial 30% bis 50%.

Erneuerung von Lüftungsanlagen: Obwohl ein beachtlicher Teil der Lüftungen im Gebäudebestand entweder erneuert oder mit Wärmerückgewinnungen nachgerüstet wurde, bestehen in diesem Bereich nach wie vor Energieeffizienzpotenziale, und zwar sowohl wärme- wie stromseitig. Das technische Elektrizitätseffizienzpotenzial bei Lüftungsanlagenerneuerungen beträgt aufgrund geringerer Druckverluste und effizienterer Ventilatoren 50 bis 80%. Bei angepassten Betriebszeiten entspricht dies bis 70 bis 100 MJ/m^{2}a. Bei bestehenden Anlagen ist eine Reduktion des Energiebedarfs durch Betriebsoptimierungsmassnahmen, d.h. durch das Anpassen der Betriebszeiten und der Luftvolumenströme möglich. Damit lässt sich der Elektrizitätsbedarf für die Luftförderung um typischerweise um einen bis zwei Drittel (je nach Ausgangslage um 30 bis 120 MJ/m^{2}a) sowie der Wärmebedarf um 50 bis 250 MJ/m^{2}a reduzieren.

Besteht bereits vor der Re-Investition eine **Zuluftkühlung** (evtl. inkl. Entfeuchtung), lässt sich bei Erneuerungen von Lüftungsanlagen ein weiteres Effizienzpotenzial nutzen, indem die Luftwechselraten und die Zulufttemperaturen **bedarfsgerecht** angepasst werden. Die Luftwechselraten im Anlagenbestand liegen meistens markant über den lufthygienischen Anforderungen (typischerweise um das Zwei- bis Dreifache). Parallel zur Reduktion der Luftwechselraten reduziert sich der Kühlenergiebedarf (gleiche Zulufttemperaturen vorausgesetzt). Der Elektrizitätsbedarf der Zuluftkühlung lässt sich von beobachteten Werten von über 50 MJ/m^{2}a auf 10 bis 20 MJ/m^{2}a reduzieren. Wird die Luftwechselrate bei Lüftungen mit Zuluftkühlung reduziert, kann sich jedoch die thermische Komfortsituation (bzgl. Überhitzung) verschlechtern, was u.U. kompensatorische Massnahmen erforderlich macht (z.B. Einbau von Kühldecken oder Umluftkühlern). Im Neubau und bei umfassenden Gebäudeerneuerungen ist aus energetischer Sicht zwischen den Funktionen Lüftung und Kühlung zu trennen.

Bezüglich der Sicherstellung des thermischen Komforts bzw. der Vermeidung hoher Stundenzahlen von überhöhten Raumtemperaturen kommt der **Gebäudekühlung** eine zentrale Bedeutung zu. Bei mittel bis hoch verglasten Bauten mit mittleren bis hohen Wärmelasten sind die Komfortanforderungen gemäss SIA 381/1 ohne die eine oder andere Form der aktiven oder passiven Gebäudekühlung nicht erfüllbar. Ein markanter Anteil des Bedarfs an Kühlung fällt nicht während des Hochsommers, sondern während der Übergangszeit an. Bei hochverglasten Bauten besteht an sonnigen Tagen bereits im Winter eine Überhitzungsgefahr. Ohne Fensterlüftung kann die Gebäudekühlung gemessen in Nutzenergie (als Bedarf an thermischer, abzuführender Energie, d.h. vor der Erzeugung durch die Kühlanlage) 100 bis 250 MJ_{th}/m^{2}a betragen, besonders bei Gebäuden mit hohen Glasanteilen, suboptimalem Sonnenschutz und hohen internen Lasten. Bei einigermassen gut gedämmten Gebäuden (Neubaustandard) ist dieser Wert vergleichbar wie der Nutzenergiebedarf der Gebäudeheizung (150 bis 250 MJ_{th}/m^{2}a). Der Kühlbedarfsminderung und hocheffizienten Kühlanlagen ist in diesen Fällen eine hohe Priorität zuzumessen. Bei heute weit verbreiteten JAZ von 2 bis 3 beträgt der Elektrizitätsbedarf in diesen Fällen 80 bis 120 MJ_{el}/m^{2}a. Das Endenergieeffizienzpotenzial ist jedoch beträchtlich und wird in der allgemeinen Wahrnehmung oft unterschätzt. Bei mitteleffizienten Anlagen und Konzepten in Kombination mit gebäudeseitigen Massnahmen (Sonnenschutz, Verglasung) beträgt der Endenergiebedarf für Kühlung selbst in Gebäuden mit hohem Glasanteil und hohen internen Lasten

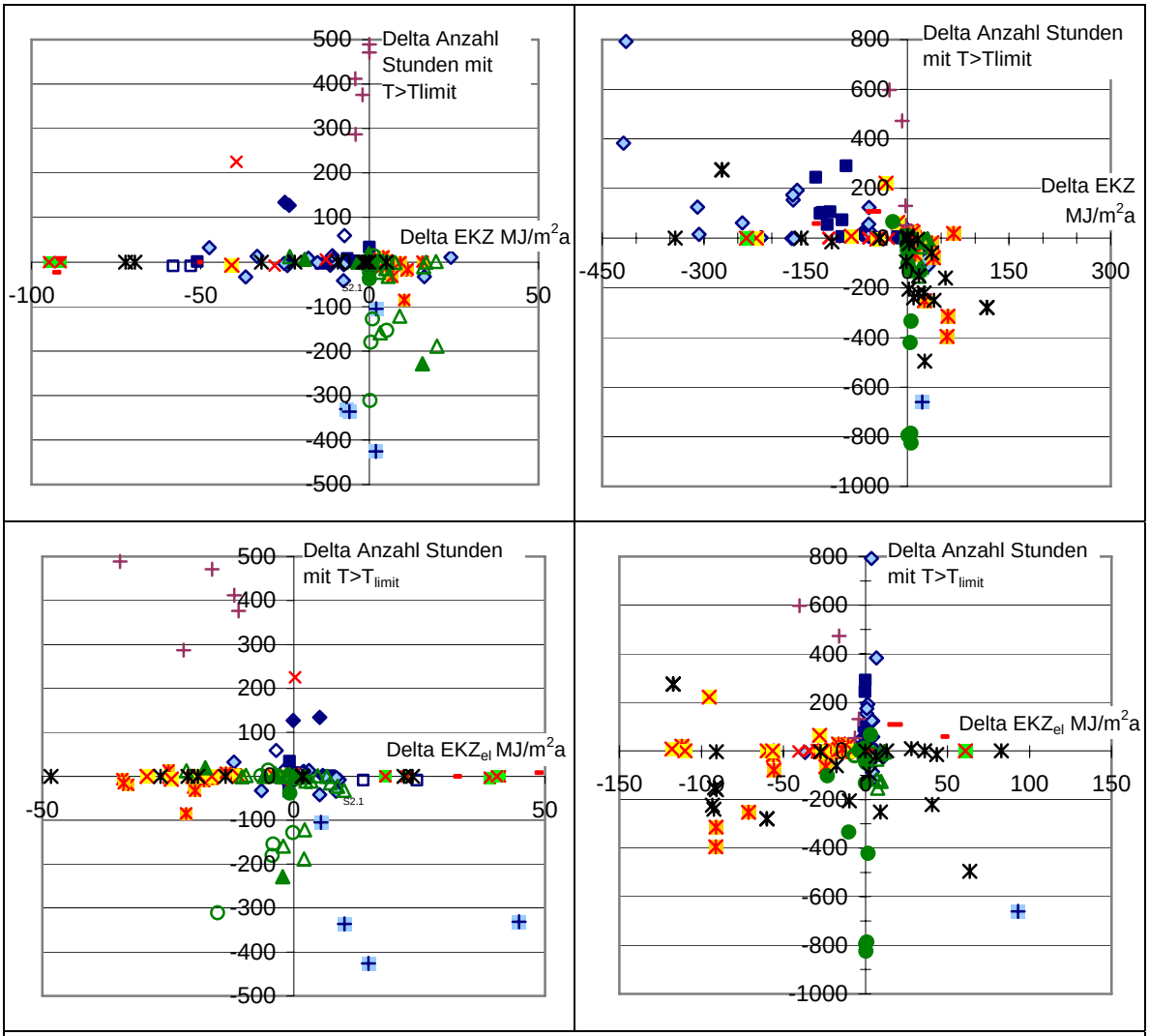


Abbildung Z.5 Auswirkungen der Massnahmen auf die Stundenzahl überhöhter Raumtemperaturen als Funktion der energetischen Wirkung der Massnahmen (Delta Energiekennzahl Brennstoffe obere Diagramme bzw. Delta Energiekennzahl Elektrizität, untere Diagramme) im Bereich Neubau (links) und Gebäudeerneuerung (rechts).

„nur" rund 30 bis 60 MJ_{el}/m^2a (ohne Entfeuchtung), bei Gebäuden mit moderatem Glasanteil die Hälfte davon. Der Einfluss der Gebäudenutzenden, umfangreiche Entfeuchtung oder mittelmässig realisierte Installationen können dieses Bild jedoch markant ändern, weshalb technische Massnahmen vorzusehen sind. Dazu gehört insbesondere die hocheffiziente Kältebereitstellung und -verteilung (d.h. ein dynamischer, geringer Temperaturhub zwischen Verteilung und Rückkühlung, Verwendung von nassen Rückkühlern), Ausnützung der „freien Kälte" der Aussenluft (bei im Vergleich zum Raum tieferen Aussentemperaturen), bedarfsgerechte Regelung, zurückhaltenden Entfeuchtung, abgestimmte Regelung von Kühlung, Sonnenschutz und Beleuchtung. Der Endenergiebedarf für Kühlung kann auf 20 MJ/m^2a oder weniger reduziert werden, bei effizienten Anlagen (JAZ 4 bis 5) in Kombination mit gebäudeseitigen Massnahmen und bei hocheffizienten Anlagen (JAZ 7 bis >20) ohne solche.

Automatisierte Fensteröffnung, Brüstungsgeräte, Free Cooling: Gemäss Ergebnissen der Gebäudesimulationen hat die geregelte Fensteröffnung sowohl bzgl. Überhitzungsschutz als auch bzgl. Kühlbedarf einen sehr grossen positiven Effekt: Die Anzahl Stunden mit zu hohen Innentemperaturen wird um einige hundert bis gegen tausend Stunden pro Jahr reduziert. Der Kühlenergiebedarf wird durch die geregelte Fensteröffnung um 50% bis 70% reduziert, was je nach Fall 30 bis 60 MJ_{el}/m^2a entspricht, ein weiterer Hinweis, dass ein markanter Anteil des Kühlbedarfs in die Übergangszeit fällt. Obwohl der positive Effekt der geregelten Fensteröffnung in den Simulationen möglicherweise zu optimistisch eingeschätzt wird (einströmende Luft ist für Behaglichkeit zu kalt, Fassade kann sich erwärmen und einströmende Luft ist wärmer als meteorologische Aussentemperatur), zeigen die Ergebnisse die hohen Energieeffizienz- und Komfortpotenziale der Möglichkeit der Fensteröffnung und der Kühlung mittels „freier Kälte". Die automatisierte Fensteröffnung kann in die Rand- und Nachtstunden verlegt werden, und die freie Kälte kann auch mittels Luftklappen, Nachströmöffnungen, Brüstungsgeräten sowie Kühl- und/oder Lüftungsanlagen (s. oben) genutzt werden. Anzumerken ist, dass die anspruchsvollen Komfortanforderungen in vielen Fällen mit solchen Massnahmen allein nicht eingehalten werden können.

Regelungen: Die Energieflüsse in Wirtschaftsbauten sind einer hohen Dynamik und Interaktion unterworfen. Der heutige Stand der Mess-, Sensor- und Regeltechnik könnte der Dynamik und den Interaktionseffekten durchaus Rechnung tragen, wird aber nicht oder nur sehr beschränkt angewendet. Die Regelung basiert jedoch häufig auf momentanen Schwellenwerten und nimmt selten auf übrige Gebäudetechnikbereiche oder auf die Trägheit des Gebäudes Bezug. Es fehlen Regelkonzepte, welche aktuelle und vorausschauende Parameter wie Nutzung, Meteorologie (inkl. Prognosen) mit einbeziehen. Vernetzte, antizipierend agierende und adaptive Regelungen und Steuerungen, welche nicht gegen, sondern mit der Bauphysik arbeiten und das Nutzerverhalten mit einbeziehen, sind zu fördern.

Die Energieanlagen und insbesondere deren Zusammenspiel verhalten sich in der Praxis häufig nicht derart ideal, wie dies die Simulationsrechnungen zeigen. Insbesondere im Fall der Gebäudekühlung kann der Elektrizitätsbedarf rasch ansteigen, z.B. durch „suboptimale" oder gar fehlerhafte Regelungen (zu tiefe oder zu hohe Sollwerte, gleichzeitige Kühlung und Heizung). Auch der häufig beobachtete „Stand-by"-Bedarf von Gebäuden (nachts, am Wochenende) ist vielfach darauf zurückzuführen. **Betriebsoptimierungsmassnahmen** kommt deshalb eine grosse Bedeutung zu, und zwar sowohl anlässlich der Inbetriebsetzung der Anlagen beim Gebäudeneubau und bei der Erneuerung als auch in regelmässigen Abständen während des laufenden Betriebs. Bei Lüftungsanlagen z.B. kann die für die Energiebedarfsreduktion entscheidende Reduktion der Druckverluste häufig auch durch die Reduktion der Luftvolumenströme erreicht werden.

Kosten- und Nutzenbetrachtung unter Berücksichtigung des Komforts

Die gesamten Jahreskosten (Kapital-, Unterhalts- und Energiekosten) variieren als Funktion des *erreichten Energieeffizienzniveaus, des Komfortniveaus und zwischen verschiedenen Gebäudetypen*, wobei die Variation zwischen den verschiedenen Gebäudetypen grösser ist als die Variation aufgrund der unterschiedlichen Energieeffizienzniveaus (siehe Abbildung Z.6). Dies ist insbesondere eine Folge von grundsätzlichen architektonischen und konzeptionellen Grundentscheiden. Dazu gehören Gebäudegrösse (Skaleneffekte) und Gebäudeform, Materialwahl, Fassadengestaltung, Glasanteil, Son-

nenschutztyp, Lüftung und/oder Kühlung. Diese grundsätzlichen Entscheide beeinflussen das Kostenniveau weit stärker als die Energieeffizienz. Eine Erhöhung des Glasanteils von 50% auf 80% kann beispielsweise mit Mehrkosten von 10 CHF/m^{2}a und mehr für die Kapitalkosten verbunden sein, und dies bei relativ geringen Auswirkungen auf den Elektrizitäts- und Brennstoffbedarf.

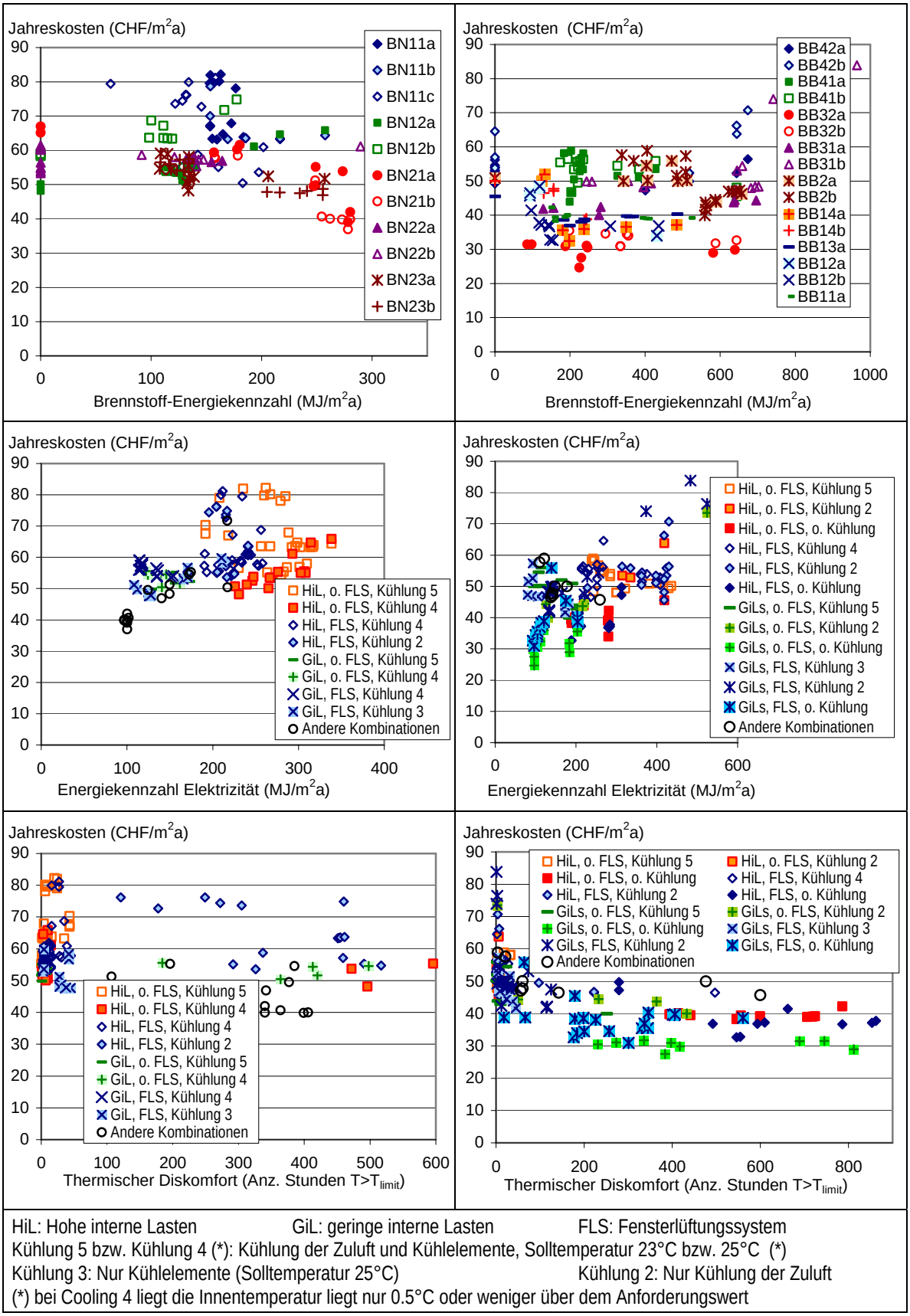
Die Jahreskosten sind zudem stark vom erreichten *thermischen Komfort* abhängig. Die Jahreskosten der Fälle, welche die Komfortanforderungen erfüllen (weniger als 100 Stunden mit Innentemperaturen über dem geforderten Grenzwert), liegen klar über denjenigen, welche die Anforderungen nicht erfüllen (untere Diagramme der Abbildung Z.6[5]). Dies trifft besonders für den Gebäudebestand zu; denn beim Neubau mussten in den meisten Fällen Komfortmassnahmen angenommen wurden, um die Anforderungen zu erfüllen. Die Jahreskosten von (zusätzlicher) Kühlung betragen rund 10 CHF/m^{2}a, diejenigen von zusätzlichen Lüftungen liegen in der gleichen Grössenordnung. Die Elektrizitätskosten der internen Lasten (Geräte, ohne Beleuchtung) beeinflussen die Jahreskosten direkt (die Elektrizitätskosten betragen 5.5 CHF/m^{2}a statt 1.8 CHF/m^{2}a) und indirekt (zusätzliche Kapital-, Unterhalts- und Energiekosten für Kühlung, wobei letztere bis zu 5 CHF/m^{2}a betragen können).

Im Gebäudebestand sind die Jahreskosten stark abhängig von den *grundsätzlichen Referenzfallkategorien* „laufende Energiekosten", „Unterhalt", „Instandhaltung", „Instandsetzung" und „Erneuerung". Im Vergleich zu den beiden erstgenannten Referenzfällen sind Energieeffizienzmassnahmen häufig nicht oder nur unter günstigen Bedingungen wirtschaftlich, währenddem weitergehende Energieeffizienzmassnahmen im Vergleich zu einer ohnehin durchzuführenden Erneuerung in vielen Fällen wirtschaftlich realisiert werden können. Typische Beispiele sind Fensterersatz, Wärmedämmung bei komplexen Fassaden, Beleuchtungserneuerung, welche im Vergleich zu den laufenden Energiekosten und einfachen Unterhalts- und Instandhaltungsarbeiten nicht wirtschaftlich sind. Ist jedoch aufgrund der Lebensdauer, aus technischen oder ästhetischen Gründen ohnehin ein Fensterersatz, eine Fassaden- oder Beleuchtungserneuerung durchzuführen, sind weitergehende Effizienzstandards wie geringere U-Werte und präsenz- oder tageslichtbasierte Beleuchtungserneuerungen meistens wirtschaftlich. Fazit: Investive Energieeffizienzmassnahmen mit einem gegenüber dem Ist-Zustand markanten Erneuerungs- und Re-Investitionsanteil sind im Vergleich zu laufenden Kosten häufig nicht wirtschaftlich, im Vergleich zu (energetisch nicht wirksamen) Instandsetzungen jedoch durchaus.

Bei der Analyse der Trade-offs zwischen den Jahreskosten und je den Einflussgrössen Brennstoffbedarf, Elektrizitätsbedarf und Komfort ist zu beachten, dass bei einem bestimmten Paarvergleich die Kosten auch von einem oder zwei der jeweils anderen Einflussfaktoren abhängen. Bezüglich des Zusammenhangs zwischen spezifischem *Brennstoffbedarf* und *Jahreskosten* auf Gebäudeebene können folgende Feststellungen gemacht werden:

- Heizkosten von Wirtschaftsgebäuden (etwa 0.4 bis 1.2 CHF/m^2.a) sind – im Vergleich zu den Stromkosten, v.a. aber im Vergleich zu den Kapitalkosten von Wirtschaftsgebäuden – sehr gering. Entsprechend relativ gering ist auch das Heizkosteneinsparpotenzial (gemessen an übrigen Kostenanteilen); als Folge wird ihnen auch wenig Aufmerksamkeit geschenkt. Für energieeffizientere Lösungen können jedoch höhere Kapitalkosten durch geringere Energiekosten kompensiert werden. Von einigen wenigen Ausnahmen abgesehen (siehe unten) sind die gesamten Jahreskosten für einen bestimmten Gebäudetyp als Funktion des geringeren Brennstoffbedarfs mehr oder weniger konstant. Einige Massnahmen sind mit geringen Mehr- oder Minderkosten im Bereich von -3 bis 2 CHF/m^{2}a verbunden (siehe Abbildung Z.6 und Abbildung Z.7, jeweils obere Diagramme). Dies bedeutet, dass die meisten Energieeffizienzmassnahmen, welche den Heizwärmebedarf reduzieren, sind entweder wirtschaftlich oder nahe der Wirtschaftlichkeitsgrenze. Dies betrifft insbesondere Gebäudehüllenmassnahmen (inkl. Fenster), aber auch Wärmerückgewinnungsanlagen mit höherem thermischem Wirkungsgrad (bei bereits vorhandenem oder vorgesehener Lüftungsanlage) und Betriebsoptimierungsmassnahmen.

[5]: Hinweis: die definierte Solltemperatur der Kühlung liegt bei „Kühlung 4" teilweise knapp über dem geforderten Limit (um bis zu 0.5°C). Die Anzahl der Stunden mit Temperaturüberschreitung mag relativ hoch sein, die Temperaturüberschreitung ist jedoch während der meisten dieser Stunden gering (0.5°C oder weniger).



HiL: Hohe interne Lasten GiL: geringe interne Lasten FLS: Fensterlüftungssystem
Kühlung 5 bzw. Kühlung 4 (*): Kühlung der Zuluft und Kühlelemente, Solltemperatur 23°C bzw. 25°C (*)
Kühlung 3: Nur Kühlelemente (Solltemperatur 25°C) Kühlung 2: Nur Kühlung der Zuluft
(*) bei Cooling 4 liegt die Innentemperatur liegt nur 0.5°C oder weniger über dem Anforderungswert

Abbildung Z.6 Jahreskosten als Funktion der Energiekennzahl Brennstoffe (obere Diagramme), der Energiekennzahl Elektrizität (mittlere Diagramme) und des thermischen Diskomforts im Bereich Neubau (links) und Gebäudeerneuerung (rechts)

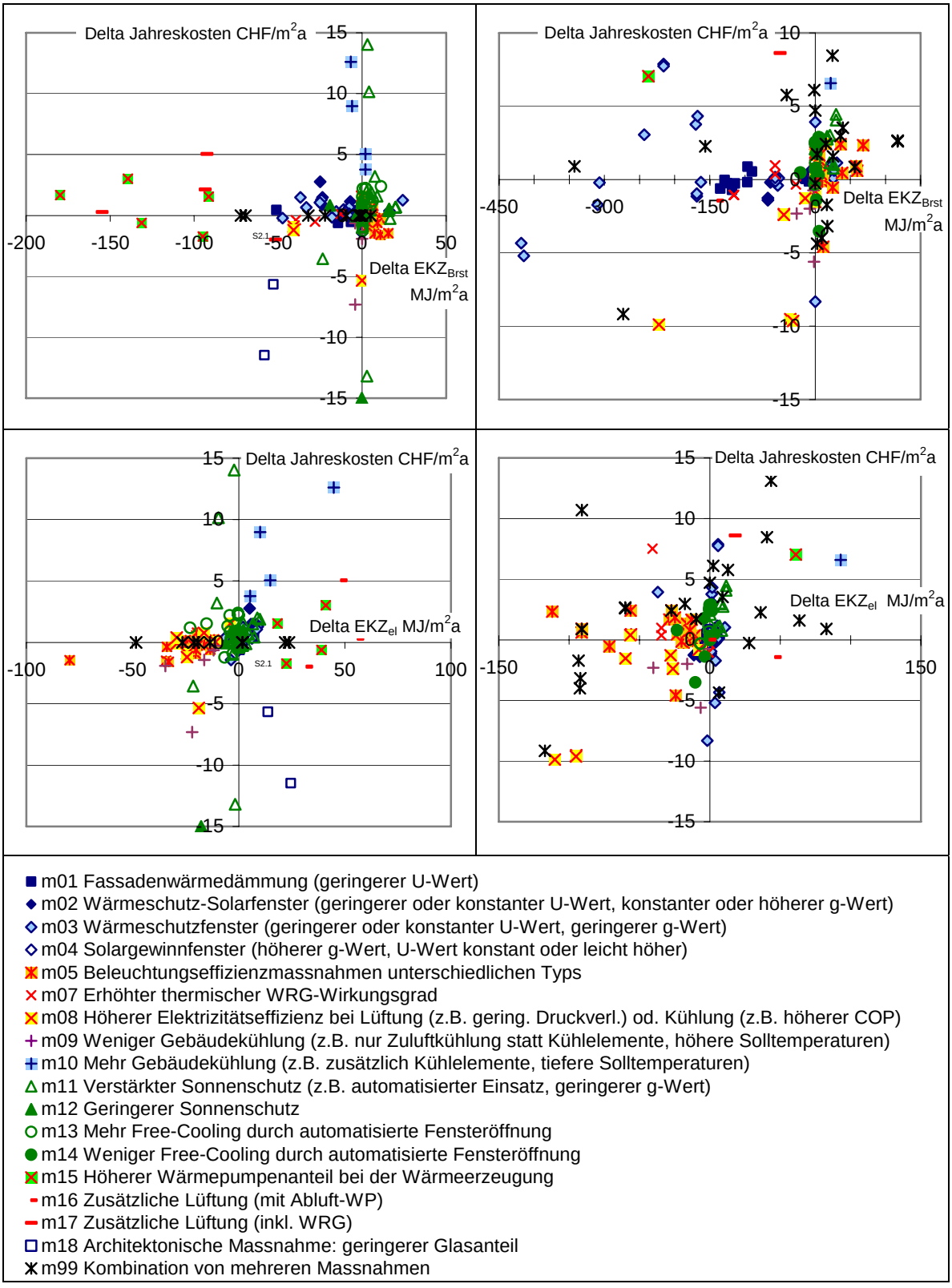


Abbildung Z.7 Mehr- und Minderjahreskosten der Massnahmen als Funktion ihrer energetischen Wirkung (Delta Energiekennzahl Brennstoffe, obere Diagramme bzw. Delta Energiekennzahl Elektrizität, untere Diagramme) im Bereich Neubau (links) und Gebäudeerneuerung (rechts).

- Teilweise sind relative grosse Reduktionen der gesamten Jahreskosten zu verzeichnen, insbesondere Betriebsoptimierungsmassnahmen (BO). Die Jahreskostenreduktionen von BO-Massnahmen können v.a. im Gebäudebestand besonders gross ausfallen (1 bis ca. 15 CHF/m^2a, in Einzelfällen über 20 CHF/m^2a), sind aber auch im Neubau nicht zu vernachlässigen (bis zu 5 CHF/m^2a).
- Einige Heizwärmebedarfsreduktionsmassnahmen sind mit einer deutlicheren Erhöhung der Jahreskosten verbunden. Verursacht werden diese entweder durch Wärmepumpen, welche fossile Heizanlagen ersetzen (bis +4 CHF/m^2a, wobei anzufügen ist, dass bei WP auch Netto-Jahreskostenreduktionen möglich sind), Abluft-Systeme mit WP oder durch Lüftungsanlagen (5 bis 10 CHF/m^2a). An dieser Stelle ist anzumerken, dass der primäre Zweck von Lüftungsanlagen im Bereitstellen von guter Luftqualität (geringe Konzentrationen an CO_2 und Gerüchen) besteht und die Heizwärmebedarfsreduktion als Zusatznutzen anzusehen ist.
- Bei einigen Kostensprüngen sind keine wesentlichen Veränderungen im Brennstoffbedarf festzustellen. Dabei handelt es sich um Elektrizitäts- und Komfortmassnahmen.

Ähnliche Aussagen können zum Zusammenhang zwischen dem spezifischen Elektrizitätsbedarf und den Jahreskosten gemacht werden: Im Verlauf der zunehmenden Elektrizitätseffizienz (geringere EKZ_{el}) sind die gesamten Jahreskosten innerhalb eines bestimmten Gebäudetyps relativ konstant oder nur mit relativ geringen Kostensteigerungen verbunden (typischerweise 0 bis 2 CHF/m^2a). Im Vergleich zwischen den verschiedenen Gebäudetypen wird die EKZ_{el} ganz erheblich von der Annahme der internen Lasten durch Geräte beeinflusst (40 bzw. 120 MJ/m^2a). Zu beachten ist zudem, dass bei einigen Fällen mit geringem Elektrizitätsbedarf und geringen Kosten die thermischen Komfortanforderungen nicht eingehalten werden (Fälle ohne oder mit nur geringer Kühlung), d.h. für einen geringen Elektrizitätsbedarf und geringe Kosten sind Komforteinbussen (und eventuell Produktivitätsverluste) in Kauf zu nehmen. Ebenfalls zu höheren (und nicht geringeren) EKZ_{el} führen Brennstoffsubstitutionsmassnahmen wie WP oder Lüftungen mit WRG. Weitere Massnahmen führen zwar zu höheren oder geringeren Kosten, nicht aber zu substanziell unterschiedlichem Elektrizitätsbedarf. Dabei handelt es sich um Brennstoffeffizienzmassnahmen oder bereits weiter oben angesprochene grundsätzliche konzeptionelle Entscheide (z.B. Fassadentyp, Glasanteile).

Bei der Energie- und Komfortwirkung und den Kosten sind zwischen den einzelnen Massnahmentypen grosse Unterschiede festzustellen, wie die Übersichts-Tabelle Z.4 zeigt. Auch innerhalb eines Massnahmenbereichs ist die Variation beträchtlich, je nach betrachteter Massnahme und Referenzfall (Neubau, Erneuerung, Instandsetzung, laufende Kosten). Zum Verständnis: wirtschaftlich sind diejenigen Massnahmen, deren Nettokosten negativ sind oder deren spezifischen Bruttokosten unter dem gemittelten künftigen Brennstoff- bzw. Elektrizitätspreis liegen (gemittelt über die Lebensdauer der Massnahme). In den meisten Bereichen lassen sich zum Teil beträchtliche wirtschaftliche Energieeffizienzpotenziale identifizieren, v.a. im Re-Investitionszyklus und bei Neubauten. Bei den übrigen Massnahmen würden markant tiefere Netto-Kosten oder gar ebenfalls Netto-Nutzen resultieren, wenn auf der Nutzenseite nebst den geringeren Energiekosten auch die Komfortnutzen wirtschaftlich bewertet würden (siehe exemplarische Gegenüberstellung im nächsten Unterkapitel).

Wegen des Zielkonfliktes von Energieeffizienz und Komfort gibt es für die jeweiligen Gebäudetypen und für den Fall von Neubau und Erneuerung jeweils kosten- und energieeffiziente Bündel von Massnahmen, die wegen der Einhaltung der Komfortanforderungen eindeutig gegenüber anderen Massnahmenkombinationen vorzuziehen sind (vgl. Tabelle Z.5).

Massnahmen-bereich	Massnahmenbeschrieb	Geb.typ [1]	Elektrizität ΔEKZel MJ/m²EBFa	Wärme-Endenergie Brennstoffe, Fernw. Δ EKZBrst MJ/m²EBFa	Komfort; Anzahl Stunden mit Überhitzung (Südraum)	Referenz-fall [1]	Netto-Jahreskosten (CHF/m²a)	Referenz-fall [1]	Spezifische Brutto-kosten CHF /kWhbrst | /kWhel
Nutzung	Geringere Belegungsdichte				bis –200 h		+ 30 bis +40		
Architektur	Geringerer Fensteranteil (50 statt 80%)		+15 bis +25	-50 bis -60	nicht untersucht		-5 bis -8		
	Fassadentyp (Materialisierung)				nicht untersucht		-15 bis +20		Nicht anwendbar (n.a.)
Wärme-dämmungen	WD 0.3 W/m²K statt keine WD [2]	B	gering	-100 bis -150	+50 bis +200 h	LK: IS:	 -0.5 bis +1	LK: IS:	0.08 bis 0.2 | * 0.05 bis 0.15 | *
	WD 0.2 W/m²K statt 0.3 W/m²K	N, B	gering	-10 bis -25	bis + 50 h	SN, EE:		SN, EE:	0.08 bis 0.13 /
Fenster	Fenstersatz Ug=1.1 statt 2.2-3.0 W/m²K	B	-15 bis +12	-170 bis -400	Markante Verb. Winter; Überh. bis + 800 h	LK: IS:	+4 bis+8; +0 bis+5	LK: IS:	0.17 bis 0.17 |* 0.09 bis 0.18 |*
	3fach-Wärmeschutzfenster statt 2-fach	N, B	-12 bis +10	-10 bis -50	bis +130 h	SN; EE:	-1 bis +2	SN, EE:	0.03 bis 0.2 | * [3]
	Sonnenschutzfenster statt reiner WS	N, B	-0 bis -12	+10 bis +25	bis –120 h		+1 bis + 2.5		nicht berechnet (n.b.)
Beleuchtung	Erneuerung bestehende Beleuchtung inkl Präsenzmelder u./o. Tageslichtreg.	B	-40 bis -110	+20 bis +60	Verbess. Beleuchtungsergonomie; Überh. b. –200 h	LK; IH: IS:	+1 bis +3 -1 bis +1	LK/IH: IS:	* | -0.05 bis +0.5 * | -0.05 bis +0.2
	Energie-effizientere Beleuchtung inkl. R.	N	-20 bis -70	+10 bis + 30	*bis –100 h*		-0.2 bis +2.5		* / 0.13 bis 0.4
	Präsenzmelder u./o. Tageslichtregel.	N, B	-20 bis -50		*bis –100 h*	SN; EE:	-1 bis –0.2	SN, EE:	* | 0.06 bis 0.15
Lüftung	Betriebsoptimierungsmassnahmen	B, N	-30 bis -100 [4]	-50 bis -250 [4]	+ einige 10 h bei [9]	B: bis –10, N: bis -2			* | - .... bis 0.2
	Komplette Lüftungserneuerung	B	-70 bis -160 [4]	-60 bis -250 [4]	+ einige 10 h bei [9]	LK; IH:	-12 bis +1.5		
	Einbau Lüftung mit WRG / Abluft-WP [2]	B, N	+20 bis +40 / [5]	-50 bis –80	+ einige 10 h		+7.5 bis +9		0.17 bis 0.3 | *
	Höherer WRG-Wirkungsgrad	B, N	< +5	-40 bis -80, -15 bis -40	+ einige 10 h	Alle	-2.5 bis 0.5	SN, LK	*0.03* bis 0.1 / *
	Geringere Druckverluste (grössere LK)	B, N	-10 bis -15	k.A.	k.A.	SN, EE:	+0.5 bis +1	SN, EE	* | 0.3 bis 0.4
	Bedarfsgerechte Regelung (z.B. CO_2)	B, N	-10 bis -25	k.A.	nicht untersucht	SN, EE:	-1 bis –1.5	SN, EE	n.a. | -0.3 bis -0.2
Komfortkühlung	Einbau Kühlung mit Kühlelementen	B, N	+30 bis +60 [6])	+0 bis +10	bis –900 h (-1200h)		+10 bis +15		n.a. (Komfortmassnahme)
	Einbau Zuluftkühlung	B, N	+7 bis +20 [7]	+0 bis +10	bis –400 h		*+3* [8]		n.a. (Komfortmassnahme)
	Erneuerung Kälteanlage (Standard)	B	-10 bis -50 [9]	-50 bis +5 [9]	+ einige 10 h bei [9]	*LK: bis +7, EE:.....*			
	Effizientere Gebäudekühlung	N, B	-10 bis -80	k.A.					* | *<0.2*
	Fensterlüftungssystem	B, N	vernachlässigbar	+0 bis +10	bis –900 h		+ 5 bis +10		n.a. (Komfortmassnahme)
Sonnenschutz	Verstärkter Sonnenschutz		-20 bis +10	-25 bis +20	bis –200 h		-1 bis +3		n.b.
Interne Lasten	Effizientere Geräte	B, N	-40 bis -80	+10 bis +40	bis –200 h		Nicht untersucht		Nicht untersucht
Wärmeerzeu-gung	WP statt fossile Heizung	B, N	+30 bis + 80	-100%	k.A.		-0.5 bis +1		
	Holz statt fossile Heizung	B, N	vernachlässigbar	Erneuerbar statt fossil	k.A.		+1 bis +2		

[1] B: Gebäudebestand, N: Neubau, SN: Standardneubau, LK: laufende Kosten, IS: Instandsetzung , EE: energetische Erneuerung [2] WD: Wärmedämmung, WRG: Wärmerückgewinnung
[3] in Einzelfällen bis 0.3 CHF/kWh (gilt auch für Rahmenverbesserungen) [4]Je nach Ausgangslage -einige 100 MJ/m²a [5] bzw. 50% davon bei effizienten Anlagen
[6] bei effizienten Lösungen 20 MJel/m²a, bei hohen Glasanteilen bis 120 MJel/m²a [7] ohne Luftförderung [8] bei vorhandener Lüftung [9] inkl. Reduktion Luftwechselraten

Tabelle Z.4 Übersicht über die energetische Wirkung, die Komfortveränderungen und die Kosten der verschiedenen Massnahmentypen (Quelle CEPE at al).

	Wichtige Planungs- und Investitionsregel (Auswahl)
Neubau und Gebäude-bestand	- Wärmedämmungen und Wärmeschutzfenster und -verglasungen sind zentrale Elemente für energie-effiziente Gebäude. Die entsprechenden Massnahmen sind – bei Annahme heutiger Energiepreise – meist rentabel (insbesondere im Vergleich zu nicht-energetischen Instandsetzungen) oder mit nur geringen Mehrkosten verbunden (weniger als 1 bis 2 CHF/m^{2}a bei Wärmedämmungen bis zu U-Werten von 0.2 W/m^{2}K bzw. Dämmstärken von 20 cm und bis zu Ug von 0.5 W/m^{2}K.). - Solargewinnfenster mit höherem g-Wert (im Vergleich zum Standard bei jeweiligem Glas-U-Wert) mit dem Ziel, die solaren Gewinne während der Heizperiode zu erhöhen, sind im Bürobereich nicht ratsam, denn sie erhöhen die Überhitzungsgefahr im Sommerhalbjahr. - Sonnenschutzfenster (mit tiefem g-Wert) verbessern zwar den sommerlichen Komfort, erhöhen jedoch netto den Wärmebedarf (bei gleichem Sonnenschutzeinsatzregime) *und* den Strombedarf, auch bei gekühlten Gebäuden (mehr Beleuchtung bei geregelter Beleuchtung). - Energie-effiziente Beleuchtungen und Beleuchtungsregelungen sind ein zentrales Element für energie-effiziente und thermisch komfortable Gebäude. Die entsprechenden Massnahmen sind meist rentabel oder mit nur geringen Mehrkosten von typischerweise 0 bis 2 CHF/m^{2}a verbunden (insbesondere bei Einbezug der Wartungskosten von alten Beleuchtungen im Bestand). - Je höher die (nicht mehr verminderbaren) internen Wärmelasten, desto notwendiger wird der Einsatz einer aktiven Kühlung, um insbesondere ausserhalb der Heizperiode das erforderliche Komfort-Niveau halten zu können. Aktive Kühlung ist mit Mehrkosten von bis zu 10 CHF/m^{2}a verbunden. Bei Einsatz von Kältemaschinen sind Anlagen möglichst effizient zu konzipieren (z.B. geringer Temperaturhub zwischen Kühlwasser und Rückkühlung, Nutzung von „freier Kälte"), was rentabel oder zu geringen Mehrkosten realisiert werden kann (0 bis 2 CHF/m^{2}a). - Der Einbau einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung (WRG) ist aus Komfortgründen bei dichter Belegung und eingeschränkter Möglichkeit der Fensterlüftung angezeigt, macht jedoch aus Gründen der Energieeffizienz allein keinen ökonomischen Sinn (deutlich über den Wärmegestehungskosten liegende Grenzkosten): durch die WRG (auch mit Abluft-Wärmepumpe) kann zwar der Heizwärmebedarf netto vermindert werden, aber weniger stark als erwartet, weil auch der bedarfsgerechte Luftwechsel meistens höher als bei typischer (wenn auch meist aus lufthygienischer Sicht ungenügender) Fensterlüftung. Typische Kosten: bis zu 10 CHF/m^{2}a. - Bei vorhandenen oder aus lufthygienischer Sicht erforderlichen Lüftungsanlagen ist auf möglichst geringe Druckverluste (ein Mass für den Elektrizitätsbedarf für die Luftförderung), d.h. auf geringe Luftgeschwindigkeiten und hocheffiziente Ventilatoren und Elektromotoren zu achten. Wärmerückgewinnungs-Anlagen mit hohem Wirkungsgrad (über 85%) sind rentabel. - Eine automatisierte Fensteröffnung oder Brüstungsgeräte mit Nachströmöffnungen ermöglichen deutliche Komfortverbesserungen (ohne den Einsatz von Lüftungs- oder Kühlanlagen). Denn abgesehen von wenigen Spitzentagen im Jahr ist die Aussenluft kühler als die Raumtemperatur (Jahreskosten der Massnahme bis zu 8 CHF/m^{2}a). - Bei Gebäuden mit komplexen oder denkmalgeschützten Fassaden sind Wärmepumpen energetisch und technisch sinnvolle Lösungen, um Brennstoffe zu Heizzwecken zu substituieren. Höhere Investitionskosten können jedoch bei effizienten Anlagen oder bei der Nutzung von Synergien mit der Gebäudekühlung durch günstigere Energie- und Betriebskosten amortisiert werden.
Gebäude-bestand	- Bei hohen internen Lasten von Gebäuden ohne aktive Kühlung verschärft Wärmeschutz die sommerliche Überhitzung, v.a. bei bereits vor der Massnahme beobachteten kritischen Situationen sommerlicher Überhitzung, so dass kompensatorische Massnahmen zu ergreifen sind.
Neubau	- Eine dichte Personenbelegung und eine damit meist verbundene hohe Gerätedichte führen zu hohen internen Wärmelasten. Ohne aktive Kühlung (Kühldecken, Umluftkühler, TABS, Zuluftkühlung, evtl. Nachtauskühlung) lassen sich die Anforderungen an den sommerlichen Komfort kaum einhalten, selbst bei Gebäuden mit geringen Glasanteilen, energie-effizienter Beleuchtung und sehr gutem Sonnenschutz.

Tabelle Z.5 Planungs- und Investitionsregeln zur Minimierung des Zielkonflikts Raum-Komfort und Energieeffizienz in Wirtschaftsgebäuden (Quelle CEPE et al.)

Fazit: Energie-effiziente Lösungen im Neubau oder energetische Erneuerungen von Anlagen und Gebäudehülle im Gebäudebestand sind bei adäquaten methodischem Ansatz entweder rentabel oder mit geringen Mehrkosten verbunden (0 bis wenige CHF/m^{2}a). Weit grössere Auswirkungen auf die (brutto) Jahresenergiekosten haben Komfort-Anforderungen oder Zusatznutzen erzeugende Installationen (aktive Kühlung, Lüftung) oder grundsätzliche architektonische Entscheide (Fassadentyp, Platzierung des Sonnenschutzes, innenarchitektonisches Design). Diese betragen 10 bis einige wenige 10 CHF/m^{2}a. Zum Vergleich: die jährlichen Vollkosten der energierelevanten Bauteile und Anlagen betragen bei Wirtschaftsgebäuden 50 bis 100 CHF/m^2 , die Gebäudenebenkosten 300 bis 400 CHF/m^2 und die Personalkosten etwa 5000 bis 10000 CHF/m^2. Wenn die Produktivität der Beschäftigten nur um wenige Promille durch überhitzte oder unterkühlte Räume leidet, wird sich jede Wärmeschutzmassnahme oder energietechnische Massnahme am Erhalt der Produktivität orientieren müssen. Dieses Faktum der sehr grossen Zusatz-Nutzen energietechnischer Massnahmen in Wirtschaftsgebäuden wird derzeit weitgehend übersehen, vielleicht nicht zuletzt deshalb, weil die produktivitätsverändernden Effekte unangenehmer Raumtemperaturen und Zuglufterscheinungen weitgehend unbekannt sind und in der ökonomischen Bewertung bisher kaum Eingang gefunden haben.

Erhebung der technischen Kennwerte und der spezifischen Kosten

Im Rahmen dieses Projekts wurden umfangreiche Kostenerhebungen durchgeführt und spezifische Kostenkennwerte erarbeitet (siehe Kap. 4). Diese Kennwerte bilden die Grundlage für die nachfolgenden Kosten-Nutzen-Rechnungen, können aber auch von Dritten für Variantenstudien und grundsätzliche Kosten-Nutzen-Überlegungen verwendet werden. Auf die Kennwerte im Einzelnen wird an dieser Stelle nicht eingegangen, denn diese Kennwerte erlangen ihre inhaltliche Bedeutung erst bei ihrer Anwendung im Einzelfall oder bei Kosten-Nutzenüberlegungen (siehe unten).

Die Kostenkennwerte beziehen sich auf jeweils adäquate Bezugsgrössen, so dass sie für eine grosse Vielfalt von Gebäuden angewendet werden können. Diese Grössen sind typischerweise Flächenmasse, Anlagen- oder Bedarfsleistungen, Luftvolumenströme etc. Bei den meisten Kostenkennwerten wird im Hinblick auf den Grenzkostenansatz zwischen verschiedenen energetischen Qualitätsverläufen oder -stufen unterschieden (z.B. Kosten als Funktion des U-Wertes, des Nutzungsgrades und weiteren Energieeffizienzmassen). Bei einigen Kostenelementen stehen Grenzkostenbetrachtungen eher zwischen verschiedenen Kostenelementen im Vordergrund als innerhalb eines selben Kostenelements (z.B. WP statt fossile Heizung). Die Kostenkennwerte umfassen sowohl investive Elemente wie auch Instandhaltungs- und Unterhaltsmassnahmen sowie Betriebsoptimierungsmassnahmen. In den meisten Fällen sind energie-effizientere Varianten derselben Energiedienstleistung mit höheren (Initial-)kosten verbunden. Inwieweit diese durch geringere laufende Kosten, insbesondere Energiekosten, wieder wettgemacht werden können, ist Gegenstand von Kap. 5 und Kap. 6.

Die Kostenerhebungen und die Erarbeitung der Kostenkennwerte sind nicht nur zur ökonomischen Bewertung der Energieeffizienzmassnahmen an Wirtschaftsgebäuden von Interesse, sondern sie sind auch aufschlussreich für bestehende Entscheidungsprozesse und Markunvollkommenheiten:

- Die beim Bau von neuen Gebäuden und bei der Instandsetzung und Erneuerung des Gebäudebestandes involvierten Planer und Gewerke arbeiten meist sehr arbeitsteilig und ohne Integrationsversuche.
- Obwohl eine Hemmnisanalyse nicht explizites Untersuchungsziel der vorliegenden Studie war, haben die Kostenerhebungen gezeigt, dass sowohl die Arbeitsteilung sowie die Kleinstruktur der beteiligten Unternehmen für die Energie-Effizienz ein system-immanentes Hemmnis darstellt. Die Arbeitsteilung führt dazu, die anzubietenden Leistungen mit möglichst geringen Investitionskosten zu erbringen. Das Prinzip der Investitionskostenminimierung steht aber dem Lebenszykluskostenansatz und damit energie-effizienten Optionen entgegen, denn diese haben in der Regel höhere Investitionskosten.

- Die Arbeitsteilung bei den einzelnen Gewerken führt auch zu vielen Schnittstellen. Dies führt für die Bauträger beim Anstreben von energie-effizienten Lösungen zu hohen Informations- und Suchkosten. Die Arbeitsteilung und die Schnittstellen vermindern die Kostentransparenz, erschweren die Vergleichbarkeit von verschiedenen Investitionsoptionen infolge der unterschiedlichen Abgrenzungen und der oft nicht vernachlässigbaren sogenannten „bauseitigen" Kosten und verhindern Erneuerungs-Investitionen, die mit modernsten Vermessungs- und Planungsmethoden bis zu 30 % kostengünstiger erstellt werden könnten (Jochem u.a. 2005, S. 105–113).
- Bei manchen Massnahmen handelt es sich um kombinierte Energie- und Komfortmassnahmen oder um alleinige Komfortmassnahmen. Einige andere Massnahmen wie z.B. Lüftungsanlagen verändern gleichzeitig Energiebedarf und Komfort (Luftqualität, thermisch), was Kosten-Nutzen-Analysen aufwändig werden lässt oder wegen fehlender Grundlagen gar verunmöglicht.
- Die (ökonomischen) Auswirkungen von konstant frischer Luft und einer angenehmen Raumtemperatur auf die Produktivität der in den Wirtschaftsgebäuden arbeitenden Menschen sind weitgehend unbekannt und deshalb in der ökonomischen Bewertung energietechnischer Investitionen und organisatorischer Massnahmen derzeit noch ausgeschlossen.

Einer weitergehenden Energieeffizienz stehen also in erheblichem Umfang strukturelle und marktorganisatorische Hemmnisse im Weg. Diese sind zielgruppenspezifisch unterschiedlich.

Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Inhaltliche Schlussfolgerungen

Die inhaltlichen Schlussfolgerungen werden insbesondere unter dem Zielkonflikt von Energieeffizienz und Komfort/Produktivität für die Wirtschaftsgebäude gezogen. Auf die Bewertung der investitionsbezogenen Lösungen wurde bereits in den oberen Abschnitten weitgehend eingegangen. Herausgestellt seien hier nochmals folgende Ergebnisse unter energie- und klimapolitischen Gesichtspunkten:

(1) Bei Wirtschaftsgebäuden können sowohl im *Gebäudebestand wie im Neubaufall* Komfortniveau, Brennstoffbedarf und *gebäudebezogener* Elektrizitätsbedarf durch geeignete Massnahmen erheblich verbessert bzw. vermindert werden. Um den *gesamten* Strombedarf markant zu reduzieren, wäre auch der Elektrizitätsbedarf der Bürogeräte (Informations- und Kommunikationstechnologien, IKT), der oft einen hohen Anteil des Strombedarfs und der internen Lasten darstellt, mit in die Massnahmen einzubeziehen.

(2) Im *Gebäudebestand* hängen die Wirtschaftlichkeit von gebäude- und anlagenbezogenen Massnahmen nicht nur von den Kosten der Massnahmen und ihrer energetischen Wirkung ab, sondern erheblich auch von der *Ausgangslage und der Kosten-Vergleichsbasis* ab. Die nicht selten verwendete Vergleichsbasis der laufenden (Energie-)Kosten mag die geringen Erneuerungsraten mit erklären, ist jedoch nicht sachgerecht, weil durch die investiven Massnahmen neue Sachwerte für die Gebäudebewertung (und die Produktivität der dort Arbeitenden) geschaffen werden. Wenngleich die ökonomische Bezugsbasis von zwei Fällen, die "Instandsetzung" oder "energetische Standard-Erneuerung" aufwändig zu definieren ist, ist das Vorgehen als Vergleichsbasis sachlich angemessen. Beide Fälle führen zur Identifikation rentabler Investitionsoptionen bzw. Investitionsbündeln.

(3) Die vielfach für die Investitionsentscheide allein verwendete und häufig relativ kurze geforderte Amortisationszeit (Payback-Zeit) ist ein Risikomass für den Rückfluss des eingesetzten Kapitals; sie sagt nichts zur Rentabilität der betrachteten Investitionsmassnahmen aus, die insbesondere bei den involvierten langen Nutzungszeiten (15 bis 50 Jahre) von höchster Bedeutung ist (z.B. Dach- oder Fassadenwärmedämmung, hoch effiziente Elektromotoren, Ventilatoren, Kompressoren und Anlagenkonzepte, Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung, kombinierte Kälte- und Wärmeerzeugung). Hier bedarf es dringend einer intensiven Aufklärung bei allen Investorengruppen von Wirtschaftsgebäuden, will man erhebliche Fehlentwicklungen unter klimapolitischen Gesichts-

punkten wegen der langen Nutzungszeiten vermeiden. Es handelt sich hier um einen klassischen Fall von „stranded investments" in den nächsten Dekaden.

(4) Bei *energiewirtschaftlichen Analysen* hatte man bisher eine Differenzierung der Kosten- und Energieeffizienzdaten wie hierbei vorliegend nicht zur Verfügung und der Konflikt zwischen Energieeffizienz und Komfort/Produktivität der Beschäftigten in den Wirtschaftsgebäuden war in der Stringenz der vorliegenden Analyse nicht aufgegriffen. Die nunmehr verfügbaren Grundlagen zur Substitutionswirkung zwischen Wärme- und Strombedarf (sehr unterschiedlich zwischen verschiedenen Massnahmetypen) war nicht empirisch fundiert, und die Differenz zwischen Instandsetzung und rentabler Re-Investition auf den neuen technischen Stand kennzeichnet jene unausgeschöpften Effizienzpotenziale (die "low hanging fruits"), die bisher überwiegend als Ergebnis von erfahrungsbasierten Schätzungen in den energiewirtschaftlichen bottom-up-Modellen quantifiziert wurden.

(5) Wegen der Fülle der unterschiedlichen Merkmale und Anforderungen der Wirtschaftsgebäude ist die Ermittlung der Grenzkosten für energiewirtschaftliche Analysezwecke komplex und wegen hoher Sensitivitäten auch nicht einfach zu realisieren; sie macht Vereinfachungen notwendig. Die hier vorgenommene Klassifizierung ist ein erster grosser Schritt, den unterschiedlichen Gegebenheiten angemessener als bisher Rechnung zu tragen.

Empfehlungen für Wirtschaft, Intermediäre, Politik und Verwaltung

Eine vertiefte Hemmnis- und Politikanalyse war nicht zentraler Gegenstand der vorliegenden Untersuchung. Dennoch waren die Arbeiten indirekt eine Auseinandersetzung mit dem Innovationsgeschehen im Bereich der Wirtschaftsgebäude mit ihren verschiedenen Gruppen der Nutzer und Investoren, der Planer und Baugewerke; sie erbrachten Hinweise für Empfehlungen der energie- und innovationspolitischen Akteure sowie der Gebäudebesitzer, die alle Wirtschaftssektoren einschliesslich der öffentlichen Hand umfassen:

(1) Eine *mangelhafte Kenntnis* auf Seiten der Investoren, Planer und Baugewerke über die rentablen Investitionsmöglichkeiten sowie das hohe Mass an Arbeitsteilung auf Seite der Bauleistungsanbieter führt häufig zu hohen Such- und Informationskosten; die mehrstufigen Entscheidungsprozesse (firmenintern und -übergreifend) mit dem fragwürdigen Entscheidungskriterium der tiefen Investitionskosten oder der kurzen Amortisations-Zeiten auch zur Resignation der Energieverantwortlichen. Ein Abbau der Informationsasymmetrie, die Erhöhung der Markttransparenz und die Verminderung der Transaktionskosten erfordern mehr

- Initial- und Umsetzungsberatungen für Immobilienbesitzer (finanziell und ideell gestützt),
- *gezielte Mess- und Informationskampagnen seitens der Technologiehersteller für Planer und Technologienutzer* (wie dies z.B. bei der Druckluft derzeit (2006) der Fall ist), insbesondere zu hocheffizienter Beleuchtung, hocheffizienten Elektromotoren, Lüftungsanlagen, Gebäudekühlung und Kälteanlagen, Pumpen und Anlagenkonzepte sowie integrierte Planung, Betriebsoptimierungs-Massnahmen und Gebäudemanagement.
- als Ergänzung/Alternative zu *klassischen* Aus- und beruflichen Weiterbildungsangeboten *ein Ausbau der örtlichen, lernenden Netzwerke* (wie Energiemodell von EnergieSchweiz bzw. der EnAW und das Programm energho) für Immobiliengesellschaften und Besitzer von Wirtschaftsgebäuden (Anschubfinanzierung empfehlenswert, Instrument erreicht einen um den Faktor 10 höheren Multiplikatoreffekt gegenüber einer Initialberatung).
- Umsetzung des Ge*bäudepasses auch in der Schweiz*, der aufgrund der EU-Richtlinie in den Mitgliedsstaaten umgesetzt wird.

Diese Verbesserungsmassnahmen zur Erhöhung der Markttransparenz müssten von der Verwaltung auf Bundes- und Kantonsebene initiiert und in Zusammenarbeit mit den Intermediären der Immobilienwirtschaft und den Planungs- und Gebäudetechnikbranchen umgesetzt werden.

(2) *Marketing:* Auch den Energieeffizienz-Anbietern, d.h. den Planern und Technologie-Lieferanten, ist bewusst zu machen, dass sie Erlebniswerte, gesundere Lebensformen, Komfort, Produktivität der Nutzer der Wirtschaftsgebäude und soziales Prestige mit ihren technischen Lösungen ermöglichen. Damit einhergehen müssen auch die Botschaften des ökonomischen Nutzens der Co-Benefits (z.B. auch mehr Komfort, verbesserte Ergonomie bei Beleuchtungen, bessere Arbeits- und Kapitalproduktivität, Schallschutz, Einbruchschutz, geringere Leerstände, bessere Bonität wegen des Abkommens Basel II).

(3) Die *Rolle der Intermediäre* wird zuweilen unterschätzt, insbesondere dann, wenn Normengebung oder Standardisierung die Transaktionskosten reduzieren oder die Ausbildung bzw. die berufliche Fortbildung das Hemmnis erheblicher Kenntnismängel beseitigen. Deshalb werden Empfehlungen zu Normen, Standards und Benchmarks gemacht.

- Normen, Standards und Benchmarks (z.B. Normen wie SIA 380/4 oder SIA 382/1) bieten Entscheidungshilfen im technischen Bereich, besonders weil sie zwischen Standardlösungen und zielorientierten Effizienzlösungen unterscheiden. Normen und Benchmarks sollten sowohl auf der Systemebene ansetzen (gesamter jährlicher Energiebedarf sowie spezifische Energiekosten je m^2 und Jahr) wie auch auf der Ebene der Einzelkomponenten (letzteres, um den gegebenen Marktstrukturen mit hoher Arbeitsteilung und Spezialisierung und klein strukturierten Unternehmen Rechnung zu tragen).
- Normen und Empfehlungen dienen letztlich als Grundlage für Vorschriften, die gesamtschweizerisch und zunehmend international koordiniert sein sollten. Bei den technischen Produkten könnten Benchmarks und Standards Exportvorteile erbringen.
- Normen und Empfehlungen (z.B. zu Grenz- und Zielwerten) dienen den Fachleuten in der Praxis als Orientierungshilfe, Planungsgrundlage und Basis für zivilrechtliche Verträge zwischen Bauträgern und Bauleistungserbringern; die Normen und Empfehlungen müssen nicht in vollem Umfang gesetzgeberisch verankert sein, sondern können in *relativ einfach handhabbare Planungshilfen und Tools* umgesetzt sein.
- Die Entwicklung *integrierter Benchmarks* und *integrierende Planungswerkzeuge*, auf welche sowohl Architekten, technisch orientierte Planer und Kostenplaner gemeinsam zugreifen.

Das weitgehend privatrechtlich organisierte Normenwesen sollte deshalb von staatlicher Seite mindestens wie bisher gestützt werden.

(4) Neben den mangelhaften Kenntnissen besteht ein Defizit an *Arbeitsunterlagen und rechnergestützten Tools*, welche die wesentlichen Kosten-Nutzen-Relationen ermitteln und Optimierungsansätze häufig erst ermöglichen. *Aus- und Weiterbildungsangebote* – sowohl mehrjährig und intensiv wie auch mit geringem Aufwand zu absolvierende Weiterbildungskurse –, Bereitstellen von *spezifischen Fachpublikationen* (wie z.B. das frühere Programm RAVEL) mit fachlich-technischen Inhalten und wirtschaftlichen Aspekte (Lebenszykluskosten- und Kosten-Nutzen-Betrachtungen) als auch A*rbeitsinstrumente und rechnergestützte Tools* werden empfohlen.

(5) Weiter zu entwickeln sind technische Standards und Tools für intelligente dynamisierte Steuerungen und Regelung von Wirtschaftsgebäuden, z.B. CO_2-konzentrationsgeführte Lüftung, übergreifende dynamische und antizipierende Optimierungen von Heiz-, Kühl- und Beleuchtungsbedarf unter Nutzung von Nutzungszeiten, Benutzerverhalten und Wettervorhersagen).

(6) Wenngleich in allen dieser empfohlenen Aktivitäten die Selbstorganisationen der Wirtschaft und einzelne Unternehmungen die Initiative und die Hauptverantwortung übernehmen sollten, so mag eine öffentliche finanzielle und ideelle Unterstützung seitens des Bundes, der Kantone oder grösserer Gemeinden sehr förderlich sein, weil die jeweiligen Aktivitäten ein öffentliches Gut darstellen oder gesamtgesellschaftliche Vorteile mit sich bringen (Beschäftigung, verbesserte Exportpotenziale, ökonomische Effizienz).

(7) Unter diesem Gesichtspunkt, aber auch aus Sicht eines least cost plannings der künftigen Energiebeschaffung, rechtfertigen sich auch anreizorientierte Preismodelle der sich weitgehend im öf-

fentlichen Besitz befindenden Elektrizitätsversorgungsunternehmen (z.B. an Zielvereinbarungen gebundene Preisnachlässe, vgl. EWZ u.a.).

(8) Technische und bauliche Vorschriften haben sich im Gebäudebereich, insbesondere beim Neubau, als effizientes und effektives Instrument erwiesen. Indirekt entfalten Vorschriften im Neubaubereich auch eine nicht zu vernachlässigende Wirkung im Gebäudebestand, indem der induzierte technische Fortschritt auch bei Gebäude- und Anlagenerneuerungen zum Tragen kommt. Im Vergleich zu Vorschriften im Wärmeschutz besteht bei der gebäudebezogenen Elektrizität ein Nachholbedarf bzgl. verbindlichen Anforderungen. Denkbar sind solche Anforderungen im Bereich Beleuchtung, Lüftung und Kühlung.

(9) Die erwähnten Anforderungen sind so auszugestalten, dass sie eine relevante Wirkung erzeugen, für Vollzugsorgane und Planende einfach anzuwenden sind und eine hohe Planungsflexibilität aufweisen. Realisiert werden könnte dies über eine duale Vorgehensweise, wobei einerseits Vorgaben zu spezifischen installierten Leistungen gemacht werden und zum anderen – bei Überschreiten dieser Vorgaben – Bedarfsnachweis, Bewilligungs- oder Erneuerungspflicht zur Anwendung kommen (vgl. SIA 382/1 und Vorgehen Kanton ZH bei Klima/Lüftung, Modul 8 der MuKEn im Bereich Grossverbraucher, Kanton GE im Zusammenhang mit der Verbrauchserhebung/VHKA-Befreiung sowie die Pflicht zu Energiekonzepten). Diese Aspekte sind möglichst schweizweit zu koordinieren, um Skaleneffekte bei Fortbildung und Kosten zu erreichen.

(10) Die öffentliche Hand (Bund, Kantone, Gemeinden) haben einen erheblichen Teil des Bestandes der Wirtschaftgebäude in ihrem eigenen Besitz. Es wäre zu erwägen, ob nicht gezielte Demonstrationsvorhaben bei der Gebäudesanierung für bestimmte Gebäudetypen (z.B. Schulen, Bürogebäude, Spitäler) in jedem Kanton eine notwendige Voraussetzung als *Beispiel der öffentlichen Hand* durchgeführt werden müssten, um die grossen Anforderungen der Energie- und Klimapolitik glaubwürdig politisch vertreten zu können.

(11) Wegen der *absehbaren Klimaerwärmung in der Schweiz binnen der kommenden drei bis fünf Jahrzehnte,* steigenden thermischen Lasten (Büroautomation, dichtere Belegung) und zunehmendem Wärmeschutz im Bestand werden Lüftung und Kühlung von Wirtschaftsgebäuden zunehmend an Bedeutung erlangen. Diese Entwicklung sollte mehr bei Neubauten und Re-Investitionen in Gebäudetechnik beachtet werden, um unnötige Nachinvestitionen oder unnötig hohe Elektrizitätskosten zu vermeiden. Überhitzungsschutz (geringe interne Lasten, u.a. durch hocheffiziente Beleuchtung, moderate Glasflächen, Sonnenschutz und adäquate Regelstrategien) sowie bedarfsgeführte und hocheffiziente Gebäudekühlung unter Nutzung der thermodynamischen Möglichkeiten (dynamische und geringe Temperaturdifferenzen, Nutzung der freien Kälte der Luft und von Erdsonden) sind auf allen Ebenen zu fördern.

(12) Da die Büroautomation zu einem ganz erheblichen Anteil zu den internen Lasten und zum Strombedarf in den Wirtschaftgebäuden beiträgt, liegt es nahe, hier mehr als bisher auf Möglichkeiten der höheren Stromeffizienz zu achten. Infolge der globalisierten Märkte ist dies in den geeigneten Gruppen der IEA und der EU intensiver zu thematisieren.

(13) Aufgabe von Forschung und Entwicklung sollte es sein, die Zusammenhänge zwischen Wärmeschutz, internen Lasten, Gebäudetechnik, Komfortnutzen und kostengünstigen Lösungen, die in dieser Arbeit mit aufwändigen Simulationsrechnungen erstellt wurden, in einfache, schnell rechnende Planungswerkzeuge umzugiessen.

(14) Aufgreifen der hier erarbeiteten Ergebnisse in vorhandene energiewirtschaftliche Modelle zur Projektion des zukünftigen Energiebedarfs (insbesondere den Komfortaspekt bei steigenden internen Wärmelasten durch Büroautomation, die tendenziell steigenden Aussentemperaturen (Klimawandel) und die zunehmenden Komfortansprüche von Gebäudenutzern und gewünschte Produktivitätsfortschritte privater und öffentlicher Arbeitgeber).

1 Einführung, Problemstellung und Methodisches Vorgehen

1.1 Ausgangslage und Problemstellung

In der Schweiz liegen grosse Energieeffizienzpotenziale u. a. in der Verminderung des Energiebedarfs im Gebäudebereich. Während für die Wohngebäude durch jüngste Untersuchungen der Stand der Kenntnisse zu den Potenzialen, Kosten und begleitenden Nutzen in der Schweiz vergleichsweise differenziert und informativ ist (Jakob u.a. 2002, Jakob 2003), sind die Informationen für Gebäude im Dienstleistungs-, Gewerbe- und Industriebereich noch sehr gering bzw. veraltet (Basler und Hofmann, 1992). Die Potenziale rationeller Energienutzung sind aber auch in diesem Gebäudebereich als ganz erheblich anzusehen. Denn rund 65 PJ (oder fast 90 % des Brennstoffbedarfs bzw. über 50 % des Endenergiebedarfs) des Dienstleistungssektors dienen der Raumheizung dieser Gebäude; im Industriesektor werden fast 30 PJ (d.h. rund 30 % des Brennstoffbedarfs oder 20 % des industriellen Endenergiebedarfs) für Raumwärme verwendet. Zudem hat bei den Wirtschaftsgebäuden der Stromverbrauch für Belüftung, Klimatisierung und Beleuchtung eine grosse Bedeutung, wobei auch hierbei grosse Effizienzpotenziale vorhanden sind, worauf beratende Ingenieure und Energie- und Baufachleute immer wieder hinweisen. Der Erschliessung dieser Potenziale kommt aus energiewirtschaftlicher und umweltpolitischer Sicht (hohe Erdölabhängigkeit, Energiepreisrisiken, CO_2-Gesetz, Kyoto-Protokoll, Luftschadstoffe etc.) künftig eine weiter zunehmende Bedeutung zu, und die Kenntnis des Kosten-Nutzenverlaufs wärme-energietechnischer Massnahmen bei den verschiedenen Gebäudetypen und -nutzungen ist deshalb wichtig. Hinzu kommt die Langfristigkeit der Erneuerungszyklen der Gebäudehülle, die angesichts der in 20 bis 30 Jahren absehbaren Preissteigerungen für Brennstoffe bei unzureichenden Wärmeschutzmassnahmen schnell zu Fehlinvestitionen (lost opportunities) führt.

Im Rahmen des EWG-Projektes „Grenzkosten bei forcierten Energie-Effizienzmassnahmen bei Wohngebäuden" hat das CEPE für Wohnbauten Analysen zu den Grenzkosten sowie Durchschnittskosten bei forcierten Energiesparmassnahmen im Wohnbaubereich (Neubauten, Erneuerungen) durchgeführt (Jakob, Jochem et al. 2002). Unter anderem zeigte sich, dass

- der Kostenverlauf als Funktion zunehmender Energie-Effizienz zunächst flach verläuft, dass aber zur Erreichung des Minergie-Standards oder des Minergie P-Standards mit gewissen Netto-Mehrkosten zu rechnen ist; d.h. nach Abzug von Minderkosten für den verringerten Energiebedarf.
- eine umfassende ökonomische Bewertung wichtig ist, um Investitionsentscheide sachgerecht zu unterstützen und energiewirtschaftliche Fehleinschätzungen zu vermeiden. Häufig werden lediglich die unmittelbaren Projekt-Kosten und energiebezogenen Nutzen betrachtet, nicht aber die zusätzlich anfallenden *Transaktionskosten* einerseits (Ostertag 2003) und monetarisierte begleitende Nutzen andererseits (Jochem 2001; Jochem and Madlener 2004; Ott et al., 2006).
- bei der *Anwendung von Best Practice Technologien* und Angeboten die direkten Mehrkosten markant gesenkt werden können. Und unter Berücksichtigung allfälliger künftiger Energiepreissteigerungen während der langen Erneuerungszyklen und von realisierbaren Zusatznutzen kann ein Teil der weitergehenden Wärmeschutz- und Energie-Effizienzmassnahmen im Wohnbaubereich als wirtschaftlich bezeichnet werden.

Die für den Wohngebäudebereich erarbeiteten Ergebnisse sind aus verschiedenen Gründen nur bedingt auf die *Gebäude des Dienstleistungs-, Gewerbe- und Industriesektors* übertragbar. Die Wirtschaftsbauten sind infolge ihrer sehr unterschiedlichen Funktionen als *wesentlich heterogener* zu betrachten. Dies drückt sich auch dadurch aus, dass der SIA für diesen Bereich 12 Gebäudekategorien unterscheidet. So kommen bei den Wirtschaftsbauten andere Bautechniken, gebäudetechnische Anlagetypen und Konstruktionsprinzipien zur Anwendung, und es bestehen andere Nutzungsanforderungen und bauphysikalische Verhältnisse (z.B. Flächen-Volumen-Proportionen, Ausstattung, Belegung, interne Lasten, erforderliche Luftwechsel, Optionen der Gebäudetechnik).

Bei den meisten Gebäudetypen der Wirtschaftsgebäude kommt zudem dem *sommerlichen Wärmeschutz (Überhitzungsschutz) und den Komfortaspekten* eine wesentliche grössere Bedeutung zu. Dies führt zu anderen energetischen Referenzwerten, zu vielfältigeren Massnahmemöglichkeiten und entsprechenden Interaktionen, insbesondere im Bereich des sommerlichen Wärmeschutzes und der Kühlung, Klimatisierung und Beleuchtung. Weiter unterscheiden sich die Wirtschaftsbauten auch bei den entscheidenden Parametern der Wirtschaftlichkeitsrechnungen (Lebensdauer geringer, Zinssätze höher im Bereich privater Gebäude) von denjenigen im Wohngebäudebereich. Dadurch sind qualitativ markant unterschiedliche Kosten-Nutzen-Verläufe zu erwarten. Zudem ist die ökonomische Bewertung der Zusatznutzen von grundsätzlich anderer Bedeutung: denn über ein verbessertes thermisches Innenraumklima, eine reduzierte Aussenlärmbelastung, eine erhöhte Luftqualität und eine gute Beleuchtungsqualität sind direkt zentrale Produktionsfaktoren wie die Arbeitsproduktivität, die Zufriedenheit der Mitarbeiter und Gebäudenutzer sowie von Kunden tangiert.

1.2 Zielsetzung

Aufgrund der oben geschilderten Ausgangslage soll auf empirischer Ebene geklärt werden, in welchem Masse die Anwendung weitergehender Wärmeschutz- und Energieeffizienz-Massnahmen sowie der Einsatz von erneuerbaren Energien netto zu Kosteneinsparungen bzw. netto zu Mehrkosten führen kann, und aufzuzeigen, inwiefern ein Einbezug von nicht-energetischen Zusatznutzen die Kosten-Nutzen-Relationen verschieben könnte. Im Einzelnen werden im Projekt folgende *Hauptziele* verfolgt:

- *Grenzkosten mit heutigem Kostenstand*: Die Grenz- und Durchschnittskosten für die Anwendung energieeffizienter Massnahmen (winterlicher und sommerlicher Wärmeschutz sowie Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik und Beleuchtung) sollen für die wichtigsten Kategorien von Wirtschaftsbauten auf eine aktuelle empirische Basis gestellt werden. Hierbei soll zwischen Neubau und Erneuerung unterschieden werden. Die Untersuchung wird auf der Ebene von Einzelkomponenten sowie für das Gebäude als Ganzes durchgeführt, d.h. für den Gesamtenergiebedarf inklusive Lüftung, Klimatisierung und Beleuchtung.
- *Good and best Practice*: Bei der Erhebung der Investitions- und sonstigen Betriebskosten soll sowohl auf die Streuung der Angaben verschiedener Bauleistungserbringer als auch auf die Werte von good and best practice Beispielen geachtet werden.
- *Zusatznutzen*: Für einige typische Fälle sollen die möglichen Zusatznutzen qualitativ und – so weit möglich – auch quantitativ (in Einzelfällen auch monetär) dargestellt werden. Als Mass dienen z.B. Aussagen zur Komfortveränderung beim Ergreifen von Energie-Effizienzmassnahmen.
- Als Projektergebnis sollen schliesslich *Handlungsempfehlungen zuhanden der relevanten Akteure* formuliert werden. Dazu gehören Investoren und Planer von Neubauten, Betreiber und Besitzer von bestehenden Gebäuden, Baubranche im Bereich der Gebäudehülle und der Haustechnik, Anwender im Bereich energiewirtschaftliche Forschung (insbesondere Energieperspektiven des BFE).

1.3 Methodisches Vorgehen im Überblick

Ausgangspunkt und Startbasis bilden in diesem Projekt das methodische Vorgehen aus dem Projekt „Grenzkosten bei forcierten Energie-Effizienzmassnahmen bei Wohngebäuden" (Jakob, Jochem et al. 2002) sowie Erkenntnisse aus diesem Projekt, welche teilweise genutzt werden können. Nebst diesen Parallelen wird das methodische Vorgehen dergestalt erweitert, dass den besonderen Verhältnissen im Bereich Wirtschaftsbauten Rechnung getragen wird. Das methodische Vorgehen umfasst folgende Eckpunkte:

- Ausgangspunkt für die Grenzkostenbetrachtung bilden Referenzfälle, welche vom gesetzlich vorgeschriebenen Baustandard (beim Neubau), vom heute üblicherweise anzutreffenden Zustand des

Gebäudebestandes (vor einer Erneuerung) und der heute üblichen Vorgehensweise bei Instandsetzungen und Erneuerungen ausgehen.

- Hierzu erfolgt eine Charakterisierung und Typisierung des Gebäudebestandes der Wirtschaftsbauten für den Dienstleistungs- und Industriesektor hinsichtlich gesamtschweizerischem Energiebedarf, Effizienzpotenzialen, Referenzsituationen und möglichen Massnahmetypen sowie Schwerpunktbildung nach Massgabe der Grösse der Einzelpotenziale (vgl. Kap. 2).
- Ermittlung der energetischen Wirkung der energie- und gebäudetechnischen Massnahmen sowie ihrer Auswirkungen auf den thermischen Komfort mittels dynamischem gebäudephysikalischem Simulationsprogramm (IDA – ICE, siehe EQUA Simulation AB, 2002).
- Elementspezifische Erhebung derjenigen Kostenelemente, welche nicht vom Wohngebäude-Grenzkostenprojekt übernommen werden können (z.B. Fensterflächen und Dächer von Dienstleistungs- und Fabrikationsgebäuden, Lüftungs- und klimatechnische Anlagen) sowie Darstellen der Brutto-Grenzkosten auf Bauteilebene (vgl. Kap.4).
- Jeweils für die relevanten Anlegetypen, Gebäudetechnikbereiche, Bauteile und Gebäudekategorien: Anwendung und Integration der spezifischen Kostenelemente und der energetischen Nutzen auf Gebäudeebene unter Berücksichtigung der sich ergebenden Interdependenzen, insbesondere zwischen winterlichem und sommerlichem Wärmeschutz bzw. zwischen Wärme- und Strombedarf (vgl. Kap. 5 und 6).

1.3.1 Gebäudekategorien

Im Gegensatz zu den Wohngebäuden ist der Bereich der Wirtschaftsbauten durch eine sehr viel grössere Heterogenität gekennzeichnet, und zwar hinsichtlich Flächenproportionen, interner Lasten und Ausgangslage bzgl. Luftwechselbedarf. Es ist deshalb zu erwarten, dass der Grenzkostenverlauf von vergleichbaren Massnahmen in verschiedenen Gebäudekategorien unterschiedlich sein kann, besonders wenn die Kostenkurven auf die Energiebezugsfläche (EBF) bezogen werden und interne Lasten zu berücksichtigen sind. Im Hinblick auf eine der wichtigen Anwendungen der Projektergebnisse wird bei der Kategorisierung der Gebäude auf die Energieperspektiven des BFE geachtet, wobei deren Grundlagendaten zum Mengengerüst bereits erste Hinweise auf eine mögliche Schwerpunktbildung innerhalb der Wirtschaftsbauten geben. Die grössten Flächenanteile haben im Bereiche der Dienstleistungssektoren die Bürogebäude (mit 16 %) und die Betriebsgebäude im Bereich der Industrie (20 %), siehe Tabelle 1. Auffallend ist auch der relativ hohe Anteil leer stehender Gebäude von 11 %.

Büro-gebäude	Schulen	Spitäler / Heime	Handel	Gast-gewerbe	sonstige Gebäude	Verkehrs-gebäude	Dienstleis-tungssektor
16%	10%	7%	8%	6%	12%	3%	62%
Bürogebäude		Betriebsgebäude		Leerstehende Gebäude			Industriesektor
5%		20%		11%			36%

Tabelle 1: Übersicht über die EBF-Anteile der Gebäudetypen der Wirtschaftsbauten (Industriesektor, Dienstleistungssektor, ohne landwirtschaftliche Gebäude). Quelle: Wüest und Partner, (Ex-Post Analysen BFE), Stand 2001

Zudem werden bei der Kategorisierung folgende weitere Punkte beachtet:

- Typische Flächenverhältnisse (hohe, mittlere und tiefe Glasanteile an der Fassadenfläche),
- Unterschiedliche Gebäudehüllentypen bzw. Gebäudekonzepte: Massiv- und Leichtbau,
- Natürlicher (manuelle Fensterlüftung) bzw. geregelter Luftwechsel, mit unterschiedlichen WRG-Jahresnutzungsgraden, ohne bzw. mit Zuluftkühlung,
- Geringe oder hohe interne Lasten durch Personen und Geräte (Arbeitshilfen),
- Standardbeleuchtung oder energie-effiziente Beleuchtung (manuell bedient oder geregelt),

- Unterscheidung zwischen Neubau und Gebäudebestand (Erneuerung) sowie
- Unterscheidung zwischen verschiedenen Bauperioden für den Gebäudebestand.

Es ist zu erwarten, dass nicht alle Gebäudekategorien mit allen Merkmalsausprägungen von gleicher energiewirtschaftlicher Relevanz sind. So sind z.B. viele Büroflächen und andere Nutzungen des Dienstleistungssektors der früheren Bauperioden in Gebäuden untergebracht, welche Wohngebäuden ähnlich sind, also eher tiefe Fensterflächenanteile und keine Lüftung aufweisen, während die hohen Glasanteile und die Lüftungen eher bei „neueren" und (nur) grösseren Gebäuden zu finden sind. In einem ersten Analyseschritt werden deshalb die wichtigsten Kombinationen identifiziert und – nicht zuletzt aus Gründen des beschränkten Projektbudgets – Schwerpunkte gesetzt (vgl. Kapitel 2.3).

Die Vielfalt der zu betrachtenden Fälle wird um eine weitere Dimension erweitert, wenn es darum geht, die verschiedenen möglichen Massnahmenvarianten auf die gewählten Gebäudekategorien anzuwenden. Auch hier ist es möglich, Schwerpunkte zu setzen bzw. eine Auswahl zu treffen, denn das Durchrechnen aller Varianten ist für den angestrebten Erkenntnisgewinn nicht notwendig. Die Schwerpunktsetzung erfolgt anhand typischer Erneuerungspraxis und optimierter Investitionskonzepte, die ein zentrales Element der Schlussfolgerungen und Empfehlungen sein sollen.

1.3.2 Methodischer Ansatz der Grenzkostenberechnung

Die (spezifischen) Grenzkosten der weitergehenden Energieeffizienz (oder des verstärkten Einsatzes erneuerbarer Energien) setzen die Mehrkosten entsprechender Massnahmen oder Anlagen in Beziehung zum entsprechenden energetischen Mehrnutzen. „Weitergehend" bzw. „Mehr-" kann sich je nach Zielsetzung auf eine Referenzsituation beziehen oder auf das vorangehende energetische Niveau einer sukzessiven schrittweisen Verbesserung der Energieeffizienz. Die jeweils zu definierende Referenzsituation ergibt sich dabei aus der Fragestellung.

Entsprechend wird die Berechnung der Grenzkosten der verschiedenen Bereiche methodisch wie folgt gegliedert:

- Definition der energetischen Referenzfälle: Betrachtet werden die Referenzfälle „heutiger Neubaustandard", „typische Instandsetzung" und „typische Erneuerung". Entsprechend der im Bauwesen etablierten Begriffsdefinition umfasst eine Instandsetzung keine energetischen Verbesserungen, sondern setzt nur Bauteile oder Anlagen wieder in den ursprünglichen Zustand (z.B. Putzausbesserung und Fassadenanstrich, Ersatz des Lüftungs-Monoblocs durch einen gleichwertigen Typ), während eine Bauteil-Erneuerung das Bauteil auf den neusten Stand der Technik bringt, also z.B. eine Wärmedämmung oder eine energie-effizientere Lüftungsanlage mit verbesserter Wärmerückgewinnung beinhaltet.
- Berechnung der energetischen Wirkung: Die Berechnung der energetischen Wirkung der Massnahmen erfolgt auf zwei Ebenen: Auf der Bauteilebene ergibt sich die energetische Wirkung bei Gebäudehüllenmassnahmen z.B. aus der Änderung der U- und g-Werte und der entsprechenden Änderung der Transmissionsverluste bzw. der solaren Gewinne. Wärmebrücken, die relativ um so relevanter werden, je energie-effizienter die Gebäudehülle wird, werden gemäss der mittlerweile veröffentlichten Wärmebrückenkataloge berücksichtigt. Auf der Gebäudeebene erfolgt die Berechnung in der Regel anhand eines dynamischen gebäudephysikalischen Simulationsmodells (IDA-ICE, ähnlich wie DOE II). Damit kann die Wechselwirkung zwischen Gebäudehüllen- und -Technik–Effizienzmassnahmen und unterschiedlichen internen und externen Lasten sowie unterschiedlicher Bauweise berücksichtigt werden. Zudem werden Erfahrungswerte zu Berechnungen von dynamischen Gebäudesimulationsprogrammen aus der Literatur (Brunner et al., 2003) berücksichtigt werden. Die Massnahmen, die der winterlichen Wärmebedarfsreduktion dienen, werden auch auf ihre energetische Wirkung bzgl. des sommerlichen Wärmeschutzes geprüft (und umgekehrt) und entsprechende Mehrnutzen oder notwendige kompensatorische Massnahmen werden in die Betrachtung (z.B. zur Sicherstellung von minimalen Komfortanforderungen) miteinbezogen. Insbesondere wird der Zusammenhang zwischen Sonnenschutz und Kühlung-, und Beleuchtungsbedarf endogen modelliert. Die energetische Wirkung des Einsatzes oder der Verbesse-

rung der Anlagen, insbesondere von Lüftungs- und Wärmerückgewinnungsanlagen, ergibt sich aus den technischen Spezifikationen und typischen Betriebskennwerten (z.B. Belegungs- und Betriebszeiten, tatsächliche bzw. notwendige Luftwechselraten).

- Wirtschaftlichkeitsrechnungen: Die Investitionskosten werden in einem ersten Schritt anhand der Annuitätenmethode auf Jahreskosten umgelegt. Unter Einbezug allfällig sich ändernder Betriebskosten (ohne Energiekosten) erfolgt hierauf die eigentliche Grenzkostenberechnung, bei der die Differenzkosten durch den Differenznutzen dividiert werden. Gemäss den zwei Dimensionen der Fragestellung bzw. der Anwendung der Ergebnisse werden zwei Grenzkostenansätze verfolgt: Bei den Projektgrenzkosten (ökonomisch = Durchschnittskosten) erfolgt die Differenzbildung der verschiedenen Varianten zunehmender Energieeffizienz mit der jeweils gleichen Referenzvariante. Im „reinen" Grenzkostenansatz (gemäss ökonomischer Definition) drücken die Grenzkosten die Steigung (Ableitung) der Kostenfunktion aus und entsprechend erfolgt die Differenzbildung gegenüber dem jeweils vorangehenden Energieeffizienz-Niveau. Aus praktischen Gründen und aufgrund des diskreten Charakters mancher Massnahmetypen wird die Kostenfunktion dabei durch eine endliche Anzahl diskreter Schritte angenähert. Der Transparenz halber werden diese Berechnungen auf Bauteilebene und auf Gebäudeebene in einem ersten Schritt ohne Einbezug der Interaktion mit der Haustechnik (=Bruttogrenzkosten) bestimmt. In einem zweiten Schritt werden kurz- und langfristige Minderkosten auf der Anlagenebene mitberücksichtigt (Nettogrenzkosten). Die so erzielten Ergebnisse können hierauf den Wärmekosten (=Energiekosten/Nutzungsgrad) gegenüber gestellt werden.
- *Einbezug von begleitenden Nutzen (Co-Benefits*): Die im obigen Abschnitt geschilderten Wirtschaftlichkeitsrechnungen müssen um weitere Nutzen- und Kostenkomponenten erweitert werden, sofern sich diese als relevant erweisen. Auf der Nutzenseite sind nicht-energetische Nutzen, sogenannte begleitende Nutzen (Co-Benefits) zu nennen. Zu diesen gehört eine verbesserte Komfortsituation, insbesondere bzgl. der thermische Behaglichkeit, im Sommer und in der Übergangszeit, verbesserte Innenluftqualität, erhöhter Schutz gegen Aussenlärm, Einbruchschutz, eventuell auch geringere Leerstände in Bürogebäuden und bessere Bonität nach 2006 (Baseler Abkommen II) etc. Die Auswirkungen der Massnahmen auf die thermische Behaglichkeit werden anhand von Gebäudesimulationsrechnungen mittels des Programms IDA - Indoor Climate and Energy (IDA-ICE, siehe EQUA Simulation AB, 2002) quantifiziert werden (PPD, Anzahl Stunden ausserhalb des Komfortbereichs). Diese verbesserten Komfortsituationen übersetzen sich für die Gebäudenutzenden in erhöhte Produktivität der Beschäftigten und dadurch für Gebäudevermieter/-verkäufer in erhöhte Mietzinseinnahmen oder Verkaufspreise. Die ökonomische Bewertung dieser Nutzen wird exemplarisch für einige typische Fälle dargestellt.

Zum verbesserten Verständnis des heute üblichen Investitions- und Erneuerungsverhaltens könnte auch der Einbezug von Transaktionskosten wesentlich beitragen. Transaktionskosten entstehen für Investierende insbesondere dann, wenn sie gegenüber dem heutigen Standard energetisch weitergehende Massnahmen realisieren möchten und dafür einen zusätzlichen Kostenaufwand zu tragen haben. Diese Kosten umfassen Informations- und Suchkosten, Kosten innerbetrieblicher Abstimmung und Entscheidungsfindung sowie eventuell zusätzlicher externer Beratung. Sie können insbesondere bei relativ kleinen Investitionen einen erheblichen Anteil an den Gesamtinvestitionskosten haben. Methodisch könnten die Transaktionskosten durch schriftliche und telefonische Befragung erhoben werden; als grobe Näherung im Sinne eines Top down Ansatzes können sie abgeschätzt werden, indem der Aufwand, den die Unternehmen im Rahmen ihrer EnAW-Aktivitäten aufzubringen haben, mit dem energetischen Nutzen in Beziehung gebracht werden. Diese Abschätzungen konnten im vorliegenden Bericht aus zeitlichen Gründen nicht dokumentiert werden. Für ausgesuchte Beispiele sei auf entsprechende Studien des ISI verwiesen (Ostertag 2003, Jochem, Gruber 2003).

1.3.3 Projektumfang und Abgrenzung

Der Untersuchungsgegenstand ist insgesamt umfangreich und komplex, insbesondere wenn eine gewisse Tiefenschärfe erreicht werden soll. Aufgrund des begrenzten Projektbudgets werden Schwerpunkte gesetzt. Prioritär bearbeitet werden:

- Energieeffizienzmassnahmen an der Gebäudehülle: Wärme- und Überhitzungsschutz im Winter und im Sommer, wobei nebst eigentlichen baulichen Massnahmen auch Betriebsoptimierungen miteinbezogen werden (z.B. Regulierung des Sonnenschutzes).
- Energieeffizienzmassnahmen im Bereich Luftwechsel und Kühlung sowie Beleuchtung: Verbesserung der bestehenden Beleuchtungen, Lüftungs- und Klima- und Wärmerückgewinnungsanlagen (WRG) sowie Einbau von neuen, Lüftungs- und Kühlanlagen und anderen Massnahmen zur Regulierung des Luftwechsels mit jeweils unterschiedlicher Effizienz.
- Die Interaktion zwischen Energieeffizienzmassnahmen an der Gebäudehülle und im Bereich Luftwechsel und Kühlung sowie Beleuchtung wird explizit untersucht, z.B. der Beleuchtungs- und Kühlbedarf bei unterschiedlichen Verglasungstypen und Sonnenschutzstrategien.
- Nebst Angaben zum Energiebedarf erlauben die Gebäude-Simulationsrechnungen Aussagen zu den Komfortzuständen in den Gebäuden bzw. in den einzelnen Räumen. Diese bzw. deren relative Veränderungen zwischen verschiedenen Fällen stellen eine Grundlage zur Abschätzung der begleitenden Nutzen dar.
- Neubau: Für eine begrenzte Zahl von Gebäudetypen werden verschiedene Neubaukonzepte bzgl. ihrer Kosten und Nutzen analysiert. Im Vordergrund stehen Skelettbauweise, Massivbau, integrale Planung, verschiedene Varianten sommerlichen Wärmeschutzes (Architektur, klassische Lüftungs- und Klimatechnik, thermoaktive Bauteile etc.)
- Messung, Regulierung, Steuerung (MSR): MSR-Massnahmen können als solche, besonders aber in Verbindung mit gewissen spezifischen Massnahmentypen bei grossflächigen Glasfassaden, sehr relevant sein. Die Kosten von MSR-Massnahmen können im Vergleich zu den damit verbundenen Nutzen jedoch sehr stark variieren, je nach dem, ob es sich um grosse oder kleine Gebäude bzw. Anlagen handelt.

In zweiter Priorität werden behandelt:

- Das Benutzerverhalten und interne Lasten fliessen als Parameter in die Analysen ein, ohne dass jedoch Kosten- und Nutzenbetrachtungen von Massnahmen wie „verbesserte Ausnützung von internen Lasten", „gezielte Reduktion von internen Lasten" (z.B. durch die Beschaffung von energie-effizienten Geräten) oder „Änderung des Benutzerverhaltens" gemacht werden.
- Erneuerbare Energien: Das Zusammenspiel zwischen Massnahmen an der Gebäudehülle und Anlagen mit erneuerbaren Energien ist für kleine und mittlere Gebäude im Wohngebäudegrenzkostenprojekt bereits behandelt, weshalb im vorliegenden Projekt der Fokus bei den erneuerbareren Energien auf Gross-Wärmepumpen- und grosse Holzenergieanlagen gelegt wird.
- Wärmeerzeugung / -verteilung: Es ist davon auszugehen, dass im Laufe der in den nächsten Jahren ohnehin durchgeführten Heizanlagenerneuerungen diese ohne weitere Massnahmen seitens der Behörden auf einen Stand der Technik gebracht werden, welcher kaum mehr verbessert werden kann (autonome Verbesserung).

Nicht Bestandteil des Projektumfangs ist die Aggregierung zu gesamtschweizerischen Grenzkostenkurven. Diese Aggregation würde empirische Grundlagen (eine Adaptation der Wohngebäude-Erhebung Jakob et al., 2003 bzw. eine Erweiterung und Aktualisierung von Weber et al. 1999) und Szenario-Annahmen über die Anteile von energetischen Gebäude- und Anlagenerneuerungen im Re-Investitionszyklus der verschiedenen Gebäudetypen, über Neubau-, Instandsetzungs- und Erneuerungs- und Abrissraten bedingen; derartige Überlegungen werden bei den derzeit laufenden Energieperspektiven des BFE angestellt.

Da wegen der Vielfalt der Gebäudetypen und Energieeffizienz-Massnahmen eine Auswahl als repräsentativ unterstellter Fälle getroffen werden muss, wird man bei den Schlussfolgerungen sorgfältig prüfen müssen, in welchem Umfang die erzielten Ergebnisse verallgemeinerungsfähig sind und in welchen Bereichen weiterer Klärungsbedarf besteht.

2 Abgrenzung, Relevanzanalyse, Referenzfälle und Massnahmenspektrum

Da die in dieser Analyse zu erarbeitenden Ergebnisse einerseits für die Energieperspektiven des Bundes genutzt werden sollen und anderseits für handlungsrelevante Informationen für Besitzer, Nutzer, Planer und Architekten von Dienstleistungs- und Fabrikationsgebäuden, sollten die Analysen der Gebäude-Struktur entsprechen, die bei den Energieperspektiven bereits verwendet wird (vgl. Kap. 2.2). Wegen der Vielfalt der Gebäudetypen muss allerdings eine Auswahl getroffen werden, die sich auf die relevanten Gebäude konzentriert (vgl. Kap. 2.3). Für die ausgewählten Gebäudetypen (Bürogebäude, Schulgebäude und Handel) werden dann ihre Daten zu den energierelevante Merkmale zusammengestellt, bevor dann die Referenzfälle festgelegt werden (vgl. Kap. 2.4). Im folgenden Kapitel 2.1 erfolgt zunächst die für das Projekt geltende thematische Abgrenzung.

2.1 Thematische Abgrenzung

Der Energiebedarf von und in Gebäuden kann gemäss seinem Verwendungszweck und seiner Form strukturiert werden. Bzgl. Form wird zwischen Wärmeanwendungen und nicht direkt durch andere Energieträger substituierbare Elektrizität unterschieden. Bei Wärmeanwendungen wird zwischen Heizwärme (von Räumen) und Prozesswärme unterschieden. Bei der Elektrizität wird – der SIA Norm 380/4 folgend – zwischen den in Tabelle 2 aufgeführten Verwendungszwecken unterscheiden. Sowohl die Wärme- wie die Elektrizitätsanwendungen lassen sich zudem gemäss ihrem Charakter weiter strukturieren. Anwendungen wie die Beheizung, Belüftung, Beleuchtung, Kühlung oder Klimatisierung von Gebäuden weisen einen mehr oder weniger ausgeprägten Infrastrukturcharakter auf. Die unter dem Stichwort Arbeitshilfen zusammengefassten Anwendungen hingegen sind sehr viel stärker von den jeweiligen Gebäudenutzenden abhängig und werden entsprechend auch von diesen gekauft und betrieben. Die meisten der aufgeführten Arbeitshilfen haben zudem im Vergleich zu den übrigen Anwendungen sehr kurze Nutzungszeiten und der Energiebedarf und mögliche Massnahmen zu dessen Reduktion sind einer entsprechend hohen Dynamik unterworfen.

Kürzel	Beschreibung	Behandlung im vorliegenden Projekt
AH	Arbeitshilfen (PC, Kopierer, Kommunikations- und andere Geräte etc.)	Nein
ZD	Zentrale Dienste (Kantine, Aufzüge, Prozesse wie Kochen, Waschen etc.)	Nein
BL	Beleuchtung	Ja
DT	Diverse Technik (Heizungspumpen etc.)	Ja
LK	Lüftung/Klima	Ja

Tabelle 2: Verwendungszwecke der Elektrizität in Gebäuden gemäss SIA 380/4

Das hier vorliegende Forschungsprojekt hat zum Ziel, die Grenzkosten von Energie-Effizienz- und Optimierungsmassnahmen des Energiebedarfs mit Infrastrukturcharakter, d.h. des Energiebedarfs, der dem Gebäude zuzuordnen ist, zu untersuchen.

Bestandteil des vorliegenden Projekts sind demnach: Wärmeerzeugung und -verteilung für Heizzwecke und Warmwasser, Elektrizität für Belüftung, Beleuchtung, Kühlung oder Klimatisierung.

Nicht Bestandteil sind die Bereiche Arbeitshilfen (insbesondere PC, Kopierer, Kommunikation und andere Geräte etc.) sowie zentrale Dienste, letztere u.a. auch deswegen, weil sich diese schwieriger standardmässig beschreiben lassen. Soweit diese hier genannten Anwendungen die erstgenannten beeinflussen (z.B. als Abwärme oder interne Lasten) werden sie parametrisiert miteinbezogen.

2.2 Bezug zu Energieperspektiven

Der Energiebedarf der Wirtschaftsbauten der Schweiz kann anhand der Multiplikation der Energiebezugsflächen mit den spezifischen Energiekennzahlen berechnet werden, wobei diese Multiplikation auf einem genügend desaggregierten Niveau erfolgt, um den unterschiedlichen Verhältnissen der Branchen und Nutzungen Rechnung zu tragen.

Die Auswahl der Referenzfälle hinsichtlich der Gebäudetypen erfolgt zunächst anhand ihrer energiewirtschaftlichen Bedeutung, ihrer Besitzerschaft (privat/öffentlich) sowie ihres unterschiedlichen Technisierungsgrades und ihrer unterschiedlichen Nutzung bei gleichem Gebäudetyp. Denn neben der Kompatibilität mit der Branchenstruktur der Energieperspektiven sollen die Referenzfälle möglichst grosse Anteile des Raumenergiebedarfs der Dienstleistungs- und Industriesektoren abdecken und zugleich die besitzerspezifischen ökonomischen Bewertungen der Investitionen sowie die jeweils denkbaren Strukturentwicklungen der Gebäude hinsichtlich ihres Technisierungsgrades einfangen.

2.2.1 Energiebezugsflächen

Die Energiebezugsflächen der Wirtschaftsgebäude setzen sich zu 62% aus dem Dienstleistungssektor, zu 36% aus dem Industriesektor und zu 2% aus der Landwirtschaft zusammen (siehe auch Tabelle 1).

Dienstleistungssektor: Betrachtet man die verschiedenen Gebäudenutzungen im Bereich der Dienstleistungsbranchen unter dem Merkmal der zu beheizenden Flächen (EBF), so sind die Branchen mit den grössten Flächen die Bürogebäude bei Handel, Banken und anderen Dienstleistungsbranchen (ca. 34.4 Mio. m^2), der Detail- und Grosshandel mit rund 18.3 Mio. m^2 und die Volkschulen sowie Kindergärten mit 18 Mio. m^2 (vgl. Tabelle 3). Der Gebäudebestand der Bürogebäude, Läden/Einkaufszentren und Schulen (ohne Hochschulen) umfasst 48% der EBF des Gebäudebestandes des Dienstleistungssektors. Weitere wichtige Gebäudegruppen sind die Gebäude des Gesundheitswesens und des Gastgewerbes mit 11% bzw. 9% Anteil an der EBF des Gebäudebestandes des Dienstleistungssektors (beim Neubau betragen die Anteile 5% bzw. 4%). Diese Flächen werden dann mit den branchen- und nutzungsspezifischen Energiekennzahlen Elektrizität (vgl. Abbildung 1) bzw. Wärme (vgl. Tabelle 4) multipliziert, um zu einem gebäudespezifischen Energiebedarf zu kommen (vgl. Tabelle 8). Weil sich Energiekennzahlen (EKZ) von verschiedenen Gebäudetypen und -nutzungen relativ stark unterscheiden, sind die Energiebezugsflächen (EBF) in Tabelle 3 relativ stark differenziert dargestellt. Bei den Bürogebäuden deuten die drei Typen 1 bis 3 beispielsweise auf einen unterschiedlichen Technisierungsgrad hin (siehe Abbildung 1 und Tabelle 5).

Industriesektor: Obwohl die eigentlichen Produktionsanlagen eine grössere Bedeutung für Energiebedarf im Industriesektor haben, wird ein Teil der Endenergienachfrage der Industrie ebenfalls durch die Gebäude bestimmt (rund 30% des industriellen Energiebedarfs für Heizzwecke und Prozesswärme, siehe Basics 1996). Die Gebäude des Industriesektors umfassten im Jahr 2002 ca. 82.9 Mio. m^2 EBF, welche sich auf 10.9 Mio. m^2 Büroflächen, 45.3 m^2 Betriebsgebäude und 26.7 Mio. m^2 leer stehende Gebäude aufteilen (Wüest und Partner, 2003, Input in Ex-Post Analysen des BFE). Bau- und energietechnisch und bzgl. Nutzung können die Bürogebäude des Industriesektors ähnlich behandelt werden wie die Bürogebäude des Dienstleistungssektors. Möglicherweise wurden die Bürogebäude des Industriesektors weniger häufig erneuert. Die Betriebs- und Produktionsgebäude stellen bzgl. Zustand, Nutzung und Gebäudetechnik und letztlich bzgl. Grenzkostenbetrachtung jedoch eine eigene Kategorie dar. Ein Teil dieser Gebäude, vor allem diejenigen der energie-intensiven Branchen, wird teilweise durch die Abwärme von Anlagen beheizt, so dass der Anreiz für Energie-technische Massnahmen am Gebäude geringer ist (weil die Massnahmen eine geringere energetische Reduktionswirkung bzgl. kommerzieller Energie aufweisen). Andererseits ist die energietechnische Ausgangslage von Produktionsgebäuden teilweise schlechter (höhere U-Werte bei Wänden und beim Dach und insbesondere beim Fenster, wo teilweise noch Einfachverglasung zu beobachten ist) als bei Gebäuden anderer Nutzung, so dass die Massnahmen eine grössere Wirkung haben und entsprechend spezifisch kostengünstiger sind. Welcher Effekt quantitativ überwiegt, bleibt zu klären.

	Branche	EBF Mio m^2	EBF-Anteil	Typ	EBF Mio m^2
Handel	Büro	4.2	3%	Bürogebäude Typ 1	2.6
				Bürogebäude Typ 2	1.1
				Bürogebäude Typ 3	0.5
	Laden, Detailhandel	16.3	11%	Warenhaus	1.9
				Laden technisiert, mit Nebenräumen	7.0
				Laden nicht technisiert	7.5
	Lager, Grosshandel	2.0	1%	Lager, Grosshandel	2.0
Banken	Hochtechn. Geb.	1.2	1%	Hochtechnisierte Gebäude mit Rechenzentren	1.2
	Büro	6.4	4%	Bürogebäude Typ 1	0.6
				Bürogebäude Typ 2	3.2
				Bürogebäude Typ 3	2.6
Gastgewerbe	Hotel	8.6	6%	Hotel, technisiert, mit Freizeitmöglichkeit	3.5
				Hotel einfach, nur Beherbergung	5.0
	Restaurant	4.3	3%	Technisiert, intensive. Küche	0.9
				Einfach, Gasthof	3.4
Schulen	Höhere Schule	5.2	4%	Technisiert, mit Labor	1.6
				Technisiert, ohne Labor	1.2
				Wenig technisiert	2.4
	Volksschule	18.0	12%	Volksschule, Kindergarten	18.0
Gesundheit	Spital			Unispital	0.8
		6.8	5%	Allgemeinspital	4.1
				Kliniken	1.9
	Heim	9.1	6%	Krankenheime	1.0
				Andere Heime	8.1
Übrige	Büro	23.8	16%	Bürogebäude Typ 1	15.0
				Bürogebäude Typ 2	5.9
				Bürogebäude Typ 3	2.9
	Verschiedene	26.4	18%	Kultur, Sport, Kirchen	10.8
				Gewerbliche Gebäude	9.5
				Diverse Gebäude	6.1
	Verkehrsgebäude	6.7	5%	Verkehrsgebäude	6.7
Landwirtschaft	Beheizte Gebäude	6.0	4%	Beheizte Gebäude	6.0

Tabelle 3: Übersicht über die EBF-Anteile der Gebäudetypen des Dienstleistungssektors (inkl. landwirtschaftliche Gebäude), Modellwerte 2004 (Modell SERVE interpoliert, Bezugsjahr 2004, interpoliert zwischen 2000 und 2005), Stand der Daten 17.5.04, Quelle CEPE

2.2.2 Energiekennzahlen am Beispiel des Dienstleistungssektors

Aufgrund der unterschiedlichen Geometrien, aber insbesondere auch aufgrund der unterschiedlichen Nutzungen weisen die Gebäude der verschiedenen Branchen einen unterschiedlichen Heizwärmebedarf auf In der Schweiz fehlen leider flächendeckende und repräsentative Untersuchungen zu den spezifischen Heizwärmebedarfswerten der verschiedenen Gebäudetypen der Wirtschaftsbauten. In den Energieperspektivarbeiten und den Ex-Post-Analysen des BFE wird der Dienstleistungssektor mit den Werten gemäss Tabelle 4 modelliert. Aus Tabelle 4 lässt sich ablesen, dass das Gesundheitswesen

(Spitäler, Heime etc.) den höchsten Heizwärmebedarf aufweist und die Banken den tiefsten. Wird auch der Energiebedarf für weitere Wärmezwecke wie Warmwasser, Waschen etc. mit einbezogen, steht das Gastgewerbe an der Spitze. Ein methodischer Hinweis zur Interpretation: in den Endenergiekennzahlen für Wärmezwecke sind alle Energieträger enthalten, also auch die Elektrizitätsbedarf.

	Heizen (MJ/m²a)		Heizen und andere Wärme (MJ/m²a)	
	∅ 1990	∅ 2000	∅ 1990	∅ 2000
Handel	573	480	613	514
Banken	459	385	499	419
Gastgewerbe	551	459	907	756
Schulen	455	372	490	400
Gesundheitswesen	695	574	830	686
Übrige	603	502	643	536
Total	549	461	626	525

Tabelle 4: Übersicht über die EKZ Wärme der Branchen des Dienstleistungssektors (inkl. landwirtschaftliche Gebäude), Durchschnittswerte 1990 und 2000, Stand der Daten 17.5.04)

Grösser als im Wärmebereich sind die Unterschiede bei der Energiekennzahl Elektrizität. An dieser lässt sich eindrucksvoll demonstrieren, wie sehr sich die flächenbezogenen Kennzahlen zwischen den verschiedenen Gebäudenutzungen unterscheiden (z.B. Volksschulen und Kindergärten um die 50 bis 60 MJ/m^{2}a oder hoch technisierte Warenhäuser, Banken und Restaurants mit einem mehr als zehnfachen Wert zwischen 800 MJ/m^{2}a und 1'400 MJ/m^{2}a; vgl. Abbildung 1). Ausserdem zeigt die Abbildung sehr schön den Unterschied zwischen Gebäudebestand und Neubauten, der bei den stromintensiven Gebäudetypen auf eine (gewünschte) negative Tendenz aufgrund verbesserter Effizienz hinweist, allerdings bei den kleineren Gebäuden eine steigende Tendenz infolge zunehmender Technisierung dieser Gebäudetypen (vgl. Abbildung 1).

Die in Abbildung 1 dargestellten Elektrizitäts-EKZ stellen das Total des Elektrizitätsbedarfs pro Gebäudetyp dar. Im Hinblick auf die Berechnung von Grenzkostenkurven und typischen Massanamebündeln ist jedoch auch der Verwendungszweck der Elektrizität von zentraler Relevanz. Umfassende diesbezügliche Schätzungen für alle Gebäudetypen des Dienstleistungssektors wurden 1994 vom Amstein+Walthert durchgeführt und sind in Aebischer et al. 1998 dokumentiert. Als Kategorien wurden die Definitionen gemäss SIA 380/4 verwendet, wobei die Elektrowärme (Elektrizität für Heizzwecke, meist in Form von Widerstandsheizungen) separat ausgewiesen wird. Ein Auszug ist in Tabelle 5 dargestellt.

Zum Vergleich: Das in Weber (2001) untersuchte Sample weist bei den Arbeitshilfen eine elektrische EKZ von 36 MJ/m^{2}a auf (rund 90% liegen unter 50 MJ/m^{2}a, bei der Beleuchtung eine solche von 78 MJ/m^{2}a (rund 90% liegen unter 100 MJ/m^{2}a, keine unter 25 MJ/m^{2}a), wobei der Wert für Beleuchtung in Verkehrsflächen tiefer lag, nämlich bei 57 MJ/m^{2}a, siehe Weber, 2001, S. 118 ff). Die Abhängigkeit der EKZ der beiden genannten Zwecke von der Gebäudegrösse ist gering; die EKZ für Beleuchtung in Funktion grösserer EBF nimmt geringfügig zu (statistisch signifikant auf dem 10%-Niveau), die EKZ Arbeitshilfen (Bürogeräte) zeigt hingegen keine Abhängigkeit von der Gebäudegrösse.

Im Vergleich zu Arbeitshilfen und Beleuchtung weist die EKZ für Lüftung bzw. Klimatisierung eine wesentlich grössere Schwankungsbreite auf (Standardabweichung zu Mittelwert >1). Diese EKZ hängen statistisch signifikant von der Gebäudegrösse ab, wobei diese Abhängigkeit bei der Klimatisierung etwas stärker ist (siehe auch Anhang 9.1, S. 271. Von 1000 m2 auf 4000 m2 steigt die EKZ Lüftung von 22 auf 36 MJ/m^{2}a und die EKZ Klimatisierung von 13 auf 29 MJ/m^{2}a.

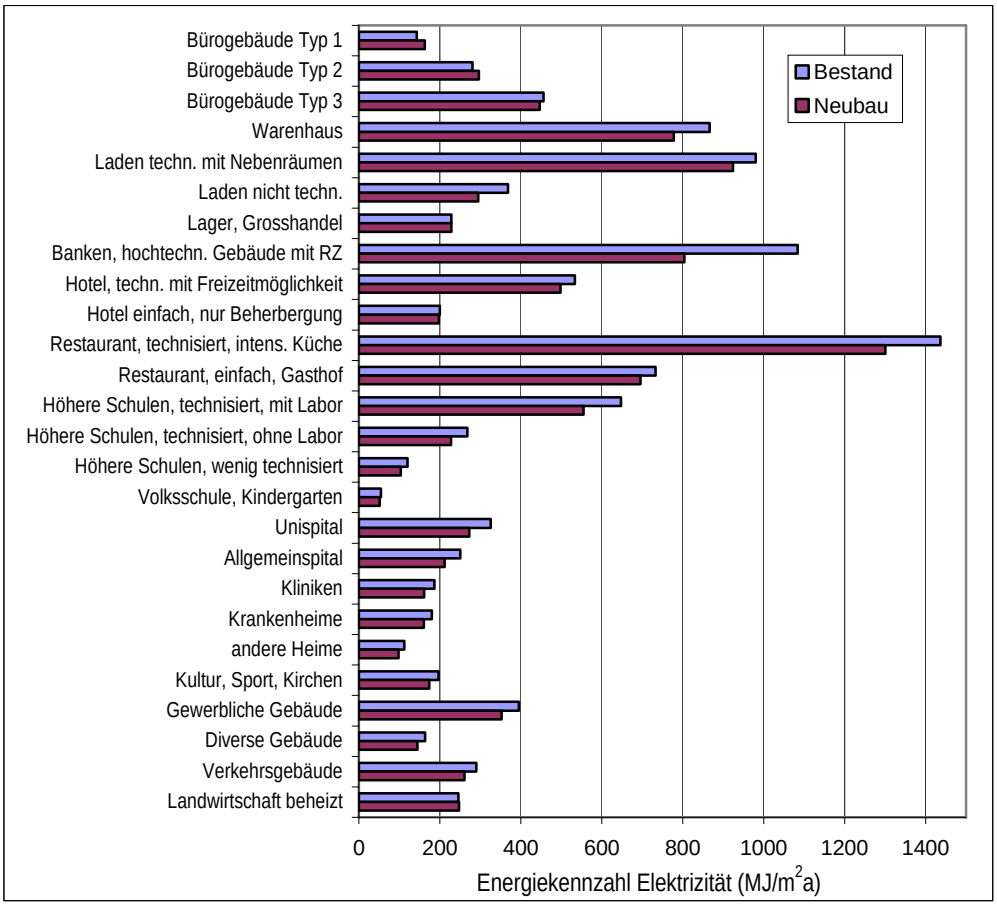


Abbildung 1 Energiekennzahlen Elektrizität (inkl. Elektrowärme) der verschiedenen Gebäudetypen des Dienstleistungssektors gemäss Energieperspektiven des BFE (CEPE-Modell SERVE)

Typ	Total	AH: Arbeits-hilfen	ZD: Zentrale Dienste	BL: Beleuch-tung	LK: Lüftung / Klima	HT: Haus-technik	EL: Elektro-wärme
Bürogebäude Typ 1	151	32	6	45	30	23	15
Bürogebäude Typ 2	300	51	30	81	102	27	9
Bürogebäude Typ 3	500	50	125	90	200	25	10
Warenhaus	900	54	153	360	270	45	18
Laden technisiert mit Nebenräumen	1000	40	550	170	200	30	10
Laden nicht technisiert	400	16	28	220	100	24	12
Lager, Grosshandel	200	10	40	70	40	20	20
Schulen (ohne höhere Schulen	52	5	3	23	8	8	5

Tabelle 5: Aufteilung der EKZ Elektrizität auf die Verwendungszwecke für ausgewählte Gebäudetypen Quelle: Aebischer et. al 1998 (Stand der Daten 1994)

Es besteht die starke Vermutung, dass diese Grössenabhängigkeit weniger auf die energetische Qualität der installierten Lüftungs- und Klimaanlagen zurückzuführen ist als vielmehr auf die strukturellen Unterschiede zwischen kleinen und grossen Gebäuden. In der Tat sind bei kleinen Gebäuden 58% weder belüftet noch klimatisiert, während bei den grossen dieser Anteil nur 6% beträgt. Umgekehrt sind bei den grossen Gebäuden 35% vollständig belüftet und klimatisiert und weitere 56% mindestens teilweise belüftet, während bei den kleinen Gebäuden kein Gebäude vollständig belüftet ist und

nur rund 30% teilweise, siehe Tabelle 6. Bei den kleinen Gebäuden sind 13% nicht belüftet, jedoch teilweise klimatisiert, was auf Kleinklimageräte oder auf einzelne klimatisierte Räume hindeutet (z.B. EDV, Sitzungszimmer).

Lüftung	Klimatisierung	Kleine Gebäude	Grosse Gebäude
Ganz	Ganz	0%	35%
	Teilweise, nicht	0%	7%
Teilweise	Teilweise	10%	28%
	Nicht	19%	20%
Nicht	Teilweise	13%	3%
	Nicht	58%	6%
Total		100% (n=31)	100% (n=69)

Quelle: Sample 100 Bürogebäude, Weber, 2001

Tabelle 6: Anteil der ganz, teilweise bzw. nicht belüfteten bzw. klimatisierten Gebäude, differenziert nach grossen bzw. kleinen Gebäuden (< bzw. >=2700 m²)

Auch bei der EKZ_{ZD}, d.h. bei den sogenannten zentralen Diensten ist eine statistisch signifikante Abhängigkeit von der Gebäudegrösse (EBF) festzustellen (p-Wert der Steigung <0.1%). Von 1000 m2 auf 4000 m2 EBF steigt die EKZ_{ZD} von 28 auf 53 MJ/m²a.

Zwischen den EKZ für zentrale Dienste, Lüftung und Klimatisierung ist zudem eine deutliche Korrelation festzustellen, siehe Tabelle 7. Eine tiefe bzw. eine hohe Technisierung betrifft also die Bereiche zentrale Dienste, Lüftung und Klimatisierung, nicht jedoch die Bereiche Arbeitshilfen und Beleuchtung, welche in allen Gebäuden etwa gleich stark ausgeprägt ist.

	ZD	BL	LU	KL
AH	0.28	0.31	0.26	0.19
ZD		0.15	0.64	0.78
BL			0.29	0.19
LU				0.76

Quelle: Sample 100 Bürogebäude, Weber, 2001

Tabelle 7: Korrelation zwischen den Teilenergiekennzahlen Elektrizität für Zentrale Dienste (ZD), Beleuchtung (BL), Lüftung (LU) und Klimatisierung (KL)

Gemäss den Schätzungen in Tabelle 5, die aus dem Jahr 1994 stammen, beträgt der Anteil der im vorliegenden Projekt abgedeckten Bereiche BL, LK und HT zwei Drittel bis drei Viertel des Elektrizitätsbedarfs der betrachteten Gebäudetypen (Hinweis: unter den drei Bürotypen hat Typ 1 die grösste Bedeutung, siehe auch Abbildung 1).

2.3 Relevanzanalyse: Gebäudekategorien inkl. energiewirtschaftliche Bedeutung

Die Bürogebäude, Läden/Einkaufszentren und Schulen (ohne Hochschulen) umfassen einen Anteil des Elektrizitätsverbrauchs des Dienstleistungssektors von etwa 48 % (bei einem Anteil von 48% der EBF des Gebäudebestandes). Im Bereich Neubau umfassen die genannten Gebäudetypen einen Anteil von rund drei Viertel, sowohl bzgl. EBF, Endenergiebedarf Elektrizität und Endenergiebedarf (siehe Tabelle

8). Beim Endenergiebedarf Elektrizität haben die Spitäler / Heime einen Anteil von 6% und die Gebäude des Gastgewerbes einen solchen von 15%. Bei der Wärme beträgt der Anteil dieser Gebäudetypen 15% bzw. 13%.

Es ist davon auszugehen, dass die hohen Energiekennzahlen Elektrizität der Bürogebäude sowie der Läden, Einkaufszentren die Bereiche Beleuchtung, Lüftung und Kühlung umfassen (siehe auch Tabelle 5). Diese Bereiche betreffen somit v.a. das Gebäude und die Art der Nutzung der Räumlichkeiten (z.B. Rauchen, Publikumsverkehr, interne Lasten mit hoher Abwärme, Geruchsentwicklung). Bei Läden und insbesondere Einkaufszentren ist zudem ein markanter Teil der Elektrizität durch die sogenannte gewerbliche Kälte bedingt. Da die Auswahl anhand der o.g. Kriterien für die Dienstleistungsbereiche getroffen wurde und keine entsprechend differenzierten Daten für den Industriebereich vorliegen, wird im folgenden davon ausgegangen, dass die Bürogebäude in der Industrie in gleicher Weise behandelt werden können wie die für die Dienstleistungsbereiche typisierten Bürogebäude.

Im Fall des Gastgewerbes verursachen jedoch v.a. die sogenannten zentralen Dienste die hohen Energiekennzahlen (Kochen, Waschen, Freizeit- und Wellnessanlagen etc.), meist über 50% entfallen auf diese Bereiche. Die zentralen Dienste betreffen damit weder die Komfortkonditionierung der Gebäude bzw. der Räume und die Abwärme ist zum Teil nicht für diesen Zweck nutzbar (z.B. wegen der hohen Belastung der Abluft von Küchen, der zeitlichen oder örtlichen Nichtübereinstimmung). Bei den als „Übrige" bezeichneten Gebäuden handelt es sich um eine grosse Vielfalt von Gebäuden. Auch diese beinhalten teilweise solche mit hohen Energiekennzahlen Elektrizität, z.B. Rechenzentren, gewerbliche Gebäude (vgl. auch mit Abbildung 1), wobei auch hier eine Nutzung der Abwärme als Energieeinsparpotenzial bisher noch wenig praktiziert wird.

Bzgl. Endenergiebedarf für Wärmezwecke ist der Anteil der genannten Gebäudekategorien mit rund 45% etwas geringer. Der grösste Teil dieses Endenergiebedarfs für Wärmezwecke wird durch die Beheizung der Gebäude verursacht. In den meisten Brachen bzw. Gebäudetypen beträgt der Anteil Endenergie für andere Wärmezwecke als Heizen nur rund 7% des gesamten Wärmeendenergiebedarfs. Nur bei den Spitälern / Heimen bzw. im Gastgewerbe ist der Anteil mit 16% höher bzw. mit 39% deutlich höher. In allen Branchen umfasst dieser Nichtheizwärmeverbrauch das Warmwasser, bei Spitälern / Heimen kommt das Waschen und im Gastgewerbe (inkl. Hotels) das Kochen hinzu. .

	EBF (Mio. m^2)			Endenergie Elektrizität (PJ/Jahr)			Endenergie Heizen, andere Wärme (PJ/Jahr)		
	Baujahr bis 2000	Neu ab 2000	Total	Baujahr bis 2000	Neu ab 2000	Total	Baujahr bis 2000	Neu ab 2000	Total
Bürogebäude	35	2.6	37	9	0.5	9	18	1.1	19
Läden, Einkaufszentren, Lager	18	0.5	19	12	0.3	12	9	0.2	10
Schulen (ohne Hochschulen)	18	0.1	18	1	0.0	1	7	0.0	7
Spitäler, Heime	17	0.2	17	3	0.0	3	11	0.1	11
Gastgewerbe	13	0.2	13	7	0.1	7	10	0.1	10
Übrige (*)	46.7	0.6	47	13.7	0.1	14	22	0.2	22
Total	147	4.2	151	45	1.1	46	77	1.8	79
Davon: Büro, Läden, Schulen (ohne Hochschulen)	71	3.2	74	21	0.8	22	34	1.4	36
Anteil in % des Totals	48%	76%	49%	48%	75%	48%	44%	75%	45%
(*) Gewerbliche Gebäude, Rechenzentren, Kultur- und Sportanlagen, höhere Schulen, Verkehrsgebäude, Landwirtschaft, diverse Gebäude									

Quelle: Berechnungen CEPE (gemäss Referenz-Szenario in Aebischer et. al 2002)

Tabelle 8: Übersicht über EBF, Wärme und Elektrizität verschiedener Aggregate von Gebäudetypen des Dienstleistungssektors (inkl. landwirtschaftliche Gebäude), Stand der Daten 17.5.04

Im folgenden wurden für drei ausgewählten Gebäudebereiche und für wichtige energietechnische Merkmale die durchschnittlich beobachtbaren Daten zusammengestellt. Hierbei wurde auch zwischen drei Bauperioden unterschieden, die aus den Blickwinkeln der jeweiligen Baupraxis, des Designs der Gebäude bzgl. Fensterflächen, Flachdach, etc sowie daraus entwickelter Kennzahlen deutlich andere Werte aufweisen und für die Frage der Re-Investitionszyklen von Bedeutung sind (vgl. Tabelle 9).

Demnach sind insbesondere diejenigen Gebäude, die im Re-Investitionszyklus der Periode von 1947 bis 1975 liegen, für die Analyse von besonders aktueller Bedeutung. Ihre Fassaden/EBF-Kennziffer liegt mit 0.73 bis 0.79 relativ hoch und ihre Fenster/Fassadenflächen-Kennziffer mit 0.32 im Mittel bzw. bei den Handelsgebäuden mit 0.18 im unteren Bereich (vgl. Tabelle 9). Diese Kennziffern stehen für die typisierten Gebäude der ausgewählten Branchen, anhand denen die energie- und wärmetechnischen Überlegungen und Berechnungen durchgeführt werden sollen.

	Bürogebäude				Schulen				Handel			
	vor 1947	1947-1975	1976-2000	ab 2001	vor 1947	1947-1975	1976-2000	ab 2001	vor 1947	1947-1975	1976-2000	ab 2001
EBF	929	1'308	1'541	1'695	898	1'272	1'440	1'380	570	929	1'268	1'375
Geschosshöhe	3.2	3.5	3.1	3.2	3.2	3.5	3.3	3.3	3.5	3.5	3.5	3.5
Fassaden inkl. Fe	738	950	1009	1044	728	924	1035	958	593	731	882	915
davon Fenster	144	300	438	450	143	293	275	264	132	131	171	185
davon Türen	12	28	23	24	11	27	14	14	11	12	9	10
Wand angebaut	77	98	90	93	25	37	42	44	62	70	80	91
Wände UG	*173*	*332*	*466*	*481*	*162*	*325*	*335*	*285*	*176*	*356*	*395*	*405*
Grundfläche (*)	293	351	384	403	281	329	332	321	208	298	354	395
Dach	367	411	443	452	374	416	426	417	294	354	443	454
Anteil Flachdach	0.09	0.59	0.60	0.60	0.10	0.61	0.60	0.60	0.09	0.68	0.60	0.60
Fassade/EBF	0.79	0.73	0.65	0.62	0.81	0.73	0.72	0.69	1.04	0.79	0.70	0.67
Wand UG / EBF	0.19	0.25	0.30	0.28	0.18	0.26	0.23	0.21	0.31	0.38	0.31	0.29
Fenster /EBF	0.15	0.23	0.28	0.27	0.16	0.23	0.19	0.19	0.23	0.14	0.13	0.13
Fenster / Fassade	0.20	0.32	0.43	0.43	0.20	0.32	0.27	0.28	0.22	0.18	0.19	0.20
A/EBF	1.35	1.17	1.07	1.00	1.38	1.18	1.13	1.11	1.74	1.33	1.18	1.14
A/EBF	1.60	1.44	1.34	1.26	1.63	1.44	1.36	1.33	2.07	1.68	1.48	1.43

(*) Die Grundfläche ist teilweise grösser als die durchschnittliche EBF-Geschossfläche, weil Untergeschosse häufig ausgedehnter in den Baugrund gebaut werden (z.B. für Parkhäuser) als die oberirdischen Geschosse, welche Grenzabstände einzuhalten haben

(**) Inkl. gesamte Fläche der Wände im Untergeschoss (UG)

Tabelle 9 Modell-Gebäude gemäss Wüest und Partner der Gebäudetypen Büro, Schulen und Handel
Quelle: Wüest und Partner (Version 17.5.04), Kennwert-Berechnungen CEPE

Die EBF der Modellgebäude gemäss Modell von Wüest und Partner (siehe Tabelle 9) erscheinen eher tief. Dazu sind folgende Anmerkungen zu machen: Bei den Geometrien der Modellgebäude handelt es sich nicht durchwegs um Durchschnittswerte, denn das Ziel der Modellgebäude ist, typische Verhältnisse, typische Relationen zwischen den verschiedenen Bauteilen abzubilden. Grosse Gebäude können auch als eine Zusammensetzung von mehreren kleineren Gebäuden aufgefasst werden. Dies drückt sich u.a. dadurch aus, dass die Modellgebäude auch Flächen „Wand angebaut" umfassen. Im Sample einer Untersuchung von grossen Bürogebäuden (Weber, 2001) beträgt der Mittelwert der EBF 2'774 m^2, der Median 1'638 m^2. Selbst bei Gebäuden, die als gross bezeichnet wurden, ist der Median der EBF im Bereich von 1'600 m^2. Auch Wüest und Partner stellt grosse Abweichungen zwischen

Mittelwert und Median fest: Der Mittelwert des Volumens (inkl. unbeheizte Anteile) beträgt 18'500 m^3, der Median liegt bei jedoch lediglich 8'500 m^3, also sogar 25% tiefer als das Volumen des Modellgebäudes (Persönliche Mitteilung Wüest und Partner, 20.5.04).

In Bürogebäuden ist die Aufteilung der Flächen auf einzelne Nutzungszonen aus der Erhebung ETH Zürich / Amstein+Walthert bekannt (Weber, 2002, S. 117). Auffallend ist der hohe Anteil an Flächen, welche nicht eigentliche Büroräume umfassen. In der Tat umfassend die eigentlichen Büroflächen nur 35% der Bruttogeschossflächen bzw. 38%, wenn die Sitzungszimmer dazugenommen werden); 22% sind sogenannte Verkehrsflächen (Gänge, Treppenhäuser etc.), 21% sind Flächen für Technik und Lager, 12% sind Parkflächen. Die übrigen 7% betreffen EDV-Räume, Küche und Restaurants und weitere diverse Nutzungen.

2.4 Referenzfälle und Energie-Effizienz-massnahmen

Die Definition von Referenzfällen ist aufgrund des Grenzkostenansatz erforderlich. Denn ausgehend von typischen Fällen der Bau- und Planungspraxis werden die Mehrkosten und die Mehrnutzen von Energie-Effizienz- und Optimierungsnassnahmen gemessen. Und auch im Rahmen der Energie-Perspektiven des Bundesamts für Energie (BFE) werden unterschiedliche Szenarien ausgehend von einer Referenzentwicklung definiert und untersucht. Die Referenzfälle sollen also eine Relevanz im bau- und planungspraktischen Einzelfall als auch aus energiewirtschaftlichen Blickwinkel aufweisen. Die Referenz ist auf den folgenden beiden Ebenen festzulegen:

- das einzelne Gebäude als System (Geometrien, EKZ, Nutzung) und
- die Bauelemente (Bauweise, Gebäudetechnik etc.).

Die zwei Ebenen sind untereinander interdependent. Die definitive Festlegung der Referenzfälle kann deshalb erst im Zusammenhang mit den energetischen Berechnungen erfolgen (siehe Kap. 3), bei denen Annahmen zu den Modellgebäuden und die resultierenden EKZ pro Gebäude mit den EKZ der Energieperspektiven in Übereinstimmung gebracht werden. Unter Umständen sind im Zuge dieser Arbeiten auch die Annahmen der Energieperspektiven zu überprüfen.

Es ist zwischen Neubau und Gebäude- und Anlagenerneuerung zu unterscheiden.

Beim Neubau wird davon ausgegangen, dass die Anforderungen der SIA 380/1 $_{2001}$ erfüllt werden und zwar die Grenzwerte. Die Zielwerte oder die Minergie-Werte können zum heutigen Zeitpunkt noch nicht als Referenzfall gelten, denn die Verbreitung dieser Bauweise ist zu gering. Gebäude- und anlagentechnisch wird der im Neubau üblichen konzeptionellen, planerischen und baulichen Vielfalt und den einzelnen bauteil- und gebäudetechnischen Kennwerten Rechnung getragen.

Im Gebäude- und Anlagenbestand sind zwei Referenzfälle zu unterscheiden, welche je eine grundsätzlich verschiedene Qualität aufweisen.

Referenzfall Typ 1 (RT1, nicht-energetische Instandsetzungen): Beim Typ 1 ist der Ist-Zustandes des Gebäudes oder der Anlagen die Referenz. Ebenfalls vom Typ 1 sind Fälle von energetisch nicht wirksame Instandsetzungsmassnahmen wie Fassadenanstrich oder Instandsetzungen der Dacheindeckung. Fragestellung im Referenzfall 1: Was sind die Kosten und Nutzen von energetisch wirksamen Massnahmen, die den **Status Quo** verbessern? Was sind die Kosten und Nutzen von energetisch wirksamen Massnahmen, die anstelle von energetisch nicht-wirksamen Instandsetzungs-Massnahmen getroffen werden?

Referenzfall Typ 2 (RT2, energetische Erneuerungen): Beim Typ 2 dienen heute übliche energetische Eneuerungsmassnahmen als Referenz. Dazu gehören Dämmungen der Gebäudehülle, Einbau von WRG etc. gemäss der heute üblichen Baupraxis. Fragestellung beim Referenzfall Typ 2: Was sind die Mehrkosten und Mehrnutzen von weitergehenden energetischen Verbesserungsmassnahmen im Vergleich zum heute Üblichen.

Die folgenden Grössen werden als Parameter interpretiert, um die Wirkung der energie-technischen Massnahmen an unterschiedlichen Fällen zu prüfen.

- Bauweise (massiv, leicht)
- Interne Lasten durch Personen und Geräte (hoch, tief)
- Fensteranteil (in einem Fall auch als Massnahme)

Tabelle 10 zeigt eine Übersicht über die Variablen, welche die Energie-Effizienz- und Komfortmassnahmen beschreiben. Um den Simulationsaufwand möglichst gering zu halten, wird ein Teil der Effekte nachträglich an die Simulationsrechnungen anhand von Umrechnungen abgebildet.

Simulationsparameter in IDA-ICE	Umrechnungen mit exogenen Annahmen
U-Wert der Fassade	Wirkungsgrad Zuluft- und Abluftventilator.
Fenstertyp	Umrechnung unterschiedliche Druckverluste (bei Lüftungen)
Qualität und Einsatz des Sonnenschutzes	Wirkungsgrad Lufterhitzer (Zulufterwärmung)
Qualität und Einsatz der Beleuchtung	Wirkungsgrad Luftkühler (Zuluftkühlung ab Kältemaschine)
Luftwechsel durch Fenster	Wirkungsgrad Wärmeerzeugung
Lüftwechsel durch Lüftungsanlagen inkl. WRG	„Wirkungsgrad“ d.h. COP bzw. Jahresarbeitszahl (JAZ) der Kältemaschine für Leistungs- bzw. Energieberechnungen.
Kühlung/Kälteverteilung	
Betriebszeiten (Lüftung, Kühlung, Beleuchtung etc.)	

Tabelle 10 Eigentliche Simulation und exogene Annahmen (Annahmen CEPE)

2.4.1 Bauweise Gebäudeform, Geometrie

Die Geometrien der Neubauten orientieren sich an den Modellgebäuden gemäss Wüest und Partner (Tabelle 9). Um zum einen den Simulationsaufwand gering zu halten und zum anderen der Vielfalt des Gebäudeparks gerecht zu werden, wurde zum einen ein fix gehaltener Grundriss und zum anderen variable Anteile an verglasten Flächen definiert. In Tabelle 11 sind die Annahmen zur Gebäudegeometrie dargestellt. Um den Einfluss der Raumtiefe und des Verhältnisses von Fensterfläche zu EBF insbesondere auf die Komfortsituation zu untersuchen, werden sowohl kleine als auch grosse Räume und sowohl Räume im Mittelbereich als auch solche im Eckbereich konfiguriert.

	Anzahl	Länge (m)	Breite (m)	EBF pro Raum (m^2)	Fassaden+Fensterfläche pro Raum (m^2)	EBF (m^2)	Fassadenfläche, inkl. Fenster (m^2)	Fassaden+Fensterfläche / EBF
Eckraum	2	4	4	16	28.0	32	56	1.75
Mitteraum gross	4.5	7	7	49	24.5	221	110	0.50
Mitteraum klein	2	4	4	16	14.0	32	28	0.88
Gesamtes Stockwerk						285	194	0.68

Tabelle 11 Geometrische Definition des bei der Simulation verwendeten Stockwerks (Annahmen CEPE)

Die drei grossen Mittelräume sind gegen Süden, Norden und Osten orientiert und fliessen mit einem Gewichtungsfaktor 1.5 in die Berechnungen ein. Die kleinen Mittelräume sind gegen Süden und Westen orientiert und die beiden Eckräume gegen Südosten und Nordwesten.

Bezogen auf die Fassadenfläche sind in Tabelle 12 die definierten Fensteranteile aufgeführt. Die Fensteranteile pro EBF ergeben sich aus der Kombination der Werte in Tabelle 11 abgeleitet werden. Variiert wurde zudem die Bauweise (Massivbau und „thermischer" Leichtbau). Beim „thermischen" Leichtbau wurde von leichten Innenwänden (Gipskarton mit 12 cm Zwischendämmung) und Hohlböden und –decken ausgegangen (Betondecke, je 15 cm Luftraum und Teppichboden). Bei der Massivbauweise wurden Backstein-Innenwände, Betondecken und Teppichböden angenommen.

	Gebäudetyp	Bauweise	Fensteranteil (*)	
BN1	Büro Neubau1	Leichtbau, hoher Glasanteil	0.5	0.80
BN2	Büro Neubau2	Geringer und mittlere Glasanteil, Massivbau	0.35	0.5
BB4	Büro Bestand 1976-2000	Leichtbau, mittlerer Glasanteil	0.5	
BB3	Büro Bestand 1947-1975	Massivbau, eher geringer Glasanteil	0.35	
BB2	Büro Bestand, 1947-1975	Leichtbau, eher geringer Glasanteil,	0.35	
BB1	Büro Bestand, vor 1947	Massivbau, geringer Glasanteil,	0.25	
(*)	bezogen auf die Fassadenfläche, Flächenfensteranteil inkl. Rahmen, d.h. verglaste Fläche ist geringer, siehe Kap. 2.4.3			

Tabelle 12 Übersicht über die bei den energetischen Berechnungen einbezogenen Modell-Gebäudetypen

2.4.2 Kennwerte der opaken Gebäudehülle

Die typischen U-Werte für Wände betragen im **Neubau** 0.3 bis 0.4 W/m^{2}K (ohne Berücksichtigung von linearen Wärmebrücken), wobei diese je nach internen Lasten und Gebäudeform auch etwas höher liegen könnten. Werden die linearen Transmissionsverluste der Anschlüsse auf die Fläche umgerechnet, können die resultierenden U-Werte je nach Fassadentyp und -geometrie um 0.05 bis 0.15 W/m^{2}K höher liegen. Bei Flachdächern wird aus Gründen des sommerlichen Wärmeschutzes in der Praxis etwas besser gedämmt (U-Wert-Annahme: 0.25 W/m^{2}K). Die typischen U-Werte für Wände betragen für den **Referenzfall Typ RT1** 0.8 W/m^{2}K bis 1.5 W/m^{2}K, je nach Bauperiode, für den **Referenzfall RT2** rund 0.3 bis 0.4 W/m^{2}K. Für die Fassade werden folgende U-Werte simuliert: 0.96, 0.42 und 0.31 W/m^{2}K (inkl. Wärmebrücken).

Die energietechnischen Annahmen im Fassadenbereich wurden zunächst auf der Ebene von flächenbezogenen U-Werten und von linienbasierten Transmissionsverlusten (lineare Wärmebrücken W/mK) getroffen. Zuhanden des Simulationsprogramms wurden letztere auf flächenbezogene Kennwerte umgerechnet (bezogen auf den opaken Flächenanteil), wobei in allen Fällen ein konstanter Wert von 0.1 W/mK angenommen wurden. Insbesondere bei Fassaden mit hohem Fenster- oder Verglasungsanteil schlagen die linearen Verluste markant zu Buche (Tabelle 13), weil das Verhältnis Fensteranschlusslänge zu opake Fassadenfläche in diesen Fällen hoch ist.

Fensteranteil (bezogen auf die Fassadenfläche)	Verhältnis Länge Fensteranschluss zu Fassadenfläche [m/m²]	U-Wert-Annahme [W/m²K] (ohne Wärmebrücken)	Resultierender U-Wert [W/m²K] (mit Wärmebrücken *) Neubau	Bestand
0.80		0.29	0.78	
0.50		1.3		1.44
		0.4	0.54	0.54
		0.35	0.49	
		0.3	0.44	
		0.25	0.39	
		0.2	0.34	
0.35		1.5		1.63
		1.1		1.23
		0.4	0.53	0.53
		0.3	0.43	0.43
		0.25	0.38	
		0.2	0.33	
		0.15	0.28	
0.25		1.1		1.2
		0.35		0.45
		0.3		0.4
		0.25		0.35
		0.2		0.3

Tabelle 13 Übersicht über angenommenen U-Werte (W/m²K) ohne Wärmebrücken und resultierende, auf die Fläche umgerechnete U-Werte unter Berücksichtigung der Wärmebrücken als Funktion der Gebäudegeometrie (Fensteranteil) für Neubau und Gebäudebestand

2.4.3 Kennwerte der transparenten Gebäudehülle

Bei Gebäuden mit geringem Glasanteil wird bei **Neubauten** der Fenstertyp 2 gemäss Tabelle 14, als Referenz angenommen. Bei Gebäuden mit hohem Glasanteil kommt in der Praxis eher Fenstertyp 5 zur Anwendung. Die ersten beiden Fenstertypen 1 und 1b in Tabelle 14 stehen für Referenzfälle im Gebäudebestand (RT1), der Fenstertyp 2 dient sowohl als Referenzfall nebst dem Neubaufall auch bei Gebäudeerneuerungen als Referenz (Referenzfall Typ2).

Bei den Gebäuden mit sehr hohem Fensteranteil (80%) wurde von grossflächigeren Fenstern mit geringem Rahmenanteil ausgegangen (15%), bei den Gebäuden mit mittlerem Fensteranteil (35% und 50%) von einem Rahmenanteil von 25% und bei Gebäuden mit geringem Fensteranteil (25%) von einem Rahmenanteil von 30%.

Typ	Bezeichnung	U-Rahmen (U_f) W/m^{2}K	U-Glas (U_g) W/m^{2}K	g-Wert	Licht-transmission	Direkte Strahlungs-transmission
1	Nicht-erneuert: Bestand, 1947-1975	2.20	3.0	0.75	0.82	0.65
1b	Bestand, erneuert vor 1990	1.80	2.2	0.7	0.8	0.6
2	Wärmeschutz (WS) zweifach verglast	1.80	1.10	0.52	0.73	0.38
3	Wärmeschutz (WS) dreifach, Ug=0.7	1.60	0.70	0.41	0.60	0.27
4	Wärmeschutz (WS) dreifach, Ug=0.5	1.60	0.50	0.41	0.60	0.27
5	Moderater Sonnenschutz zweifach	1.60	1.10	0.41	0.73	0.38
6	Komb. Sonnenschutz/WS dreifach	1.60	0.50	0.35	0.60	0.27
7	Moderater WS (zweifach), starker Solargewinn	1.8	1.2	0.63	0.8	0.52
8	Moder. WS, verb. Rahmen, starker Solargewinn,	1.4	1.2	0.63	0.8	0.52
9	Verbesserte WS-Verglasung, moderater Solargewinn	1.4	0.9	0.51	0.7	0.42
10	Verb. WS (inkl. Rahmen), moderater Solargewinn	1.1	0.9	0.51	0.7	0.42
11	Starker WS, moderater Solargewinn	1.4	0.7	0.51	0.7	0.42
12	Wie Typ 11	1.4	0.7	0.51	0.7	0.42
13	Starker Wärmeschutz (Ug=0.5), moderat. Solargewinnvergl.	1.4	0.5	0.51	0.7	0.42
14	Solargewinn, starker Wärmeschutz (dreifach)	1.4	0.5	0.59	0.71	0.42
15	Solargewinn, WS: dreifach, verbesserter Rahmen	1.0	0.5	0.59	0.71	0.42
16	Starker Wärme- und Sonnenschutz, dreifach	1.6	0.5	0.25	0.5	0.2
17	Mod. Wärmeschutz und starker Sonnenschutz	1.4	1.2	0.27	0.43	0.23

Tabelle 14: Übersicht über die bei den energetischen Berechnungen einbezogenen Fenstertypen

2.4.4 Beleuchtung

Die allgemeinen Richtwerte für die spezifische Leistung Beleuchtung (p_B) des Entwurfs der neuen SIA Norm 380/4 in Tabelle 15 gehen von Erfahrungswerten für Beleuchtungen mit Leuchtstofflampen und Leuchten[6] mit hohem Wirkungsgrad[7]; die verschärften Richtwerte gehen zusätzlich von elektronischen Vorschaltgeräten aus.

Im Vergleich zu den Werten in Tabelle 15 liegen die von Weber (2001) erhobenen Werte im oberen Bereich der allgemeinen Richtwerte (Mittelwert 78 MJ/m^{2}a rund 90% liegen unter 100 MJ/m^{2}a, keine unter 25 MJ/m^{2}a). Folgende Gründe könnten die höheren Werte erklären: 1. Die Daten von Weber, 2001 beziehen sich auf das Jahr 1997. 2. Der Wirkungsgrad der Leuchten ist nicht in allen Fällen hoch. Es ist zu vermuten, dass in einem Teil des Gebäudebestandes immer noch opale Wannen und konventionelle Vorschaltgeräte installiert sind. 3. Die Volllaststunden sind in Realität eher höher als die Richtwerte von SIA 380/4 (welche die Funktion von Vorgaben haben und vor 1995 nicht flächendeckend erreicht wurden). Auf höhere Volllaststunden deuten auch die Ergebnisse der Simulationsrechnungen, siehe dazu Kap. 3.4.4).

Umgekehrt ergeben die von Weber (2001) erhobenen Energiekennzahlen höhere spezifische Leistungen als in Tabelle 15 angegeben. Bei 1100 Volllaststunden pro Jahr ergibt der Mittelwert der EKZ von 78 MJ/m^{2}a eine spezifische Leistung von 20 W/m^2 und bei 1500 Volllaststunden eine solche von 14 W/m^2; der 90%-Wert von 100 MJ/m^{2}a führt mit den gleichen Volllaststunden zu 25 W/m^{2}a bzw.

---

[6] Im allgemeinen Sprachgebrauch wird für den Fachbegriff „Leuchte" der Begriff „Lampe" bzw. „Lampenschirm" verwendet. Der Fachbegriff „Lampe" bezeichnet das eigentliche Leuchtmittel, also z.B. „Glühbirne" oder die „Leuchtstofflampe". In diesem Bericht werden die Fachbegriffe verwendet.

[7] Der Wirkungsgrad der Leuchte ist das Verhältnis des Lichts, das die Leuchte verlässt, zum gesamten von der Lampe produzierten Licht.

19 W/m^2. Auch dies deutet darauf hin, dass im Gebäudebestand entweder die Volllaststunden höher liegen oder dass noch substantiell opale Wannen und konventionelle Vorschaltgeräte installiert sind (bzw. zum Erhebungszeitraum 1997 waren).

		Allgemeine Richtwerte			Verschärfte Richtwerte			Grenzwert	Zielwert
	Lux	W/m^2	Volllaststunden	MJ/m^{2}a	W/m^2	Volllaststunden	MJ/m^{2}a	MJ/m^{2}a	MJ/m^{2}a
Überwiegend Tageslicht	300	10.0	1000	36	7.5	500	14	35	12
	400	12.5	1000	45	9.0	500	16		
Zum Teil mit Tageslicht	300	10.0	1200	43	7.5	900	24		
	500	15.0	1500	81	11.0	1100	44	70	40

Tabelle 15: Richtwerte für spezifische Leistungen und Volllaststunden gemäss SIA 380/4 und abgeleitete Energiekennzahlen für Beleuchtung im Bereich Büro, Quelle: SIA-Norm 380/4 (fette Werte), Berechnungen CEPE

Zum Vergleich: zur Berechnung der internen Wärmelasten geht der SWKI (SWKI 95) für eine Büroraumbeleuchtung von 400 Lux von 7.5 W/m^2 bis 10.5 W/m^2 aus. Mit angenommen 1100 Volllaststunden pro Jahr ergibt dies 36 MJ/m^{2}a bis 50 MJ/m^{2}a.

Im Rahmen des Investitionsprogramms Energie 2000 des Bundes wurden in den Jahren 1997 bis 1998 Beleuchtungserneuerung finanziell gefördert. Als Kriterium galt dabei die erreichte spezifische Leistung in W/m^2 in Abhängigkeit der erforderlichen Beleuchtungsstärke (Lux). Diese Werte betrugen 4.0 W/m^2 für 100 Lux, 10.6 W/m^2 für 400 Lux und 12.8 W/m^2 für 500 Lux und sind heute problemlos erreichbar und sollten sowohl bei Neubauten als auch bei Erneuerungen erreicht oder - noch besser - unterschritten werden. Darauf deuten auch die typischen Kennwerte der Publikation Faktor Licht hin (siehe Tabelle 16).

	Typischer Jahrgang	Leuchtenwirkungsgrad	Vorschaltgerät	W/m^2 (el)
Opale Wanne	1960	50%	konventionell	20
Parabol-Reflektor	Ab 1980	75%	elektronisch	8
Pendelleuchte	Ab 1980	85%	elektronisch	9
Mildes Licht	Ab 1990	70%	elektronisch	10
Stehleuchte	Ab 1990	70%	elektronisch	11

Tabelle 16: Technische Kennwerte für typische Büroleuchten bei 400 Lux gemäss Faktor Licht (2000)

Bei Neubauten wurde im Referenzfall von 9 bzw. 13.5 W/m^2 an spezifischer installierter Beleuchtungsleistung ausgegangen, im Gebäudebestand von 15 bis 18 W/m^2 (Tabelle 17). Bei Beleuchtungserneuerungen wurde angenommen, dass die spezifische Leistung auf 9 bis 11 W/m^2 reduziert werden kann. Bei den Energie-Effizienzmassnahmen wurden präsenzbasierte Regelungen der Einfachheit halber pauschal mit bis zu rund 30% geringerer Leistung modelliert (Abwesenheiten durch Sitzungen, Dienstreisen, Mittags- und andere Pausen etc.)

	Tief	Hoch
Neubau (Referenz)	9 W/m^2	13.5 W/m^2
Bestand (Ist-Zustand bzw. Referenz)	15 W/m^2	18 W/m^2

Tabelle 17: Annahmen bzgl. spezifischer installierter Beleuchtungsleistung bei Simulationsrechnungen mit IDA-ICE

Bzgl. Beleuchtungsregelung (Ein- / Auskriterien) werden folgende Fälle unterschieden, je nach Betriebsoptimierungsmassnahmen:

- Manuelles Ein- und Ausschalten: approximiert mit Schwellenwerten (Ein- bzw. Ausschalten der elektrischen Beleuchtung zwischen 750 und 850 Lux Tageslicht auf Arbeitsfläche, Entfernung vom Fenster: 1 m in den grossen wie kleinen Räumen)
- Fall 1: Beleuchtung ein, sobald weniger als 500 Lux Tageslichtangebot auf Arbeitsfläche.
- Fall 2: Beleuchtung zwischen 0% und 100% zwischen 500 und 100 Lux Tageslicht.

Im Referenzfall wurde bei allen Fällen von einer manuellen Bedienung der Beleuchtung ausgegangen.

2.4.5 Sonnenschutz

Im Neubaubereich werden die Sonnenschutzen G2 und G4 gemäss Bezeichnung in Tabelle 18 als Referenzfälle angenommen. Bei Neubauten mit hohem Glasanteil dienen die Sonnenschutztypen G8 und G6 (innen oder zwischen den Gläsern liegend) als Referenzfälle, da diese – obwohl aus bauphysikalischen Gründen ungünstig – in der heutigen Neubaupraxis häufig anzutreffen sind, bei höheren Gebäuden auch wegen der Windlast. Es wird zum einen von manueller Bedienung und zum anderen von automatisiertem Einsatz ausgegangen (Sonnenschutzeinsatz ab einem Strahlungswert von 250 W/m^2, ab einem Winkel von 70° auf die Fassade).

Im Referenzfall des Gebäudebestandes sind S2 und G1 typische Sonnenschutzvarianten. Es wird von manueller Bedienung ausgegangen, wobei dieser mit Einsatzkriterium simuliert wird (Sonnenschutz unten ab einem Strahlungswert von 250 W/m^2, ab einem Winkel von 70° auf die Fassade).

Bei energie-effizienten Varianten erfolgt die Bedienung des Sonnenschutzes entweder manuell oder gesteuert über die Solarstrahlung der Fassade. Die angenommenen Werte sind ein Strahlungswert von 150 bei einem Winkel von 80° von 6–18 Uhr. Kombinierte Regelkriterien, z.B. von Strahlung und Innenraumtemperatur oder dynamische Regulierungen wurden nicht in Analysen einbezogen.

Typ		Reduktionsfaktor sichtbares Licht Tvis	Gesamter Abschirmungsfaktor z-Wert (*)	Abschirmungsfaktor Direktstrahlung Tsol
S2	Aussen liegend	0.1	0.2	0.11
G1	Alter Lamellenstoren aussen	0.05	0.1	0.05
G2	Neuer Sonnenschutz aussen, Lamellen	0.02	0.05	0.02
G3	Neuer Sonnenschutz aussen opt.	0.05	0.11	0.02
G4	Neuer Sonnenschutz aussen opt., Soff, alufarbig	0.09	0.15	0.1
G5	Neuer Sonnenschutz zwischenliegend, Lamellen	0.01	0.2	0.01
G6	Neuer Sonnenschutz zwischen, Stoff, alufarbig	0.09	0.3	0.1
G7	Neuer Sonnenschutz innen, Lamellen	0.03	0.41	0.03
G8	Neuer Sonnenschutz innen, Stoff, alufarbig	0.09	0.67	0.1
G9	Neuer Lamellenstoren, weiss, Lamellenstellung 45°	0.225	0.24	0.208

(*) Der g-Wert des Fensters bei geschlossenem Sonnenschutz wird anhand eines vereinfachten Ansatzes bestimmt, und zwar als Produkt des z-Werts und des g-Werts des Fensterglases. Dies aus Gründen der Datenverfügbarkeit (Sonnenschutzhersteller- oder Anbieter geben den g-Wert von Sonnenschutz und Fenster üblicherweise nur für eine beschränkte Anzahl Glastypen an) und weil die Abweichung vom durch die Normen vorgegebenen Vorgehen gering ist (eigentlich müsste der g-Wert für die jeweils betrachtete Kombination Sonnenschutz/Fenster jeweils separat bestimmt und angegeben werden).

Tabelle 18: Übersicht über die bei den energetischen Berechnungen einbezogenen Sonnenschutztypen (Quellen: Annahmen HTA Luzern/CEPE, Sonnenschutzunternehmen 1)

2.4.6 Luftwechsel, Kühlung

Im Gebäudebestand besteht in der Ausgangslage im Bereich Lüftung und Kühlung eine grosse Vielfalt (Tabelle 19). In gut der Hälfte des Bürogebäudebestandes ist keine Lüftungsanlage installiert. Bei den übrigen Gebäuden sind die Funktionen Luftwechsel und Kühlung bei einem markanten Teil des Anlagenbestandes gekoppelt, d.h. die Kälteverteilung erfolgt über die Luft. Aus diesem Grund werden die beiden Bereiche Lüftung und Kühlung im selben Unterkapitel beschrieben. Auch im Neubau besteht eine gewisse Kopplung und Anlagenvielfalt (siehe z.B. Schadegg und Baggi, 2006).

Die Luftwechselrate der Lüftungsanlage orientiert sich im Neubaubereich und bei neu installierten Lüftungen im Gebäudebestand an den hygienischen Erfordernissen bzw. an den Vorgaben gemäss SIA 380/1 $_{2001}$ und wird auf 3.9 $(m^3/h)/m^2$ festgelegt (zum Vergleich: die 2006 als Vernehmlassungsexemplar verfügbar Studie von Schadegg und Baggi liegt der Aussenluftvolumenstrom in etwas mehr als 50% der Fälle über 4.5 $(m^3/h)/m^2$, d.h. der Referenzfall wurde etwas optimistisch eingeschätzt). Als Referenz dient ein konstanter Volumenstrom. Dieses Regelkonzept ist in der Praxis nach wie vor mehrheitlich verbreitet (vgl. Schadegg und Baggi, 2006). Die Betriebszeit dauert im Referenzfall in der Regel von 7 h bis 19 h). In den Fällen ohne Lüftungsanlage wird ein Luftwechsel durch Fensterlüftung simuliert.

	Nicht	Teilweise	Ganz
Belüftung	50%	36%	14%
Klimatisierung	58%	32%	10%

Tabelle 19: Anteile Belüftung und Klimatisierung bei grossen Bürogebäuden (Quelle: Weber 2001)

Die Luftwechselrate liegt bei alten, nicht erneuerten Anlagen häufig über den hygienischen Erfordernissen. Als Referenz dient ein konstanter Volumenstrom von 12, 8 respektive 4 $(m^3/h)/m^2$, Betriebszeit bei einem Teil der Fälle 24 h/d, respektive von 7 bis 19 Uhr. Eine Übersicht über die Referenzfälle und davon ausgehenden Verbesserungsmassnahmen gibt Tabelle 20. Um den Effekt von Betriebsoptimierungsmassnahmen zu berechnen, werden als Referenzfall auch alte, nicht erneuerte Anlagen mit in die Berechnungen einbezogen werden.

	Referenzfall	Komfort- und Effizienzmassnahmen
Luftwechsel	Fensterlüftung, keine Lüftungsanlage vorhanden	Einbau einer Lüftungsanlage inkl. Verteilung (Lufthygiene, WRG)
	Lüftungsanlage vorhanden, ohne WRG	BO, Einbau einer WRG, verschiedene Varianten
	Lüftungsanlage und WRG vorhanden	BO, Ersatz WRG durch WRG mit besserem Wirkungsgrad, geringere Druckverluste (grössere Querschnitte), bedarfsabhängige Luftwechselraten (z.B. präsenz- oder CO_2-geregelt)
Kühlung	Keine Lüftungsanlage vorhanden, Einbau von Kälteerzeugung und Umluftkühlern/Kühldecken *	Höhere Effizienz der Gebäudekühlung (höhere JAZ)
	Lüftungsanlage vorhanden, inkl. Kühlung der Zuluft (vorhanden oder neu eingebaut *)	BO, Trennung der Funktion Kühlung und Lüftung, höhere Effizienz der Gebäudekühlung
	Lüftungsanlage, Kühlung der Zuluft vorhanden, Umluftkühler vorhanden (oder neu eingebaut *)	BO, Verbesserung der Gebäudekühlung
(*) Diese Referenzfälle erhöhen den Energiebedarf gegenüber einer Situation ohne Kühlung, sind jedoch im Trend der zunehmenden Kühlung von Gebäuden als Referenz anzusehen.		

Tabelle 20: Referenzfälle und mögliche Massnahmen im Gebäudebestand im Bereich

Die betrachteten Luftwechsel-Kühlungs-Konzepte (LWK) umfassen:

- LWK0 steht für einen natürlichen Luftwechsel ohne mechanische Lüftungsanlagen. Der Luftwechsel ist aufgrund der Nutzung und einer allgemeinen Undichtigkeit des Gebäudes als eher hoch zu bezeichnen (dies wird durch entsprechende Undichtigkeit im Fensterbereich simuliert).
- LWK1 steht ebenfalls für einen natürlichen Luftwechsel ohne mechanische Lüftungsanlagen. Der Luftwechsel ist als durchschnittlich zu bezeichnen.
- LWK2 beinhaltet eine mechanische Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung (WRG), jedoch keine Kühlung der Zuluft. Im Gebäudebestand weist die WRG im Referenzfall einen thermischen Wirkungsgrad von 60% auf, im Neubaubereich beträgt dieser 70% im Referenzfall. Sowohl im Neubau wie auch bei der Erneuerung können effizientere Anlagen mit 80% bis 90% eingesetzt werden.
- LWK3 beinhaltet eine mechanische Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung (WRG) und eine Kühlung der Zuluft. Der thermische Wirkungsgrad der WRG im Referenzfall des Gebäudebestands wurde mit 55% angenommen und die Jahresarbeitszahl der Kühlanlage mit 2 im Gebäudebestand und mit 2.5 im Neubau..
- LWK4 umfasst einen Luftwechsel über die Lüftung inkl. Kühlung der Zuluft sowie eine hydraulische Kälteverteilung mit Kühlelementen in den Räumen (z.B. Kühldecken oder Umluftkühler).
- LWK5 umfasst einen Luftwechsel über die Fenster und einen nachträglichen Einbau von Kühlelementen in den Räumen jedoch keine mechanische Lüftung. Hierbei kann es sich im Referenzfall auch um Kleinklimageräte handeln (JAZ 1.6).
- LWK6 beinhaltet eine mechanische Lüftungsanlage, jedoch keine Wärmerückgewinnung (WRG) und auch keine Kühlung der Zuluft. LWK6 dient insbesondere als Referenzfall im Gebäudebestand. Im Neubaubereich ist LWK6 jedoch ohne Bedeutung, denn der Einbau einer WRG ist im Neubau Standard (bzw. vorgeschrieben).

Die definierten Luftwechsel-Kühlkonzepte (Tabelle 21) ermöglichen es auch die Wirkung einer Trennung der Kühl- und Lüftungsfunktionen zu betrachten. Im getrennten Fall wird die Zuluft nur so weit gekühlt, wie es für eine komfortable Luftzuführung erforderlich ist, während der übrige Kühlbedarf hydraulisch verteilt wird und über Kühlelemente in den Raum abgegeben wird.

	Konzepte für Luftwechsel (LW) und Kühlung (K)	Plant	AHU (*)	Bemerkung
LWK0	LW „natürlich“ (Fenster), LW eher hoch, Kühlung nein	Plant1	Keine	Fenster ohne Gummidichtung
LWK1	LW „natürlich“, LW normal, Kühl nein	Plant1	Keine	Fenster mit Gummidichtung
LWK2	LW mechanisch, mit WRG, Kühlung nein	Plant1	AHU2 (**) AHU3 (***)	AHU2: Wirkungsgrad bestehende WRG (60%) AHU3: Verbesserte oder neue WRG (70%, 85%)
LWK3	LW mechanisch mit WRG, Kühlung der Zuluft	Plant2	AHU3	Verbesserte oder neue WRG (70%, 85%), [im Gebäudebestand evtl. 60% im Referenzfall ?]
LWK4	LW mechanisch, mit WRG, Kühlung der Zuluft und hydraulisch (Umluftkühler oder TAB)	Plant2	AHU3	Falls die Kühlleistung allein durch Kühlung der Zuluft nicht ausreichend ist
LWK5	LW natürlich, Kühlung über dezentrale Klimageräte	Plant2	Keine	Im Gebäudebestand, wenn keine Lüftung vorhanden
LWK6	LW mechanisch, ohne WRG, keine Kühlung	Plant1	AHU1	Im Gebäudebestand
	Ergänzende Strategien: Nachtauskühlung: Fallweise durch Fenster (Kippöffnung) oder über Lüftung (wenn vorhanden) FreeCooling: Abwärmeabgabe des Kühlaggregats über Rückkühler, ohne Kältemaschine			
(*) Bezeichnung in IDA-ICE: Air Handling Unit (**) Gebäudebestand (***) Gebäudebestand und Neubau				

Tabelle 21: Übersicht über die bei den energetischen Berechnungen einbezogenen Konzepte für Luftwechsel (LW) und Kühlung (K)

Bei einem Teil der Fälle wird angenommen, dass sich das Fenster bei Überhitzung durch eine automatisiertes Fensterlüftungssystem öffnet oder durch die Nutzenden geöffnet wird und zwar, wenn die Innentemperatur 23°C übersteigt und Aussentemperatur mindestens 2°C unter der Innentemperatur liegt. Dies ist als ideales Öffnungsverhalten zu bezeichnen, das in der Praxis stark abweichen kann. Es ist auch von Fällen auszugehen, in denen die Fenster weniger häufig geöffnet werden (z.B. bei Belastung durch Aussenlärm) oder in denen die Fenster auch geöffnet werden, wenn die Aussentemperatur wärmer ist als die Innentemperatur (minus 2°C).

2.4.7 Kälteerzeugung und –verteilung

Als Referenzfall dient eine „klassische" Kältemaschine, zu 100% Kompressorbetrieb, Rückkühlung trocken, Jahres-Wirkungsgrad 2.5 (wenn nur die Zuluft gekühlt wird) bzw. 2 (Kühlung der Zuluft und hydraulische Kälteverteilung). Als Kälteverteilung wird von zwei Fälle ausgegangen (siehe auch Tabelle 25): zum erfolgt die Kälteverteilung über die Lüftung und zum anderen über die Lüftung und hydraulisch, die Kälteabgabe bei letzterem über Umluftkühler. Im Gebäudebestand dient eine „konventionelle" Kältemaschine als Referenzfall, wobei von 100% Kompressorbetrieb (kein By-Pass zwecks Free-Cooling über Rückkühler oder dergleichen), einem trockenen Rückkühlung ausgegangen wird, mit einem typischen Jahres-Nutzungsgrad von 2 bis 2.5. Als Kälteverteilung wird von drei Fällen ausgegangen (siehe auch Tabelle 25): zum einen erfolgt die Kälteverteilung über die Lüftung, zum zweiten hydraulisch über Umluftkühler und zum dritten kombiniert über die Lüftung und Umluftkühler.

Der Energieverbrauch eines Gebäudes hängt nicht nur von der Bauweise und den energie-technischen Kennwerten der Anlagen, sondern auch von der Betriebsweise der Anlagen und vom Verhalten der Gebäudenutzenden ab. Die resultierende energetische Wirkung unterschiedlicher Betriebsweisen der Anlagen, insbesondere der Lüftungen, ist ebenfalls im Gebäude-Simulationsmodell abzuschätzen, um den dynamischen Effekten gerecht zu werden. Wird die Lüftung z.B. über Nacht betrieben, erhöht sich zum einen der Stromverbrauch (was exogen berechnet werden könnte), aber u.U. reduziert sich der Kühlbedarf während des Tages, weil die Räume während der Nacht abgekühlt werden können. Häufig sind in der Realität jedoch auch suboptimale Betriebsweisen anzutreffen. Diese sind als Referenzfälle (Ausgangslage) von Betriebsoptimierungsmassnahmen zu betrachten. Die in das Untersuchungsdesign mit einbezogenen Betriebszeiten und die thermischen WRG-Wirkungsgrade sind in Tabelle 22 dargestellt.

AHU	Temperaturerhöhung Zuluft durch Ventilatormotor	Thermischer WRG-Wirkungsgrad	Betriebsweise
AHU1		keine	24 h/Tag bzw. 7 h bis 19h 5 Tage/Woche
AHU2	1.5 K	60%	24 h/Tag, 5 Tage/Woche
AHU3	1 K	70%, 85%	7 h bis 19h, 5 Tage/Woche

Tabelle 22: Übersicht über die bei den energetischen Berechnungen einbezogenen Konzepte für Luftwechsel (LW) und Kühlung (K)

Der Elektrizitätsbedarf für die Luftförderung ist direkt proportional zu den Druckverlusten der Lüftungsanlage. Entsprechend wichtig ist eine sorgfältige Auslegung (beim Neubau) bzw. eine Erneuerung der bestehenden Lüftungsanlagen. Tabelle 23 zeigt die Druckverluste als Funktion der Bauperiode sowie für heutige (2005) Neubauten. Zum Vergleich: Im Anwendungsinstrument zu SIA 380/4, Teil Lüftung, Klima, Befeuchtung (Seidinger 2003) wird für die Kat II (Büronutzung, Verkauf etc.) von 800 Pa für die Zuluft und 600 Pa für die Abluft ausgegangen.

Die Druckverluste hängen zum einen von der Auslegung ab (insbesondere vom Querschnitt der Luftkanäle im Vergleich zum Luftvolumenstrom) sowie von der Gebäudegrösse (längere Wege verursachen höhere Druckverluste).

	Zuluft			Abluft			Total
	Monobloc	Verteilung	Total	Monobloc	Verteilung	Total	Zu- und Abluft
Gebäudebestand 1960 - 1985	700-1000	700-1000	1400-2000	300-700	300-700	600-1400	2000-3400
Neu ab 1985	600-800	300-400	900-1200	400-600	200-300	600-900	1500-2100
Neubau 2005, Standard und optimiert	300-600	200-300	500-900	150-400	150-250	300-650	800-1450

Tabelle 23: Druckverluste von Lüftungsanlagen in Funktion der Einbauperiode (Quelle A+W)

Für die energetischen Berechnungen im Kap. 3 wurden die Angaben gemäss auf verschiedene Zustände der Lüftungsanlage konkretisiert, um die energetische Wirkung von konkreten Einzelmassnahmen wie Erneuerung des Monoblocs, Erneuerung der Verteilung etc. berechnen zu können (siehe Tabelle 24). Bei der Erneuerung der Luftaufbereitungsanlage (Monobloc) kann der Druckverlust (600 bis 700 Pa) und damit der Elektrizitätsbedarf merklich reduziert werden. Eine mindestens so bedeutende Verbesserung ist möglich, wenn die Luftverteilung erneuert wird, besonders beim Ersatz der ältesten Anlagen, die mit geringen Querschnitten und hohen Luftgeschwindigkeiten konzipiert waren. Selbst bei Neuanlagen besteht ein Optimierungspotenzial von schätzungsweise 30%.

GebTyp	Zuordnung	Zuluft (Pa)	Abluft (Pa)	Total (Pa)
BB3 (Ref.)	Alter Monobloc, alte Verteilung (ohne WRG)	1500	800	2300
BB3	Neuer Monobloc, alte Verteilung	1300	725	2025
BB3	Neuer Monobloc, neue Verteilung	850	525	1375
BB4 (Ref.)	Alter Monobloc, alte Verteilung	1325	900	2225
BB4	Neuer Monobloc, alte Verteilung	1050	625	1675
BB4	Abluftanlage	300	475	775
BB2	Verbesserte Abluftanlage	150	475	775
Neubau (Ref.)	Neuer Monobloc, Neue Verteilung (Neubau)	700	475	1175
Neubau	Optimiert (Neubau)	300	300	800
	Brüstungsgerät	300	200	500

Tabelle 24: Annahmen zu Druckverlusten von Lüftungsanlagen (Annahmen CEPE)

Der elektrische Energiebedarf ergibt sich aus den Druckverlusten und dem geförderten Luftvolumenstrom dividiert durch den elektrischen Gesamtwirkungsgrad der Lüftung (Ventilator- und Elektromotorwirkungsgrad). In (Seidinger 2003) ist der Wirkungsgrad generell auf 55% für die Grenzwertberechnung bzw. 60% für die Zielwertberechnung festgelegt. Der Wert beinhaltet die Teilwirkungsgrade von Motor, Ventilator und Steuerung.

2.4.8 Wärmeerzeugung und -verteilung

Als Referenz werden im Neubau fossile Heizanlagen angenommen. In den Fällen mit Lüftung ist eine Wärmerückgewinnung Standard und als Referenz wird von einem Wirkungsgrad von 60% ausgegangen. Die Wärmeverteilung erfolgt im Referenzfall über Radiatoren oder Fussbodenheizung, bei Einkaufszentren auch über die Luft. **Im Gebäudebestand** dient die Instandsetzung von fossilen Heizanlagen als Referenz angenommen. In den Fällen mit Lüftung sind sowohl Situationen mit Wärmerückgewinnung (WRG) als auch solche ohne WRG als Referenz zu bezeichnen. Im Fall mit WRG wird im Referenzfall von einem Wirkungsgrad von 60% ausgegangen. Die Wärmeverteilung erfolgt im Referenzfall über Radiatoren oder Fussbodenheizung, bei Einkaufszentren auch über die Luft.

2.4.9 Interne Lasten und EKZ Elektrizität im Ist-Zustand und im Referenzfall

Die EKZ Elektrizität kann bei einem selben Gebäudetyp (z.B. Bürogebäude) stark variieren (siehe Abbildung 1). Die Annahmen zur Personenbelegung, zur Beleuchtung, zur Gerätedichte und zu Kühlung/Klimatisierung werden pro Gebäudetyp so festgelegt, dass die EKZ gemäss Abbildung 1 in etwa abgebildet werden. Wie in Abbildung 1 werden pro Gebäudetyp drei homogene Gruppen unterschieden. Zur Orientierung dienen die Angaben der SWKI-Richtlinie 95-3 und die weiteren Annahmen in Tabelle 25. Bei den Läden mit Kühlprodukten kann durch die Kühlvitrinen eine Entlastung von –10 W/m^2 entstehen (falls die Kälte zentral in einem anderen Raum erzeugt wird und nicht lokal im Kühlmöbel). Bei den Geräten wird dabei von 2150 Volllaststunden ausgegangen, bei den Personen von 1720 Volllaststunden pro Jahr.

	Personenbelegung	Geräte	Beleuchtung	Lüftung	Kühlung
Bürogebäude Typ 1	18 m^2/Person	50 W/Pers.	9 W/m^2	Keine	Keine
Bürogebäude Typ 2	14 m^2/Person	100 W/Pers.	11 W/m^2	Teilweise	Kühlung Zuluft
Bürogebäude Typ 3	10 m^2/Person	150 W/Pers.	12.5 W/m^2	Alle Räume	Klimatisierung
Warenhaus, Einkaufszentrum	3 m^2/Person	2 W/m^2	15 W/m^2	Ja	Ja
Laden mit Kühlprodukten	5 m^2/Person	18 W/m^2	14 W/m^2	Ja	Ja
Laden ohne Kühlprodukte	5 m^2/Person	2 W/m^2	14 W/m^2	Nein	Nein
Schulen (ohne Hochschulen)	3 m^2/Person	4 W/m^2	10 W/m^2	Nein	Nein

Tabelle 25 Mögliche Annahmen im Hinblick darauf, die EKZ Elektrizität gemäss Abbildung 1 abzubilden
Quelle: SWKI 95-3, Erweiterung CEPE

Die Grössenordnung der EKZ Elektrizität und der internen Lasten des Gebäudebestandes ist vergleichbar mit derjenigen des Neubaus (siehe Abbildung 1). Entsprechend können die Annahmen zur Personenbelegung, zur Beleuchtung, zur Gerätedichte und zu Kühlung/Klimatisierung pro Gebäudetyp ähnlich wie im Neubaufall getroffen werden, wobei dort tendenziell von einer etwas besseren Technik ausgegangen wird. . Bei den Bürogebäuden (Gebäudebestand) können die Auslegungsdaten mit den tatsächlichen Verbräuchen gemäss (Weber, 2001, S. 118) verglichen werden, indem die spezifische Leistung mit typischen jährlichen Volllaststunden multipliziert werden. Zu berücksichtigen ist zudem, dass sich die erhobenen Energiekennzahlen in Weber, 2001 auf die gesamte EBF der Gebäude beziehen, die Auslegungswerte gemäss SWKI jedoch nur auf die Büroräume im eigentlichen Sinn (ohne Verkehrsflächen etc.). Bezogen auf die Büroräume liegen die erhobenen EKZ schätzungsweise doppelt so hoch (35% der BGF sind Büroräume, die EBF umfasst 70% der BGF, wobei anzunehmen ist, dass die Büroräume zu 100% zur EBF gehören), wenn angenommen wird, dass sich alle Arbeitshilfen in den Büroräumen befinden. Entsprechend beträgt der spezifische Bedarf für Arbeitshilfen im Mittel rund 70 MJ/m$^2_{\text{Bürofläche}}$a (ca. 90% <=100 MJ/m$^2_{\text{Bürofläche}}$a).

Gemäss Weber, 2001, bezogen auf			SIA D 0176		SWKI		Dieses Projekt	
gesamte EBF	Büroräume				1260 Volllaststunden/a		2150 Volllaststunden/a	
Mittelwert	Mittelwert	90%-Wert	tief	hoch	50 W/Pers., 10m^2/Pers.	150 W/Pers., 10m^2/Pers.	80 W/Pers., 16 m^2/Pers.	150 W/Pers., 10m^2/Pers.
36	72	100	40	120	23	68	39	116

Tabelle 26: EKZ Elektrizität für Arbeitshilfen in Bürogebäuden in MJ/m^{2}a gemäss verschiedenen Quellen

Bzgl. dem Niveau der internen Lasten werden zwei verschiedene Niveau unterschieden: tief und hoch, siehe Tabelle 27. Die Modellierung des zeitlichen Verlaufs der Personen und Geräte erfolgt gemäss SWKI und ist im Anhang dokumentiert.

	Tief	Mittel	Hoch	Volllast-stunden	Resultierende Belastung Tief	Mittel	Hoch
Personen (70 W/Pers.)	18 m²/Pers.	14 m²/Pers.	10 m²/Pers.	6 h/d	4 W/m²	5 W/m²	7 W/m²
Geräte	50 W/Pers.	100 W/Pers.	150 W/Pers	6 h/d	3 W/m²	7 W/m²	15 W/m²
Beleuchtung (400 lx)				11 h/d	9 W/m²	11 W/m²	12.5 W/m²
Gesamt (Wh/m²d)					130	170	240

Tabelle 27: Übersicht über typische Werte von internen Lasten (Quelle: SWKI 95-3)

Für die Simulationsrechnungen mit IDA-ICE wurden bzgl. interner Lasten zwei Fälle unterschieden, siehe (Tabelle 28).

	Tief	Hoch
Personen (70 W/Pers.)	16 m²/Pers., d.h. 4.4 W/m²	10 m²/Pers., d.h. 7 W/m²
Geräte (als Parameter)	5 W/m²	15 W/m²
Beleuchtung (Neubau)	9 W/m²	13.5 W/m²
Beleuchtung (Bestand)	15 bis 18 W/m²	15 bis 18 W/m²

Tabelle 28: Annahmen bzgl. interner Lasten bei Simulationsrechnungen mit IDA-ICE

Die resultierenden Elektrizitätskennzahlen ergeben sich aus den oben beschriebenen Annahmen zu Geräten und Beleuchtungen sowie die Annahmen zu Lüftungen und Kühlungen der vorangehenden Unterkapitel sind für verschiedene Konfigurationen von Referenzfällen in Abbildung 2 dargestellt. Die den Referenzfällen zugrundeliegenden Annahmen sind in Tabelle 96 im Anhang (S. 280) dokumentiert.

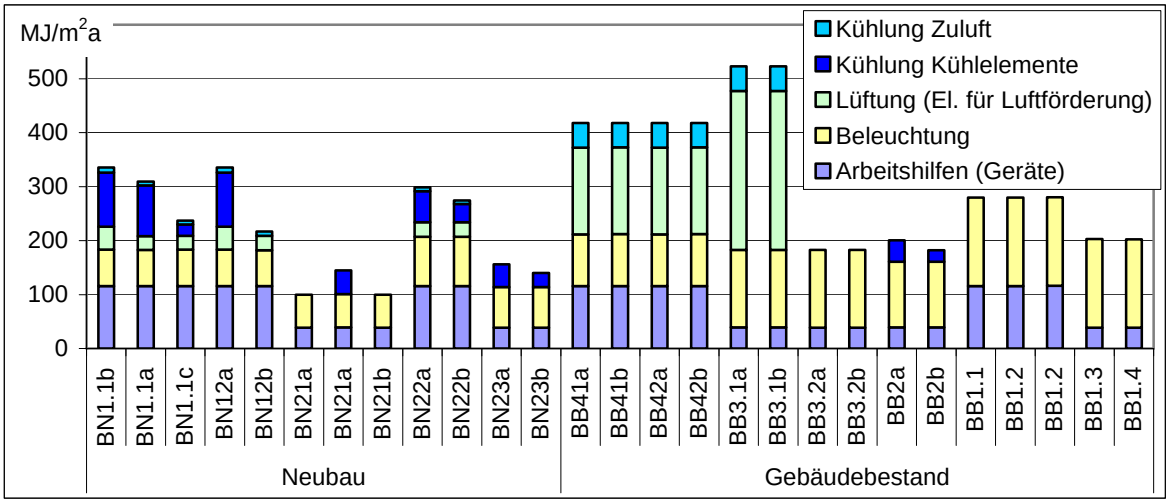


Abbildung 2 Resultierende Elektrizitäts-Energiekennzahlen der verschiedenen Neubau-Referenzfälle und der Instandsetzungs-Referenzfälle im Gebäudebestand (BB41a bis BB1.4)

2.4.10 EKZ Wärme im Ist-Zustand und Referenzfall

Die aus den oben beschriebenen Annahmen zur Gebäudehülle, Gebäudetechnik und internen Lasten durch Personen, Geräte und Beleuchtungen und ihre Belegungs- bzw. resultierenden Raumwärme-Energiekennzahlen sind für verschiedene Konfigurationen von Referenzfällen in Abbildung 3 darge-

stellt. Die den Referenzfällen zugrundeliegenden Annahmen sind in Tabelle 96 im Anhang (S. 280) dokumentiert.

Zur EKZ Wärme im Referenzfall (RT2): Die Erneuerung der Gebäudehülle wird in der Erneuerungspraxis meist etappenweise vorgenommen, d.h. die einzelnen Bauteile wie Fassaden, Dach, Fenster werden separat erneuert. Je nach dem, welche Bauteile bereits erneuert wurden, ist die EKZ Wärme in der Ausgangslage einer bestimmten Erneuerung unterschiedlich. Wichtiger als die EKZ sind für Kosten- und Nutzenüberlegungen deshalb die Annahmen pro Bauteil (das Niveau der EKZ beeinflusst zwar die Wirkung einer bestimmten Massnahme ebenfalls, weil das Gebäude als System zu betrachten ist; entsprechend werden die Massnahmen in ihrer Reihenfolge variiert werden).

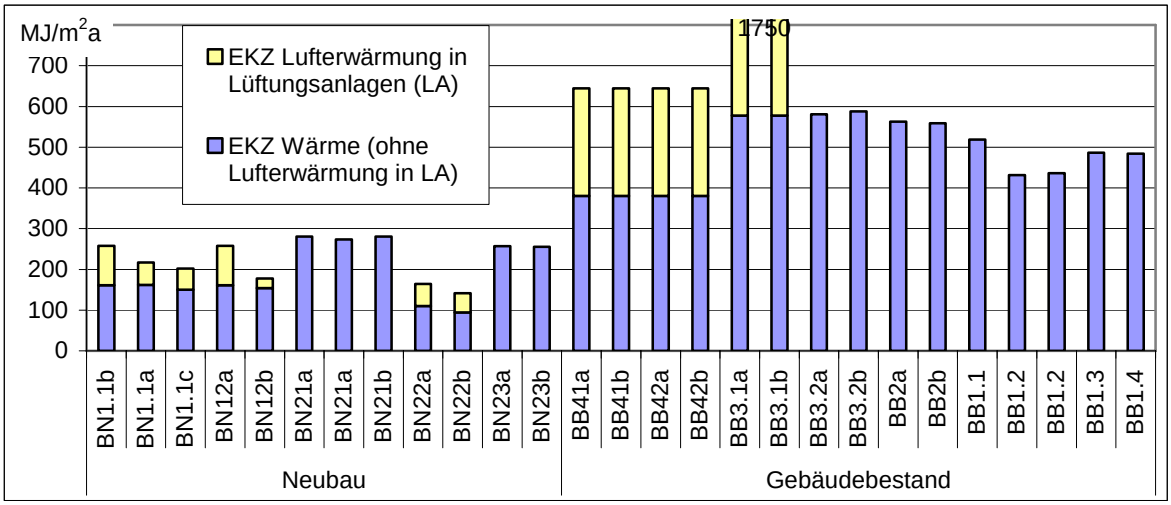


Abbildung 3 Resultierende Raumwärme-Energiekennzahlen der verschiedenen Neubau-Referenzfälle bei und der Instandsetzungs-Referenzfälle im Gebäudebestand (BB41a bis BB1.4)

3 Energie- und Komfortberechnungen

Der Energiebedarf von Wirtschaftsbauten hängt von vielen verschiedenen Faktoren ab. Die Wirkung einzelner Faktoren beeinflussen sich zudem in vielen Fällen gegenseitig. Dies gilt umso mehr, wenn nicht der Energiebedarf als Ganzes betrachtet wird, sondern separate Aussagen zu Wärme- und Strombedarf gefragt sind.

3.1 Stand der Forschung und Anwendung

Zur Berechnung der energetischen Wirkung von baulichen Massnahmen an Gebäuden dienen je nach Fragestellung und Anwendung unterschiedliche Verfahren, auf welche nachfolgend eingegangen wird.

3.1.1 Wärmebedarf der Wirtschaftsbauten

Bauteil-Betrachtung: Bei opaken Bauteilen kann zu einer ersten groben Abschätzung eine einfach Energiebilanz mittels U-Wert-Berechnung und Heizgradtagen herangezogen werden (SIA 180). Dies ist grundsätzlich – wiederum als erste grobe Annäherung – auch bei transparenten Bauteilen möglich, wobei hier zusätzlich die solaren Gewinne zu bilanzieren sind.

Statische (stationäre) energetische Gebäudesimulationsmodelle: Je tiefer jedoch die Transmissionsverluste der Bauteile und je höher die internen und solaren Gewinne im Verhältnis zu den Transmissionsverlusten werden, desto eher ist ein energetisches Simulationsmodell zu verwenden, welches die Energieflüsse im Gebäude als Ganzes abbildet. Ein Beispiel dafür ist das in der Schweiz gebräuchliche Berechnungsverfahren SIA 380/1, wobei in der Version 380/1 $_{1988}$ als erste Annäherung eine Jahresbilanz zur Anwendung kam. Dynamische Effekte oder Interaktionseffekte wurden anhand von Kennwerten (z.B. Ausnützungsfaktor für frei verfügbare Wärme) modelliert, wobei die Kennwerte der Modelle anhand von Experimenten und Erfahrungswerten validiert wurden. Die fortschreitende energetische Verbesserung der Neubauten im Laufe der letzten fünfzehn bis zwanzig Jahre machte ein Verfeinerung des Berechnungsverfahrens notwendig. In der neuen Version 380/1 $_{2001}$ (welche mit der europäischen Norm EN 13790 kompatibel ist) kommen deshalb Monatsbilanzen zur Anwendung und die Bauweise (Massiv- oder Leichtbau) wird mittels differenzierteren Kennwerten berücksichtigt. Zudem sind Wärmebrücken explizit zu berücksichtigen und nicht mehr als Pauschalzuschläge. Es handelt sich jedoch auch bei der neuen Version 380/1 $_{2001}$ um einen nicht-dynamischen, stationären Ansatz.

Dynamische Gebäudesimulationsmodelle: Bei sehr markanten Verhältnissen zwischen solaren und internen Lasten einerseits und Wärmeverlusten andererseits und der damit verbundenen Dynamik im Tagesablauf sind auch Monatsbilanzen nicht mehr geeignet, um die bauphysikalischen Verhältnisse genügend genau abzubilden. Solche Verhältnisse sind bei Wohngebäuden, deren Heizwärmebedarf sich dem Passivhausstandard annähert, gegeben, aber auch bei einem Grossteil der heute neu gebauten Wirtschaftsbauten (insbesondere im Bereich Büro, Spitäler, Schulen etc.) aufgrund der hohen Glasanteile in der Fassade bzw. bezogen auf die EBF einzelner Räume sowie aufgrund der hohen dynamischen internen Lasten. Bei Gebäuden mit hohen Glasanteilen stellt sich zudem die Frage des Komforts und damit des Temperaturverlaufs innerhalb der Räume während der Nutzungszeiten. Entsprechend kommen in diesem Bereich dynamische Gebäudesimulationsmodelle zur Anwendung (z.B. TRNSYS DOE 2, IDA ICE). Diese Modelle bilden die thermischen Energieflüsse (Strahlung, Leitung, Luftströme von innen nach aussen bzw. zwischen den Räumen) in einem Gebäude bzw. zwischen dem Gebäude und der Umwelt dynamisch ab, wobei die modellinterne zeitliche Auflösung Stunden oder gar Minuten beträgt. Interne Lasten durch Personen und Beleuchtung sind dabei exogene Inputs. Dynamische Simulationen werden häufig u.a. aufgrund des grossen Rechenbedarfs, aber auch aufgrund der Fragestellung, nur für einzelne (besonders kritische) Räume (Eckräume) oder Zeitperioden (Hitzeperioden) durchgeführt, seltener jedoch für ganze Gebäude oder ganze Jahre. Im Unterschied

zu den oben beschriebenen stationären (statischen) Verfahren verlang der Gesetzgeber keine dynamischen Ganzjahres-Simulationen für ganze Gebäude. Bei Bedarfsnachweisen nach SIA 382/3 kommen zwar dynamische Simulationsprogramme zur Anwendung, aber nur für den Nachweis relevante kritische Perioden. Ein weiterer Grund, warum mit Simulationen meist nur einzelne Räume und keine Gebäude gerechnet werden, ist, dass bei Simulationen meist der thermische Komfort sowie allenfalls der Leistungsbedarf und nicht der Energieverbrauch im Zentrum des Interesses stehen.

3.1.2 Elektrizitätsbedarf der Wirtschaftsbauten

Elektrizität im Hochbau wird in der Schweiz direkt oder indirekt durch die Normen 380/4 (Energie), 381/1 (Lüftungs- und Klimaanlagen – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen) und 382/2 (Kühlleistungsbedarf) geregelt. Das SIA Regelwerk hat zwar keine direkte rechtliche Grundlage, es wird aber von der Behörde bzw. von der Rechtssprechung als Regel der Baukunde eingestuft und bekommt damit einen rechtlichen Charakter. Die Empfehlung SIA 380/4 „Elektrizität im Hochbau" regelt die Bilanzierung der elektrischen Energie in Hochbauten. SIA 382/1 und SIA382/2 sind Lüftungsnorm und haben deshalb indirekt mit elektrischer Energie zu tun.

Beim Elektrizitätsbedarf von Gebäuden wird zwischen verschiedenen Kategorien unterschieden, welche mehr oder weniger entweder von der Bauweise des Gebäudes, der installierten Gebäudetechnik oder der momentanen Nutzung bestimmt werden. Nach SIA 380/4 wird der Elektrizitätsbedarf von Gebäuden in folgende Kategorien unterteilt:

- BL Beleuchtung,
- AH Arbeitshilfen (PC, Kopierer, Kommunikations- und andere Geräte etc.),
- ZD Zentrale Dienste (Kantine, Aufzüge, d.h. Prozesse wie Kochen, Waschen etc.),
- DT Diverse Technik (Heizungspumpen etc.), und
- LK Lüftung/Klima, wobei in diesem Projekt zwischen Lüftung und Klima unterschieden wird

Der Leistungsbedarf für Kühlung und Lüftung wird dabei für den Dimensionierungsfall relativ genau berechnet und auch der energetische Nachweis ist für den Dimensionierungsfall zu leisten. Abschätzungen zum gesamten Strombedarf für Lüftung, Kühlung und Beleuchtung erfolgen anhand von Erfahrungswerten zu Volllaststundenäquivalenten, welche mit den ermittelten Leistungen (Dimensionierungsfall) multipliziert werden.

Die erwähnten SIA-Normen 380/4 und 382/2 sind aufgrund ihres Ansatzes nicht in der Lage, Interaktionseffekte von baulichen oder betrieblichen Massnahmen an der Gebäudehülle (Fensterersatz, Erneuerung / Alternativen zum bestehenden oder geplanten Sonnenschutz, Steuerung des Sonnenschutzes etc.) auf den Energiebedarf für Beleuchtung und Kühlung/Klimatisierung zu berechnen. Unter anderem aufgrund dieses Mangels wurde die SIA Dokumentation SIA 0176 erstellt, welche einige wichtige Wechselwirkungen für Büroneubauten untersuchte.

3.1.3 Gleichzeitige Modellierung des Wärme- und Strombedarfs für Luftwechsel, Kühlungs- und Beleuchtung bei SIA 0176

Im Anhang sind die Ergebnisse der SIA Dokumentation D 0176 (Gebäude mit hohem Glasanteil – Behaglichkeit und Energie-Effizienz) zu Energiebedarf von unterschiedlichen Neubauvarianten wiedergegeben (Abbildung 106, Kap. 9.1, S. 271). Gemäss den Erkenntnissen aus SIA D 0176 kann von folgenden Wirkungsmechanismen ausgegangen werden, wobei darauf hinzuweisen ist, dass die Fazits für die im SIA D 0176 getroffenen Annahmen und technischen Kennwerte gelten:

- Eine Reduktion der U-Werte der Fenstergläser reduziert den Heizwärmebedarf merklich. Bei U-Wert-Verbesserungen bei Fenstern erhöht sich aber der gesamte Strombedarf leicht, denn der Strombedarf für Lüftung und Kühlung wird nicht reduziert (sondern bleibt gleich und in einigen Fällen steigt er sogar) und derjenige für Beleuchtung steigt, weil bei den meisten handelüblichen Fenstern bei tieferem U-Wert auch die Lichttransmission zurück geht.

- Bei hohen internen Lasten ist die absolute Wirkung von Fenster-U-Wert-Verbesserungen (reduzierte MJ/m^{2}a) geringer als bei tiefen internen Lasten (weil der Wärmebedarf im Vergleich zur freien Wärme stärker zurückgeht. Bsp. 50% Glasanteil: 53 MJ/m^{2}a bei tiefer interner Last, 48 MJ/m^{2}a bei hoher interner Last.
- Eine Reduktion der g-Werte bei den Fenstern reduziert den Stromverbrauch für allfällig vorhandene Kühlung (jedoch kaum denjenigen für Lüftung), erhöht jedoch den Strombedarf für Beleuchtung. Bei 30% Fensteranteil ergibt sich insgesamt eine leichte **Erhöhung** des Strombedarfs bei tieferen g-Werten (sic!), bei 50% Glasanteil ist der Stromverbrauch vergleichbar und bei 80% geht der Stromverbrauch bei tieferen g-Werten leicht zurück, allerdings nur minim. Der Heizwärmebedarf nimmt bei tieferen g-Werten erwartungsgemäss zu, bei tiefen Glasanteilen leicht und bei hohem Glasanteil markant (ca. 70 M/m^{2}a!).
- Eine Reduktion der g-Werte des Sonnenschutzes verhält sich ähnlich wie eine solche bei den Fenstern. Sie reduziert den Stromverbrauch für allfällig vorhandene Kühlung (jedoch kaum denjenigen für Lüftung), erhöht jedoch den Strombedarf für Beleuchtung. Bei 30% Fensteranteil ist der Beleuchtungseffekt **grösser** und es ergibt sich insgesamt eine leichte **Erhöhung** des Strombedarfs bei tieferen g-Werten (sic!), bei 50% Glasanteil ist der Stromverbrauch vergleichbar und bei 80% geht der Stromverbrauch bei tieferen g-Werten leicht zurück, allerdings nur sehr gering. Der Heizwärmebedarf nimmt bei tieferen g-Werten erwartungsgemäss zu, bei tiefen Glasanteilen leicht und bei hohem Glasanteil merklich (20 bis 30 MJ/m^{2}a).
- Aufgrund verschiedener, sich gegenseitig kompensierender Effekte ist bei ansonsten gleich bleibender Situation die Auswirkung der Lüftungs- und Kühlungstechnik auf den Strombedarf i.a. überraschend gering (ca. 10 MJ/m^{2}a)

Gemäss den Ergebnissen in SIA D0176 rechtfertigten sich tiefere g-Werte bei Fenster und Sonnenschutz aus energetischer Sicht in der Jahresbetrachtung nur in Ausnahmefällen, denn sowohl Strom wie Wärmebedarf erhöhen sich oder bleiben ungefähr konstant. Einzig bei 80% Glasanteil und bei gleichzeitiger Zuluft- und Zusatzkühlung reduziert sich der Stromverbrauch bei tieferen g-Werten leicht (ca. 10 MJ/m^{2}a). Dies ist zunächst als überraschende Erkenntnis zu bezeichnen, widerspricht dies doch der Intuition, dass eine Verbesserung des Sonnenschutzes und eine Verringerung der g-Werte bei gekühlten oder klimatisierten Gebäuden einen markant verringernden Effekt auf den Strombedarf haben müsste. Möglicherweise sind die Unterschiede u.a. deshalb sehr gering, weil in vielen Fällen ein bereits guter Stand der Technik (gute Kennwerte bei Gläsern und Sonnenschutz) und optimaler Regelung ausgegangen wurde. Zu überprüfen ist aber auch der Zusammenhang zwischen g-Wert auch die Lichttransmission. Können andere Resultate erwartet werden, wenn die Selektivität explizit und unabhängig vom g-Wert berücksichtigt wird?

Unterschiedliche U-Werte der opaken Gebäudehülle wurden in SIA D0176 nicht untersucht. Mögliche Interaktionseffekte: Die Auskühlung während der Nacht und die Infiltration von kühler Luft ist bei fachgerecht ausgeführten Wärmedämmungen (welche meist auch zu einer dichteren Gebäudehülle führen) im Vergleich zu ungedämmter Gebäudehülle geringer und eine Dämmung könnte vormals komfortable Situationen zu unkomfortablen verändern, insbesondere bei hohen internen Lasten.

In SIA D0176 ebenfalls nicht untersucht wurde der jeweils separate Einfluss eines verbesserten Sonnenschutzes einerseits bzw. einer Veränderung der Glaskennwerte andererseits, sondern es wurden fixe Kombinationen Glas plus Sonnenschutz abgebildet (z.B. kombinierter g-Wert).

Für alle vier Orientierungen wurden die jeweils selben Fenstergläser eingesetzt. Aufgrund der Erkenntnisse aus dem Grenzkostenprojekt Wohngebäude ist jedoch zu erwarten, dass bei Süd- bzw. Nordorientierungen unterschiedliche Gläser Energie- und kostenoptimal sind.

3.2 Fragestellungen

Als Fazit der Ergebnisse von SIA D 0176 kann folgendes festgehalten werden. Manche der Massnahmen, von denen eine Verbesserung der energetischen Situation erwartet würde, bringen keine solche oder allenfalls gar eine Verschlechterung. Entsprechend lässt sich auch keine Grenzkostenberechnung durchführen, zumindest dann nicht, wenn als Nutzen nur die energetische Komponente mit einbezogen wird. Denn viele der betrachteten Varianten dienen v.a. der Komfortverbesserung. Für die Bedürfnisse des vorliegenden Projekts sind weitere energetischen Berechnungen erforderlich, nicht zuletzt deshalb, um auch den Gebäudebestand und weitere Gebäudetypen abzudecken.

Mit den hier vorgeschlagenen energetischen Berechnungen sollen folgende Fragestellungen beantwortet werden.

3.2.1 Wärmebedarf in Funktion zunehmenden Wärmeschutzes

- Wie verändert sich der Wärmebedarf in Funktion zunehmender Dämmstärken bzw. geringeren U-Werten? Zu untersuchen sind Strategien: Pakete mit vergleichbaren Grenzkosten bei den Bauteilen, allenfalls ähnlichen U-Werten. Als Parameter fliessen ein: geringe und hohe interne Lasten, Kühlung ja/nein, höhere bzw. tiefere Glasanteile.
- Führt eine verstärkte Wärmedämmung und die damit verbundene geringere Auskühlung (insbesondere nachts) zu einer Verschlechterung der Komfortsituation im Sommer? Kann dies durch verstärkten Sonnenschutz, erhöhten Luftwechsel oder gar eine Kühlung kompensiert werden?
- Zusätzliche Stunden mit Sonnenschutzeinsatz verringern den Anteil der nutzbaren Sonnenwärme. In welchen Fällen hat die Qualität und die Steuerung des Sonnenschutzes einen Einfluss auf den Heizenergiebedarf und wie stark ist dieser?
- Kann die Nutzung der (passiven) Sonnenenergie optimiert werden, indem die Steuerung des Sonnenschutzes zusätzlich die Raumtemperatur mit einbezieht?

3.2.2 Glasanteil, Glasqualität, Sonnenschutz und Auswirkungen auf Komfort, Wärme und Kühlungsbedarf

- Wie ändert sich der Kühlbedarf zwischen massiver Bauweise und Leichbauweise, je bei geringen und hohen internen Lasten? Wie verändern sich die Komfortbedingungen bei zunehmender Erhöhung des Glasanteils? Ab wann besteht Handlungsbedarf?
- Kann durch tiefere g-Werte und/oder einen verbesserten Sonnenschutz auf eine Klimatisierung GANZ verzichtet werden? Wenn ja, bei welchen Bedingungen? Oder können die Investitionskosten in Kälteanlagen- und -infrastruktur zumindest merklich reduziert werden?
- Welcher Nutzen kann von einer Automatisierung des Sonnenschutz erwartet werden? Welchen Einfluss hat die Akzeptanz, weil die Automatisierung von Benutzern teilweise übergangen wird?
- Bei tieferen g-Werte und verbesserten Sonneschutz sollte sich erwartungsgemäss der Kühlbedarf reduzieren. Im Gegenzug erhöht sich nebst dem Heizwärmebedarf in den meisten Fällen der Elektrizitätsbedarf für Beleuchtung, weil bei tieferen g-Werten oder ausgedehnterem Sonnenschutzeinsatz meistens auch die Lichttransmission zurück geht. Kann dies mit hochselektiven Gläsern oder Sonnenschützen verhindert werden? Wie stark erhöht sich der Elektrizitätsbedarf für Beleuchtung in welchen Fällen?

3.2.3 Kühlung

Entsteht bei der Wärmedämmung der Gebäudehülle bestehender Gebäude ein zusätzlicher Handlungsbedarf (z.B. automatisierter Sonnenschutz, zusätzlicher Luftwechsel- oder Kühlbedarf)? Wenn ja, ist dies abhängig vom Dämmstandard?

Bei welchen Situationen werden die typischen Komfortschwellenwerte überschritten, so dass auf Kühlung zurückgegriffen wird? Welche Massnahmen erlauben es, die Komfortschwellenwerte wieder zu unterschreiten, so dass auf Kühlung verzichtet werden kann?

Zu unterscheidende Fälle:

- Detailhandel mit Kühlung, aber wenig Fensterflächen, Massnahmen: Wärmedämmung Flachdach, Wärmedämmung Flachdach plus Fassade.
- Bürogebäude ohne Kühlung, Massnahmen: Wärmedämmung Gebäudehülle, evtl. kombiniert mit dichteren Fenstern => jeweils Anzahl Stunden / Tage ausserhalb des Komfortbereichs.
- Schulen (ohne Kühlung), Massnahmen: Wärmedämmung Gebäudehülle, evtl. kombiniert mit dichteren Fenstern => jeweils Anzahl Stunden / Tage ausserhalb des Komfortbereichs, bezogen auf Nutzungen bis 17 Uhr.
- Bürogebäude mit bestehender Kühlung (z.B. Banken).

Bei welchen Massnahmen geht der Kühlbedarf Gebäude mit bereits bestehender Kühlung um wieviel zurück? Geht der Kühlbedarf auch bei eigentlichen Wärmeschutzmassnahmen zurück, sozusagen als Nebeneffekt? Rückgang kWh Nutzenergie, Rückgang Stromverbrauch (inkl. Verbesserung Leistungsziffer), Rückgang zu installierende Leistung (beim nächsten Ersatz).

Zu unterscheidende Fälle:

- Detailhandel mit Kühlung, aber wenig Fensterflächen, Massnahmen: Wärmedämmung Flachdach, Wärmedämmung Flachdach plus Fassade.
- Bürogebäude mit bestehender Kühlung.

Kann die Komfortsituation durch erhöhten Luftwechsel während der Nacht und frühen Morgenstunden verbessert werden?

Welche Komfortzustände können in welchen Fällen mittels Free Cooling erreicht werden? Mögliche Fälle: TABS, Kühldecken mit Erdsonde, adiabatische Kühlung, hybride Rückkühlung mit By-Pass der Kältemaschine.

3.2.4 Beleuchtung

Kann im Neubaufall der Beleuchtungsbedarf bei zunehmendem Glasanteil realistischerweise verringert werden? Oder erhöht er sich sogar, weil der Sonnenschutz häufiger in Gebrauch ist? Inwieweit kann dies mit selektivem Sonnenschutz kompensiert werden?

Entsteht beim Fensterersatz im Gebäudebestand oder beim Einsatz von ausgesprochenen Wärmeschutzfenstern im Neubau ein zunehmender Beleuchtungsbedarf (z.B. wegen geringerer Lichttransmission)? Im Winter, der Übergangszeit oder im Sommer? Anzahl Stunden bzw. Elektrizitätsbedarf für verschiedene Raumtiefen und Fensterflächenanteile:

Kann die Tageslichtnutzung erhöht bzw. Elektrizitätsbedarf verringert werden durch den Einsatz von Storen mit variablen Stellwinkeln (im oberen Bereich flacher, um Licht einzulassen), getrenntem Sonnen- und Blendschutz (äusserer Sonnenschutz, Innenrollo für Blendschutz in Winter)? Welche Konsequenzen hat dies auf den Wärme- und Kühlbedarf?

Wieviel elektrische Energie für Beleuchtung kann eingespart werden, wenn

- eine tageslichtabhängige Regelung das Licht ein- und ausschaltet oder nur ausschaltet (manuelle Einschaltung)
- eine tageslichtabhängige Regelung die Lichtstärke reguliert (Dimmen)
- effizientere Beleuchtungskörper verwendet werden,
- effizientere Leuchtmittel inkl. Vorschaltgeräte eingesetzt werden

Welche Auswirkungen haben diese Massnahmen auf die internen Lasten und wie ändert sich dadurch der Heizwärmebedarf?

3.3 Vorstudie am Beispiel Bürogebäude der Bauperiode 1947-1975

Um die Relevanz der einzelnen Haupt- und Interaktionseffekte aufzuzeigen, wurde zunächst eine Vorstudie durchgeführt und zwar am Beispiel des Bürogebäudebestandes der Bauperiode der 1950er bis 1970er Jahre. Das Untersuchungsdesign wurde dazu derart festgelegt, dass mit einer überschaubaren Anzahl Simulationen die relevanten Fragestellungen beantwortet werden können. Zu diesem Zweck sollten mittels der zu rechnenden Varianten möglichst viele ceteris paribus Vergleiche möglich werden. Bei ceteris paribus Vergleichen ist jeweils der Wert einer Variablen unterschiedlich, während alle andern konstant gehalten werden.

Für die Fallstudie des Bürogebäudebestandes der Bauperiode 1947-1975 werden einige wichtige Grössen als Konstanten fixiert. Zu diesen gehören:

- Gebäudegeometrie (4 grosse Mittelräume, 2 kleine Mittel- und 2 kleine Eckräume), Fensteranteil (35%, bezogen auf Fassadenfläche) und Orientierung
- In den Fällen, die eine Lüftungsanlage beinhalten: Luftwechselrate
- In den Fällen, die eine Kühlung beinhalten: Temperatur der Zuluft
- Fensterlüftungssystem (Fenster offen bei Überhitzungsgefahr Ti>23°C, Ta+2°C <Ti)
- Gebäudetechnische Parameter wie Kältemaschinen-JAZ, und Ventilator- und Motorwirkungsgrade
- Interne Lasten bzgl. Personen und Arbeitsgeräten
- Sonnenschutzeinsatzkriterium: 250 W/m^2, ab 70° Sonneneinstrahlungswinkel gemessen ab der Fassaden-Normalen.

Zur Vereinfachung wurden für die Druckverluste der Lüftungsanlage (inkl. Verteilung) nur zwei Werte unterschieden: 2300 Pa für LWK6_1 und LWK6_2 und 2025 Pa für übrigen LWK.

Der in der Vorstudie abgedeckte Parameterraum ist aus den Ergebnistabellen der Simulationen ersichtlich (Tabelle 29 bis Tabelle 31). Die sich aus den daraus möglichen ceteris paribus Vergleichen möglichen Fazits werden in den nachfolgenden Unterkapiteln beschrieben. Die folgenden Tabellen zeigen die Ergebnisse der energetischen Berechnungen in der Übersicht. Tabelliert sind die Energiekennzahl Raumwärme (Tabelle 29) und die Energiekennzahl Elektrizität (Tabelle 30) je auf Stufe Endenergie. In Tabelle 31 sind exemplarisch die Anzahl PPD-Stunden mit mehr als 10% Unzufriedenen aufgrund zu warmer Innentemperaturen für den grossen Südraum dargestellt. Der grosse Südraum erwies sich im Gebäudebestand bzgl. Überhitzungs-Diskomfort als kritischer als der (kleinere) Südwestraum.

Zu betonen ist, dass die Ergebnisse und Fazits in diesem Unterkapitel und die Komfortauswertungen für **Südräume** und **für hohe interne Lasten** gelten**.** Bei geringen internen Lasten können gewisse Phänomene in weit geringerer Ausprägung oder gar nicht auftreten (siehe auch Kapitel 3.4).

Luftwechsel-Kühlung			LWK0	LWK1	LWK6.1	LWK6.2	LWK2.1	LWK2.2	LWK2.3	LWK2.4	LWK2.5	LWK2.6	LWK3.5	LWK3.6	LWK4.3	LWK5
Beschrieb			LW natürlich hoch, keine Kühlung	LW natürlich, keine Kühlung	LW mechanisch, ohne WRG, keine Kühlung		LW mechanisch, mit WRG, keine Kühlung						LW mechanisch, mit WRG, Kühlung Zuluft		LW mechanisch, mit WRG, Kältevert. hydr., Umluftkühler, inkl. Zuluft	LW natürlich, dezentrale Kühlelemente
Betriebszeiten Lüftung					24h/d	7 - 19	24h/d	7 - 19	24h/d	24h/d	7 - 19	7 - 19	7 - 19	7 - 19	7 - 19	
Wirkungsgrad WRG							65%	65%	80%	90%	80%	90%	80%	90%	80%	
So.Schutz	U-Wert Wand	Fenstertyp														
S 1	0.83	1	596	533	1'223	677	641	485	-	-	448	429	449	430	449	522
		2		331	991	440	392	239	277	-	202	183	202	-	204	320
		3		305	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		4		290	-	405	-	-	-	-	165	-	165	-	169	280
		5		344	-	-	-	-	-	-	-	-	211	-	-	-
		6		299	-	412	-	-	-	-	172	-	172	-	176	289
	0.29	1		435	1'133	586	-	-	-	-	354	-	354	-	-	424
		2		238	921	362	309	156	193	136	118	102	119	102	125	228
		3		212	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		4		199	-	-	-	125	-	-	87	73	87	-	97	189
		5		248	-	-	-	-	-	-	125	-	125	-	131	237
		6		206	-	-	-	130	-	-	92	78	92	-	102	197
	0.18	2		218	-	348	-	140	-	-	-	-	103	87	111	209
		4		181	-	-	263	111	-	92	-	61	74	61	-	-
		5		-	-	-	-	-	-	-	-	-	109	93	116	218
		6		188	-	-	-	116	-	-	-	65	78	65	89	178
S 2	0.83	2		335	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.29	1		440	-	590	-	-	-	-	358	-	358	-	-	429
		2		241	-	364	-	-	-	-	121	-	121	-	127	231
		3		215	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		4		201	-	-	-	-	-	-	89	-	89	-	98	-
		5		251	-	-	-	-	-	-	127	-	127	-	133	-
		6		208	-	-	-	-	-	-	94	-	94	-	103	-
	0.18	2		222	-	-	-	-	-	-	-	-	105	-	-	212
		4		183	-	-	-	-	-	-	-	-	75	-	-	-
		5		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	221
		6		190	-	-	-	-	-	-	-	-	79	-	-	180

Tabelle 29 Endenergiebedarf für Raumwärme (MJ/m²a) für das Stockwerk des Modellgebäudes, gemäss Definition Tabelle 11 (Bürogebäude, Bauperiode 1947-1975)

Luftwechsel-Kühlung			LWK0	LWK1	LWK6.1	LWK6.2	LWK2.1	LWK2.2	LWK2.3	LWK2.4	LWK2.5	LWK2.6	LWK3.5	LWK3.6	LWK4.3	LWK5
Beschrieb			LW natürlich hoch, keine Kühlung	LW natürlich, keine Kühlung	LW mechanisch, ohne WRG, keine Kühlung		LW mechanisch, mit WRG, keine Kühlung						LW mechanisch, mit WRG, Kühlung Zuluft		LW mechanisch, mit WRG, Kältevert. hydr., Umluftkühler, inkl. Zuluft	LW natürlich, dezentrale Kühlelemente
Betriebszeiten Lüftung					24h/d	7 - 19	24h/d	7 - 19	24h/d	24h/d	7 - 19	7 - 19	7 - 19	7 - 19	7 - 19	
Wirkungsgrad WRG							65%	65%	80%	90%	80%	90%	80%	90%	80%	
So.Schutz	U-Wert Wand	Fenstertyp	293													
S 1	0.83	1		295	464	355	442	347	-	-	347	347	353	353	360	345
		2		302	471	362	449	354	448	-	354	354	360	-	369	354
		3		319	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		4		319	-	380	-	-	-	-	372	-	378	-	387	370
		5		302	-	-	-	-	-	-	-	-	360	-	-	-
		6		319	-	380	-	-	-	-	372	-	378	-	385	364
	0.29	1		295	464	355	-	-	-	-	347	-	353	-	-	350
		2		301	471	362	449	354	448	448	354	354	360	360	372	362
		3		319	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		4		319	-	-	-	372	-	-	372	371	378	-	392	379
		5		302	-	-	-	-	-	-	354	-	360	-	369	350
		6		319	-	-	-	372	-	-	372	371	378	-	390	372
	0.18	2		302	-	362	-	354	-	-	-	-	360	360	373	364
		4		319	-	-	466	372	-	466	-	372	378	378	-	-
		5		-	-	-	-	-	-	-	-	-	360	360	371	352
		6		319	-	-	-	372	-	-	-	372	378	378	392	374
S 2	0.83	2		300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.29	1		293	-	353	-	-	-	-	345	-	351	-	-	345
		2		300	-	360	-	-	-	-	352	-	358	-	370	357
		3		318	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		4		318	-	-	-	-	-	-	371	-	377	-	390	-
		5		300	-	-	-	-	-	-	352	-	358	-	367	-
		6		318	-	-	-	-	-	-	371	-	377	-	389	-
	0.18	2		300	-	-	-	-	-	-	-	-	358	-	-	359
		4		318	-	-	-	-	-	-	-	-	377	-	-	-
		5		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	348
		6		318	-	-	-	-	-	-	-	-	377	-	-	371

Tabelle 30 Gesamter Elektrizitätsbedarf für alle Verwendungszwecke (MJ/m2a) für das Stockwerk des Modellgebäudes, gemäss Definition Tabelle 11

Luftwechsel-Kühlung			LWK0	LWK1	LWK6.1	LWK6.2	LWK2.1	LWK2.2	LWK2.3	LWK2.4	LWK2.5	LWK2.6	LWK3.5	LWK3.6	LWK4.3	LWK5
Beschrieb			LW natürlich hoch, keine Kühlung	LW natürlich, keine Kühlung	LW mechanisch, ohne WRG, keine Kühlung		LW mechanisch, mit WRG, keine Kühlung						LW mechanisch, mit WRG, Kühlung Zuluft		LW mechanisch, mit WRG, Kältevert. hydr., Umluftkühler, inkl. Zuluft	LW natürlich, dezentrale Kühlelemente
Betriebszeiten Lüftung					24h/d	7 - 19	24h/d	7 - 19	24h/d	24h/d	7 - 19	7 - 19	7 - 19	7 - 19	7 - 19	
Wirkungsgrad WRG							65%	65%	80%	90%	80%	90%	80%	90%	80%	
So.Schutz	U-Wert Wand	Fenstertyp														
S 1	0.83	1	560	595	436	584	436	582	-	-	586	585	525	522	196	188
		2		764	677	920	1'115	920	680	-	920	921	850	-	378	286
		3		794	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		4		833	-	1'061	-	-	-	-	1'062	-	992	-	456	330
		5		651	-	-	-	-	-	-	-	-	726	-	-	-
		6		767	-	974	-	-	-	-	973	-	895	-	411	287
	0.29	1		739	540	732	-	-	-	-	736	-	666	-	-	276
		2		1'000	1'110	1'419	1'115	1'420	1'117	1'117	1'416	1'419	1'365	1'366	633	455
		3		1'037	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		4		1'090	-	-	-	1'664	-	-	1'665	1'664	1'609	-	826	530
		5		866	-	-	-	-	-	-	1'264	-	1'177	-	528	364
		6		1'015	-	-	-	1'563	-	-	1'563	1'563	1'497	-	745	468
	0.18	2		1'060	-	1'550	-	1'551	-	-	-	-	1'497	1'499	754	504
		4		1'160	-	-	1'404	1'797	-	1'408	-	1'799	1'738	1'738	-	-
		5		-	-	-	-	-	-	-	-	-	1'316	1'317	617	402
		6		1'074	-	-	-	1'701	-	-	-	1'703	1'636	1'636	854	524
S 2	0.83	2		726	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.29	1		689	-	695	-	-	-	-	697	-	629	-	-	241
		2		957	-	1'354	-	-	-	-	1'355	-	1'298	-	593	426
		3		1'003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		4		1'057	-	-	-	-	-	-	1'617	-	1'560	-	790	-
		5		841	-	-	-	-	-	-	1'212	-	1'123	-	504	-
		6		985	-	-	-	-	-	-	1'524	-	1'454	-	713	-
	0.18	2		1'018	-	-	-	-	-	-	-	-	1'437	-	-	471
		4		1'125	-	-	-	-	-	-	-	-	1'691	-	-	-
		5		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	379
		6		1'045	-	-	-	-	-	-	-	-	1'592	-	-	498

Tabelle 31 Anzahl Stunden mit PPD-Werten „zu warm“ über 10% für den Südraum des Modellgebäudes, gemäss Definition Tabelle 11

3.3.1 Energetischer Vergleich verschiedener Fassaden-U-Werte

Je nach Ausganglage ist die energetische Wirkung einer Fassadenwärmedämmung unterschiedlich. **Je tiefer der Ausgangswert der Energiekennzahl liegt, desto geringer ist die Wirkung einer Fassadenwärmedämmung,** denn das Verhältnis der sogenannten freien Wärme zu den Wärmeverlusten nimmt zu und der Ausnutzungsgrad der freien Wärme entsprechend ab. Dieser Effekt wird umso grösser, je tiefer der Ausgangswert der Energiekennzahl ist (siehe Abbildung 4). Die Wirkung einer Fassadenwärmedämmung einer zuvor ungedämmten Fassade liegt bei tiefen Ausgangswerten der Energiekennzahl ca. 30% tiefer als bei hohen Ausgangswerten, bei einer Verbesserung des Fassaden-U-Werts um ca. 0.1 W/m^{2}K liegen die tiefsten und die höchsten Werte bereits 50% auseinander, d.h. statt um 20 MJ/m^{2}a geht der Heizenergiebedarf nur um 10 MJ/m^{2}a zurück.

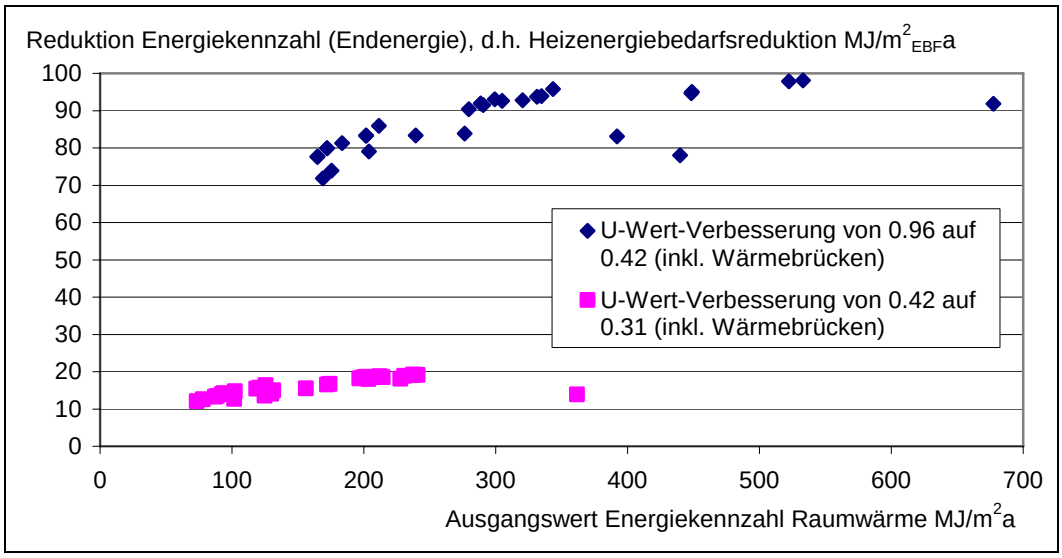


Abbildung 4 **Energetische Wirkung* einer Fassadenwärmedämmung bei Verbesserung der Fassaden-U-Werte**, Funktion des Ausgangswerts der Energiekennzahl Raumwärme (hohe interne Lasten, Verhältnis opake Fassadenfläche zu EBF = 0.45)

Zwischen einer angenäherten Abschätzung der Wirkung einer Fassadenwärmedämmung über die Reduktion der Transmissionswärmeverluste und einer dynamischen Simulationsrechnung mittels IDA bestehen markante Unterschiede: Aus den IDA-Simulationsrechnungen resultiert ein Mittelwert für die EKZ-Reduktion bei einer Wärmedämmung von 86 MJ/m$^2_{EBF}$a bzw. um 115 MJ/m$^2_{Fassade}$a. Damit ist die erzielte Reduktion ca. 30% tiefer als die Brutto-Reduktion des Transmissionsverlustes (berechnet über die Formel U-Wert-Differenz * Heizgradtage * 24 h/Tag). Bei einer Verbesserung der Dämmung von 0.42 auf 0.31 W/m^{2}K, sind die Unterschiede noch etwas deutlicher: der Mittelwert der Reduktion aufgrund Simulationsrechnungen liegt bei 16 MJ/m$^2_{EBF}$a bzw. bei 21 MJ/m$^2_{Fassade}$a und die Abschätzung über die Reduktion der Transmissionsverluste 25 MJ/m$^2_{EBF}$a bzw. bei 34 MJ/m$^2_{Fassade}$a (37% Unterschied). Bei einer Wärmedämmung mit einer U-Wert-Verbesserung von 0.96 auf 0.42 W/m^{2}K (inkl. Wärmebrückeneffekte) liegt die energetische Wirkung in 90% der betrachteten Fällen in einem Band von 20% Abweichung, bei einer Verbesserung von 0.42 auf 0.31 W/m^{2}a innerhalb von 30% (Tabelle 32).

	Differenz EKZ Raumwärme zwischen U-Wand 0.96 und U-Wand=0.42	Differenz EKZ Raumwärme zwischen U-Wand 0.96 und U-Wand=0.42
Mittelwert (Std. abw.) (MJ/m^{2}a)	86 (8.0)	16 (2.3)
10% – 90%-Percentil (MJ/m^{2}a)	77.6 – 95.0	13.3 – 18.8

Tabelle 32: **Energetische Wirkung einer Fassadenwärmedämmung, d,h. Reduktion der Energiekennzahl Raumwärme (Endenergiebedarfsreduktion, MJ/m^{2}a) bei Verbesserung der Fassaden-U-Werte (U-Wert inkl. Wärmebrücken, opake Fassadenfläche zu EBF = 0.45)**

In den Fällen mit Kühlung erhöht eine Fassadenwärmedämmung den Elektrizitätsbedarf geringfügig, siehe Tabelle 33. Bezogen auf die gesamte Energiekennzahl Elektrizität ist der relative Interaktionseffekt relativ gering, bezogen auf die Kühlenergie beträgt die Zunahme je nach Fall 15% bis 20%.

		Energiekennzahl Elektrizität (MJ_{el}/m^2a) bei Wand-U-Wert			Differenz Energiekennzahl Elektrizität (MJ_{el}/m^2a)	
		Referenz (0.96 W/m^2K)	Erneuerung1 (0.42 W/m^2K)	Erneuerung2 (0.31 W/m^2K)	Erneuerung1 - Referenz	Erneuerung2 - Erneuerung1
Zentrale Kälteerzeugung, Umluftkühler	Fe1_Alt_2_2_Isolier	360				
	Fe2_WS2IV_1.1	369	372	373	4	1
	Fe4_WS3IV_0.5	387	392		5	
	Fe5_SS2IV_1.1		369	371		1
	Fe6_SSWS3IV_0.5_g0.35	385	390	392	5	2
Dezentrale Klimageräte	Fe1_Alt_2_2_Isolier	345	350		5	
	Fe2_WS2IV_1.1	354	362	364	8	2
	Fe4_WS3IV_0.5	370	379		9	
	Fe5_SS2IV_1.1		350	352		2
	Fe6_SSWS3IV_0.5_g0.35	364	372	374	8	2

Tabelle 33 Energiekennzahl Elektrizität (Total für Geräte, Beleuchtung, Kühlung, Ventilatoren und Pumpen) für das Stockwerk des Modellgebäudes

3.3.2 Komfortvergleich verschiedener Fassaden-U-Werte

Bei einer Fassadenwärmedämmung erhöht sich die Anzahl der Stunden mit mehr als 10% Unzufriedenen aufgrund eines zu warmen Innenklimas markant. Im Gebäude mit ungedämmter Fassade und nicht-erneuertem Fenster sind in rund 550 bis 600 Stunden pro Jahr mehr als 10% entsprechend Unzufriedene zu verzeichnen, bei erneuerten Fenstern rund 700 Stunden pro Jahr. Nach einer Fassadenwärmedämmung steigt dieser Wert bei der Ausgangslage nicht-erneuerte Fenstern um rund hundert Stunden an, bei der Ausgangslage der bereits erneuerten Fenster um 250 bis 500 Stunden (siehe Tabelle 31 weiter oben). Relativ gesehen beträgt die Zunahme der Stunden 25% bis 70%, Abbildung 5). Um nach einer Fassadenwärmedämmung ähnliche Komfortbedingungen zu erhalten wie im ungedämmten Zustand zu erhalten, sind kompensatorische Massnahmen erforderlich, insbesondere bei Gebäuden mit hohen internen Lasten.

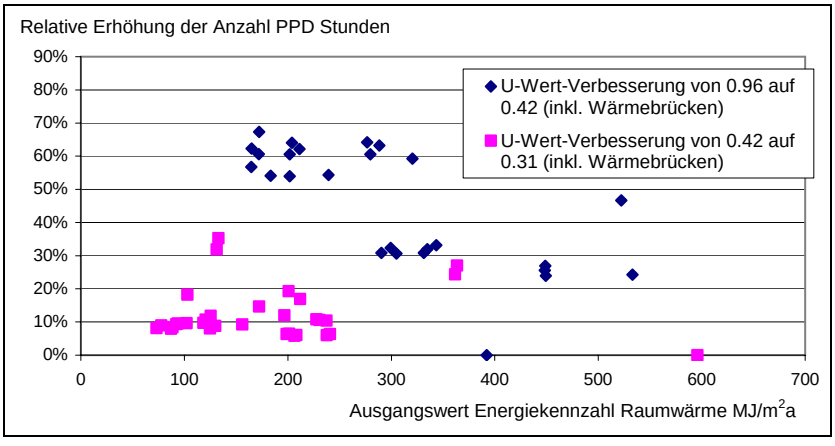


Abbildung 5 Relative Erhöhung der Anzahl Stunden mit PPD-Werten mit über 10% Unzufriedenen bei Verbesserung der Fassaden-U-Werte, als Funktion des Ausgangswerts der Energiekennzahl Raumwärme, Büronutzung mit hohen internen Lasten

Unter dem Vorbehalt, dass die in Tabelle 31 dargestellten PPD-Auswertungen noch mit weiteren Auswertungen zu ergänzen sind (z.B. Schwellenwerte 20% Unzufriedene), sind die notwendigen kompensatorischen Massnahmen je nach Ausgangslage als umfangreich zu bezeichnen. Bei einer vorhandenen Lüftungsanlage würde es – gemäss vorliegenden Auswertungen – zum Beispiel nicht genügen, neu die Zuluft zu kühlen (falls dies vorher nicht der Fall war), sondern es wäre entweder die Installation von Kühlelementen erforderlich (in Form von dezentralen Klimageräten oder mittels neuer Kälteverteilung und zentral erzeugter Kälte) oder das Ergreifen weiterer kompensatorischer Massnahmen (Reduktion interner Lasten, Nachtauskühlung, selektiver Sonnenschutz).

3.3.3 Energetischer Vergleich unterschiedlicher Fenstertypen

Ähnliche Phänomene wie bei der Verbesserung der Fassaden-U-Werte lassen sich auch bei der Fenstererneuerung feststellen.

- Je tiefer die Energiekennzahl in der Ausgangslage bereits liegt, je geringer ist die Wirkung einer U-Wert-Verbesserung im Fensterbereich.
- Je stärker der U-Werte reduziert wird, desto geringer wird zwar der Heizwärmebedarf bzw. der Heizenergiebedarf, desto mehr erhöht sich allerdings auch die Anzahl der Stunden mit mehr als 10% Unzufriedenen aufgrund eines zu warmen Innenraumklimas.

In Tabelle 34 ist die Differenz der Energiekennzahl Raumwärme zwischen dem Fall mit einem heutigen Standardwärmeschutzfenster und einerseits einem altern Fenster (mit unbeschichteter Isolierverglasung) und andererseits zu diversen Alternativen neuer Fenster dargestellt. Wird ein Fenster mit (unbeschichteter) Isolierverglasung durch ein heutiges Standardwärmeschutzfenster ersetzt, reduziert sich der Heizenergiebedarf deutlich, nämlich um über 200 MJ/m^{2}a. Im Vergleich zu einem noch älteren Fenster, z.B. einem solchen mit einem Glas-U-Wert von 3.0 W/m^{2}K und einem Rahmen von 2.2 W/m^{2}K, ist die energetische Wirkung eines Fensterersatzes 20% bis 30% höher, nämlich rund 260 MJ/m^{2}a statt rund 200 MJ/m^{2}a (abzuleiten aus Tabelle 29 weiter oben).

Weitergehende U-Wert-Verbesserungen führen nur noch zu vergleichsweise geringeren weiteren Verbesserungen und im Fall des Sonnenschutzfensters ist die Reduktion sogar geringer als beim Standardwärmeschutzfenster. Beim Einsatz eines Sonnenschutzfensters (Fenstertyp 5, Ug=1.1 W/m^{2}K, g-Wert = 0.41) anstelle eines Standardwärmeschutzfensters (Fenstertyp 2, Ug=1.1 W/m^{2}K, g-Wert=0.52) erhöht sich nämlich die Energiekennzahl Raumwärme um 9 MJ/m^{2}a (trotz des um 0.2 W/m^{2}K tieferem Rahmen-U-Werts).

	Differenz Energiekennzahl Raumwärme FeTyp1 (*) - FeTyp2	Differenz Energiekennzahl Raumwärme FeTyp2 (**) -			
		FeTyp3	FeTyp4	FeTyp5	FeTyp6
Mittelwert (Std. abw.) (MJ/m^{2}a)	226 (19.6)	26 (0.6)	34 (4.5)	-9 (2.1)	28 (3.2)
10% – 90%-Percentil (MJ/m^{2}a)	198.5 – 246.6	26.4 – 25.5	39.4 – 28.7	-5.9 – -10.9	31.8 – 23.8
(*) FeTyp1: Altes Fenster (**) FeTyp2: heutiges Standardwärmeschutzfenster (Definitionen gemäss Tabelle 14)					

Tabelle 34: Energetische Wirkung bei Einsatz unterschiedlicher Fenstertypen: Differenz der Energiekennzahl Raumwärme (Endenergie, MJ/m^{2}a) gegenüber dem heutigen Standardwärmeschutzfenster (Typ2, Ug=1.1, g-Wert=0.52), Fensterfläche zu EBF = 0.25), Büronutzung mit hohen internen Lasten

Als unerwünschter Nebeneffekt erhöht sich in Bürogebäuden bei einem Fensterersatz in vielen Fällen der Elektrizitätsbedarf. Dies zeigt sich auch bei den hier beschriebenen Simulationsrechnungen in den meisten Fällen. Nur beim Sonnenschutzfenster (Typ 5) ist keine Zunahme der Elektrizitätskennzahl festzustellen, siehe Tabelle 35 (dafür eine Zunahme der Wärmeenergiekennzahl, siehe Tabelle 34). Die Zunahme der Elektrizitätskennzahl wird durch einen zunehmenden Lichtbedarf verursacht, wie aus dem Vergleich von Tabelle 35 und Tabelle 36 hervorgeht.

	Differenz Energiekennzahl Elektrizität	Differenz Energiekennzahl Elektrizität FeTyp2 (**) -			
	FeTyp1 (*) - FeTyp2	FeTyp3	FeTyp4	FeTyp5	FeTyp6
Mittelwert (Std. abw.) (MJ/m²a)	-8 (1.6)	-18 (0.5)	-18 (1.0)	3 (4.2)	-16 (2.8)
10% – 90%-Percentil (MJ/m²a)	-9.3 – -6.7	-18.3 – -17.6	-18.6 – -17.1	-0.1 – 11.6	-18.6 – -11.9
(*) FeTyp1: Altes Fenster (**) FeTyp2: heutiges Standardwärmeschutzfenster N.B: ein negatives Vorzeichen kennzeichnet eine Zunahme der Energiekennzahl					

Tabelle 35: Energetische Wirkung bei Einsatz unterschiedlicher Fenstertypen: Differenz der Energiekennzahl Elektrizität (Endenergie, MJ/m²a) gegenüber dem heutigen Standardwärmeschutzfenster (FeTyp2, Ug=1.1, g-Wert=0.52), Fensterfläche zu EBF = 0.25), Büronutzung mit hohen internen Lasten

Werden die Fälle mit Kühlung separat betrachtet, sind sehr ähnliche Ergebnisse festzustellen. Der Effekt der U-Wert Reduktion (geringere Auskühlung durch Transmission und Abstrahlung während der Nacht) und die mit neuen Fenstern verbundenen g-Wert Reduktion (geringerer Lasteintrag der Sonnenstrahlung) scheinen sich in etwa zu kompensieren. Einzig beim Sonnenschutzfenster ist ein geringfügiger zusätzlicher Nutzen erkennbar (in den Fällen mit Kühlung verringert sich die Energiekennzahl um zusätzliche 3 MJ/m²a). Der insgesamt geringe Effekt hängt auch mit dem relativen geringen Anteil der Energiekennzahl „Kühlen" zusammen (vgl. Tabelle 30 mit Tabelle 94 im Anhang).

	Differenz Energiekennzahl Elektrizität Beleuchtung	Differenz Energiekennzahl Elektrizität Beleuchtung FeTyp2 (**) -			
	FeTyp1 (*) - FeTyp2	FeTyp3	FeTyp4	FeTyp5	FeTyp6
Mittelwert (MJ/m²a)	-7	-18	-18	0	-18
(*) FeTyp1: Altes Fenster (**) FeTyp2: heutiges Standardwärmeschutzfenster N.B: ein negatives Vorzeichen kennzeichnet eine Zunahme der Energiekennzahl					

Tabelle 36: Energetische Wirkung bei Einsatz unterschiedlicher Fenstertypen: Differenz der Energiekennzahl Elektrizität für Beleuchtung (Endenergie, MJ/m²a) gegenüber dem heutigen Standardwärmeschutzfenster (Typ2, Ug=1.1, g-Wert=0.52), Fensterfläche zu EBF = 0.25), Büronutzung mit hohen internen Lasten

Fazit: bei den meisten der (betrachteten) Fenstern, die über den heutigen Wärmeschutzstandard hinaus gehen, muss die weitergehende Reduktion der Energiekennzahl Wärme mit einer Erhöhung der Energiekennzahl Elektrizität „erkauft" werden, wobei diese Erhöhung oft mehr als 50% der Wärmereduktion beträgt..

3.3.4 Komfortvergleich unterschiedlicher Fenstertypen

Die bereits bei der Fassadendämmung festgestellte Zunahme der unkomfortablen Bedingungen tritt auch bei der Fenstererneuerung zutage. Bei einem Fensterersatz eines alten Fensters mit unbeschichteter Isolierverglasung durch ein Wärmeschutzfenster gemäss heutigem Standard erhöht sich die Anzahl Stunden mit PPD-Werten über 10% Unzufriedenen aufgrund eines zu warmen Innenklimas im Mittel der betrachteten Fälle um rund 400, wobei eine beträchtliche Spannweite festzustellen ist (siehe Tabelle 37). Vergleichsbasis in Tabelle 37 ist heutiges Standardwärmeschutzfenster. Die verschiedenen untersuchten Alternativen zu einem heutigen Standardwärmeschutzfenster führen im Vergleich zu diesem bei drei von vier Fenstertypen zu einer weiteren Verschärfung der Komfortsituation. Das Sonnenschutzfenster schneidet jedoch etwas besser ab als das Standardwärmeschutzfenster (die Anzahl Stunden mit PPD-Werten über 10% liegt um rund 100 Stunden pro Jahr tiefer). Aber auch das Sonnenschutzfenster schneidet bezüglich Komfort schlechter ab als das alte Fenster, siehe auch Abbildung 6.

Anzahl Stunden	Differenz der Anzahl Stunden mit PPD>10% (zu warm)	Differenz der Anzahl Stunden mit PPD>10% (zu warm) FeTyp2 (**) -			
	FeTyp1 (*) - FeTyp2	FeTyp3	FeTyp4	FeTyp5	FeTyp6
Mittelwert (Std. abw.)	-407 (216)	-38 (8)	-177 (75)	120 (41)	-96 (66)
10% – 90%-Percentil	-681 – -179	-44 – -31	-252 – -76	72 – 181	-175 – -14
(*) FeTyp1: Altes Fenster (**) FeTyp2: heutiges Standardwärmeschutzfenster N.B: ein negatives Vorzeichen kennzeichnet Verschlechterung, d.h. eine Zunahme der Anzahl Stunden mit mehr als 10% Unzufriedenen					

Tabelle 37: **Anzahl Stunden während der Bürozeiten (11h/Tag) mit PPD Werten über 10% (zu warm): gegenüber dem heutigen Standardwärmeschutzfenster** (FeTyp2, Ug=1.1, g-Wert=0.52), Fensterfläche zu EBF = 0.25), Büronutzung mit hohen internen Lasten

Aus Abbildung 6 ist ersichtlich, dass die Komfortverschlechterung (gemessen an der Erhöhung der Anzahl Stunden mit PPD-Werten über 10%) umso deutlicher ausfällt, je schlechter sie bereits in der Ausgangslage ist. Besonders betroffen von einer Zunahme der unkomfortablen Bedingungen sind Gebäude mit Lüftungsanlage ohne aktive Kühlelemente (die Kühlung der Zuluft vermag die Verschlechterung kaum zu kompensieren). Die relative Zunahme ist mehr oder weniger unabhängig von der Ausgangslage. Die relative Zunahme der Anzahl Stunden (mit PPD-Werten über 10%) beträgt im Mittel +75%, wobei das 90%-Intervall von +40% bis +100% reicht.

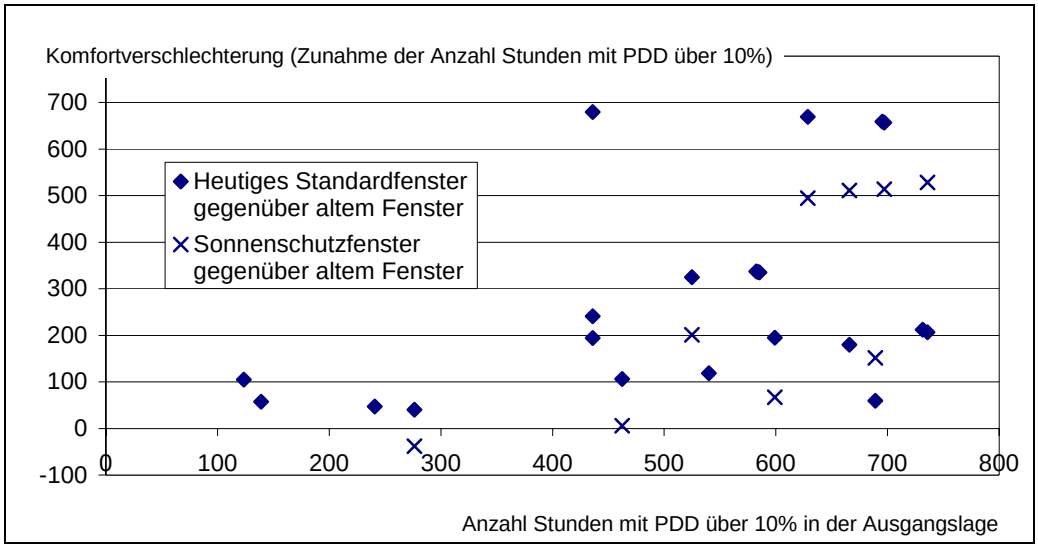


Abbildung 6 **Erhöhung der Anzahl Stunden mit PPD-Werten mit über 10% Unzufriedenen bei einem Fenstersatz** eines alten Fensters durch ein heutiges Standardwärmeschutzfenster als Funktion des Ausgangs-PPD-Werts, Büronutzung mit hohen internen Lasten

Wird der U-Wert weitergehend reduziert, verschärft sich das Komfortproblem weiter, und zwar umso mehr, je höher der PPD-Wert in der Ausgangslage bereits ist. In Abbildung 7 ist die Zunahme der PPD-Werte mit über 10% Unzufriedenen für verschiedene Fensteralternativen mit tieferem U-Wert dargestellt (im Vergleich zu einem heutigen Standardwärmeschutzfenster). Einzig durch ein Sonnenschutzfenster wird die Komfortsituation gegenüber dem heutigen neuen Standardwärmeschutzfenster nicht weiter verschärft, sondern etwas vermindert. Gegenüber dem alten Fenster ist aber auch mit dem Sonnenschutzfenster eine Komfortminderung einhergehend, siehe obenstehende Abbildung 6.

Die genannten Ergebnisse sind allerdings nur unter den angenommenen Prämissen gültig (Kühlung der Zulufttemperatur immer auf das selbe Niveau (18°C), und der Volumenstrom von Lüftungsanlagen, internen Lasten durch Personen und Geräte konstant, Fensteröffnung bei Überhitzung tagsüber).

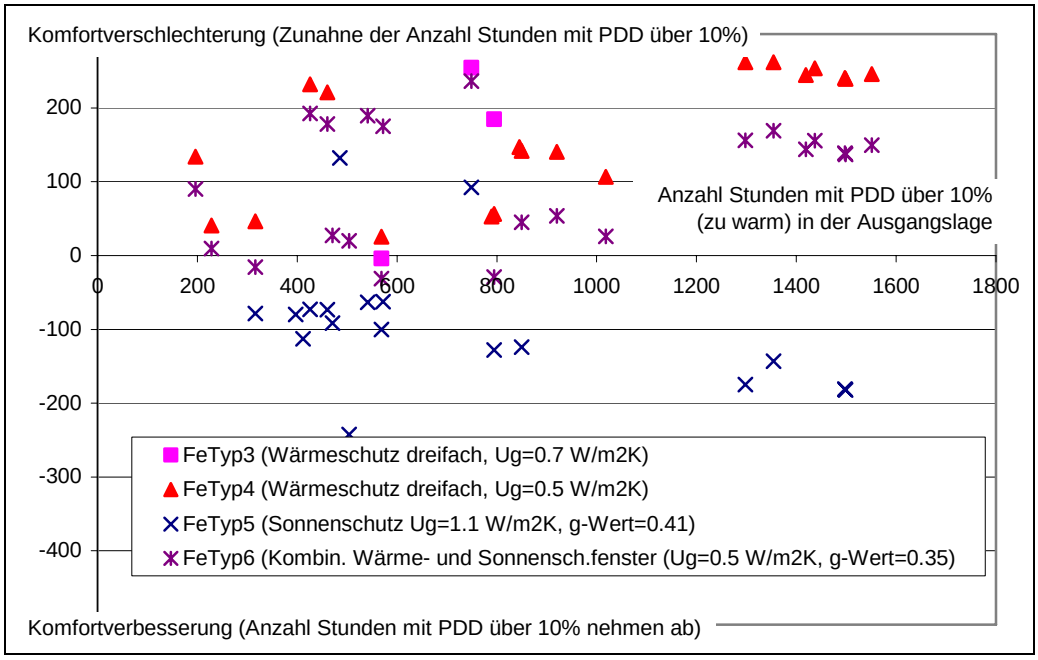


Abbildung 7 Erhöhung der Anzahl Stunden mit PPD-Werten mit über 10% Unzufriedenen bei verschiedenen Fenstertypen im Vergleich zu einem heutigen Standardwärmeschutzfenster als Funktion des Ausgangs-PPD-Werts (beim heutigen Standardwärmeschutzfenster), Südraum, hohe interne Lasten

3.3.5 Energetischer Vergleich unterschiedlicher Luftwechselkonzepte

Folgende Massnahmen werden bzgl. ihrer energetischen Wirkung und der Komfortveränderungen untersucht:

- Einbau einer Wärmerückgewinnungsanlage (Referenz: Lüftungsanlage ohne WRG)
- Verbesserung der Wärmerückgewinnungsanlage (höherer thermischer Wirkungsgrad)
- Einbau einer Lüftungslage mit WRG

a) Einbau einer Wärmerückgewinnungsanlage (Referenz: Lüftungsanlage ohne WRG)

Lüftungsanlagen ohne WRG weisen einen hohen Bedarf an Heizenergie auf. Dies gilt in besonderem Mass, wenn die Betriebszeit nicht den Bedürfnissen der Gebäudenutzenden angepasst ist. Im Extremfall ist die Anlage in einem Bürogebäude 24 h pro Tag im Betrieb, obwohl die Nutzung nur einen Tagesbetrieb erfordern würde.

Bei der Beurteilung der energetischen Wirkung eines nachträglichen Einbaus einer WRG-Anlage wird zwischen zwei Referenzfällen unterscheiden:

- Referenzfall 1: Alte Anlage (hoher Luftwechsel und Druckverluste)
- Referenzfall 2: Betriebszeit der Lüftungsanlage beträgt 24 h/Tag (inkl. Wochenenden)
- Referenzfall 3: Lüftungsanlage ist zwischen 7 Uhr und 19 Uhr in Betrieb (nur werktags)

Referenzfall 1: Alte Anlage (hoher Luftwechsel und Druckverluste)

Im Fall eines Gebäudes mit alter Lüftungsanlage und hohem Luftwechsel ist von wesentlich höheren Energiekennzahlen auszugehen als in den in Tabelle 4 dargestellten Werten auszugehen. Wird bei Lüftungsanlagen beispielsweise ein Luftwechsel angenommen, der zweieinhalb mal so gross ist wie derjenige, der den Ergebnissen in Tabelle 29 zugrunde liegt, so steigt die Energiekennzahl markant an (siehe Tabelle 38).

	Luftwechsel 1.14/h (4 m³/h/m²)	Sensitivität Luftwechsel 2.9/h (10 m³/h/m²)
Lüftung ohne WRG, 24h	1223	2478 (+103%)
Lüftung ohne WRG, 7h bis 19 h	677	1078 (+59%)
WRG 65%, 24 h	641	1030 (+61%)
WRG 65%, 7h bis 19 h	485	597 (+23%)

Tabelle 38: Energiekennzahl Raumwärme (Endenergie, MJ/m²a) für unterschiedliche Luftwechselraten bei mechanischen Lüftungen (Altes Fenster, Ug=2.2, g-Wert=0.)

Referenzfall 2: Betriebszeit der Lüftungsanlage beträgt 24 h/Tag

Im Referenzfall 2 wird davon ausgegangen, dass der Luftwechsel bereits reduziert wurde und zwar auf rund 4 m³/h/m² (1.14/h bei einer Nettoraumhöhe von 3.5m und einer Belegungsdichte von 10 m2/Person). Es wird von einem neuen Monobloc, aber alter Verteilung ausgegangen und als Druckverlust der Anlage inkl. Verteilung wurden konstant rund 2000 Pa angenommen (1300 Pa für die Zuluft und 725 Pa für die Abluft). Je nach Gebäudehülle weisen die Fälle mit Lüftungsanlage ohne WRG im 24h-Stundenbetrieb eine Energiekennzahl Wärme von 900 bis 1200 MJ/m²a auf. Selbst wenn die Betriebszeit der Lüftungsanlage nach dem Ersatz nicht reduziert wird (z.B. weil die Gebäudenutzung einen 24 h Betrieb erfordert oder aus Nachlässigkeit), geht die Energiekennzahl Wärme bei Einbau einer WRG sehr stark zurück, nämlich um knapp 580 MJ/m²a bei einem Wirkungsgrad von 65% und um rund 780 MJ/m²a bei einem angenommen Wirkungsgrad von 90%, siehe Tabelle 39.

Betriebszeit	24 h/Tag			7 h bis 19 h						
Wirkungsgrad WRG	65%	80%	90%	Keine	65%	80%	80%	80%	90%	90%
Zustand Gebäudehülle Kühlung	keine	keine	keine	Keine	keine	keine	Zuluft	Zuluft, Kühlelemente	keine	Zuluft
U-Wand=0.96, Fe1_Alt_2_2_Isolier	582			546	738	775	774	774	794	793
U-Wand=0.96, FeTyp2 (Ug=1.1 W/m²K)	599	715		551	752	789	789	787	808	
U-Wand=0.42, Fe1_Alt_2_2_Isolier				548		780	780			
U-Wand=0.42, FeTyp2 (Ug=1.1 W/m²K)	612	728	785	559	765	803	802	796	819	819

Tabelle 39 Reduktion der Energiekennzahl Raumwärme bei Einbau einer WRG mit unterschiedlichen Wirkungsgraden und Betriebszeiten im Vergleich zu einer Lüftungsanlage ohne WRG und 24 h-Betrieb für das Stockwerk des Modellgebäudes

Mit der Reduktion der Betriebszeit um 12 h/Tag (ohne Einbau einer WRG) wird bemerkenswerterweise eine beinahe gleich hohe Reduktion erzielt wie mit dem Einbau einer WRG, nämlich eine solche von rund 550 MJ/m²a. Daraus wird die hohe Bedeutung und das Potential der Betriebsoptimierung deutlich. Wird die Reduktion der Betriebszeit der Lüftungsanlage mit dem Einbau einer WRG kombiniert, geht die Energiekennzahl Wärme weiter zurück und zwar um bis ca. 820 MJ/m²a im Fall eines WRG-Wirkungsgrades von 90%. Festzuhalten ist an dieser Stelle auch, dass die energetische Wirkung der WRG-Anlage in Situationen mit guter Gebäudehülle etwas höher ist als bei nicht-erneuerter Gebäudehülle. Dieser positive Interaktionseffekt von 25 bis 40 MJ/m²a entspricht betragsmässig etwa einer Wirkungsgradverbesserung von 5% bis 10%-Punkten. Der Einbau einer WRG führt zu einer Erhöhung des Strombedarfs aufgrund eines zusätzlichen Druckverlusts von ca. 100 bis 200 Pa bzw. 150 bis 250 Pa (je nach Quelle). Dieser Mehrbedarf beträgt umgerechnet ca. 13 MJ/m²a beim Rund-um-die-Uhr-Betrieb und 5 MJ/m²a bei einem werktäglichen 12-h-Betrieb. Wird jedoch gleichzeitig die Betriebszeit der Lüftungsanlage um 12 h/Tag reduziert, geht auch die Energiekennzahl Elektrizität markant zurück und zwar um ca. 85 bis 95 MJ/m²a (netto also um 80 bis 90 MJ/m²a). **Mit der Reduktion der Betriebszeit wird also sowohl eine Reduktion der Heizenergie als auch eine Reduktion des Elektrizitätsbedarfs erzielt.**

Beurteilung bzgl. Komfort: Der Reduktion der Betriebszeiten verschlechtert die Komfortsituation bzgl. Überhitzung markant, besonders bei energetisch guter Gebäudehülle. Die Anzahl Stunden mit PPD-Wert über 10% steigt beispielsweise von rund 680 auf 920 bzw. von rund 1100 auf rund 1400, siehe auch Tabelle 31 auf S. 81). Daraus wird die Wirkung der Nachtauskühlung sichtbar, welche mit dem 24h-Stunden-Betrieb verbunden ist und mit dem 12h-Betrieb unterbunden wird. An Tagen mit Überhitzungsrisiko ist deshalb u.U. Nachtbetrieb in Erwägung zu ziehen. Wird parallel zum Einbau der WRG eine Kühlung eingebaut, verbessert sich die Komfortsituation leicht (wenn nur die Zuluft gekühlt wird) bzw. markant (wenn gleichzeitig eine hydraulische Kälteverteilung und Kühlelemente eingebaut werden). Bei effizienter (zentraler) Kälteerzeugung lässt sich die Komfortverbesserung schätzungsweise mit geringerem Strombedarf erzielen als mit forcierter Nachtauskühlung (Abschätzung des Strombedarf für Nachtauskühlung: ein Drittel der Tage mit 24h-Betrieb erhöht den Strombedarf um ca. 35 MJ_{el}/m^2a, wobei hier nicht von einer erhöhten Luftwechselrate während der Nacht ausgegangen wird. Strombedarf für Kühlung der Zuluft inkl. hydraulischer Kälteverteilung für Umluftkühler: 15 bis 20 MJ_{el}/m^2a. Eine Kühlung über dezentrale Klimageräte erfordert demgegenüber einen Strombedarf von 50 bis 60 MJ_{el}/m^2a, also sowohl mehr als bei aktiver Kühlung mit zentral erzeugter Kälte als auch mehr als ein 24h-Lüftungsbetrieb während einem Drittel der (Werk-)tage des Jahres.

Referenzfall 3: Lüftungsanlage ist zwischen 7 Uhr und 19 Uhr in Betrieb

Es ist davon auszugehen, dass die Betriebszeit häufig bereits im Referenzfall den Bedürfnissen einigermassen der Gebäudenutzung angepasst ist. Im Referenzfall einer Lüftungsanlage ohne WRG mit Betriebszeit von 7 Uhr morgens bis 19 Uhr abends (werktags) lässt sich die Energiekennzahl Wärme um rund 190 bis 250 J/m^2a reduzieren, wie aus Tabelle 40 hervorgeht. Auch im Referenzfall 3 wird davon ausgegangen, dass der Luftwechsel bereits im Referenzfall reduziert war und zwar wie im Referenzfall 2 auf rund 4 $m^3/h/m^2$. Ist eine Lüftungsanlage bereits im Referenzfall vorhanden und bleibt die Betriebszeit unverändert, ist die rückgewonnene Wärme beim Einbau einer WRG mit einem geringem zusätzlichen Strombedarf von 4 bis 7 MJ/m^2a verbunden, denn die neu eingebaute WRG führt zu einem – allerdings geringen – höheren Druckverlust.

Betriebszeit	7 h bis 19 h					
Wirkungsgrad WRG	65%	80%	80%	80%	90%	90%
Zustand Gebäudehülle Kühlung	keine	keine	Zuluft	Zuluft/Kühlelemente	keine	Zuluft
U-Wand=0.96, Fe1_Alt_2_2_Isolier	193	229	229	228	248	248
U-Wand=0.96, FeTyp2 (Standard-WS, Ug=1.1 W/m²K)	200	238	238	236	256	
U-Wand=0.42, Fe1_Alt_2_2_Isolier		232	232			
U-Wand=0.42, FeTyp2 (Standard-WS, Ug=1.1 W/m²K)	206	243	243	237	260	259

Tabelle 40 Reduktion der Energiekennzahl Raumwärme bei Einbau einer WRG mit unterschiedlichen Wirkungsgraden im Vergleich zu einer Lüftungsanlage ohne WRG (Betrieb jeweils 7h bis 19h)

Beurteilung bzgl. Komfort: Der Einbau einer WRG verändert die Komfortsituation nicht, sofern die Betriebszeit der Lüftungsanlage nicht verändert wird. Wird hingegen parallel zum Einbau der WRG eine Kühlung eingebaut, verbessert sich die Komfortsituation leicht (wenn nur die Zuluft gekühlt wird) bzw. markant (wenn auch eine hydraulische Kälteverteilung und Kühlelemente eingebaut werden).

b) Verbesserung der Wärmerückgewinnungsanlage

Ist im Referenzfall bereits eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung vorhanden, stellt sich die Frage, um wieviel der Heizenergiebedarf weiter reduziert werden kann, falls eine WRG mit verbessertem Wirkungsgrad eingesetzt wird. Im Vergleich zum Wirkungsgrad von 65% lässt sich mit einem Wirkungsgrad von 80% eine weitere Reduktion von 35 bis 40 MJ/m^2a erzielen und mit einem solchen von 90% eine solche von rund 55 MJ/m^2a, wie aus Tabelle 41 hervorgeht.

Betriebszeit	7 h bis 19 h				
Wirkungsgrad WRG	80%	80%	80%	90%	90%
Zustand Gebäudehülle Kühlung	keine	Zuluft	Zuluft / Kühlelemente	keine	Zuluft
U-Wand=0.96, Fe1_Alt_2_2_Isolier	37	36	35	55	55
U-Wand=0.96, FeTyp2 (Standard-WS, Ug=1.1 W/m²K)	38	38	35	56	
U-Wand=0.42, FeTyp2 (Standard-WS, Ug=1.1 W/m²K)	38	38	31	54	54

Tabelle 41 Reduktion der Energiekennzahl Raumwärme bei Einbau einer WRG mit unterschiedlichen Wirkungsgraden und Betriebszeiten im Vergleich zu einer Lüftungsanlage mit WRG mit 65% Wirkungsgrad und Betrieb 7h bis 19h für das Stockwerk des Modellgebäudes

c) Einbau einer Lüftungslage mit WRG

Die energetische Wirkung des Einbaus einer Lüftungsanlage mit WRG ist deutlich geringer als diejenige eines WRG-Einbaus in eine bestehende Lüftungsanlage. Begründet ist dies durch den höheren Luftwechsel der Lüftungsanlagen im Vergleich zur Fensterlüftung, wodurch ein Teil der Wirkung der WRG kompensiert wird. Der erzielbare thermische Effizienzgewinn beträgt rund 50 bis gut 130 MJ/m²a, je und thermischen Wirkungsgrad und Betriebszeit, Tabelle 42.

Betriebszeit	24 h/Tag		7 h bis 19 h					
Wirkungsgrad WRG	80%	90%	65%	80%	80%	80%	90%	90%
Zustand Gebäudehülle Kühlung	keine	keine	keine	keine	Zuluft	Zuluft, Kühlelemente	keine	Zuluft
U-Wand=0.96	55		70	117	120	114	126	103
U-Wand=0.42	45	101	77	110	110	109	130	135
U-Wand=0.31		88	73		110	103	121	124
Fe1_Alt_2_2_Isolier			48	83	83	84	104	103
FeTyp2 (Standardwärmeschutz, Ug=1.1 W/m²K)	50	101	84	124	121	116	142	133
FeTyp3 (Wärmeschutz dreifach, Ug=0.7 W/m²K)								
FeTyp4 (Wärmeschutz dreifach, Ug=0.5 W/m²K)		88	72	119	115	112	123	119
FeTyp5 (Sonnenschutz Ug=1.1 W/m2K, g=0.41)				123	127	117		
FeTyp6 (WS- u. So.Sch.Ug=0.5 W/m²K, g=0.35)			74	121	117	109	125	122

Tabelle 42 Reduktion der Energiekennzahl Raumwärme (MJ/m²a) beim Einbau einer Lüftungsanlage mit WRG im Vergleich zur Situation mit Fensterlüftung für das Stockwerk des Modellgebäudes

Der Einbau einer Lüftungsanlage mit einem Wirkungsgrad von 65% bringt keine Reduktion der Energiekennzahl Raumwärme, wenn die Lüftungsanlage 24 h/Tag betrieben wird. In diesem Fall erhöht sich die Energiekennzahl Raumwärme sogar, je nach Fall um 70 bis 100 MJ/m²a. Der erhöhte Luftwechsel im Vergleich zur Fensterlüftung kann mit diesem Wirkungsgrad der WRG durch die rückgewonnene Wärme nicht wettgemacht werden (in Tabelle 42 nicht dargestellt). Bei Einbau einer neuen Anlage inkl. Verteilung kann von einem tieferen Druckverlust ausgegangen werden im Vergleich zu einer bestehenden Verteilung. Im folgenden wird von einem Druckverlust der Anlage inkl. WRG von knapp 1400 Pa ausgegangen (850 Pa zuluftseitig und 525 Pa abluftseitig) und die aus den Simulationen erhaltenen Ergebnisse bzgl. „Elektrizität für Lüftung" werden entsprechend umgerechnet.

Tabelle 43 zeigt die Zunahme der Energiekennzahl Elektrizität beim Einbau einer Lüftungsanlage mit WRG für verschiedene Fälle. Zum Vergleich: wird mit dezentralen Klimageräten gekühlt, erhöht sich die EKZ Elektrizität um ca. 50 MJ/m²a (ungedämmte Gebäudehülle) bis 60 MJ/m²a (erneuerte Fassade und Fenster). **Der Lüftungs-Elektrizitätsbedarf hat damit eine vergleichbare Bedeutung wie die Gebäudekühlung, wobei je nach Auslegung und Betrieb markant verändern können.**

Betriebszeit	24 h/Tag		7 h bis 19 h					
Wirkungsgrad WRG	80% keine	90% keine	65% keine	80% keine	80% Zuluft	80% Zuluft Kühlelemente	90% keine	90% Zuluft
Zunahme EKZ Elektrizität MJ/m²a	100	100	36	36	42	50	36	42

Tabelle 43 **Zunahme der Energiekennzahl Elektrizität (MJ/m²a) beim Einbau einer Lüftungsanlage mit WRG im Vergleich zur Situation mit Fensterlüftung** für das Stockwerk des Modellgebäudes (Druckverluste 1400 Pa, Ventilator- und Motorenwirkungsgrad gesamthaft 65%)

Wird in einem Gebäude mit Fensterlüftung eine Lüftungsanlage mit WRG eingebaut, ist die eingesparte Wärmeenergie unter Umständen nicht grösser als der zusätzliche Elektrizitätsbedarf, wenn die Betriebszeit nicht der Nutzung angepasst wird. Eine Lüftungsanlage bringt nämlich zunächst einen höheren Lüftungsenergieverlust mit sich, denn die Luftwechselrate ist bei einer Lüftungsanlage üblicherweise höher als bei Fensterlüftung wobei anzumerken ist, dass eine manuell bediente Fensterlüftung aus lufthygienischer Sicht oft als unbefriedigend zu bezeichnen ist, u.a. bei dichter Belegung in Gruppenbüros. Besonders gross ist dieser Mehrbedarf, wenn die Lüftungsanlage auch während der Abwesenheit der Gebäudenutzenden in Betrieb ist (wenn davon ausgegangen wird, dass die Fenster während deren Abwesenheit geschlossen bleiben). Mit dem Einbau einer WRG kann dieser Mehrbedarf kompensiert oder überkompensiert werden, je nach Wirkungsgrad der WRG.

Die Berechnungen zeigen, dass bei einem 24 h-Betrieb selbst ein WRG-Wirkungsgrad von 90% kaum ausreicht, um mit dem Strommehrbedarf eine im Vergleich grössere Menge Wärmeenergie einzusparen (das Verhältnis Reduktion Raumwärme-Energiekennzahl zu Reduktion Elektrizitäts-Energiekennzahl ist kleiner als 2 bis 3, siehe Tabelle 44). Sowohl aus energetischer wie auch aus wirtschaftlicher Sicht macht der Einbau einer Lüftung mit WRG nur dann Sinn, wenn dieses Verhältnis (auch elektrothermische Verstärkung genannt) mindestens 1 beträgt. Dieses Verhältnis ist aus energietechnischer Sicht qualitativ direkt vergleichbar mit dem Jahresnutzungsgrad einer Wärmepumpe. Bei angepasster Betriebszeit und einem hohem WRG-Wirkungsgrad von 90% erreicht das erwähnte Verhältnis je nach Situation einen Wert zwischen 3 und 4 (Tabelle 44). Wird die Zuluft der neuen Lüftungsanlage gekühlt, sinkt der Wert erwartungsgemäss. Dies ist kann als Preis für einen gleichbleibenden und erhöhten Komfort für die Gebäudenutzenden angesehen werden.

Einschätzung: Das Verhältnis Reduktion Raumwärme-Energiekennzahl und Reduktion Elektrizitäts-Energiekennzahl ist möglicherweise relativ tief, weil der Luftwechsel der Lüftungsanlage im Verhältnis zu demjenigen des Referenzfalls Fensterlüftung zu pessimistisch eingeschätzt wurde bzw. weil der Referenzfall Fensterlüftung zu optimistisch eingeschätzt wurde. Es ist eher vom letzteren auszugehen, denn der Luftwechsel der Lüftungsanlage ist mit rund 4 $m^3/h/m^2$ (1.14/h bei einer Nettoraumhöhe von 3.5 m und einer Belegungsdichte von 10 m2/Person) als realistisch einzuschätzen.

Das Verhältnis Reduktion Raumwärme-Energiekennzahl und Reduktion Elektrizitäts-Energiekennzahl kann verbessert werden, indem

- versucht wird, bei der neuen Lüftungsanlage einen tieferen Druckverlust zu erreichen (gute Werte liegen bei 800 Pa, während bei den hier dargestellten Werten von 1400 Pa ausgegangen wurde).
- die Betriebszeiten und das Lastverhalten optimiert wird, z.B. mittels Teillastbetrieb während der Randzeiten (und drehzahlgesteuerten Ventilatoren).
- Ventilatoren und Elektromotoren mit höheren Wirkungsgraden eingesetzt werden (hier wurde von 65% ausgegangen)
- die Lüftungsanlage mittels CO_2-Fühlern geregelt wird

Insgesamt könnte der Elektrizitätsbedarf damit schätzungsweise um einen Faktor zwei reduziert werden (d.h. die elektrische EKZ für Lüftung wäre dann rund 20 MJ/m^2a) und das Verhältnis Strombedarf zu Wärmeenergiereduktion entsprechend um diesen Faktor gesteigert werden.

Betriebszeit	24 h/Tag		7 h bis 19 h					
Wirkungsgrad WRG	80%	90%	65%	80%	80%	80%	90%	90%
Zustand Gebäudehülle / Kühlung	keine	keine	keine	keine	Zuluft	Zuluft, Kühlelemente	keine	Zuluft
U-Wand=0.96	0.5		2.0	3.3	2.9	2.3	3.5	2.5
U-Wand=0.42	0.4	1.0	2.2	3.1	2.6	2.0	3.7	3.2
U-Wand=0.31		0.9	2.0		2.6	1.9	3.4	3.0
FeTyp1 (Altes Fenster, Ug=2.2 W/m²K)			1.3	2.3	2.0	1.7	2.9	2.5
FeTyp2 (Standardwärmeschutz, Ug=1.1 W/m²K)	0.5	1.0	2.4	3.5	2.9	2.2	4.0	3.2
FeTyp3 (Wärmeschutz dreifach, Ug=0.7 W/m²K)								
FeTyp4 (Wärmeschutz dreifach, Ug=0.5 W/m²K)		0.9	2.0	3.3	2.7	2.1	3.4	2.8
FeTyp5 (Sonnenschutz Ug=1.1 W/m2K, g-Wert=0.41)				3.4	3.1	2.3		
FeTyp6 (WS- u. So.Sch.Ug=0.5 W/m²K, g-Wert=0.35)			2.1	3.4	2.8	2.1	3.5	2.9

Tabelle 44 Verhältnis zwischen Reduktion Raumwärme-EKZ und Reduktion Elektrizitäts-EKZ beim Einbau einer Lüftungsanlage mit WRG (Referenzsituation mit Fensterlüftung)

Beim Einbau einer Lüftungsanlage mit WRG verschlechtert sich die sommerliche Komfortsituation markant, wenn gleichzeitig die Gebäudehülle erneuert wird und die Anlage nur tagsüber betrieben wird. Die Anzahl der Stunden mit PPD-Werten über 10% (zu warm) erhöht sich umso mehr, je besser der Wärmeschutz der Gebäudehülle ist (und je ungünstiger die Komfortsituation bereits in der Ausgangslage ist). Bei erneuertem Fenster erhöht sich die Anzahl Stunden mit erhöhten PPD-Werten ausgehend von 750 um rund 160 bei nicht erneuerter Fassade (bzw. um knapp 90, wenn die Zuluft gekühlt wird) und ausgehend von rund 1000 um gut 400 bis knapp 600 bei erneuerter Fassade (siehe Tabelle 45). Bei Sonnenschutzfenstern und bei verbessertem äusserem Sonnenschutz (S2 gemäss Tabelle 18) erhöht sich die Anzahl Stunden etwas weniger stark, aber der Effekt ist nur gering. Die Kühlung der Zuluft ist keine ausreichende Massnahme, um diese Komfortverschlechterung zu verhindern. Nur mit Kühlelementen liegt die Anzahl Stunden mit erhöhten PPD-Werten wieder ungefähr auf dem Ausgangsniveau der ungedämmten Gebäudehülle mit Fensterlüftung.

	Ausgangslage	Differenz zu Ausgangslage							
Betriebszeit	-	24 h/Tag		7 h bis 19 h					
Wirkungsgrad WRG	keine	80%	90%	65%	80%	80%	80%	90%	90%
Zustand Gebäudehülle / Kühlung	keine	keine	keine	keine	keine	Zuluft	Zuluft, KE	keine	Zuluft
U-Wand=0.96, FeTyp1 (Altes Fenster, Ug=2.2 W/m²K)	595			-12	-9	-70	-398	-9	-73
U-Wand=0.42, FeTyp1 (Altes Fenster, Ug=2.2 W/m²K)	739				-3	-73			
U-Wand=0.96, FeTyp2 (Standard-WS, Ug=1.1 W/m²K)	764	-84		156	156	86	-386	156	
U-Wand=0.42, FeTyp2 (StandardWS, Ug=1.1 W/m²K)	1'000	118	117	420	417	365	-367	420	367
U-Wand=0.42, FeTyp4 (Dreifach-WS, Ug=0.5 W/m²K)	1'090			574	575	519	-264	574	
U-Wand=0.42, FeTyp5 (Ug=1.1 W/m2K, g-Wert=0.41)	866				398	311	-338		
U-Wand=0.42, FeTyp5 (Ug=1.1 W/m2K, g-Wert=0.41) verbesserter externer Sonnenschutz	841				371	282	-337		
U-Wand=0.31, FeTyp2 (Standard-WS, Ug=1.1 W/m²K)	1'060			491		438	-305		439

Tabelle 45 Ausgangslage und Veränderung der Anzahl Stunden mit PPD-Werten über 10% (zu warm) beim Einbau einer Lüftungsanlage mit WRG im Vergleich zur Situation mit Fensterlüftung

Dass die Anzahl PPD-Stunden mit über 10% Unzufriedenen bei Vorhandensein einer Lüftungsanlage höher liegt als im Fall der Fensterlüftung kann wie folgt erklärt werden: Bei der Fensterlüftung wurde

angenommen, dass die Nutzenden oder ein Fensterlüftungssystem (FLS) ab 7 Uhr morgens die Fenster öffnen. Die Betriebszeit der Lüftungsanlage startet ebenfalls um 7 Uhr morgens, aber die Zuluft wird aus Komfortgründen gemäss Annahme auf mindestens 18°C aufgewärmt bzw. nicht unter 18° gekühlt. Damit resultiert für die Fensterlüftung während der kühlen Morgenstunden eine grössere Temperaturdifferenz und damit eine grössere Kühlleistung, was zu angenehmeren Temperaturen während des Tages führt, v.a. während der Übergangszeit, während der bereits Kühlbedarf besteht[8].

Bei der Beurteilung der Komfortsituation bzgl. Überhitzung des Falls mit Fensterlüftung ist zu erwähnen, dass die Anzahl PPD-Stunden mit über 10% Unzufriedenen zwar tiefer ist im Vergleich zum Fall mit Lüftungsanlage, aber dass während der extremen Sommertage die Innentemperaturen markant höher liegen (Abbildung 8) und entsprechend eine grössere Anzahl Stunden mit wesentlich mehr als 10% Unzufriedenen zu verzeichnen sind, siehe Abbildung 9. Bei der Beurteilung der Komfortsituation bzgl. Überhitzung des Falls mit Lüftungsanlage ist zu berücksichtigen, dass die gewählte Luftwechselrate mit 1.1 (39 m^3/h/Person) bzgl. Energieeffizienz und lufthygienischem Bedarf als relativ optimal einzuschätzen ist, bzgl. Kühlleistung an Tagen mit Überhitzungsgefahr, aber tiefen Nacht- und Morgentemperaturen eher tief einzuschätzen ist. Bei höherem Luftwechsel während der Morgenstunden würde sich die Komfortsituation der Gebäude mit Lüftungsanlage verbessern. Darauf deuten auch die tiefen PPD-Werte der Fälle mit 24h-Lüftungsbetrieb hin. Beide Fälle sind jedoch mit höherem Strombedarf verbunden (siehe Tabelle 43 weiter oben).

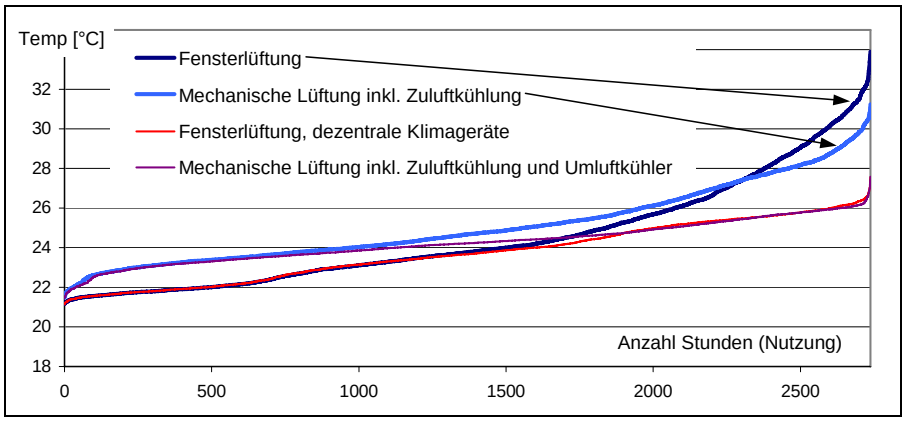


Abbildung 8 Summenhäufigkeit der Innentemperatur während der Büronutzungszeit

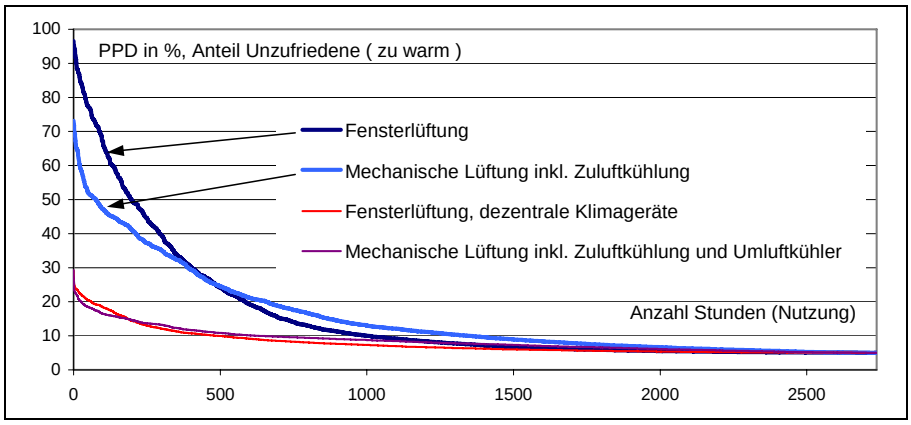


Abbildung 9 Summenhäufigkeit der PDD-Werte während der Büronutzungszeit

[8] Sowohl für den Fall der Fensterlüftung wie für den Fall der mechanischen Lüftung wurde angenommen, dass das Fenster geöffnet wird, sobald die Innentemperatur 23°C überschreitet und die Aussentemperatur (mindestens 3 K) tiefer liegt das die Innentemperatur (das Fenster bleibt jedoch geschlossen, falls die Aussentemperatur unter der Innentemperatur liegt).

3.3.6 Erneuerung der Lüftungsverteilung und Effizienz der Ventilatormotoren

Bei umfassenden Erneuerungen von Lüftungsverteilungen kann die Energie-Effizienz auf folgende Arten gesteigert werden:

- Die Luftwechselmengen können markant reduziert werden, da diese bei alten Anlagen häufig wesentlich über den Erfordernissen der lufthygienischen Anforderungen liegen. Dadurch wird der Druckverlust markant reduziert, denn der Leistungsbedarf der Ventilatoren hängt theoretisch von der dritten Potenz und in der Praxis von der zweieinhalbfachen Potenz der Volumenströme ab.
- Bei der Erneuerung der Luftverteilung können die Querschnitte in den meisten Fällen so gewählt werden, dass die Geschwindigkeiten und damit die Druckverluste deutlich reduziert werden. Bei eingeschränkten Platzverhältnissen reduziert sich die Geschwindigkeit mindestens in dem Masse, in dem die Volumenströme reduziert werden (siehe oben stehender Punkt).
- Neue Lüftungsgeräte (Monoblocs) weisen tiefere Druckverluste auf als solche, die vor 1985 oder zwischen 1985 und 2000 eingebaut wurden.

	Druckverlust Pa	Wirkungsgrad Ventilator und Elektromotor	EKZ MJ_{el}/m^2a 24h/T, 7 Tage/Woche	EKZ MJ_{el}/m^2a 7-19h, werktags
Alter Monobloc ohne WRG, Alte Verteilung	2300	40%	400	144
Alter Monobloc, Alte Verteilung, inkl. WRG	2700	40%	469	169
Neuer Monobloc, Alte Verteilung, inkl. WRG	2025	65%	216	78
Neuer Monobloc, Neue Verteilung, inkl. WRG	1375	65%	147	53

Tabelle 46 Energiekennzahl Elektrizität (MJ_{el}/m^2a) für Lüftungszwecke für verschiedene Situationen (Gebäudebestand der Bürobauten mit Bauperiode 1947-1975)

3.3.7 Fazit der energetischen Berechnungen der Vorstudie für die Bürogebäude

Aus den vorangehenden Kapiteln können folgende Befunde abgeleitet werden

- Je nach Lüftungs-/Kühlungskonzept und Fensterkonzept variiert die Wirkung einer Verbesserung des Fassaden-U-Werts um 20% bis 35%
- Je nach Lüftungs-/Kühlungskonzept und je nach U-Wert der Fassade variiert die Wirkung einer Fenstervariation um bis 60%
- Die Erneuerung der Gebäudehülle verschlechtert bei Gebäuden mit hohen internen Lasten und ohne Nachtauskühlung (sei es über Fenster oder über Lüftungen) die sommerliche Komfortsituation deutlich, gemessen an der Anzahl Stunden mit PPD-Werten mit mehr als 10% Unzufriedenen. Weitere Auswertungen sind notwendig (z.B. Anzahl PPD- Stunden mit PPD-Werten mit mehr als 20% Unzufriedenen), aber es zeichnet sich ab, dass kompensatorische Massnahmen notwendig sind, um die Akzeptanz der Gebäudehüllenerneuerung zu erreichen.
- Der Strommehrverbrauch durch Lüftung und WRG scheint aus energetischen Gründen nicht in allen Fällen gerechtfertigt, wenn mit dem thermischen Nutzen verglichen wird.

3.4 Energetische Berechnungen für konkrete Gebäudetypen und stufenweise weitergehende Energie-Effizienzmassnahmen

In diesem Kapitel 3.4 erfolgt die Darstellung der Ergebnisse der energetischen Berechnungen und der Auswertungen bzgl. thermischem Komfort für zwölf verschiedene Gebäudetypen. Für jeden Gebäudetyp wurde eine Liste von sukzessive weitergehenden Energie-Effizienzmassnahmen definiert. Mit jedem Massnahmeschritt wurde jeweils nur eine Variable verändert, um so die direkte Auswirkung auf Energiebedarf und Komfort sichtbar zu machen.

In Tabelle 47 (Neubau) und Tabelle 48 (Gebäudebestand) sind die betrachteten Gebäudetypen und die Motivation für die Definition der Massnahmenlisten aufgeführt. Bei den meisten Gebäudetypen werde bzgl. Fensteröffnungsverhalten bei Überhitzung zwei Fälle unterschieden, welche mit den Buchstaben „a" bzw. „b" gekennzeichnet sind (ohne bzw. mit Fensteröffnung bei Überhitzung). Die detaillierte Beschreibung der Massnahmen erfolgt direkt in den nachfolgenden Abbildungen. Die zugrundeliegenden Annahmen sind in Tabelle 96 im Anhang (S. 280) dokumentiert.

Bez.	Gebäudetyp (Referenzfall)	Fragestellung, Motivation der Massnahmenliste
BN1.1a	Grosses Bürohochhaus, 10000 m² EBF, hoher Fensteranteil (80%), Leichtbauweise, hohe interne Lasten, innerer, von Hand bedient. Sonnenschutz, Lüftung mit WRG 65%, Zuluftkühlung/Kühlelemente)	Aufzeigen des Effekts von Massnahmen an Gebäudehülle, Sonnenschutz, Beleuchtung, Nachtauskühlung und zunehmend effizienterer aktiver Kühlung auf den Elektrizitätsbedarf
BN1.1b	Wie BN1.1a, jedoch ohne Betriebsoptimierung im Referenzfall	Aufzeigen des Effekts von Betriebsoptimierungen, gegenüber BN1.1a veränderte Massnahmenreihenfolge
BN1.1c	Wie BN1.1a, jedoch nur Zuluftkühlung (keine Kühlelemente), dafür mit Fensterlüftungssystem (FLS, automatische Fensteröffnung bei Überhitzung)	Können die Komfortanforderungen bei hohem Glasanteil auch ohne Kühlelemente erfüllt werden, d.h. nur mit Zuluftkühlung mit lufthygienischem Luftwechsel, FLS und weiteren Massnahmen an Gebäudehülle, Sonnenschutz und Beleuchtung?
BN1.2	Grosses Bürogebäude (4600 m²) mit hohem Fensteranteil (80%), Leichtbauweise, von Hand bedienter, innerer Sonnenschutz, Lüftung mit WRG 65%, Zuluftkühlung und Kühlelemente	Reduktion des Fensteranteils, Verbesserung des Wärmeschutzes aufzeigen des Effekts von Massnahmen an Gebäudehülle, Sonnenschutz, Fensternachtauskühlung und Beleuchtung auf den Energiebedarf bei aktiv gekühlten Gebäuden
BN2.1	Grosses Bürogebäude (4600 m²) mit mittel-hohem Fensteranteil (50%) und Metallfassade, Massivbauweise, geringe interne Lasten, aussenliegender, von Hand bedienter Sonnenschutz, Fensterlüftung (keine mechanische Lüftung), Fensteröffnung bei Überhitzung bzw. Kleinklimageräte (KKG)	Wärmeschutz: Fenster (opake Wärmedämmung unverändert); Sommerlicher Komfort: zunächst aktive Kühlung mit KKG, dann mit zentraler Kühlanlage, BO und Fensternachtauskühlung, dann Sonnenschutz und Beleuchtung, Abluft-WP und WP-Sonde statt fossil
BN2.2	Kleines Bürogebäude (1400 m²) mit mittel-hohem Fensteranteil (50%), Massivbauweise, hohe interne Lasten, von Hand bedienter Sonnenschutz aussen, mech. Lüftung mit WRG 65%, Zuluftkühlung und Kühlelemente	Wärmeschutzverbesserung nur im Bereich Fenster (weitere Brennstoffbedarfsreduktion durch WP), Reduktion Kühlenergiebedarf durch Lastreduktion und Gebäudetechnik
BN2.3	Mittleres Bürogebäude mit relativ geringem Fensteranteil (35%), Massivbauweise, tiefe interne Lasten, von Hand bedienter Lamellen-Sonnenschutz aussen, Fensterlüftung (keine mechanische Lüftung), Kleinklimageräte, suboptimaler Wärmeschutz	Wärmeschutz an der opaken Gebäudehülle und bei den Fenstern sowie mittels Lüftungsanlage mit WRG, effizientere Lüftungs- und Kühlanlage

Tabelle 47 Betrachtete Neubau-Gebäudetypen und Motivation für die Definition der Massnahmenliste

Bez.	Gebäudetyp (Referenzfall)	Fragestellung, Motivation der Massnahmenliste
BB4.1	Bestehendes Bürogebäude der Bauperiode 1976-2000, 8600 m², relativ hoher Fensteranteil (50%), Leichtbauweise, Metallfassade, hohe interne Lasten, Deckenleuchten (abgehängte Decke), mechanische Lüftung (hoher Luftwechsel) mit WRG (45%), von Hand bedienter Lamellen-Sonnenschutz aussen	Wärmeschutz v.a. im HLK-Bereich, an Gebäudehülle zunächst nur bei Fenstern, an Fassade nur ganz zum Schluss, Installation aktive Kühlung (zur Vermeidung von Kleinklimageräten) mit zunehmender Energieeffizienz, unterstützt durch Fensternachtauskühlung
BB4.2	Wie BB4.1	Kühlung: Konzeptwechsel von Kühlung über Zuluft zu hydraulischer Kälteverteilung, komplette Erneuerung Lüftung (Abluft-Anlage und Brüstungselement statt Zu-Abluft). Wärme: Anpassung des Luftwechsels an den lufthygienischen Bedarf, keine Fassadenerneuerung
BB3.1	Bestehendes Bürogebäude der Bauperiode 1947-1975, 2900 m², eher tiefer Fensteranteil (35%), Massivbauweise, Mauerwerk, geringe interne Lasten, Deckenleuchten (an Decke montiert), mechanische Lüftung (ohne WRG), Luftwechsel doppelt so hoch wie lufthyg. erforderlich, 24h/Tag, von Hand bedienter Lamellen-Sonnenschutz aussen	Priorität Gebäudetechnikerneuerung (Kühlung und Lüftung inkl. Anpassung der Betriebszeiten, Beleuchtungserneuerung), Fensterersatz und Wärmedämmung am Schluss
BB3.2	Wie BB2.1, jedoch ohne mechanische Lüftungsanlage	Beleuchtungserneuerung und Gebäudehüllenwärmeschutz (Fensterersatz, Wärmedämmung, Sonnenschutz, passive Kühlung mittels Fensternachtauskühlung, jedoch keine aktive Kühlung
BB2	Bestehendes Bürogebäude der Bauperiode 1947-1975, 1150 m², eher tiefer Fensteranteil (35%), Leichtbau, geringe interne Lasten, Metallfassade (U=1.5 W/m²K) energetisch zwar suboptimal, aber sonst noch funktional, Beleuchtung (15 W/m²) und Fenster, Sonnenschutz aussen (Flachlamelle), Kleinklimageräte	Opake Fassade bleibt unverändert, Sonneschutz- und Beleuchtungserneuerung (für direkte Energieeffizienz und geringeren Kühlbedarf), Fensterersatz mit zunehmend energie- effizienteren Fenstern, Einbau Kombibrüstungsgerät für Lüftung, WRG und Kühlung bzw. als Alternative zentrale Lüftung mit WRG und Zuluftkühlung, zum Schluss Wärmepumpenheizung (als Kombination mit Kälteerzeugung)
BB1.1	Bestehendes Bürogebäude der Bauperiode vor 1947, 860 m², tiefer Fensteranteil (25%), Massivbau, hohe interne Lasten, Fassade: verputztes Mauerwerk (U=1.1 W/m²K) energetisch zwar suboptimal, aber sonst noch funktional, Beleuchtung (18 W/m²), Lochfenster (Ug=3.0), Sonnenschutz: alter Rollladen aussen	Prioritäre Verbesserung des Wärmeschutzes der Gebäudehülle (1. Fassade, 2. Fenster) und Beleuchtungserneuerung. Ziel: Wärmeschutz sowie Reduktion Strombedarf und interne Lasten und Aufzeigen der Auswirkungen auf thermischen Komfort, bei Abwesenheit von mechanischer Lüftung und Kühlung
BB1.4	Bestehendes Bürogebäude der Bauperiode vor 1947, 860 m², tiefer Fensteranteil (25%), Massivbau, hohe interne Lasten, Fassade: verputztes Mauerwerk (U=1.1) energetisch zwar suboptimal, aber sonst noch funktional, Beleuchtung (18 W/m²), Lochfenster (Ug=3.0), Sonnenschutz: alter Rollladen	Prioritäre Verbesserung des Wärmeschutzes der Gebäudehülle (1. Fassade, 2. Fenster) und Beleuchtungserneuerung. Ziel: Wärmeschutz sowie Reduktion Strombedarf und interne Lasten. Sicherstellung des thermischen Komforts entweder mit FLS oder mit Lüftung und Kühlung oder kombiniert, zum Schluss Wärmepumpenheizung

Tabelle 48 Betrachtete Gebäudetypen des Gebäudebestandes und Gründe für die Definition der Erneuerungsmassnahmen

Präambel: Die einzelnen Gebäudetypen und die dazugehörenden Massnahmenlisten wurden jeweils aus spezifischen Gründen definiert, die z.T. auch didaktischer Natur sind. Es ging darum, eine möglichst grosse Breite an möglichen auftretenden Phänomenen und Interaktionen aufzuzeigen. Darunter sind auch Fälle zu finden, für welche eine entsprechende Ausführung in der Praxis nicht zu empfehlen ist, z.B. aus Komfortgründen. Insbesondere beim Neubau sind Fälle mit massiver Verletzung der Komfortanforderungen als nicht gesetzeskonform zu betrachten.

Die nachfolgenden Auswertungen der Gebäudesimulationen sind wie folgt strukturiert:

- Charakterisierung des thermischen Komforts mittels Anzahl Stunden mit mehr als 10% Unzufriedenen (PPD), 90%-Percentil der PPD-Werte sowie Anzahl Stunden mit Innentemperatur über den Grenzwerten gemäss Entwurf der Norm SIA 382/1,
- Gegenüberstellung von Energiebedarf und thermischem Komfort sowie
- Energiebedarf nach Verwendungszweck, unterteilt nach Brennstoff und Elektrizität.

3.4.1 Charakterisierung des thermischen Komforts

Bzgl. des thermischen Komforts werden die Auswertungen nachfolgend auf den sommerlichen Komfort beschränkt. Dieser Aspekt ist im Bereich Büro und Schulen als kritischer zu beurteilen. Diese Einschränkung schliesst aber nicht aus, dass der thermische Komfort auch im Winter durch energetische Massnahmen spürbar zu verbessern ist, auch bei Bürogebäuden. Gerade die Erneuerung alter, evtl. undichter Fenster ohne Wärmeschutzverglasung mit relativ hohen Glas-U-Werten und die Erneuerung von energetisch suboptimalen Fassaden vermag den winterlichen Komfort durch die Verminderung der natürlichen Konvektion und durch Strahlungskälte signifikant zu verbessern. In der Praxis führen auch schlecht geregelte Lüftungs- und Klimaanlagen zu unkomfortablen Zuständen. Dies kann jedoch im Rahmen dieser Forschungsarbeit nicht weiter behandelt werden, sollte jedoch Eingang finden in Aus- und Weiterbildungen von zuständigen Gebäudetechnikern und Facility Managern.

Als in der Literatur gut etabliertes Mass zur Komfortbeurteilung dienen der PMV (predicted mean vote) und der Anteil der unzufriedenen Personen (PPD: predicted percentage of dissatisfied persons), wobei zwischen den beiden Werten ein Zusammenhang besteht (siehe z.B. SIA 180). Die Vorhersagewerte werden aufgrund der thermischen Bedingungen im Raum (insbesondere der Raumtemperatur und mittleren Strahlungstemperatur) anhand von kalibrierten Modellen berechnet. Zur Beurteilung eines Raums wird üblicherweise der kritischste Tag (oder die kritischste Woche) herangezogen. Gemäss SIA 180 sollten die PPD-Werte 10% nicht überschreiten. Der CEN Report CR 1752 enthält bzgl. PPD folgenden Vorschlag für drei Komfortklassen A, B und C: 6%, 10% und 15% (Stand 2004). Für die Beurteilung der Ganzjahressituation (oder der ganzen Sommerperiode) nimmt die SIA-Normierung jedoch nicht auf die PPD Bezug, sondern auf zwei andere Masse, nämlich die Kelvinstunden und die Anzahl Stunden, während derer ein bestimmter Temperaturgrenzwert (abhängig von der Aussentemperatur) überschritten wird. Nach der Überarbeitung relevanten SIA-Norm 382/1 ist zu erwarten (Stand Entwurf 2004), dass auf das Beurteilungsmass der Kelvinstunden verzichtet wird und es nur auf die Anzahl Stunden Überschreitung eines Temperaturgrenzwertes abgestützt werden wird (vgl. Abbildung 10). Der entsprechende Grenzwert darf während nicht mehr als 100 h/Jahr überschritten werden.

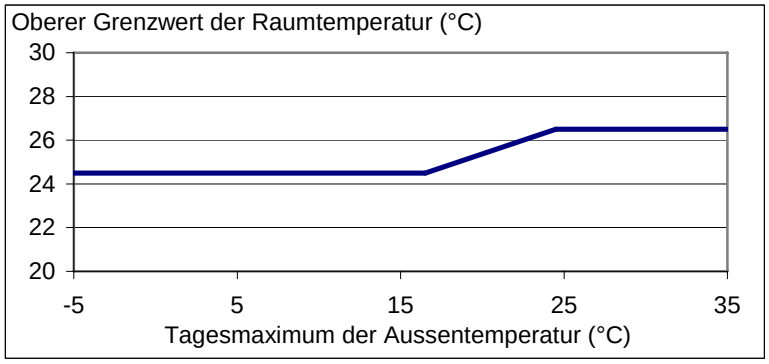


Abbildung 10 Komfortanforderungen gemäss Entwurf SIA 382/1

Um zum einen auf das fachlich interessantere Beurteilungsmass zurückzugreifen und um zum anderen auf die künftigen Normen-Anforderung Bezug nehmen zu können, wurden für ausgewählte Ge-

bäudetypen und die dazu definierten Energie-Effizienzmassnahmen folgende Auswertungen zur Beurteilung der sommerlichen Komfortsituation erstellt:

- Anzahl Stunden mit mehr als 10% Unzufriedenen (PPD-Wert grösser oder gleich 10% aufgrund zur warmer Raumtemperatur, d.h. wenn PMV>0) im Sommerhalbjahr (vom 16.4 bis 15.10, während der Belegungszeit (von 7 Uhr bis 18 Uhr)
- 90%-Percentil der PPD-Werte, wobei die einzelnen Werte nach der Belegung gewichtet wurden (die Randstunden am Morgen und am Abend, Ferienzeiten etc. erhalten ein geringeres Gewicht als die Stunden mit maximaler Belegung, wobei für die Belegung die Werte von SWKI / SIA verwendet wurden). Bedeutung des 90% Percentils: zu 90% der (gewichteten) Zeit ist der Anteil der Unzufriedenen geringer als der jeweils angegebene %-Wert. 90% der (gewichteten) Stunden entsprechen ca. 1344 Stunden pro Jahr, 100% entsprechen 1494 Stunden, d.h. während ca. 150 Stunden pro Jahr wird der angegebene Wert für den Anteil der Unzufriedenen überschritten.
- Anzahl Stunden mit höheren Raumtemperaturen als gemäss Vernehmlassungsentwurf 2004 der SIA-Norm 382/1 vorgegeben: 24.5 °C bis zu einem Tagesmaximum der Aussentemperatur von 16 °C, 26.5 °C ab dem Tagesmaximum-Temperaturwert von 24 °C und linear interpoliert dazwischen (ebenfalls während des Sommers und während der Belegungszeit von 7 Uhr bis 18 Uhr)

Der Nachteil des ersten und des dritten Beurteilungsmasses ist das Risiko eines sprunghaften Verhaltens, da die Masse auf Schwellenwerten beruhen. Gewisse Gebäude oder Massnahmenkombinationen könnten sehr viele Stunden knapp unter dem Grenz- oder Schwellenwert haben und andere, relativ ähnliche, sehr viele Stunden knapp oberhalb des Grenzwertes. Damit fiele das Beurteilungsmass sehr unterschiedlich aus, obwohl es sich um recht ähnliche Fälle handelte. Der Nachteil der Percentil-Darstellung besteht darin, dass die Kommunizierbarkeit anspruchsvoller ist, da Percentile nicht Bestandteil des alltäglichen Umgangs sind. In der nachfolgenden Abbildung 11 sind die Auswertungsergebnisse für den Neubaufall und in Abbildung 115 für den Gebäudebestand dargestellt.

Beim Vergleich der drei Komfortbewertungsmasse in Abbildung 11 und Abbildung 115 (im Anhang) fällt auf, dass das Vorzeichen der Veränderung von einer Massnahme zur nächsten für alle drei Masse gleich ist. Reduziert sich die Anzahl Stunden mit Temperaturgrenzwertüberschreitung von Massnahme zu Massnahme, so reduziert sich auch die Anzahl Stunden mit PPD-Werten über 10% und das 90%-Percentil der PPD-Stunden. Dasselbe gilt für eine jeweilige Erhöhung. Die drei Komfortbewertungsmasse schätzen die Massnahmen also qualitativ gleich ein, so dass man sich diesbezüglich bei der Darstellung der Ergebnisse auf eines der Masse konzentrieren kann.

Beim Vergleich zwischen den PPD-basierten Massen und dem temperaturbasierten Mass sind jedoch auch Unterschiede zu verzeichnen, nicht gänzlich unerwartet aufgrund der Definition. Insbesondere bei Gebäuden mit hohen Glasanteilen und Raumkühlung liegen die PPD-Werte vergleichsweise höher als die rein temperaturbasierten Werte, teilweise markant, wie aus Abbildung 12 hervorgeht. Aufgrund der Gebäudekühlung werden die temperaturbasierten Komfortanforderungen (gemäss Abbildung 10) eingehalten. Die PPD-basierten Auswertungen deuten jedoch darauf hin, dass in bis zu 400 h mehr als 10% Unzufriedene zu erwarten sind bzw. dass in mehr als 10% der Belegungsstunden unter Umständen mehr als 20% Unzufriedene zu erwarten sind (FallM2). Die höheren Unzufriedenheitswerte werden durch die hohen Oberflächentemperaturen der Glasflächen bei Sonneneinstrahlung und/oder warmen Aussentemperaturen verursacht. Umgekehrt liegen bei den Gebäuden mit geringem Glasanteil eher die temperaturbasierten Werte höher als die PPD-basierten Werte.

Fazit: Wenn davon ausgegangen wird, dass das PPD-Konzept die Komfortsituation und letztlich die Zufriedenheit der Gebäudenutzenden besser abbildet als die rein temperaturbasierten Werte, wird die Komfortsituation mit letzteren bei Gebäuden mit hohem Glasanteil tendenziell zu optimistisch eingeschätzt.

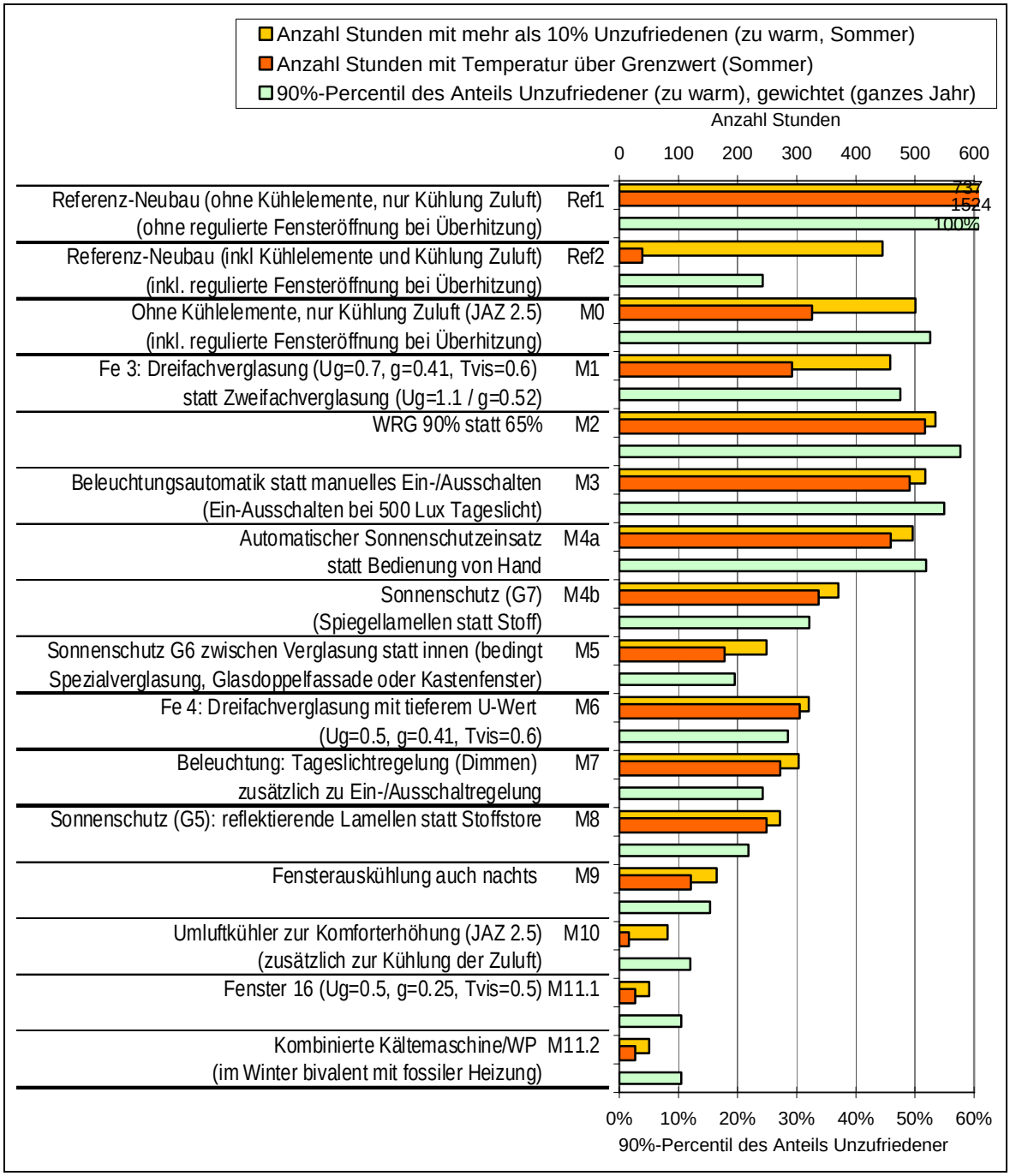


Abbildung 11 **Charakterisierung des thermischen Komforts beim Gebäudetyp BN1.1c, Südraum, 7 m Raumtiefe:** Neubau eines grossen Bürohochhauses, EBF 10'000 m², hoher Fensteranteil (80%), Leichtbauweise, hohe interne Lasten, Beleuchtung: 13.5 W/m², U-Wert Aussenwand 0.29 bzw. 0.77 W/m²K (Wert ohne bzw. mit Wärmebrücken), innerer, von Hand bedienter Sonnenschutz (G8), Lüftung mit WRG 65%, Fenster Typ 2 (U_g=1.1, g=0.52, T_{vis}=0.73, U_f=1.8), Beleuchtung: manuelles Ein-/Ausschalten (bei 800 Lux), Kühlung der Zuluft (jedoch keine Kühldecke / Umluftkühler) [9],

[9] Lesehilfe: Zuoberst im Diagramm ist der (oder die) Referenzfall dargestellt. Die darunter folgenden Massnahmen gehen von diesem Referenzfall aus und beinhalten die Wirkung der jeweils vorangehenden Massnahmen (von Ausnahmen abgesehen, welche in der Beschriftung jeweils kenntlich gemacht werden). In Massnahme M3 zum Beispiel wird also davon ausgegangen, dass vorgängig die Massnahmen M0, M1 und M2 ergriffen wurden.

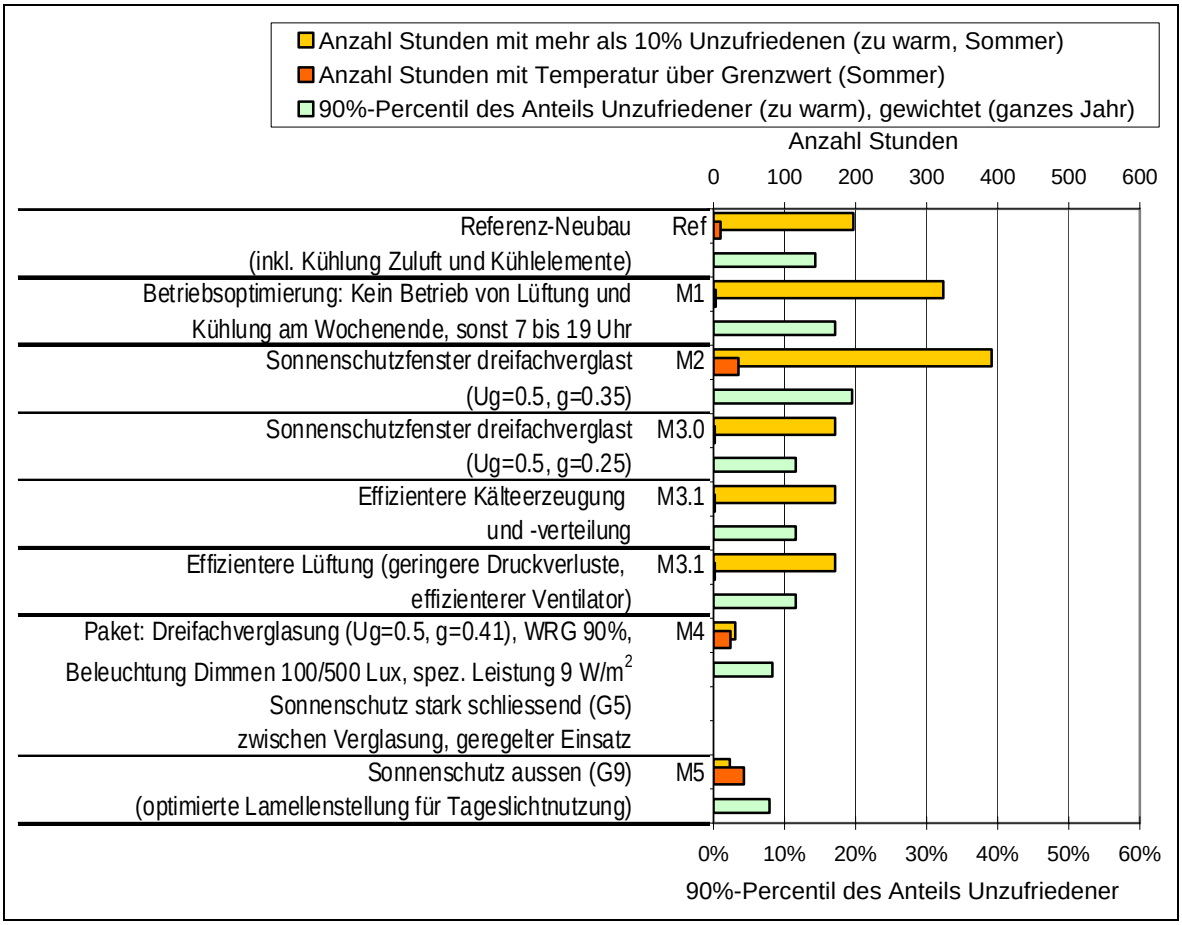


Abbildung 12 **Charakterisierung des thermischen Komforts beim Gebäudetyp BN1.1b, Südraum, 7 m Raumtiefe:** Neubau wie BN1.1c (Abbildung 11), jedoch mit Kühlung (Kühlelemente, Solltemperatur 23°C, Zuluftkühlung), aber ohne Fensteröffnung bei Überhitzung

Nachfolgend wird die Charakterisierung des thermischen Komforts zusammenfassend beschrieben, zunächst für den Neubaufall und daran anschliessend für den Gebäudebestand.

3.4.2 Gegenüberstellung von Energiebedarf und thermischem Komforts bei Neubauten

Die Verbesserung der sommerlichen Komfortsituation kann durch Einflussnahme der Gebäudenutzenden oder durch energie- und regeltechnische Massnahmen erzielt werden. Bei einigen dieser Massnahmen wird die Komfortverbesserung durch einen erhöhten Energieeinsatz „erkauft", bei anderen treten u.U. Synergieeffekte auf (z.B. bei der Beleuchtungserneuerung, welche sowohl den Komfort erhöht und als auch den Energiebedarf verringert). Um diese Effekte zu quantifizieren, werden in diesem Kapitel Energiebedarf und thermischer Komfort einander gegenüber gestellt. Als Mass für den thermischen Komfort dient hierbei die Anzahl Stunden mit Raumtemperaturen über den Vorgaben der SIA 382/1 (Vernehmlassungsentwurf 2004), siehe Abbildung 10.

BN1.1a (Abbildung 13): Bei Gebäuden mit hohem Glasanteil, hohen internen Lasten und eingeschränkter Möglichkeit der Fensterlüftung (z.B. an immissionsbelasteten Lagen, bei Hochhäusern und Grossraumbüro) sind eine mechanische Lüftung und eine Gebäudekühlung Bestandteil des Referenzfalls. Die führt zu einem insgesamt relativ hohen spezifischen Elektrizitätsbedarf von gut 310 MJ/m^{2}a, wozu die Kühlung mit 100 MJ/m^{2}a, die Beleuchtung mit knapp 70 MJ/m^{2}a und die internen Lasten mit 120 MJ/m^{2}a beitragen. Mittels einer Reihe von Massnahmen lässt sich der spezifische Bedarf auf rund 180 MJ/m^{2}a reduzieren, wobei die internen Lasten der Geräte als konstant angenommen wurden.

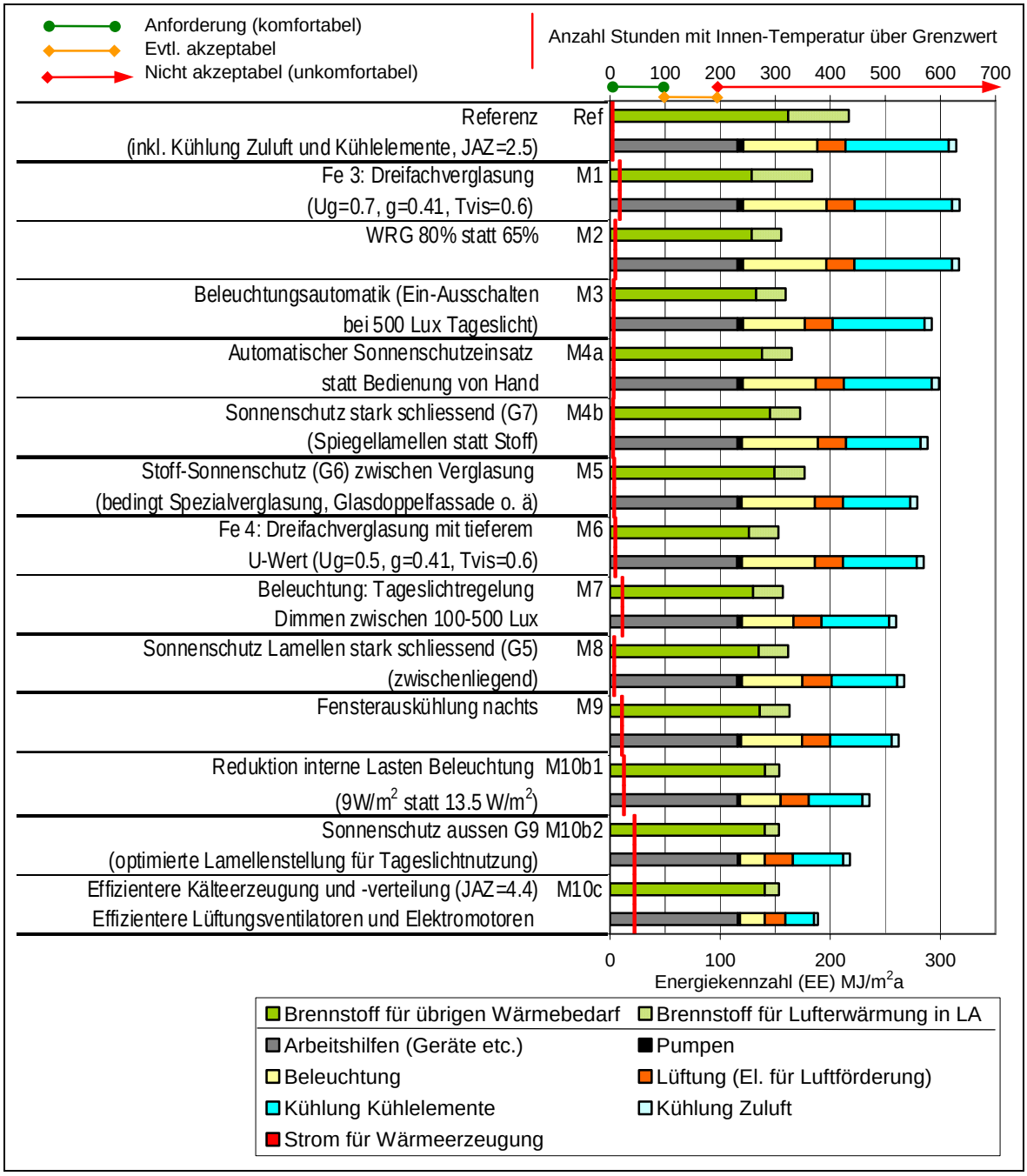


Abbildung 13 **Energiebedarf und thermischer Komfort bei Gebäudetyp**[10] **BN1.1a:** Neubau eines grossen Bürohochhauses, EBF 10'000 m², hoher Fensteranteil (80%), ohne Fensteröffnung bei Überhitzung, Leichtbauweise, hohe interne Lasten, Beleuchtung: 13.5 W/m², U-Wert Aussenwand 0.29 bzw. 0.77 W/m²K (Wert ohne bzw. mit Wärmebrücken, innerer, von Hand bedienter Sonnenschutz (G8), Lüftung (Druckverluste 1200 Pa, Ventilatorwirkungsgrad 55%) mit WRG (thermischer Wirkungsgrad 65%), Fenstertyp 2 (U_g=1.1, g=0.52, T_{vis}=0.73, U_f=1.8), Beleuchtung: manuelles Ein-/Ausschalten (bei 800 Lux), Kühlung der Zuluft und Kühlelemente (Kühldecke/Umluftkühler) ohne Leistungsbeschränkung, JAZ=2.5

[10] Lesehilfe: Zuoberst im Diagramm ist der (oder die) Referenzfall dargestellt. Die darunter folgenden Massnahmen gehen von diesem Referenzfall aus und beinhalten die Wirkung der jeweils vorangehenden Massnahmen (abgesehen von gekennzeichneten Ausnahmen). Für jede Massnahme stellt der jeweils obere Balken die Brennstoff-EKZ und der untere die Elektrizitäts-EKZ dar. Als senkrechte rote Linie ist die Anzahl Stunden mit Temperaturüberschreitung während der Nutzungszeit dargestellt (gemäss Anforderung in Abbildung 10).

Zum Effizienzgewinn tragen die Beleuchtung und der tageslicht-optimierte Sonnenschutz mit 45 MJ/m^{2}a und der geringere Kühlenergiebedarf mit 70 MJ/m^{2}a bei. Zum geringeren Kühlenergiebedarf tragen indirekte Massnahmen wie effizientere Beleuchtung und verbesserter Sonnenschutz mit 50 MJ/m^{2}a die Mehrheit bei, wobei dies auch eine Konsequenz der Massnahmenreihenfolge ist (würde die Massnahme der effizienteren Kälteerzeugung und Verteilung zu Beginn ergriffen, wäre deren Effizienzgewinn schätzungsweise rund 45 statt 20 MJ/m^{2}a). Anzumerken ist an dieser Stelle, dass die Massnahme M10b (aussenliegender Sonnenschutz) bei Hochhäusern aufgrund des Windschutzes evtl. nicht realisiert werden kann, dass der Hauptnutzen des Sonnenschutzes G9 jedoch in der Tageslichtnutzung aufgrund der Optimierung der Lamellenstellung liegt (Reduktion des Beleuchtungsenergiebedarfs von 37 auf 22 MJ/m^{2}a), was auch bei einem zwischenliegenden Sonnenschutz möglich ist. Auf der Wärmeseite lässt sich der spezifische Endenergiebedarf von knapp 220 auf gut 150 MJ/m^{2}a reduzieren und zwar mittels Dreifachverglasung (Ug=0.5 W/m^{2}K) und höherem WRG-Wirkungsgrad (80% statt 65%). Eine weitere Reduktion des Wärmebedarfs würde u.a. eine wärmebrückenarme oder –freie Fassadenkonstruktion bedingen.

BN1.1b (Abbildung 116 im Anhang): Hierbei handelt es sich um den selben Referenzfall wie im Fall BN1.1a, abgesehen von noch nicht optimierten Betriebszeiten von Lüftung und Kühlung (6 bis 20 Uhr inkl. Wochenende statt 7-19 Uhr werktags), was einen entsprechend höheren Wärme- und Elektrizitätsbedarf zur Folge hat (340 MJ/m^{2}a).

Durch die Optimierung der Betriebszeiten lässt sich dieser um knapp 40 MJ/m^{2}a reduzieren, was die Bedeutung von Betriebsoptimierungsmassnahmen auch bei der Inbetriebnahme von Neubauten unterstreicht. Die effizientere Kühlung (JAZ 4.4 statt 2.5) ermöglicht einen Effizienzgewinn von 40 MJ/m^{2}a und die effizientere Lüftung (Druckverluste 800 Pa statt 1200 Pa, effizienterer Ventilator) einen solchen von gut 10 MJ/m^{2}a. Der gesamte Effizienzgewinn beträgt gut 150 MJ$_{el}$/m^{2}a, was einer relativen Reduktion der gebäudebezogenen Elektrizität (ohne Geräte) von 70% entspricht. Der verbleibende Bedarf wird mit knapp 120 von gut 180 MJ/m^{2}a klar von den Geräten dominiert.

BN1.1c (Abbildung 14): Abgesehen von der automatischen Fensteröffnung bei Überhitzung handelt es sich hierbei um den selben Referenzfall im Fall BN1.1a. Die Massnahmenreihe ist im wesentlichen ebenfalls dieselbe, abgesehen von der erwähnten Fensteröffnung und abgesehen davon, dass nur die Zuluft gekühlt wird und keine Kühlung über Kühlelemente (Kühldecken, TABS, Umluftkühler o.ä.) stattfindet. Diese Konfiguration wurde gewählt, um aufzuzeigen, ob und inwiefern Gebäude mit hohen Glasanteilen ohne Kühlelemente betrieben werden können. Die beiden erwähnten Unterschiede haben markante Auswirkungen auf den Kühlenergiebedarf und auf den Komfort: Im Referenzfall beträgt der Kühlenergiebedarf nur noch knapp 30 MJ/m^{2}a und in übrigen Fällen nur noch weniger als 10 MJ/m^{2}a. Mit Zuluftkühlung und Fensteröffnung kann der thermische Komfort bzgl. Überhitzung jedoch in den meisten Fällen nicht eingehalten werden; die Anzahl Stunden mit Temperaturüberschreitung im Vergleich zu den Anforderungen in Abbildung 10 beträgt meistens mehr als 200 h/Halbjahr.

Massnahmen beim Sonneschutz und bei der Beleuchtung vermögen die zwischendurch hohe Anzahl an Stunden mit Temperaturüberschreitung markant zu reduzieren, aber erst in Kombination mit der Nachtauskühlung durch Fensteröffnung lässt sich die Anzahl auf die Nähe des Grenzwertes von 100 h/a reduzieren. Der Elektrizitätsbedarf wird durch diese Massnahmen ebenfalls leicht reduziert und auch beim Brennstoffbedarf ist kaum ein Nachteil in Kauf zu nehmen (der Wärmeschutzverglasung mit gleichzeitig etwas reduziertem g-Wert von 0.42 sei dank). Dies ist ein an sich bemerkenswertes Ergebnis, denn das Gebäude weist einen Fensteranteil von 80% auf. Zur Erinnerung: Gekühlt wird bis und mit M9 nur die Zuluft und zwar auf ein Niveau von 18°C. Erst ab M10 wird von einer aktiven Kühlung ausgegangen, wobei sich die Anzahl Stunden mit Temperaturüberschreitung auf rund ein Duzend reduziert, also weit unter dem Grenzwert von 100 h/a.

Der Vergleich zwischen den Fällen BN1.1a und BN1.1c verdeutlicht die hohe Bedeutung der „freien Kälte" der Aussenluft, welche durch automatisierte Fensteröffnung, aber auch durch Brüstungsgeräte und bei der konventionellen Kälteerzeugung zu nutzen ist. Es wird auch deutlich, dass ohne eine Nutzung derselben entweder die Komfortanforderungen nicht einzuhalten sind, oder dass in Fällen mit

hohen internen Lasten und einem hohen Verglasungsanteil nebst der Zuluftkühlung zusätzlich eine Kühlung mit Kühlelementen erforderlich ist, um die Komfortanforderungen einzuhalten.

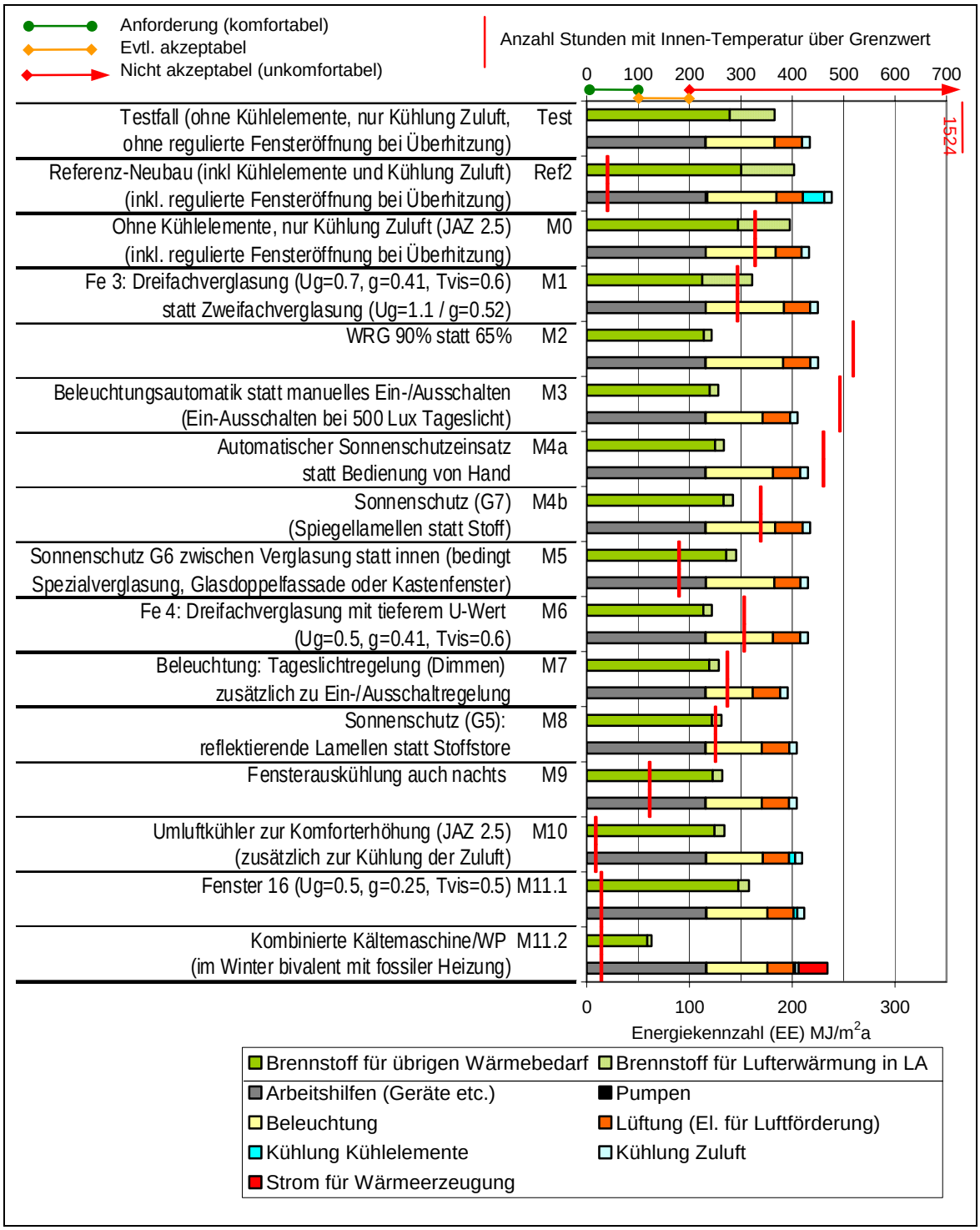


Abbildung 14 **Energiebedarf und thermischer Komfort bei Gebäudetyp BN1.1c:** Neubau eines Bürogebäudes, hoher Fensteranteil (80%), inkl. automatische Fensteröffnung bei Überhitzung (ausser Fall Test), Leichtbauweise, hohe interne Lasten, Beleuchtung: 13.5 W/m2, U-Wert Aussenwand ohne Wärmebrücke 0.29, innerer, von Hand bedienter Sonnenschutz (G8), Lüftung mit WRG 65%, Fenstertyp 2 (U_g=1.1, g=0.52, T_{vis}=0.73, U_f=1.8), Beleuchtung: manuelles Ein-/Ausschalten (bei 800 Lux), Kühlung der Zuluft und Kühlelement (Kühldecke/Umluftkühler)

BN1.2a (Abbildung 15): Zusätzlich zu den Fällen BN1.1a bis BN1.1c zeigt der Fall BN1.2a insbesondere die energetische Wirkung der Reduktion des Fensteranteils auf: Bei Fenstern bzw. Verglasungen gemäss heutigem Standard wird auf der Wärmeseite ein Effizienzgewinn von 50 MJ/m^{2}a erzielt. Ermöglicht wird weil opake Fassaden in der Regel geringer U-Werte aufweisen als Glasflächen und weil der relative Einfluss der Wärmebrücken reduziert wird. Auf der Elektrizitätsseite ist dafür ein Netto-Mehrbedarf von rund 15 MJ/m^{2}a in Kauf zu nehmen, denn der erhöhte Beleuchtungsbedarf von 25 MJ/m^{2}a überwiegt betragsmässig den Gewinn bei der Kühlenergie von 10 MJ/m^{2}a. Der erhöhte Beleuchtungsbedarf kann jedoch teilweise durch ein geändertes Sonnenschutzmanagement kompensiert werden: wird der Sonneschutz erst bei einer Solarstrahlung grösser 500 W/m^2 statt bereits bei einer solchen grösser 250 W/m^2 eingesetzt, reduziert sich der Beleuchtungsbedarf um 10 MJ/m^{2}a, der Kühlenergiebedarf steigt jedoch nur um 4 MJ/m^{2}a. Hierbei handelt es sich um den Effekt von jahreszeitlich konstanten Schwellenwertkriterien. Ohne dies explizit simuliert zu haben, kann davon ausgegangen werden, dass dieser der Netto-Effekt bei variablen Sonnenschutzeinsatzkriterien verstärkt werden kann: An Tagen, an denen sich das erwartete Tagesmaximum der Aussentemperaturen der gewünschten Raumtemperatur annähert oder dieses überschreitet, so ist der Sonnenschutz bei geringem Strahlungsschwellenwert einzusetzen. Bei geringen Aussentemperaturen ist die jedoch die Tageslichtnutzung vorzuziehen, weil die Gebäudekühlung in diesem Fällen durch die freie Kälte unterstützt wird. Die freie Kälte kann über die Gebäudehülle, die Lüftung und/oder die Kälteerzeugung/-verteilung genutzt werden.

Im übrigen zeigt der Fall BN1.2a wiederum die Wirksamkeit von Beleuchtungs- und Betriebsoptimierungsmassnahmen. Der direkte Effizienzgewinn von Beleuchtungsmassnahmen von gut 50 MJ/m^{2}a wird elektrizitätsseitig durch indirekte Wirkungen um 25% verstärkt wird (15 MJ/m^{2}a weniger Kühlenergiebedarf); wärmeseitig resultiert eine geringe Erhöhung (12 MJ/m^{2}a). Wird die Solltemperatur der Kühlung um nur 2 K von 23°C auf 25° erhöht, reduziert sich der Kühlenergiebedarf um beinahe die Hälfte (von 56 auf 29 MJ/m^{2}a). Die Komfortanforderungen werden in diesem Fall überschritten: markant gemessen an der Anzahl Stunden und geringfügig gemessen als Temperaturdifferenz (die Anforderung verlangt bei Aussentemperaturen unter rund 17° einen leicht geringeren Wert zwischen 25° und 24.5°).

Der Wärmeenergiebedarf wird von 260 auf zeitweise 120 MJ/m^{2}a, unter Berücksichtigung der Interaktionseffekte auf 130 MJ/m^{2}a reduziert. Wird der restliche Wärmebedarf mit WP statt mit Brennstoffen gedeckt, erhöht sich der Elektrizitätsbedarf um 30 bis 40 MJ/m^{2}a. Zum Vergleich: dies ist weniger als der Bedarf für Kühlung, Luftförderung oder Beleuchtung im Referenzfall und markant weniger als der Gerätebedarf und auch als das gesamte identifizierte Elektrizitätseffizienzpotenzial von 140 MJ/m^{2}a. Somit resultiert netto auch bei einer WP-Heizung ein klarer Nettogewinn.

Der Fall BN1.2b beinhaltet – ähnlich wie der Fall BN1.1c im Vergleich zum Fall BN1.1a – im Vergleich zum Fall BN1.1a zusätzlich die automatisierte Fensteröffnung bei Überhitzung und enthält bei einigen Varianten keine Kühlelemente, sondern nur eine Zuluftkühlung: Wie erwartet werden die Komfortanforderungen im Referenzfall und mit den ersten Massnahmen bis einschliesslich M4 nicht eingehalten (siehe Abbildung 117 im Anhang). Die entsprechenden Massnahmen zielten nicht auf eine Komfortverbesserung ab, sondern auf eine Reduktion des Brennstoffbedarfs. Die Kühlung der Zuluft allein genügt nicht, um den Komfort sicherzustellen (unter der Voraussetzung des Luftwechsels an das hygienische Erfordernis). Mit einer aktiven Kühlung ab M5 werden die Komfortanforderungen erfüllt. Der energetische Preis, der dafür zu bezahlen ist, ist wegen der Nutzung der freien Kälte allerdings gering. Durch weitergehende Elektrizitäts-Effizienzmassnahmen im Bereich Beleuchtung wird der Kühlenergiebedarf mehr als kompensiert.

BN2.1a (Abbildung 16): Auch bei geringen internen Lasten und einem nicht allzu hohen Fensteranteil (50% inkl. Rahmen, bezogen auf die Fassadenfläche) reicht eine automatisierte Fensteröffnung nicht aus, um ein Übermass an Stunden mit zu hohen Temperaturen zu verhindern (die Wirkung der automatisierten Fensteröffnung oder ähnlicher technischer Lösungen ist allerdings beachtlich: die Anzahl Stunden mit zu hohen Temperaturen wird von über 1100 auf gut 300 reduziert). Als Referenz

wird deshalb der Fall mit aktiver Kühlung definiert, in diesem Fall in Form von relativ ineffizienten Kleinklimageräten mit einer Solltemperatur von 23°C. Der entsprechende Elektrizitätsbedarf beträgt 45 MJ/m²a und steigt mit tieferem Fenster-U-Wert leicht über etwas über 50 MJ/m²a an (sic!).

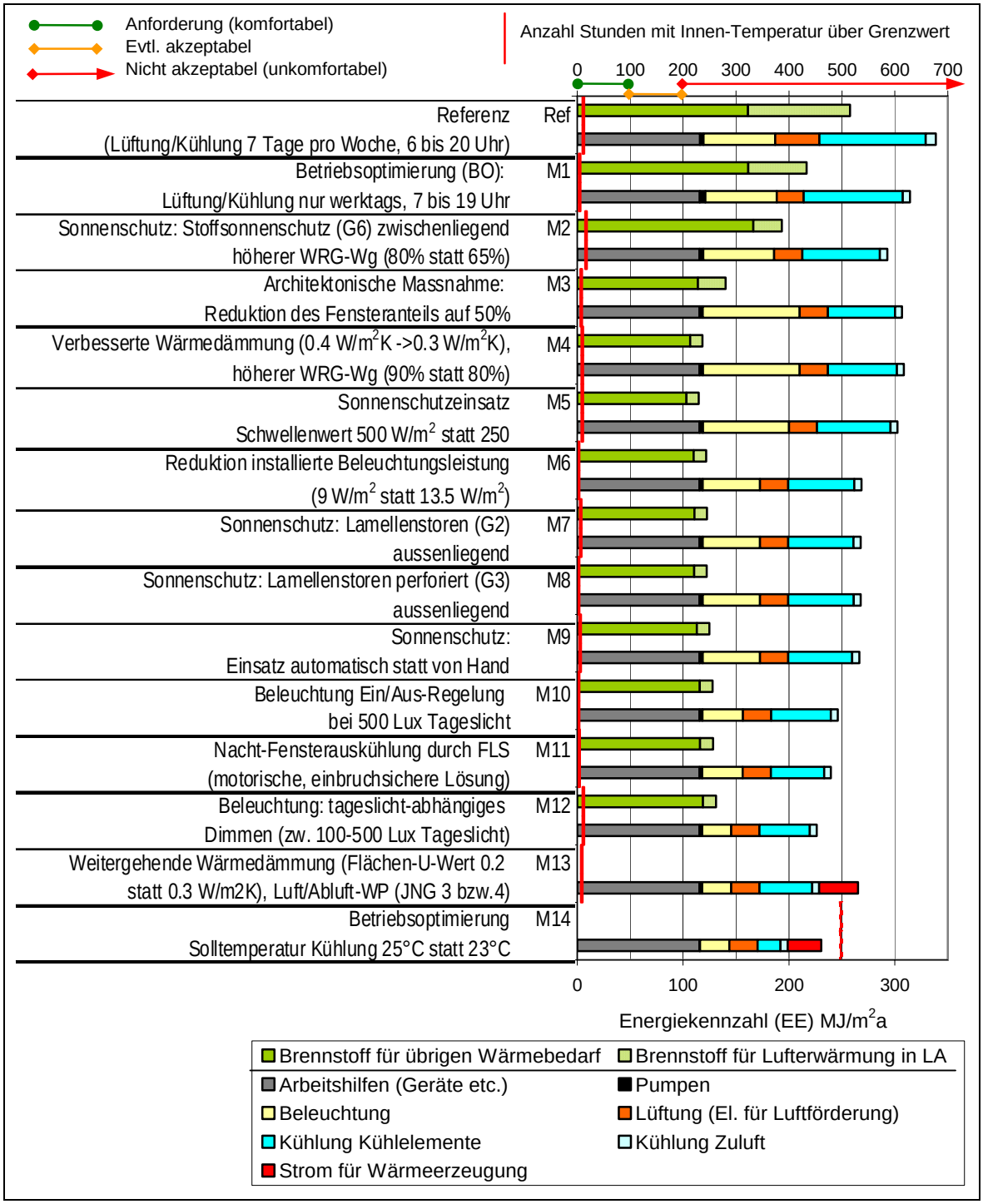


Abbildung 15 Energiebedarf und thermischer Komfort bei Gebäudetyp BN1.2a: Neubau eines mittleren Bürohochhauses, EBF 4600 m², hoher Fensteranteil (80%), ohne Fensteröffnung bei Überhitzung, Leichtbauweise, U-Wert Aussenwand ohne Wärmebrücke 0.29, hohe interne Lasten, Beleuchtung: 13.5 W/m², innerer, von Hand bedienter Sonnenschutz (G8), Lüftung mit WRG 65%, Kühlung der Zuluft und Kühlelemente (Kühldecke oder Umluftkühler), JAZ=2.5, Fenster Typ 2 (U_g=1.1, g=0.52, T_{vis}=0.73, U_f=1.8), Beleuchtung: manuelles Ein-/Ausschalten (bei 800 Lux)

Mittels höherem Temperatursollwerts und effizienterer Kühlanlage kann der Bedarf auf 10 MJ/m^{2}a reduziert werden. Zusammen mit einem automatisierten Sonnenschutzeinsatz und unterstützt mit automatisierter Nachtauskühlung durch Fenster oder Brüstungsgeräte werden die Komfortanforderungen auch bei der höheren Solltemperatur eingehalten. Ab Massnahme M6 wird zur lufthygienischen Verbesserung eine Abluftanlage mit Abluft-WP hinzugefügt, was den Brennstoffbedarf um 100 MJ/m^{2}a reduziert, dies um den Preis einer Strombedarfserhöhung von 50 bis 60 MJ/m^{2}a (das Verhältnis Wärme zu Elektrizität ist damit weit geringer als der JNG der Abluft-WP, denn aufgrund der Lüftungsanlage erhöht sich der Luftwechsel und im erwähnten Elektrizitätsbedarf ist auch ein Anteil für die Luftförderung (15 MJ/m^{2}a) enthalten. Der restliche Wärmebedarf (ca. 180 MJ/m^{2}a) wird ab Massnahme M7 mittels WP gedeckt, was den Elektrizitätsbedarf weiter erhöht (um rund 40 MJ/m^{2}a).

Der Fall BN2.1 (Abbildung 16, unten) macht also deutlich, dass Substitutionsmassnahmen und Massnahmen zur Erhöhung des thermischen und lufthygienischen Komforts den Elektrizitätsbedarf netto markant erhöhen können. Entsprechend wichtig sind das energie-effiziente Ausgestalten dieser Massnahmen und das Ergreifen von kompensatorischen Elektrizitäts-Effizienzmassnahmen (z.B. im Beleuchtungs- und Gerätebereich). Stehen im Bereich Lüftung und Beleuchtung keine solchen Massnahmen zur Verfügung, z.B. weil der Referenzfall bereits relativ effizient ist, oder werden keine solchen Massnahmen getroffen, muss bei einem WP-Einsatz mit einer markanter Erhöhung des Strombedarfs gerechnet werden, wie aus dem nachfolgenden Beispiel BN2.1 hervorgeht (Abbildung 16).

Eine über alles gesehene Reduktion des Brennstoffbedarfs von 280 MJ/m^{2}a wird im vorliegenden Beispiel mit einer Stromerhöhung von insgesamt etwas mehr als 100 MJ/m^{2}a „erkauft", wobei nur ein geringerer Teil davon auf das Konto der Kühlung geht (rund 50 MJ/m2a mit Kleinklimageräten, 20 bis 30 MJ$_{el}$/m^{2}a mit zentraler Kälteerzeugung bzw. weniger als 10 MJ/m^{2}a, wenn diese mit Nachtauskühlung kombiniert wird). Abschliessend sei zum Fall BN2.1 festgehalten, dass ausser im Testfall und im Referenzfall Ref0 die Komfortanforderungen im wesentlichen eingehalten werden (bei den Massnahmen M4b bis M7 beträgt die Temperaturüberschreitung jeweils weniger als rund 0.5 °C[11]. Die Raumtemperatur beträgt in diesen Fällen 25°C statt wie gefordert 24.5°C, was auch für die Übergangszeit noch als akzeptable Temperatur bezeichnet werden kann.

BN2.2a (Abbildung 17): Mit Kühlung bereits in der Ausgangslage stellen sich kaum Komfortprobleme. Der entsprechende Kühlenergiebedarf beträgt 70 MJ/m^{2}a. Durch ein Bündel an Massnahmen im Beleuchtungsbereich kann ein direkter Effizienzgewinn von rund 60 MJ/m^{2}a[12] und ein indirekter Gewinn von 15 MJ/m^{2}a aufgrund des geringeren Kühlenergiebedarfs erzielt werden. Durch Massnahmen in den Bereich Fenster (geringerer g-Wert) und Sonnenschutz (automatisierter Einsatz, unter Einbezug des Wochenendes) wird der Kühlenergiebedarf um weitere 10 MJ/m^{2}a reduziert und mittels effizienterer Kälteerzeugung und –verteilung um weitere gut 10 MJ/m^{2}a. Fazit zum Fall BN2.2a: Obwohl der Wärmebedarf durch WP gedeckt wird und dies bei nicht optimierter Gebäudehülle im Bereich der opaken Fassade, kann netto ein Netto-Elektrizitäts-Effizienzgewinn erreicht werden.

Dies gilt auch im Vergleich zum Referenzfall mit geringerem Kühlenergiebedarf aufgrund höherer Kühlungssolltemperatur (25°C statt 23°C), siehe Abbildung 119 im Anhang.

---

[11] Dies ist einem Modellierungsartefakt zuzuschreiben (es wurde eine etwas zu hohe Solltemperatur im Vergleich zur Anforderung definiert)

[12] Die Wirkung der Beleuchtungsmassnahmen im Einzelnen wird aus Abbildung 119 im Anhang ersichtlich.

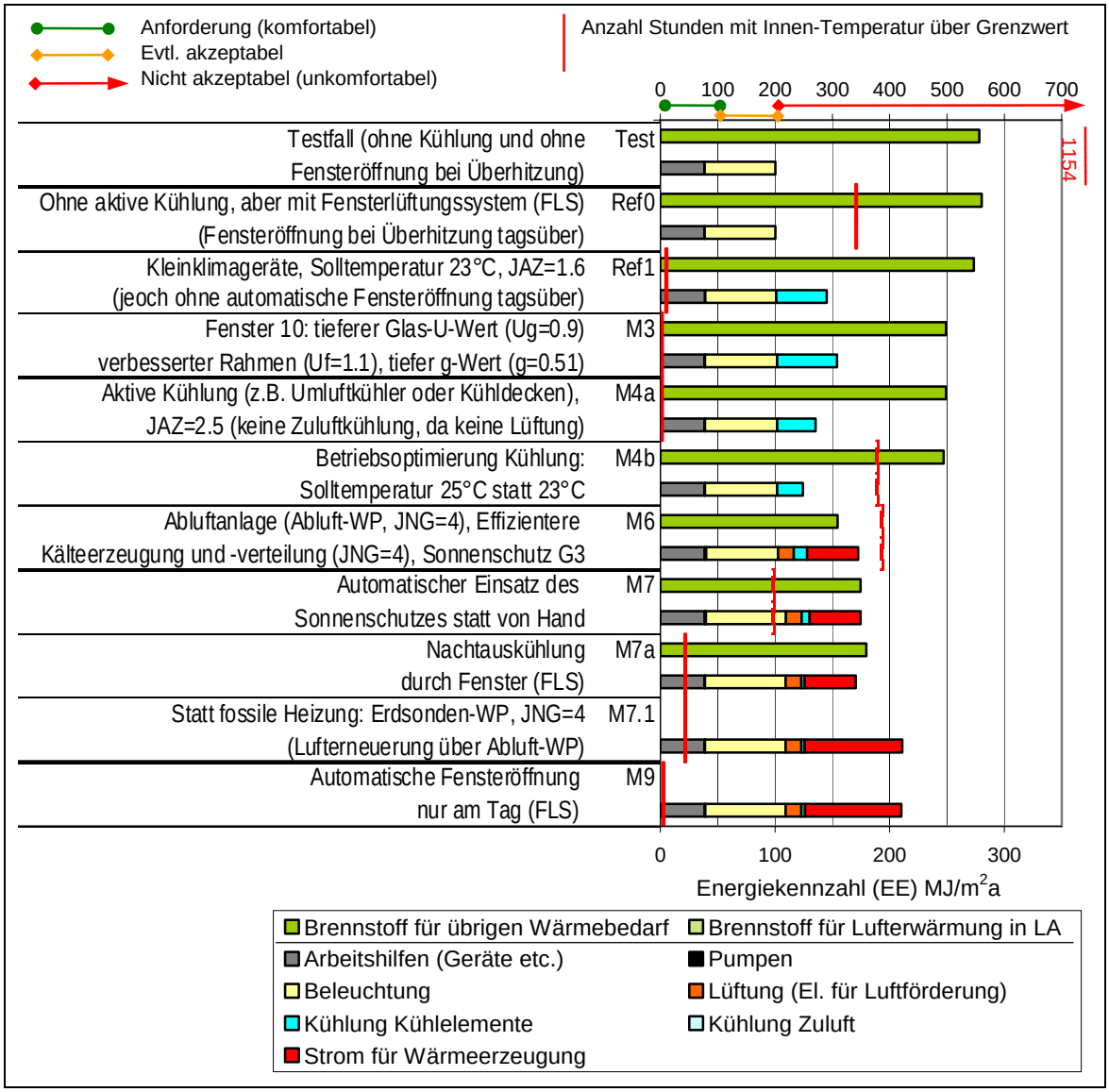


Abbildung 16 **Energiebedarf und thermischer Komfort**[13] **bei Gebäudetyp BN2.1a: Bürogebäude-Neubau, relativ hoher Fensteranteil (50%), Massivbauweise, U-Wert Aussenwand 0.4 bzw. 0.54 W/m²K (ohne bzw. mit Wärmebrücken), geringe interne Lasten,** aussenliegender, von Hand bedienter Sonnenschutz (G4), keine mechanische Lüftungsanlage (Fensterlüftung), keine Kühlung, Metallfassade, ohne Fensteröffnung bei Überhitzung (ausser MO und M7a und folgende), Fenster Typ 2 (U_g=1.1, g=0.52, T_{vis}=0.73, U_f=1.8), Beleuchtung: manuelles Ein-/Ausschalten (bei 800 Lux), 9 W/m²

[13] Die als gestrichelte Linien dargestellten Stunden mit erhöhten Temperaturen geben an, dass die Temperaturüberschreitung nur gering ist (0.5 °C oder weniger, dies weil die Solltemperaturen in der Übergangszeit knapp über dem Anforderungsprofil gemäss Abbildung 10 liegen.

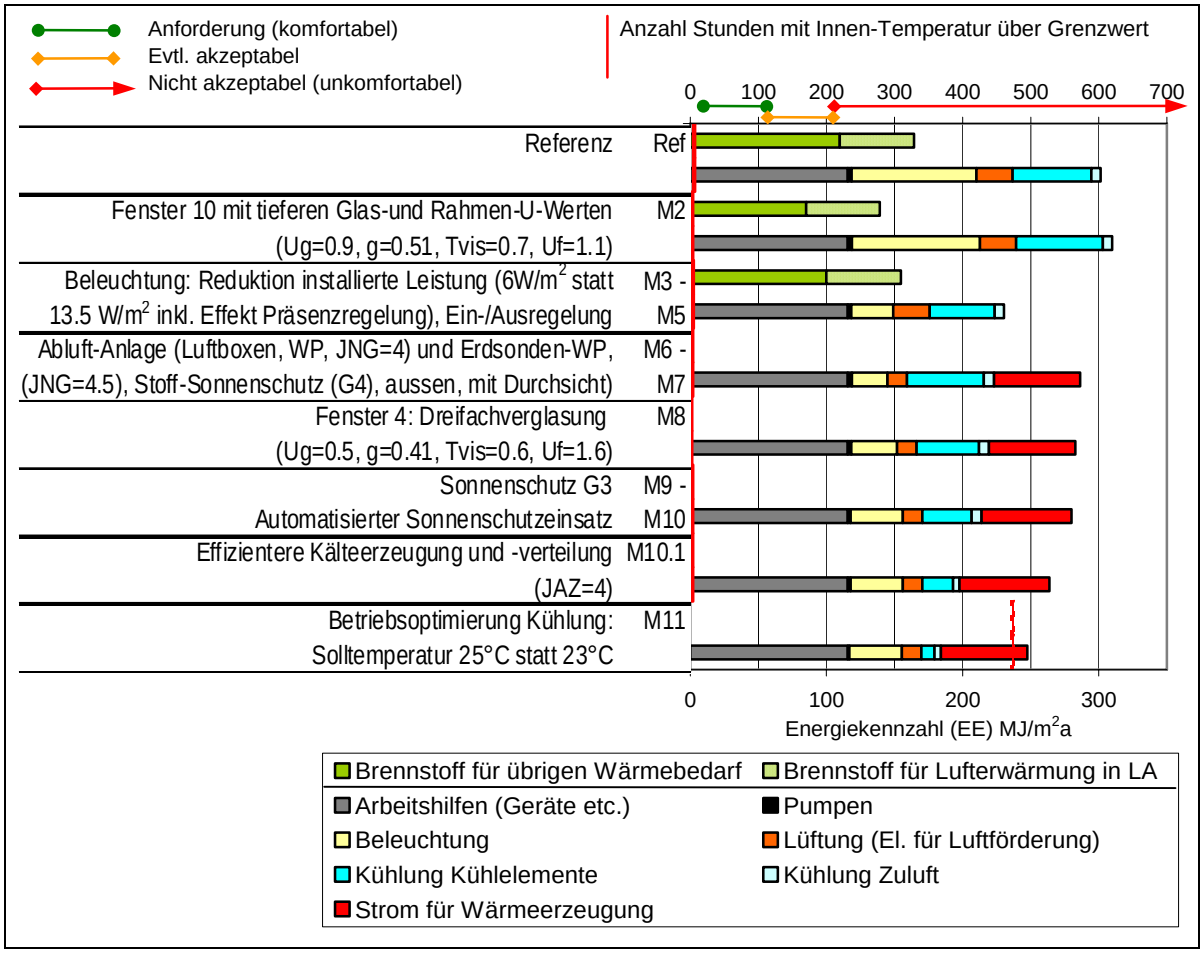


Abbildung 17 **Energiebedarf und thermischer Komfort bei Gebäudetyp BN2.2a: Bürogebäude mit relativ hohem Fensteranteil (50%) und Metallfassade, ohne Fensteröffnung bei Überhitzung, Massivbauweise**, U-Wert Aussenwand 0.4 bzw. 0.54 W/m²K (ohne bzw. mit Wärmebrücken), hohe interne Lasten, aussenliegender, von Hand bedienter Sonnenschutz (G2), mechanische Lüftung mit WRG 65%, Kühlung der Zuluft und Kühlelemente (JAZ=2.5, Solltemperatur=25°C), Fenstertyp 2 (U_g=1.1, g=0.52, T_{vis}=0.73), Beleuchtung: manuelles Ein-/Ausschalten (bei 800 Lux), 13.5 W/m²

BN2.3a (Abbildung 18): Im Referenzfall wird von einer Kühlung mit Kleinklimageräten ausgegangen. Der Verzicht auf die Kleinklimageräte zugunsten einer Lüftungsanlage mit Zuluftkühlung reduziert zwar netto den Strombedarf (M5), verschlechtert jedoch den Komfort massiv. Nur unter Einbezug der automatisierten Fensteröffnung (oder ähnlicher Massnahmen) würden die Komfortanforderungen knapp eingehalten (siehe Massnahmen M5 in Abbildung 120 im Anhang). Unter Hinzunahme von Kühlelementen wie Kühldecken oder Umluftkühlern kann der Überhitzungsschutz wieder gewährleistet werden. Bei moderater Kühlung, d.h. bei einer Solltemperatur von 25°C statt 23°C ergibt sich ein (geringes) Überschreiten der Grenzwerttemperatur (25°C statt 24.5°C), wobei die Anzahl entsprechender Stunden mittels Sonnenschutz und Beleuchtungsmassnahen auf rund 200 h/Halbjahr reduziert werden kann (M14), bei gleichzeitiger Reduktion des Elektrizitätsbedarfs.

Der Wärmebedarf wird aufgrund von besseren Fenstern, verbesserter Fassadenwärmedämmung und aufgrund der Lüftungsanlage mit WRG ausgehend von 260 MJ/m²a auf netto rund 110 MJ/m²a mehr als halbiert, dies trotz gegenläufigen indirekten Effekten aufgrund von Beleuchtungs- und Sonnenschutzmassnahmen.

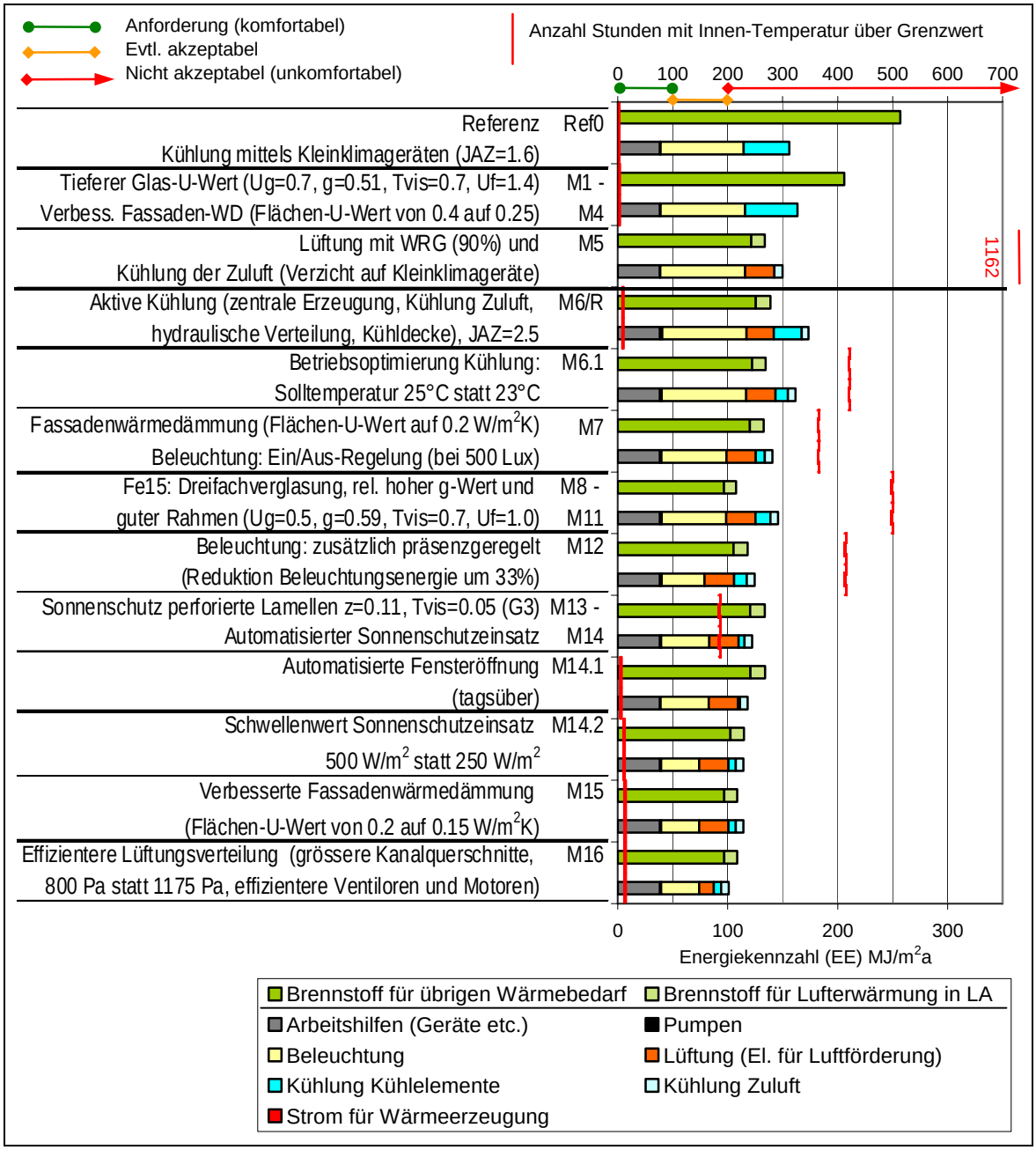


Abbildung 18 **Energiebedarf und thermischer Komfort bei Gebäudetyp BN2.3a: Bürogebäude-Neubau mit relativ geringem Fensteranteil (35%), ohne Fensterlüftung bei Überhitzung, Massivbauweise, U-Wert Aussenwand 0.4 bzw. 0.54 W/m²K (ohne bzw. mit Wärmebrücken), geringe interne Lasten**, von Hand bedienter Lamellen-Sonnenschutz aussen (G2), keine mechanische Lüftung (Fensterlüftung), Kleinklimageräte (JAZ=1.6), Fenster Typ 2 (U_g=1.1, g=0.52, T_{vis}=0.73, U_f=1.8), Beleuchtung: manuelles Ein-/Ausschalten (bei 800 Lux), 9 W/m²

Fazit zu Energie und Komfort bei Neubauten

Anhand der Fälle BN1.1 bis BN 2.3 wird deutlich, dass sowohl beim Wärmeenergie- wie beim Elektrizitätsbedarf deutliche Effizienzgewinne erzielt werden können, dies bei gleichzeitiger Verbesserung des thermischen Komforts bzw. Gewährleistung des Überhitzungsschutzes. Notwendig für einen geringen Elektrizitätsbedarf und gute thermische Komfortbedingen sind Fensteranteile wenn möglich nicht über 70%, Raumtiefen wenn möglich nicht über 7 m, geringe interne Lasten mittels effizienter Geräte und effizienter Beleuchtung inkl. präsenz- und tageslichtbasierte Regelung, stark selektive Verglas-

ungen und ebensolcher Sonnenschutz (hohe Lichttransmission, geringer g-Wert), Sonnenschutz mit Tageslichtnutzung (d.h. saisonal variable, strahlungs- und temperaturabhängige Schwellenwerte), die Nutzung der freien Kälte über Fenster, Brüstungsgeräte o.ä., effiziente Kühlanlagen (JAZ > 4, wenn möglich > 8), bedarfsgerechte Lüftung mit CO_2-basierter Regelung inkl. Zuluftkühlung. Mit diesen Massnahmen kann der gebäudebezogene Elektrizitätsbedarf (ohne Gerätemassnahmen) um 50 bis 100 MJ/m^{2}a reduziert werden, von typischerweise 250 bis 350 MJ/m^{2}a auf 150 bis 250 MJ/m^{2}a (Niveauangabe inkl. Gerätebedarf). Bei Gebäuden mit hohem Glasanteil (50% und mehr) sind Fenster- bzw. Glas-U-Werte ≤0.7 W/m^{2}K zur Sicherstellung des thermischen Komforts bei kalten Aussentemperaturen zu empfehlen. Ein geringer Wärmebedarf wird erreicht durch opake Bauteile, Fenster und Verglasungen mit geringen U-Werten, Lüftungsanlagen mit WRG hohem thermischem Wirkungsgrad (>80%). Verglasungen mit hohem g-Wert sind nicht zu empfehlen. Mit solchen Massnahmen kann der Brennstoffbedarf von 200 bis 250 MJ/m^{2}a auf 100 bis 150 MJ/m^{2}a reduziert werden, je nach Kombination und Eingriffstiefe. Der Bedarf an Brennstoffen kann vollständig substituiert werden, wenn der restliche Wärmebedarf über effiziente Wärmepumpen gedeckt wird (JAZ>4) z.B. mittels kombinierter Nutzung von Erdsonden auch für die Kälteerzeugung, was den Einsatz der Kältemaschine beinahe obsolet werden lässt und wärmeseitig einen höheren Nutzungsgrad der WP ermöglicht (JAZ WP >5).

Insgesamt ist es möglich, geringe Brennstoff- und Elektrizitäts-EKZ zu erreichen und gleichzeitig die Komfortanforderungen zu erfüllen (Abbildung 19). Voraussetzung dafür ist ein guter Wärmeschutz inkl. Luftwechsel mit Wärmerückgewinnungsmöglichkeit und hoher Elektrizitätseffizienz (geringe Druckverluste, hohe Ventilator- und Motorenwirkungsgrade, bedarfsgerechte Luftmengen), energieeffiziente, tageslicht- und präsenzgeregelte Beleuchtungen, energie-effiziente Gebäudekühlung unter Nutzung von freier Kälte (geregelte Fensterlüftung oder Brüstungsgeräte, Rückkühlung ohne Kältemaschine, adiabatische Kühlung, Erdsonden etc.) sowie energie-effiziente Arbeitshilfen (Geräte). Der Thematik des Überhitzungsschutzes ist gebührende Aufmerksamkeit zu schenken; gemäss Dott, Afjei et al. (2006) droht ohne jegliche Gebäudekühlmassnahmen selbst in Minergie-EFH eine Überhitzung während mehrer hundert Stunden pro Jahr.

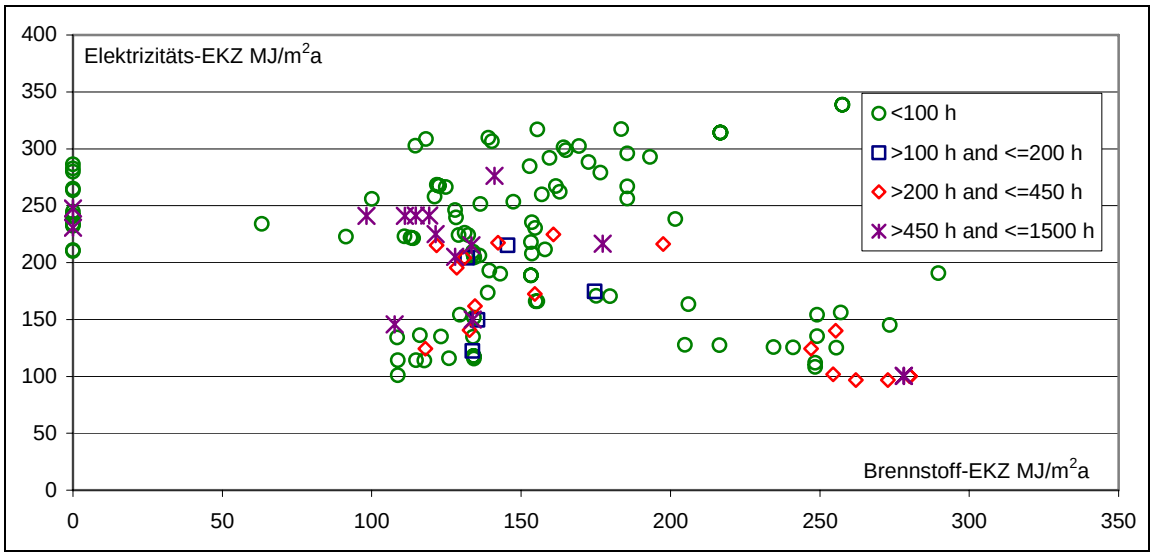


Abbildung 19 **Energiekennzahl Elektrizität als Funktion der Energiekennzahl Brennstoffe für verschiedene Komfortlevels (gemessen als Anzahl Stunden mit zu hohen Raumtemperaturen in Südräumen) bei Neubauten**

Die Wirkung der verschiedenen Massnahmentypen bzgl. Elektrizitäts- und Wärmeenergiebedarf sowie bzgl. thermischem Komfort wird zudem anhand der verschiedenen Diagramme in der Zusammenfassung ersichtlich, sowohl für die Massnahmen in Einzelnen wie auch im Kontext der betrachteten Gebäude-Massnahmenfolgen (siehe Abbildung Z.2 bis Abbildung Z.5, S. 32).

3.4.3 Energiebedarf und thermischer Komfort im Gebäudebestand

Der Gebäudebestand ist durch eine hohe Vielfalt unterschiedlicher architektonischer Formen, Bausubstanz und Technisierung geprägt. Aufgrund des unterschiedlichen Alters und unterschiedlicher Erneuerungszyklen ist auch der Stand der Technik im Gebäudebestand sehr divers. Zudem sind unterschiedliche Instandsetzungs- und Erneuerungsverhalten, welche als Referenzfall dienen, festzustellen. Die nachfolgend definierten Ist-Zustände und die verschiedenen Massnahmenabfolgen tragen dieser Vielfalt Rechnung. Die Massnahmenabfolgen unterscheiden sich in ihrer Zusammensetzung und in ihrer Reihenfolge und repräsentieren unterschiedliche Randbedingungen und Strategien (z.B. Erneuerung der Gebäudehülle vor Erneuerung der Gebäudetechnik oder umgekehrt).

Fall BB4.1a: Bei einem markanten Teil des Bestandes an Bürobauten der 1970er und 1980er-Jahre wurden Lüftungsanlagen mit Zuluftkühlung eingebaut. Die Anlagen sind oft durch hohe Luftwechselraten (typischerweise zwei bis drei Mal mehr als lufthygienisch erforderlich), hohe Druckverluste und geringe Ventilatorwirkungsgrade charakterisiert, was mit einem hohen Elektrizitätsbedarf für die Luftförderung verbunden ist (160 MJ/m^{2}a für Luftförderung und über 40 MJ/m^{2}a für die Zuluftkühlung). Die technische Erneuerung der Lüftungsanlagen sowie die Anpassung der Betriebszeiten und die Reduktion hohen Luftwechselraten auf die hygienischen Anforderungen vermag den Elektrizitätsbedarf stark zu verringern (auf total 50 MJ/m^{2}a), direkt und indirekt über geringeren Kühlbedarf). Weil sich durch die geringeren Luftwechselraten auch die Kühlleistung reduziert, verschlechtert jedoch die Komfortsituation bzgl. Überhitzung (vgl. Abbildung 20, M7). Diese kann auch durch ein Fensterlüftungssystem markant verbessert, aber nicht vollständig entschärft werden (M7.1), so dass u.U. der Einbau von Kühlelementen wie Kühldecken oder Umluftkühlern notwendig wird, was das Netto-Effizienzpotenzial durch den dafür notwendigen Strombedarf von 30MJ/m^{2}a entsprechend reduziert. Weitere bedeutende Elektrizitätseffizienzpotentiale können durch Beleuchtungserneuerungen realisiert werden, denn Beleuchtungen der Gebäude dieser Bauperioden sind im Vergleich zum heutigen Stand der Technik oft relativ ineffizient (ineffiziente Leuchten, konventionelle Vorschaltgeräte, keine Beleuchtungsregelung).

Wärmeseitig können bei dieser Gebäudekategorie ebenfalls sehr hohe Effizienzgewinne erzielt werden, und zwar v.a. bei den Lüftungsanlagen. Bei einem Teil der Anlagen wurde ursprünglich keine Wärmerückgewinnung (WRG) eingebaut, wobei bei einem Teil dieser Anlagen eine solche nachgerüstet wurde. Bei vorhandenen WRG-Anlagen ist der Wirkungsgrad oft relativ tief. Durch die oben erwähnten Massnahmen bzgl. Luftwechselraten und Betriebszeiten sowie die Erneuerung der WRG-Anlagen lässt sich der Wärmebedarf für Lufterwärmung von über 250 MJ/m^{2}a auf unter 20 MJ/m^{2}a reduzieren. Ein ähnlich hoher Gewinn kann durch den Ersatz der Fenster erzielt werden, so dass der Wärmeenergiebedarf insgesamt von etwa 650 MJ/m^{2}a auf etwa 200 MJ/m^{2}a reduziert werden kann und zwar ohne den Einbezug der übrigen Gebäudehülle.

Fall BB4.2a (Abbildung 21): Die Erneuerung der alten Lüftungsanlage mit hohem Luftwechsel kann auch durch eine Abluft-Anlage mit Nachströmöffnungen bzw. Brüstungsgeräten und Abluft-WP erreicht werden, womit der Wärmebedarf um gut einen Drittel und der Elektrizitätsbedarf um etwa 110 MJ/m^{2}a reduziert werden kann (Abbildung 21**,** M2). Anzumerken ist hierbei allerdings, dass eine solche Lösung im Einzelfall bzgl. Realisierung hohe Ansprüche stellt, damit eine zufriedenstellende Funktionalität gewährleistet werden kann (die Dynamik der Druckverhältnisse in Gebäuden mit Abluft-Anlage und Nachströmöffnungen ist relativ komplex). Alternativ dazu können Brüstungsgeräte mit integrierterer WRG verwendet werden, was zwar den Brennstoffbedarf weniger stark reduziert, dafür aber eine stärkere Reduktion des Strombedarfs ermöglicht (M3.1). Brüstungsgeräte sind denn auch insbesondere aufgrund des geringen Elektrizitätsbedarfs von besonderem Interesse, denn die zu überwindenden Druckverluste sind im Vergleich zu konventionellen Lüftungsanlagen gering.

Wird der restliche Wärmebedarf mittels Wärmepumpe gedeckt (z.B. weil die Gebäudehülle den Erneuerungszyklus noch nicht erreicht hat), kann der Brennstoffbedarf markant reduziert werden (von gut 500 MJ/m^{2}a auf gut 100 MJ/m^{2}a, was dem Wärmebedarf der Brüstungsgeräte entspricht), dafür

erhöht sich der Elektrizitätsbedarf wieder (um rund 120 MJ/m²a, siehe M3.2). Ebenfalls ein zusätzlicher Elektrizitätsbedarf ergibt sich, wenn die „freie Kälte" der kühlen Aussenluft aus Komfortgründen (oder aus regeltechnischen Gründen) nicht voll genutzt werden kann, wenn auch in weit geringerem Umfang (knapp 30 MJ/m²a, siehe M3.3). Im Vergleich zur Referenz ist bis zu dieser Massnahme trotzdem netto ein Elektrizitäts-Effizienzgewinn zu verzeichnen.

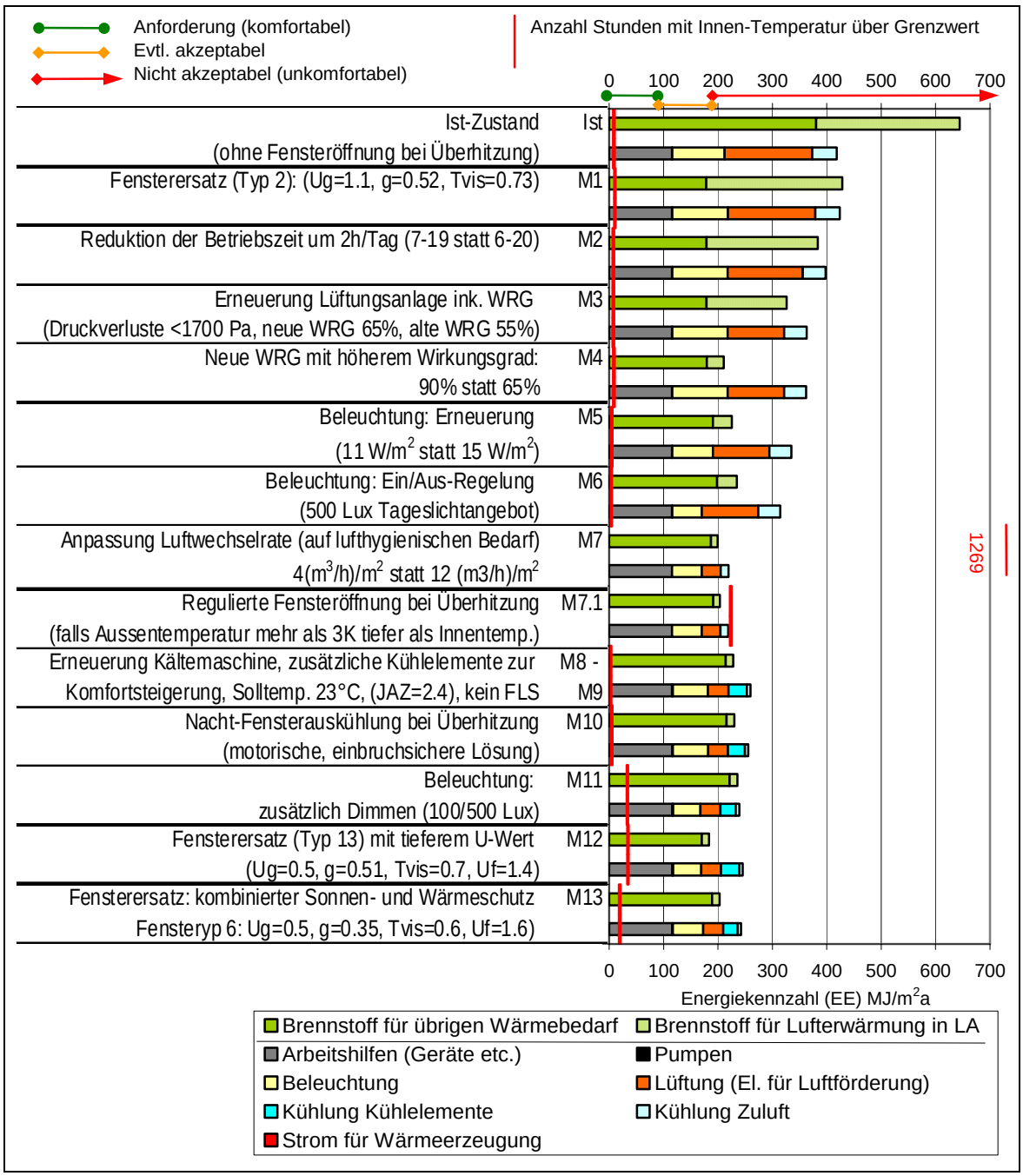


Abbildung 20 Energiebedarf und thermischer Komfort bei Gebäudetyp BB4.1a: Bestehendes Bürogebäude der Bauperiode ab 1976, 8600 m², rel. hoher Fensteranteil (50%), ohne Fensteröffnung bei Überhitzung (ausser M7.1 und M10 folgende), Leichtbauweise, U-Wert Aussenwand 1.3 W/m²K (ohne WB), hohe interne Lasten, Deckenleuchten (abgehängte Decke), Beleuchtung: 15W/m², mechanische Lüftung (hoher Luftwechsel: 12 m³/h/m²) mit WRG (45%), Kühlung der Zuluft, von Hand bedienter Lamellen-Sonnenschutz aussen (S2), Metallfassade, Fenster Typ 1 (U_g=2.2, g=0.7, T_{vis}=0.8, U_f=1.8)

Weitergehende Energie-Effizienzmassnahmen (ab M4) reduzieren den Strombedarf weiter, entweder direkt (Beleuchtung, effizientere Wärme- und Kälteerzeugung mittels Erdsonden) oder indirekt (geringerer Wärmebedarf durch effizientere Fenster etc.), so dass trotz Wärmepumpen und aktiver Kühlung ein stromseitiger Netto-Effizienzgewinn von etwa 180 MJ_{ef}/m^2a, d.h. von beinahe 50%, resultiert. Der Fall BB4.2a zeichnet sich durch verschiedene gebäudetechnische Kombilösungen aus: Kombinierte Kälte- und Wärmeerzeugung und kombinierte Lufterneuerung, Zuluft- und Umluftkühlung durch Brüstungsgeräte. Letztere bieten die Möglichkeit, die freie Kälte der Aussenluft zu nutzen und im gleichen System relativ raumsparend eine zusätzliche Umluftkühlung zu realisieren.

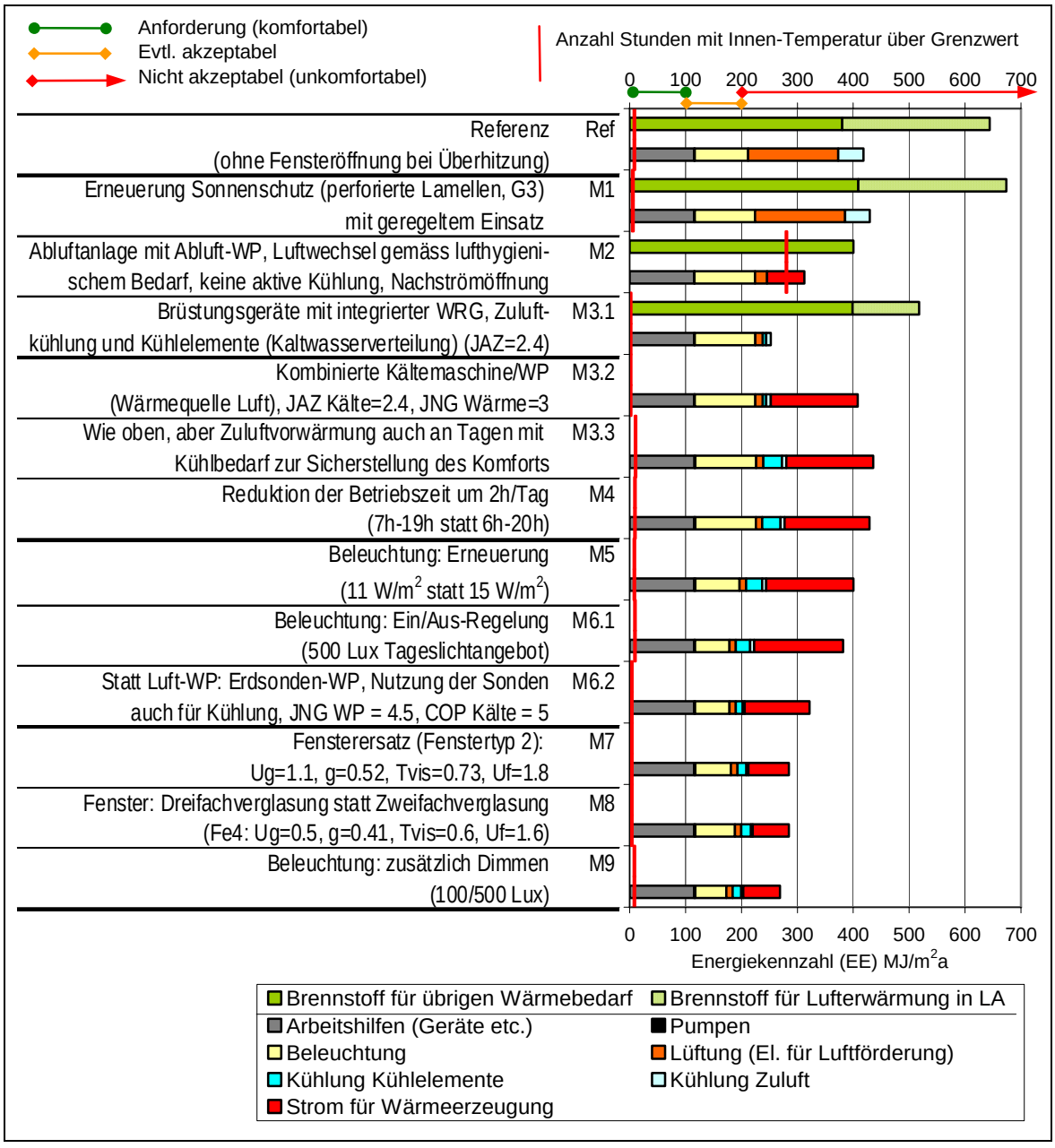


Abbildung 21 Energiebedarf und thermischer Komfort bei Gebäudetyp BB4.2a: Bürogebäude der Bauperiode 1976-2000, 8600 m², relativ hoher Fensteranteil (50%), ohne Fensteröffnung / Brüstungsgerät bei Überhitzung (ausser M2 bis M3.2) Leichtbauweise, U-Wert Aussenwand ohne WB 1.3 W/m²K, hohe interne Lasten, Deckenleuchten (abgehängte Decke), Beleuchtung: 15W/m², mechanische Lüftung (hoher Luftwechsel) mit WRG (45%), Kühlung der Zuluft, von Hand bedienter Lamellen-Sonnenschutz aussen (S2), Metallfassade, Fenstertyp 1 (U_g=2.2, g=0.7, T_{vis}=0.8, U_f=1.8)

BB3.1a (Abbildung 22): Noch grösser als oben beschrieben sind die möglichen Effizienzgewinne, falls im Referenzfall die Lüftungsanlagen während 24h/Tag in Betrieb sind. Dieser Fall stellt zwar nicht einen mehrheitlich vorkommenden Fall dar, ist aber durchaus nicht vollkommen selten. Die Reduktion der Luftwechselrate tagsüber und die Reduktion der Betriebszeit im Winterhalbjahr hat nur einen geringen Einfluss auf die Komfortsituation (zur Erinnerung, die Zuluft wird gekühlt). Die Reduktion der Betriebszeit auf einen Tagesbetrieb von 7 h bis 19 h auch im Sommer verschlechtert jedoch den Komfort, auch wenn der Grenzwert der Anzahl Stunden mit Temperaturüberschreitung noch als knapp akzeptabel bezeichnet werden kann (siehe Abbildung 22, M4). Wird jedoch zusätzlich die Zulufttemperatur leicht angehoben (von 16 °C auf 18 °C), wird der Grenzwert überschritten (M5), ohne jedoch das Ziel einer merklichen Elektrizitätsbedarfsreduktion zu erreichen. Dafür ist die Beleuchtungserneuerung weit besser geeignet; diese bewirkt in M6 bis M8 gleichzeitig eine Komfortverbesserung und eine Elektrizitätsbedarfsreduktion.

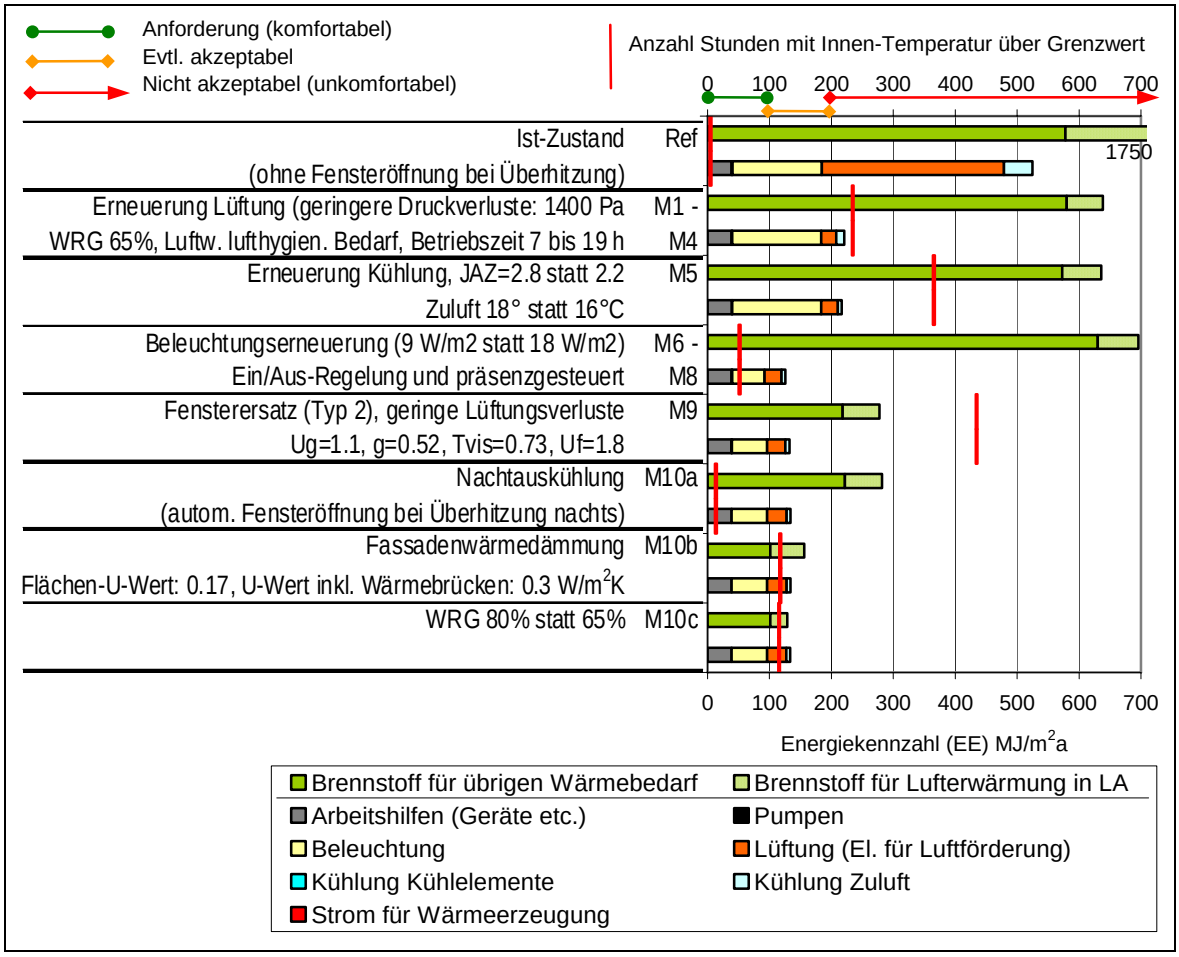


Abbildung 22 Energiebedarf und thermischer Komfort bei Gebäudetyp BB3.1a: Bestehendes Bürogebäude der Bauperiode 1960-1975, 2900 m², eher tiefer Fensteranteil (35%), ohne Fensteröffnung / Brüstungsgerät bei Überhitzung, Massivbauweise, U-Wert Aussenwand 1.1 W/m²K (Werte ohne Wärmebrücken), geringe interne Lasten, Beleuchtung: 18 W/m², Deckenanbauleuchten, alte mechanische Lüftung ohne WRG mit hohen Druckverlusten (2300 Pa), Kühlung der Zuluft, Luftwechsel doppelt so hoch wie lufthygienisch erforderlich, 24h/Tag, von Hand bedienter Lamellen-Sonnenschutz aussen (G1), Mauerwerk, Fenster Typ 0 (U_g=3.0, g=0.75, T_{vis}=0.82, U_f=2.2)

Ebenfalls ein sehr hoher Gewinn kann erzielt werden, wenn die erneuerungsbedürftigen Fenster ersetzt werden (Verglasungen mit Ug-Werten von 3.0 W/m²K sind im Gebäudebestand noch immer häufig anzutreffen). Allerdings ist auch hierbei wieder eine Komfortverschlechterung in Form von markant mehr Überhitzungsstunden zu verzeichnen. An dieser Stelle ist zu betonen, dass dafür der

Komfort während Perioden mit kalten Aussentemperaturen deutlich verbessert wird. Verursacht wird dieser Anstieg mutmasslich durch eine geringere nächtliche Auskühlung des Gebäudes, so dass die Kühlung der Zuluft nicht ausreicht, um die internen und externen Lasten abzuführen (Zuluft aus Komfortgründen nicht tiefer als 18°C, Luftwechsel gemäss lufthygienischem Bedarf). Die zunehmende Überhitzung kann durch Nachtauskühlung über ein Fensterlüftungssystem oder ähnlich wirkende Systeme wie Brüstungsgeräte oder Nachströmöffnungen kompensiert werden (M10). Anzumerken ist an dieser Stelle, dass nur von einer raum- und nicht von einer gebäudebezogenen Nachtauskühlung ausgegangen wird (geschlossene Türen im Gebäudeinnern, ohne Nutzung des Kamineffekts von offenen Türen und Treppenhäusern).

BB3.2a (Abbildung 24): Beim Gebäudetyp BB3.2 handelt es sich um ein wenig technisiertes Gebäude mit geringen internen Lasten (Geräte, Personen) ohne Lüftung und ohne Kühlung mit alten Fenstern und ungedämmter Aussenwand. Trotz geringer internen Lasten durch Geräte und Personen ist in Südräumen eine massive Verletzung der Komfortanforderungen zu verzeichnen. Der Fall zeigt exemplarisch, wie zum einen die weitere Reduktion der internen Lasten (bei der Beleuchtung, M8), verbesserter Sonnenschutz inkl. Regulierung (M11, M15.3, M15.4) und Nachtauskühlung (M10) die Anzahl Stunden mit Überhitzung vermindert und wie zum anderen der zunehmende Wärmeschutz bei Fassade und Fenstern die Anzahl Stunden mit Überhitzung erhöht (M9, M13, M14, M15.1). Wird die Gebäudehülle umfassend erneuert (Fenster und opake Fassade), reicht eine Nachtauskühlung über die Fenster nicht aus, um die Komfortanforderungen bzgl. Überhitzung zu erfüllen. Allerdings ist anzumerken, dass diese auch im Ist-Zustand bei weitem nicht erfüllt werden und dass netto eine leichte Verbesserung erzielt werden kann.

An dieser Stelle ist anzumerken, dass in diesen Fällen die simulierte Temperatur in den (Süd-)räumen ohne weitergehende Fensteröffnung während mehrerer Tage über 28°C steigt. Aufgrund dieser hohen Temperaturen sinkt die Raumtemperatur auch in Übergangszeit während Schlechtwetterperioden nicht unter 26° bzw. unter 24.5°C (während der Büronutzungszeit), siehe Abbildung 23. In der Praxis ist davon auszugehen, dass die Gebäudenutzenden die Fenster bei solch hohen Temperaturen zwischenzeitlich öffnen würden, was während der Übergangszeit zu einer spürbaren Reduktion der Temperatur führen würde. In diesem Sinn stellen die Simulationsergebnisse einen Maximalwert der Anzahl Stunden mit Temperaturgrenzwertüberschreitung dar. Im Gegensatz dazu stellen die Fälle mit automatisierter, d.h. idealisierter Fensteröffnung, einen Minimalwert dar, der durch Fensteröffnung im besten Fall zu erreichen wäre. Dieser beste Fall (siehe Fall BB3.2b, Abbildung 124) wird von real agierenden Benutzern wohl kaum erreicht, denn es würde ein ständiges Überwachen der Innen- und Aussentemperatur erfordern.

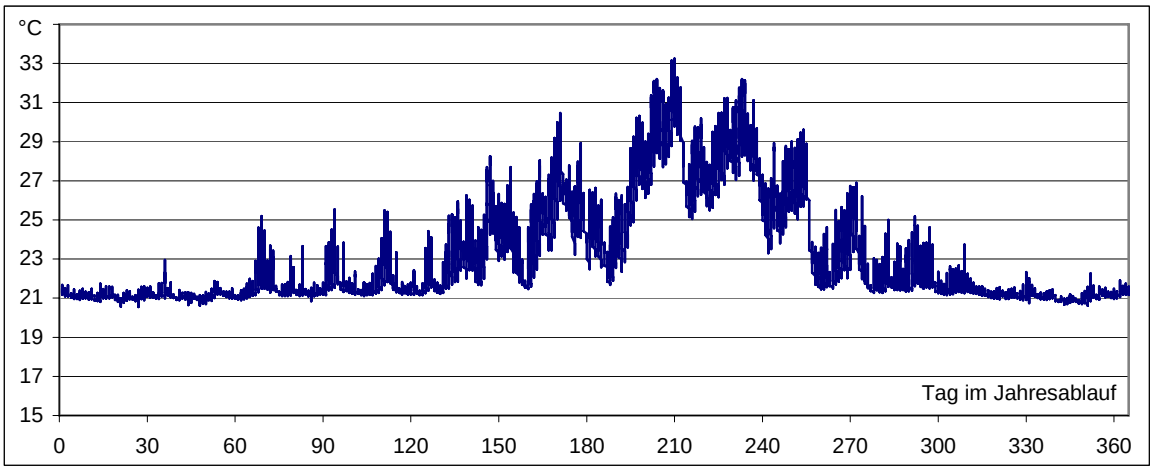


Abbildung 23 Jahresverlauf der Raumtemperatur im grossen Südraum beim Gebäudetyp BB3.2a

Das Komfortlevel ist im allgemeinen höher (d.h. die Anzahl unkomfortabler Stunden ist geringer), wenn eine geregelte Fensterlüftung in die Betrachtung mit einbezogen wird. Dies gilt sowohl für den Referenzfall wie auch für die übrigen Fälle (siehe Fall 3.2b, Abbildung 124 im Anhang). Relativ gesehen kann die zunehmende Anzahl Stunden mit zu hohen Temperaturen aufgrund des Fensterersatzes und der Wärmedämmung durch Beleuchtungs- und Sonnenschutzmassnahmen kompensiert werden, bei Vermeidung von Solargewinnfenstern sogar verbessert werden.

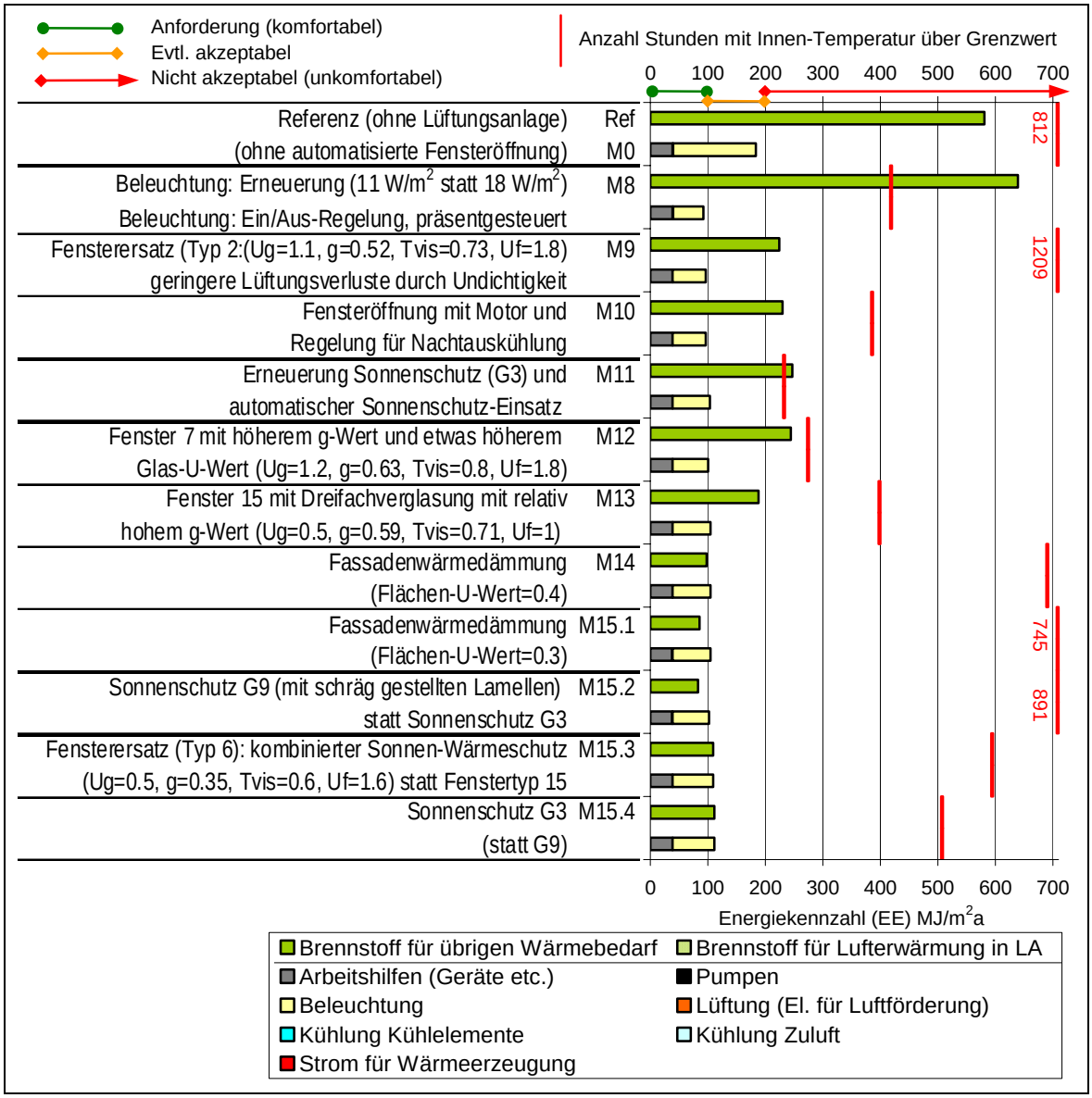


Abbildung 24 Energiebedarf und thermischer Komfort bei Gebäudetyp BB3.2a: Bürogebäude der Bauperiode 1947-1975, 2900 m², eher tiefer Fensteranteil (35%), alte Fenster (hohe Lüftungsverluste durch Undichtigkeit), ohne Fensteröffnung bei Überhitzung, Massivbauweise, U-Wert Aussenwand 1.1 W/m²K (Wert ohne Wärmebrücken), geringe interne Lasten durch Geräte und Personen, Beleuchtung: 18 W/m², Deckenanbauleuchten, ohne mechanische Lüftung, von Hand bedienter Lamellen-Sonnenschutz aussen (G1), Fenster Typ 0 (U_g=3.0, g=0.75, T_{vis}=0.82, U_f=2.2)

BB2 (Abbildung 25): Wie die Fälle 3.2a und 3.2b zeigen, ist im Gebäudebestand (ohne Lüftung mit Zuluftkühlung) in Südräumen auch im Referenzfall mit einer beträchtlichen Anzahl unkomfortabler Stunden zu rechnen, v.a. wenn die Möglichkeit der Fensteröffnung nicht gegeben ist (entsprechende Referenzfälle dürften je nach Mikrolage, Raumgeometrie und Nutzung von quantitativer Bedeutung

sein). Dies trifft auch auf Fälle mit geringen internen Lasten zu. Es ist damit zu rechnen, dass als Reaktion darauf in solchen Situationen künftig bei wachsenden Komfortansprüchen vermehrt Kleinklimageräte eingesetzt werden. Entsprechend wurde beim Gebäudetyp BB2 von Kleinklimageräten im Referenzfall ausgegangen. Mit diesen kann der sommerliche Komfort sichergestellt werden, wobei dies mit einem Elektrizitätsbedarf von rund 40 MJ/m²a verbunden ist. Trotz relativ geringem Sollwert (23°C) und geringer JAZ ist dies markant weniger als bei den meisten bestehenden Gebäudekühlungen der 1980er-Jahre (siehe Fälle 4.1 und 4.2), bei denen v.a. der Elektrizitätsbedarf für die Luftförderung merklich zu Buche schlägt (160 MJ_{el}/m^2a, dazu 40 bis 50 MJ_{el}/m^2a für Zuluftkühlung).

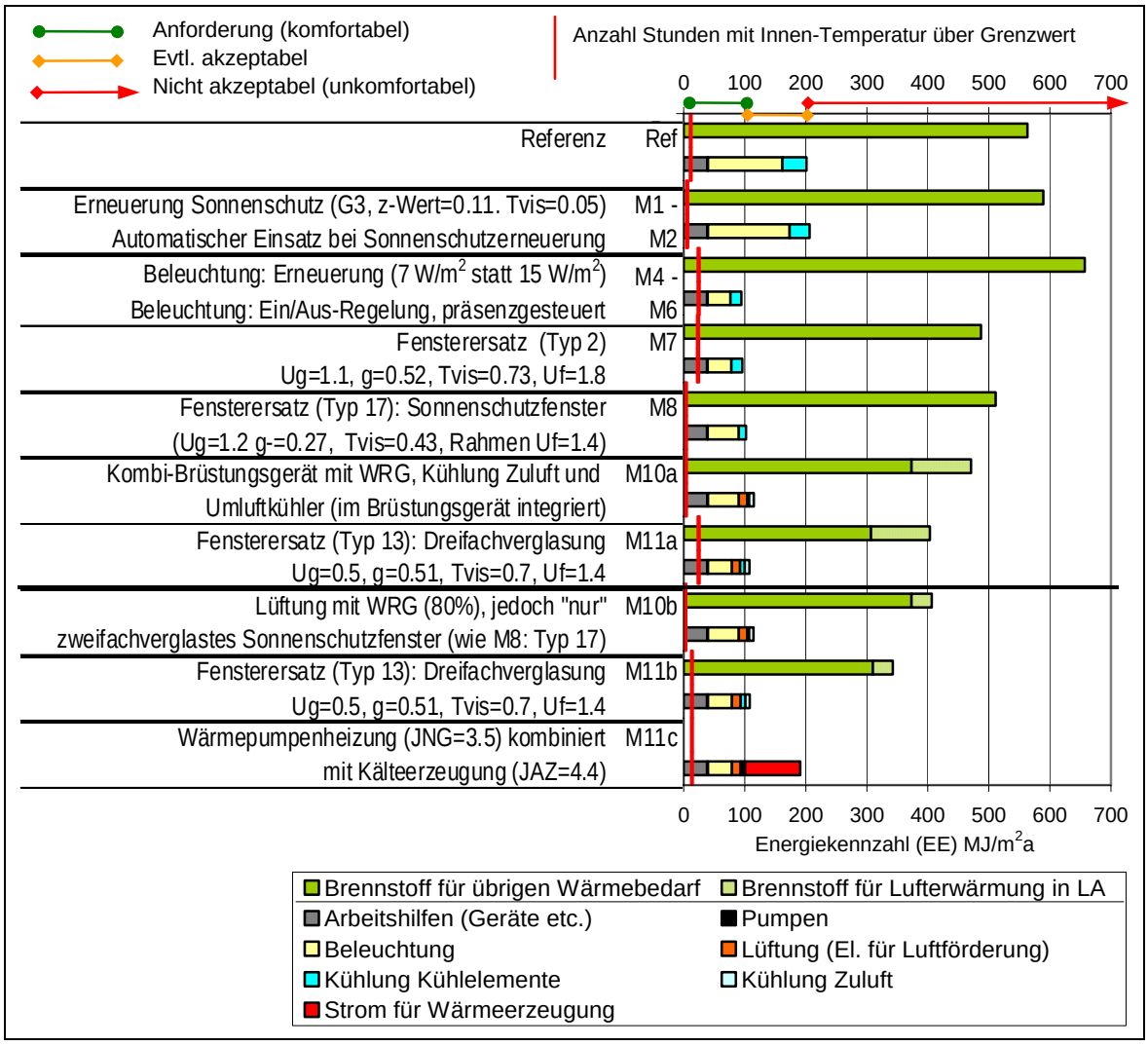


Abbildung 25 **Energiebedarf und thermischer Komfort bei Gebäudetyp BB2a: Bestehendes Bürogebäude der Bauperiode 1947-1975, 1150 m², eher geringer Fensteranteil (35%), ohne Fensteröffnung / Brüstungsgerät bei Überhitzung, Leichtbau, U-Wert Aussenwand 1.5 W/m²K** (Werte ohne Wärmebrücken): Fassade energetisch zwar suboptimal, aber sonst noch funktional), **geringe interne Lasten**, Beleuchtung (15 W/m²), Sonnenschutz aussen (Flachlamelle, G1), Kleinklimageräte, Solltemperatur 23°C, Fenster Typ 1 (U_g=2.2, g=0.7, T_{vis}=0.8, U_f=1.8)

Der Elektrizitätsbedarf der Kleinklimageräte kann durch Beleuchtungserneuerungen mit Präsenz- und Tageslichtregelungen um ein Mehrfaches überkompensiert werden und dank der damit verbundenen Reduktion der internen Lasten und eines verbesserten Sonnenschutzes um beinahe die Hälfte reduziert werden (Abbildung 25, M6). Beim bereits relativ geringen Kühlelektrizitätsbedarf von rund 20 MJ_{el}/m^2a (M6 und M7) bringen ausgeprägte Sonnenschutzfenster (g=0.27) netto keine weitere Reduktion, denn aufgrund des dadurch verursachten höheren Beleuchtungsbedarfs ergibt sich netto eine

leichte Erhöhung (M8). Wärmeseitig führen die erwähnte Beleuchtungs- und Sonnenschutzerneuerung zunächst zu einer Bedarfserhöhung (bis M6), bevor dann Fenstererneuerungen und WRG-Anlagen auch den Wärmebedarf netto merklich reduzieren (auf ein Niveau von etwa 340 MJ/m^{2}a). Für eine weitere Wärme-Endenergie-Reduktion wäre auch die Fassade zu erneuern.

BB1.1 und BB.1.2 (Abbildung 26 und Abbildung 127 im Anhang): Bei diesen beiden Fällen handelt es sich um bestehende, massiv gebaute Bürogebäude mit relativ geringem Fensteranteil (25%) und hohen internen Lasten durch Personen und Geräte. Im Fall BB1.1 wird in der Referenz von undichten Fenstern ausgegangen (hohe Infiltrationsverluste) und im Fall BB1.2 von vergleichsweise dichten (jedoch weniger dicht als nach einem Fensterersatz). In beiden Fällen werden im Referenzfall die Komfortanforderungen bei weitem nicht eingehalten, trotz des geringen Fensteranteils von 25%. Fensterersatz und / oder Fassadenwärmedämmung verschärfen das Komfortproblem tendenziell (siehe Abbildung 26 und Abbildung 127, M4), auch wenn der g-Wert eines neuen Fensters üblicherweise tiefer ist als derjenige von alten IV-Verglasungen. Der mit der g-Wert-Reduktion zu erwartende positive Effekt wird aber durch den markant grösseren Effekt aufgrund des Unterschieds beim U-Wert der Verglasung mehr als zunichte gemacht: Durch die U-Wert-Reduktion von z.B. 2.0 bis 3.0 W/m^{2}K auf heute übliche 1.1 W/m^{2}K kühlt das Gebäude während der Nacht- und Morgenstunden weniger stark aus.

Die Erneuerung der Beleuchtung vermag die sommerliche Komfortsituation zu verbessern, dies dank der geringeren installierten elektrischen Leistung sowie der geringeren Anzahl Volllaststunden aufgrund der Lichtregelung, siehe Abbildung 26 und Abbildung 127 (Anhang), Massnahmen M7 und M8 im Vergleich zu M6. Wird die installierte Leistung von 18 auf 9 W/m^2 reduziert, kann die interne Last der Beleuchtung immerhin von 130 MJ/m^{2}a auf 65 MJ/m^{2}a reduziert werden (bei 2000 Volllaststunden) bzw. von 65 MJ/m^{2}a auf 32 MJ/m^{2}a (bei 1000 Volllaststunden). Zum Vergleich: die übrige interne Last durch Geräte variiert bei den Annahmen in diesem Kapitel zwischen 120 und 40 MJ/m^{2}a. Auch wenn die Beleuchtungslast u.U. nicht gleichmässig über das ganze Jahr verteilt ist, sind dies doch beträchtliche Beträge an thermischer Last, insbesondere weil nicht auszuschliessen ist, dass die Beleuchtung auch während der sonnigen Tage im Einsatz ist (Sonnenschutz und Blendschutz).

Eine weitere Komfortverbesserung wird durch die Verwendung von Sonnenschutzfenstern erreicht (Abbildung 26, M8), dies zum Preis einer Erhöhung des Bedarfs an Elektrizität (ca. 10 MJ/m^{2}a für Beleuchtung) und Brennstoffen (ca. 30 MJ/m^{2}a). Netto ergeben sich damit beim Fall BB1.1 im Vergleich zur Referenz Effizienzgewinne bei der Elektrizität (knapp 100 MJ/m^{2}a, d.h. knapp 50%) und bei den Brennstoffen (gut 300 MJ/m^{2}a, d.h. rund 65%), dies bei gleichzeitiger Komfortverbesserung, wobei anzumerken ist, dass die diesbezüglichen Anforderungen trotzdem noch nicht eingehalten werden. Dasselbe gilt auch bei geringen internen Lasten, wenn auch die Überhitzung sich insgesamt auf einem geringeren Niveau befindet (im Vergleich zwischen hohen und geringen internen Lasten zeigt sich generell ein sehr ähnliches Muster, siehe Abbildung 125 zum Fall BB1.3 im Anhang.

Der Einbau einer Lüftung (mit WRG) verschlechtert hingegen den sommerlichen Komfort (wenn die Zuluft nicht gekühlt wird, Fall BB1.2, M10, siehe Abbildung 127 im Anhang). Wird der thermische Komfort durch Kleinklimageräte sichergestellt, kann dies zu einer markanten Erhöhung des Elektrizitätsbedarfs führen, insbesondere wenn relativ stark gekühlt wird, d.h. wenn gewünschte Niveau der Solltemperatur relativ tief gewählt wird (90 MJ/m^{2}a bei 23°C, siehe M11.1). Dies ist markant mehr als im vergleichbaren Fall mit geringen internen Lasten (20 bis 40 MJ/m^{2}a im Fall BB2a). Bei einer um 2°C höheren Solltemperatur (25°C) reduziert sich der Bedarf auf 50 MJ/m^{2}a, in Kombination mit Fenster-Nachtauskühlung auf 30 MJ/m^{2}a. Dies verdeutlicht die bereits an anderer Stelle festgestellte hohe Sensitivität des Kühlenergiebedarfs bzgl. interner Lasten, Solltemperaturen und dem Ausmass der unterstützenden passive Kühlung (z.B. Nutzung der freien Kälte über Fenster).

Der **Gebäudetyp BB1.4 (Abbildung 27)** zeigt eindrücklich auf, dass bei geringer Fensterlüftung und manuellem Sonnenschutzeinsatz (nur zwischen 9 und 17 Uhr, erst ab einem Strahlungs-Schwellenwert von 250 W/m^2 und einem Winkel zwischen –70° und + 70°) auch bei geringen mittleren Lasten (Beleuchtung hoch, Geräte tief) während langer Perioden des Sommerhalbjahres ein Überhitzungs-

problem besteht. Der Wärmeschutz an der Gebäudehülle akzentuiert dieses Überhitzungsproblem (verbessert aber den Komfort im Winter). Die Erneuerung der Beleuchtung, ein verbesserter Sonnenschutz, v.a. aber die (automatisierte) Fensteröffnung vermögen die Anzahl mit zu hohen Raumtemperaturen markant zu senken. Mit Nachtauskühlung über die Fenster können die Komfortanforderungen eingehalten werden (M8.5), was das hohe Potential der automatisierten Fensteröffnung unterstreicht.

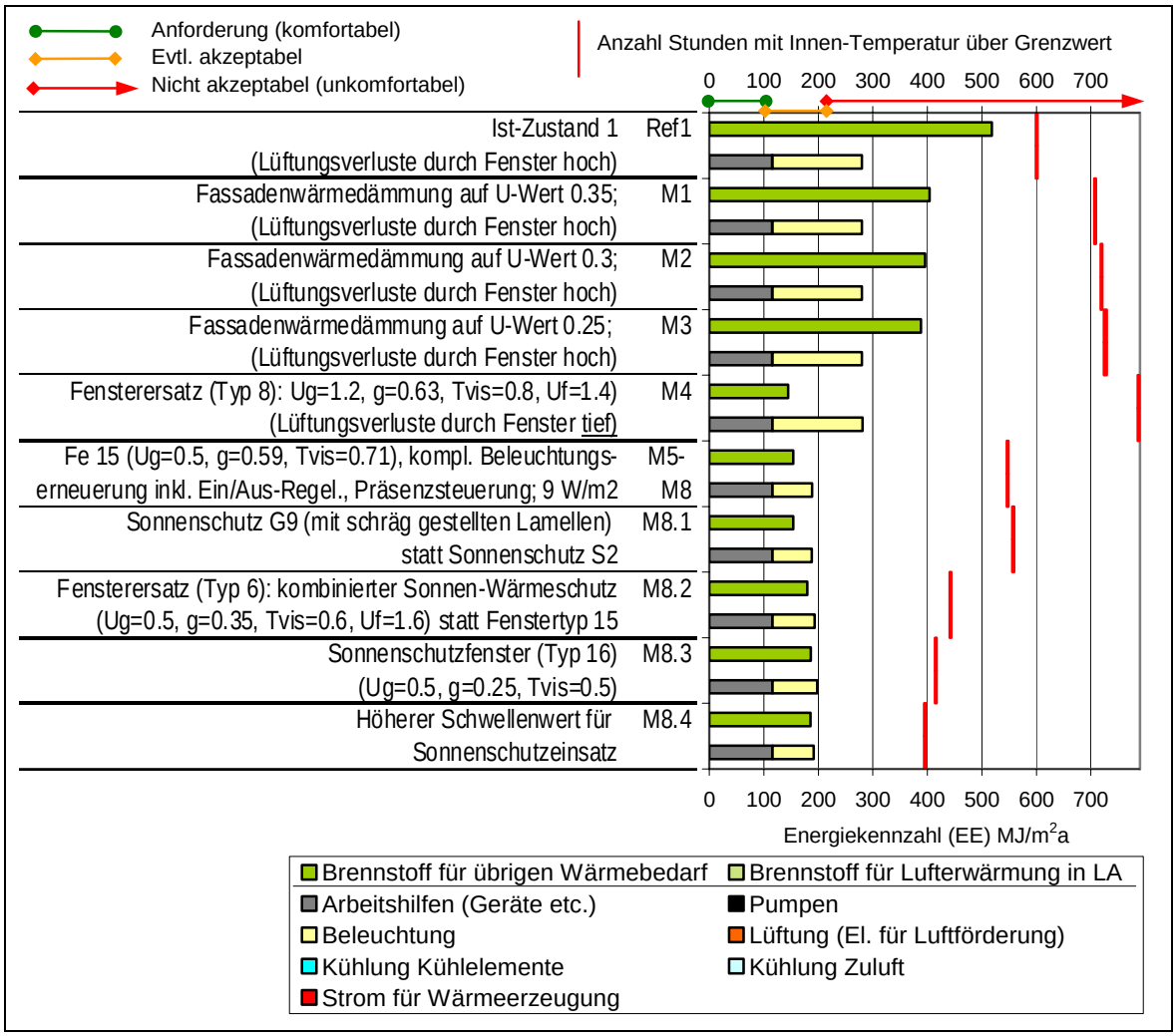


Abbildung 26 **Energiebedarf und thermischer Komfort bei Gebäudetyp BB1.1: Bestehendes Bürogebäude der Bauperiode vor 1947, 860 m², hohe interne Lasten, geringer Fensteranteil (25%), Massivbau, U-Wert Aussenwand 1.1 W/m²K** (Wert ohne Wärmebrücken), Beleuchtung: 18 W/m², Lochfenster Typ 0 (U_g=3.0, g=0.75, T_{vis}=0.82, U_f=2.2), Lüftungsverluste durch bestehende Fenster hoch, Fensteröffnung bei Überhitzung, Sonnenschutz: alter Rollladen aussen (S2); keine Kühlung.

Die möglichen Komfortproblemen der automatisierten Fensteröffnung tagsüber, welche in der Übergangszeit und in den Morgenstunden verursachen kann (kalte einströmende Luft), sollte bei der Nachtauskühlung nicht auftreten (sofern davon ausgegangen wird, dass die Gebäude nachts nicht genutzt werden). Alternativ dazu kann der Komfort mit Kleinklimageräten und Zuluftkühlung sicher gestellt werden (M11.1), wobei mit einem zusätzlichen Elektrizitätsbedarf von 30 bis 40 MJ_{el}/m^2a für die Kühlung und von knapp 20 MJ_{el}/m^2a für die Luftförderung zu rechnen ist. Demgegenüber steht ein Wärmeendenergie-Effiziezenzgewinn dank der WRG von etwa 110 MJ/m^2a. Zum Vergleich: Der Endenergie-Effiziezenzgewinn des Wärmeschutzes an der Gebäudehülle beträgt rund 240 MJ/m^2a, was in etwa einer Halbierung des ursprünglichen Bedarfs entspricht.

Wird die Nachtauskühlung mit der Zuluftkühlung kombiniert, sind die Kleinklimageräte nicht mehr notwendig, um die Komfortanforderungen sicherzustellen (M11.3). Sonnenschutzfenster oder ein neuer Sonnenschutz erbringen an dieser Stelle elektrizitätsseitig keine Verbesserung, sondern im Gegenteil eine minime Verschlechterung (M11.4 und M11.5). Zudem erhöht sich auch der Wärmeenergiebedarf (von 130 auf beinahe 160 MJ/m²a), so dass Sonnenschutzfenster bei dieser Konfiguration nicht zu empfehlen sind.

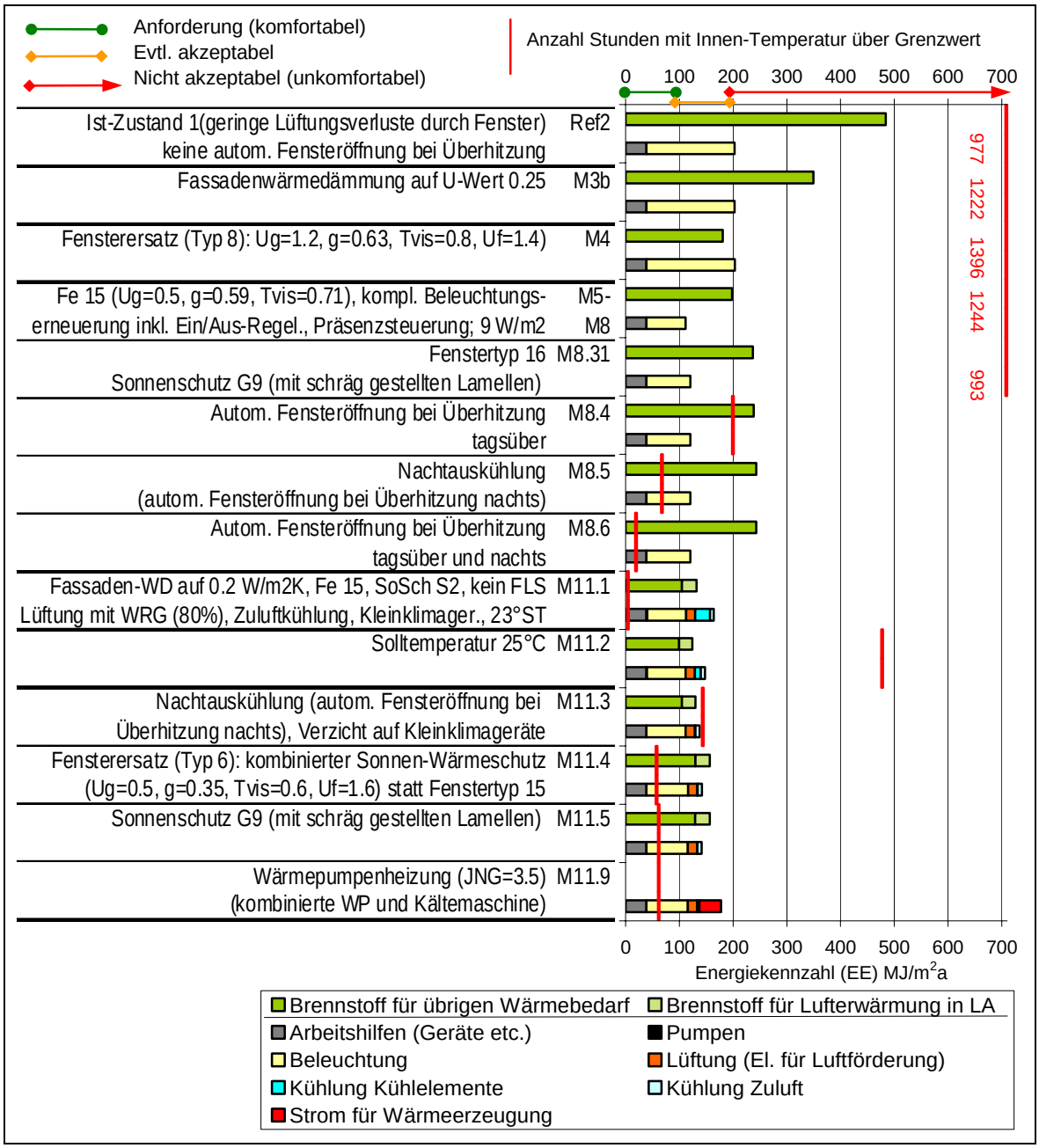


Abbildung 27 Energiebedarf und thermischer Komfort bei Gebäudetyp BB1.4: Bestehendes Bürogebäude der Bauperiode vor 1947, 860 m², geringer Fensteranteil (25%), Massivbau, U-Wert Aussenwand 1.1 W/m²K (Wert ohne Wärmebrücken), geringe interne Lasten, Beleuchtung: 18 W/m², Lochfenster Typ 0 (U_g=3.0, g=0.75, T_{vis}=0.82, U_f=2.2), Lüftungsverluste durch Fenster tief, keine Fensteröffnung bei Überhitzung, Sonnenschutz: alter Rollladen aussen (S2), „manueller" Einsatz; keine Kühlung; Fassade: verputztes Mauerwerk (U=1.1) energetisch zwar suboptimal, aber sonst noch funktional

Insgesamt zeigt sich, dass die energietechnische Erneuerung des Gebäudebestandes eine grosse Variation der möglichen Massnahmen bedeutet, d.h., es gibt kaum "optimierte" Standardlösungen bei der Sanierung, wie sie beim Neubau eher denkbar sind. Diese Tatsache setzt hohe Anforderungen an Architekten und Fachingenieure bei Gebäudeerneuerungen. Sie sollten unterstützt werden mit geeigneten Simulationsmodellen und einfach handhabbaren, integrierten Softwaretools, um sachgerechte Entscheidungen für die Erneuerungen im Gebäudebestand treffen zu können.

Im Gebäudebestand fällt das hohe Energie-Effizienzpotenzial im Bereich Lüftungen auf, und zwar sowohl bzgl. Brennstoffbedarf wie auch bzgl. Elektrizitätsbedarf. Möglich wird dies durch

- die Reduktion der Luftwechselmengen, die zum einen den Energiebedarf der Lufterwärmung reduziert (auch mit WRG und internen Lasten besteht ein Restanteil an zu erwärmender Aussenluft) und zum anderen den Bedarf an Luftförderung reduziert. Letzteres aufgrund der geringeren zu fördernden Luftmengen, aber auch aufgrund der reduzierten Druckverluste.
- den Ersatz bestehender Wärmerückgewinnungsanlagen durch Anlagen mit höherer Wärmerückgewinnungszahl oder durch den nachträglichen Einbau von WRG in Lüftungen, die bis anhin ohne WRG ausgestattet sind.
- Betriebsoptimierung, wodurch die Betriebszeiten reduziert werden können und an Randzeiten die Lüftungsleistung bedarfsgerecht reduziert wird:

Im Brennstoffbereich sind Reduktionen von 200 MJ/m^{2}a bis 300 MJ/m^{2}a durchaus realistisch, in Einzelfällen (hohe Luftwechselraten, keine WRG in der Ausgangslage) sind gar Reduktionen von einigen hundert MJ/m^{2}a möglich. Der Elektrizitätsbedarf kann durch die genannten Massnahmen um 100 bis 150 MJ/m^{2}a, in Einzelfällen bis 300 MJ/m^{2}a, reduziert werden.

Der Brennstoffbedarf lässt sich zudem durch Fassadenerneuerungen, v.a. aber durch Fenstererneuerungen markant reduzieren. Das Fenster hat im Bereich Bürogebäude eine relativ grosse Bedeutung, dies aufgrund der meistens hohen Fenster- bzw. Glasanteile. Eine Ausnahme bilden wohngebäudeähnliche Bürogebäude oder umgewandelte Wohngebäude der Bauperiode vor 1947, welche meistens geringere Fensteranteile aufweisen. Bei moderneren Gebäuden kann die Fassade u.U. ebenfalls eine hohe Bedeutung erlangen (im Vergleich zum Fenster), insbesondere bei Fassaden mit hohen Anteilen an Wärmebrücken. Es ist damit zu rechnen, dass Metallfassaden und vorgehängte Fassaden im Allgemeinen der 1960er bis 1980er Jahre ein nicht zu vernachlässigendes energetisches Erneuerungspotenzial aufweisen.

Beim Fallbeispiel des Bürogebäudes der Periode ab Mitte der 1970er Jahre (Fall BB4.2) reduziert sich die Energiekennzahl Wärme durch den Fensterersatz von rund 640 MJ/m^{2}a auf rund 430 MJ/m^{2}a, wenn ein neues Standardfenster zum Einsatz kommt, was einer Reduktion von gut 200 MJ/m^{2}a entspricht. Im Fall BB3 ist die Reduktion mit rund 300 MJ/m^{2}a sogar höher, dies trotz des geringeren Fensteranteils von 35 % statt 50 %. Der Grund hierfür liegt in der schlechten Ausgangslage mit undichten Fenstern und einem Glas-U-Wert von rund 3 W/m^{2}K. Beim noch älteren Gebäude mit einem Fensteranteil von 25% beträgt die Reduktion 150 MJ/m^{2}a. Zum Vergleich: weitergehende Massnahmen im Fensterbereich mit tieferen U-Werten und/oder höheren g-Werten reduzieren den Brennstoffbedarf vergleichsweise weniger, typischerweise um einige zehn MJ/m^{2}a. Beim Einsatz von Sonnenschutz- anstelle von Wärmeschutzfenstern wird die Reduktionswirkung etwas geringer.

Last but not least besteht im Gebäudebestand die Möglichkeit, den Brennstoffbedarf durch den Ersatz der Heizanlagen durch Wärmepumpen zu reduzieren. Fallweise ist zu prüfen, ob die Voraussetzungen einer Erdsonden-WP möglich ist oder ob Wasser als Wärmequelle zur Verfügung steht (See-, Fluss-, Grund- oder gar Abwasser). Bei kleineren und mittleren Gebäuden (welche einen beachtlichen Anteil der EBF umfassen, siehe Kap. 2) kommen auch Luft-WP in Frage. Denkbar sind im Einzelfall auch Abluft-Wärmepumpen (falls ein Einbau einer WRG nicht möglich oder zu kostenintensiv ist). Je nach Rangfolge des WP-Einsatzes ist die damit erreichbare Reduktion grösser oder kleiner, in den vorliegenden Fallbeispielen variiert sie zwischen 100 und 400 MJ/m^{2}a (bei höherer Reduktion ist selbstverständlich auch der damit verbundene Strombedarf grösser).

Fazit: auch im Gebäudebestand wird bis zu einem gewissen Mass der Zielkonflikt zwischen der Verminderung des Brennstoff- und des Elektrizitätsbedarfs deutlich. Je nach Ausgangslage bieten sich bei Gebäudeerneuerungen jedoch auch Synergieeffekte in beträchtlichem Ausmass an, welche es erlauben, den Brennstoff- und den Elektrizitätsbedarf gleichzeitig deutlich zu reduzieren und die Komfortsituation zu verbessern oder zumindest nicht zu verschlechtern.

Voraussetzung dafür sind geeignete Kombinationen von Massnahmenbündeln, welche den Wärmeschutz verbessern (unabdingbar für eine energie-effiziente Gebäudeerneuerung), die internen Lasten senken und allgemein den gebäudebezogenen Elektrizitätsbedarf reduzieren, v.a. im Bereich Beleuchtung, Lüftung und Kühlung. Zentral hierbei sind adäquate Betriebszeiten, an den lufthygienischen Bedarf angepasste Luftwechselraten, die Trennung der Funktion Kühlen und Lüften, Beleuchtungserneuerungen und bedarfsorientierte Regelungen. Zu nennen sind insbesondere tageslicht- und präsenzbasierte Beleuchtungsregelungen und CO_2- oder präsenzbasierte Lüftungsregelungen. Bei aktiver Kühlung ist auf nicht zu tiefe Temperatur-Sollwerte zu achten, da der Kühlbedarf stark sensitiv darauf reagiert. In allen Bereichen kommen Betriebsoptimierungen und –überwachungen eine hohe Bedeutung zu, um die potenziell möglichen Effizienzpotentiale dauerhaft zu nutzen.

Insgesamt ist es damit möglich, geringe Brennstoff- und Elektrizitäts-EKZ zu erreichen und gleichzeitig einen guten thermischen Komfort zu erzielen (Abbildung 28), siehe auch Baumgartner (2003).

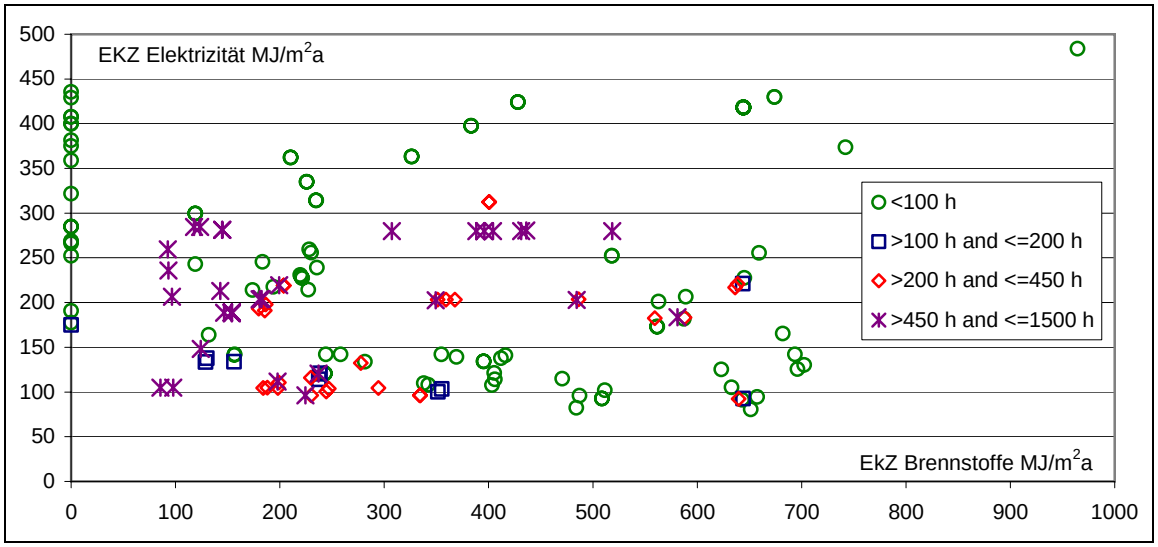


Abbildung 28 **Energiekennzahl Elektrizität als Funktion der Energiekennzahl Brennstoffe für verschiedene Komfortlevels (gemessen als Anzahl Stunden mit zu hohen Raumtemperaturen in Südräumen) im Gebäudebestand**

Zu betonen ist dabei, dass ein umfassender Wärmeschutz mit einem adäquaten Überhitzungsschutz zu verbinden ist. Ein Gebäudehüllensonnenschutz (über Gläser und mobilen Sonnenschutz) und die Reduktion der internen Lasten sind dabei hilfreiche, aber in vielen Fällen nicht hinreichende Massnahmen. Sie sind mit passiver oder aktiver Kühlung zu kombinieren. Als passive Kühlung kommen automatisiere Fensterlüftungssysteme (geregelt, einbruch- und wettersicher), Nachtauskühlung über Lüftungsanlage, die Nutzung von „freier Kälte“ (über Rückkühlung ohne Kältemaschine, adiabatische Kühlung, Erdsonden etc.) und weitere in Frage.

Gebäudeerneuerungen sind also gesamtheitlich zu konzipieren, um Komfort- und damit verbundene Akzeptanzprobleme zu vermeiden. In dieser Hinsicht ist eine entsprechende Bewusstseinsbildung bei Gebäudebesitzern und –betreibern, Planern und Unternehmen mit geeigneten (Informations-)Massnahmen zu fördern.

3.4.4 Volllaststunden bei der Beleuchtung

Bezüglich Elektrizitätsbedarf kommt der Beleuchtung in Wirtschaftsgebäuden eine zentrale Bedeutung zu. Der Kunstlichtbedarf und die Möglichkeiten zu dessen Reduktion werden von vielen Faktoren beeinflusst, v.a. in Räumen mit Aussenbezug. Es bestehen zahlreiche Interaktionen zwischen winterlichem Wärmeschutz, Überhitzungsschutz und Tageslichtnutzung. Beim Überhitzungsschutz und bei der Tageslichtnutzung sind die Qualität des Sonnenschutzes und das Einsatzregimes des Sonnenschutzeinsatz massgebend. Für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit von Energieeffizienzmassnahmen sind die Volllaststunden von entscheidender Bedeutung (nebst der installierten Leistung, der Abschreibung und den Kosten). Aus diesem Grund wurden die Volllaststunden der Beleuchtung für verschiedenste Konstellationen separat ausgewertet. Eine separate Auswertung hat zudem den Vorteil, dass der Energiebedarf von Beleuchtungen auch für andere spezifische Leistungen (W/m^2) berechnet werden kann, als sie in den vorangehenden Fallbeispielen angenommen wurde.

Die Volllaststunden sind definiert als Jahresbedarf dividiert durch die installierte Leistung. In Abbildung 29 und in Abbildung 30 sind die entsprechenden Ergebnisse für die verschiedenen Räume und die verschiedenen Konstellationen dargestellt[14]. Zur Interpretation der Ergebnisse: Innerhalb eines bestimmten Gebäudetyps „kumulieren" sich die Massnahmen von links nach rechts, ausgehend von der jeweils am weitest link stehenden Ausgangssituation. Von einer Massnahme zur nächsten kann entsprechend die Ceteris paribus Wirkung der jeweiligen Massnahme ermittelt werden (Differenz der Volllaststunden). Die Wirkung des jeweils gesamten Pakets kann im Vergleich zur Ausgangssituation (der pro Gebäude am weitesten links stehende Fall) ermittelt werden. Vergleichsbasis ist in den meisten Fällen ein approximierter manueller Beleuchtungseinsatz (Kunstlicht bei weniger als 850 Lux am Arbeitsplatz) und Sonnenschutzeinsatz „von Hand" (bei mehr als 250 W/m^2 Normalstrahlung und ab einem Azimutwinkel von weniger als 70° gemessen ab der Fassadenorientalen). Unter der **Präambel von über den Jahresverlauf konstanten Kriterien und Schwellenwerten** können folgende Fazits gezogen werden:

- Die höchsten Beleuchtungsvolllaststunden weisen die Südräume auf (bei dieser Orientierung ist der Sonnenschutz am häufigsten im Einsatz und bei eingesetztem Sonnenschutz ist ein Kunstlichteinsatz vergleichsweise häufiger notwendig als bei den übrigen Orientierungen).
- Die Volllaststunden steigen mit geringerem Fensteranteil deutlich an, v.a. bei der West- und der Nordorientierung (mutmasslich auch bei der Ostorientierung).
- Ceteris paribus kann die Anzahl Beleuchtungsvolllaststunden durch tageslichtbasiertes Ein- und Ausschalten oder durch tageslichtbasiertes markant reduziert werden (je um einige hundert Stunden, siehe dazu auch Abbildung 76 und Abbildung 77 (S. 222) und die entsprechenden Erläuterungen sowie Abbildung 138 bis Abbildung 143 im Anhang.
- Die Anzahl Beleuchtungsvolllaststunden kann durch Massnahmen im Bereich Sonnenschutz und Verglasung wieder ansteigen, so dass ein Teil der Wirkung der Beleuchtungsregelung ganz oder teilweise wieder kompensiert werden kann. Besonders ausgeprägt ist dies bei Südräumen der Fall. Nachteilig wirken sich insbesondere ein Sonnenschutzeinsatz mit tieferen Schwellenwerten, wenig lichtdurchlässige Sonnenschutzvarianten (Tvis<10%) sowie Sonnenschutzfenster (Tvis<0.5) aus. Von Vorteil sind lichtdurchlässige Stoffsonnenschutzprodukte sowie Lamellen mit geregelter Lamellenstellung.
- Aus dem Vergleich mit den kleinen kann das Potenzial von Beleuchtungsregelungen der fensternahen Leuchten in grossen Räumen abgeschätzt werden (im Vergleich zur Situation, in welcher der gesamte Raum als ganzes geschaltet wäre): Dieses beträgt auch unter Berücksichtigung der oben genannten kompensatorischen Effekte 700 bis über 1000 Volllaststunden pro Jahr.

---

[14] Aus technischen Gründen nicht berücksichtigt wurde, dass bei gedimmten Beleuchtungen der Elektrizitätsbedarf unterproportional zur Reduktion des Kunstlichtbedarfs zurückgeht (die entsprechenden Vollaststunden-Ergebnisse stellen also eine gewisse Unterschätzung dar, d.h. die Wirkung von Beleuchtungsdimmungen eine gewisse Überschätzung).

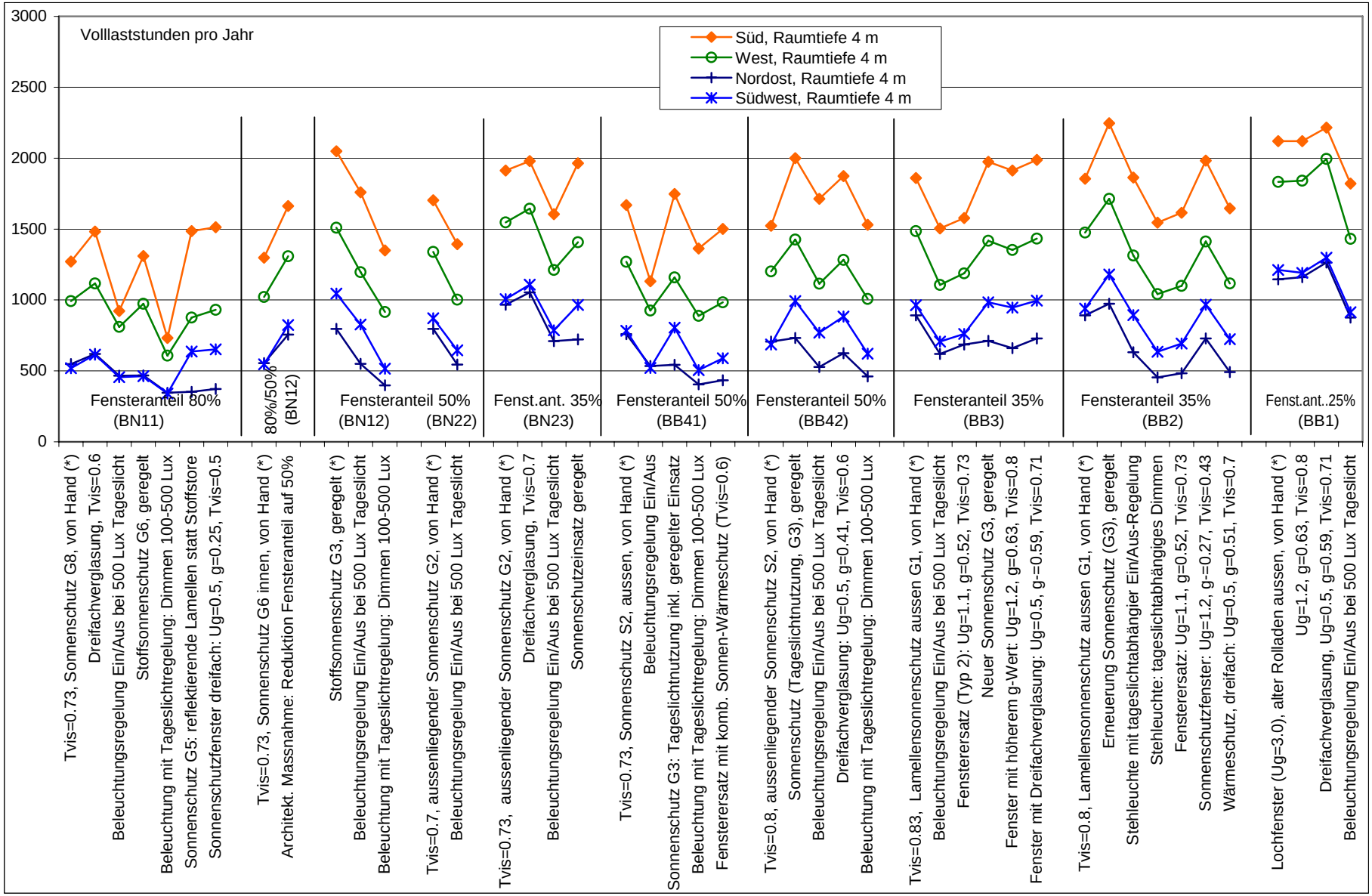


Abbildung 29 Volllaststunden der Beleuchtung bei verschiedenen Kombinationen des Fensteranteils, der Verglasung und des Sonnenschutzes (tiefe Räume)
(*) approximierter manueller Beleuchtungseinsatz (Ein-/Aus bei 800 Lux Tageslicht)

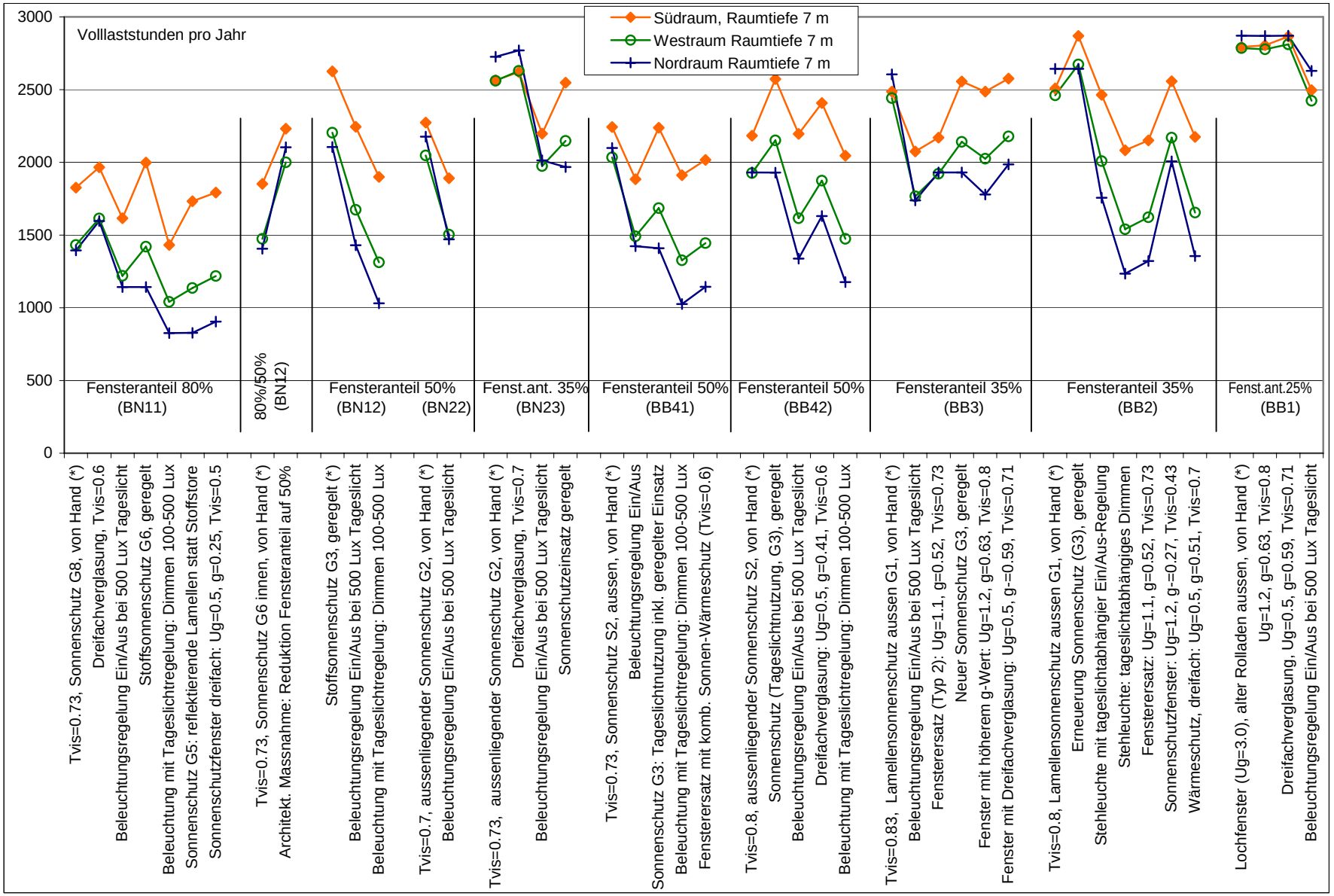


Abbildung 30 Volllaststunden der Beleuchtung bei verschiedenen Kombinationen des Fensteranteils, der Verglasung und des Sonnenschutzes (wenig tiefe Räume)
(*) approximierter manueller Beleuchtungseinsatz (Ein-/Aus bei 800 Lux Tageslicht)

3.4.5 Sensitivität Fensteröffnung

In Gebäuden mit Klimakühlung bleiben die Fenster in der Regel geschlossen, besonders während der Perioden mit Kühlbedarf. Zum einen liegt dies darin begründet, dass viele Gebäude mit Komfortkühlung auch über eine Lüftungsanlage verfügen, so dass ein geringerer Bedarf an Fensteröffnung besteht. Zum anderen bleiben die Fenster geschlossen, um zu verhindern, dass die gekühlte Innenluft nach aussen entweicht bzw. dass zusätzlich von aussen einströmende Frischluft zu kühlen ist.

Der Nachteil dieser Strategie, die Fenster geschlossen zu halten, besteht darin, dass die Aussenluft auch nicht zur direkten Kühlung genutzt wird. Gerade in Gebäuden mit hohen internen Lasten und/oder grossen Fensterflächen ist während der Periode mit Kühlbedarf die Aussentemperatur häufig tiefer als die Temperatur der Innenluft. Das Öffnen der Fenster würde während dieser Tages- und Wochenphasen Bedarf an aktiver Klimakühlung verringern.

Vor dieser Ausgangslage wurde untersucht, wie stark sich der Kühlenergiebedarf erhöht, wenn die Fenster auch dann geschlossen bleiben, wenn die Aussentemperatur (mehr als 3 K) geringer ist als die Innentemperatur. Vergleichsbasis sind die analogen Fälle, die eine Fensteröffnungsregulierung beinhaltet. Um den Rechenaufwand zu verringern und um die Übersichtlichkeit zu erhöhen, wurden Pakete von Einzelmassnahmen gebildet. Auch in Abbildung 31 und Abbildung 32 sind die Massnahmen von oben nach unten kumulativ zu verstehen. Lesebeispiel: bei Paket M6 bis M9 sind auch die Massnahmen bzw. Pakete M1 bis M5 enthalten.

Berechnet wurden Fälle mit teilweiser (nur Zuluft oder nur Kühlelemente) oder vollständiger Klimakühlung, letzteres um den vermuteten Effekt eines erhöhten Kühlenergiebedarfs sichtbar zu machen. Zu erwarten sind ausserdem Effekte auf den Heizwärmebedarf und auf den Komfort.

Komfort: Am augenfälligsten ist die Auswirkung des Fensteröffnungsregimes auf den Komfort. Wird das Fenster bei (drohender oder tatsächlicher) Überhitzung nicht geöffnet (bei tieferer Aussentemperatur), verschlechtert sich die Komfortsituation massiv, besonders bei den Gebäuden ohne Kühlung oder nur teilweiser Kühlung (entweder Zuluftkühlung oder Kühlung mit Kühlelementen wie Umluftkühlern, Kühldecken, Kleinklimageräten). Selbst bei gesamthafter Kühlung (Zuluft und Kühlelemente) steigt die Anzahl Stunden mit Temperaturüberschreitung sprunghaft an (siehe Abbildung 32). Selbst im besten Fall und inkl. Kühlung kann die Anforderung von maximal 100 Stunden Temperaturgrenzwertüberschreitung pro Jahr nicht erfüllt werden.

Kühlenergiebedarf: Bei Gebäuden mit aktiver Kühlung mit Kühlelementen erhöht sich der Energiebedarf für Kühlzwecke tatsächlich markant, wie Abbildung 32 zeigt. Die Erhöhung ist besonders markant bei Gebäuden mit hohem Glasanteil und bei solchen, bei denen keine spezifischen Massnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz getroffen wurden. Beim Gebäude mit dem höchsten Glasanteil (BN11) erhöht sich der Energiebedarf der Kühlelemente im Referenzfall Ref2 (inkl. Kühldecke) um rund das Dreifache (von 22 auf 65 MJ/m^{2}a), beim gleichen Gebäude inkl. Effizienzmassnahmen (M1 bis M10) um mehr als das Fünffache, nämlich von 6 MJ/m^{2}a auf 35 MJ/m^{2}a. Der gesamte Kühlenergiebedarf (inkl. Kühlung der Zuluft) erhöht sich um rund das Zweieinhalbfache im Fall Ref2 bzw. um das Dreifache (14 MJ/m^{2}a auf 43 MJ/m^{2}a) im Fall BN11, M10, siehe Tabelle 49. Dies führt dazu, dass die energetische Wirkung von Effizienzmassnahmen ebenfalls stark variiert. Im Fall mit Fensteröffnung bei Überhitzung kann der Kühlenergiebedarf mit dem Massnahmenpaket M1 bis M10 von 30 MJ/m^{2}a auf 14 MJ/m^{2}a, also um 16 MJ/m^{2}a reduziert werden. Im Fall ohne Fensteröffnung reduziert sich der Kühlenergiebedarf von 73 MJ/m^{2}a auf 43 MJ/m^{2}a, also um 30 MJ/m^{2}a. Dies ist betragsmässig eine doppelt so grosse Reduktion. Als Folge davon sind die spezifischen Reduktionskosten dieses Massnahmenpakets im Fall mit Fensteröffnung nur halb so gross. Bei den übrigen Gebäudetypen mit geringeren Glasanteilen sind die Phänomene ähnlich, wenn auch auf betragsmässig geringerem Niveau.

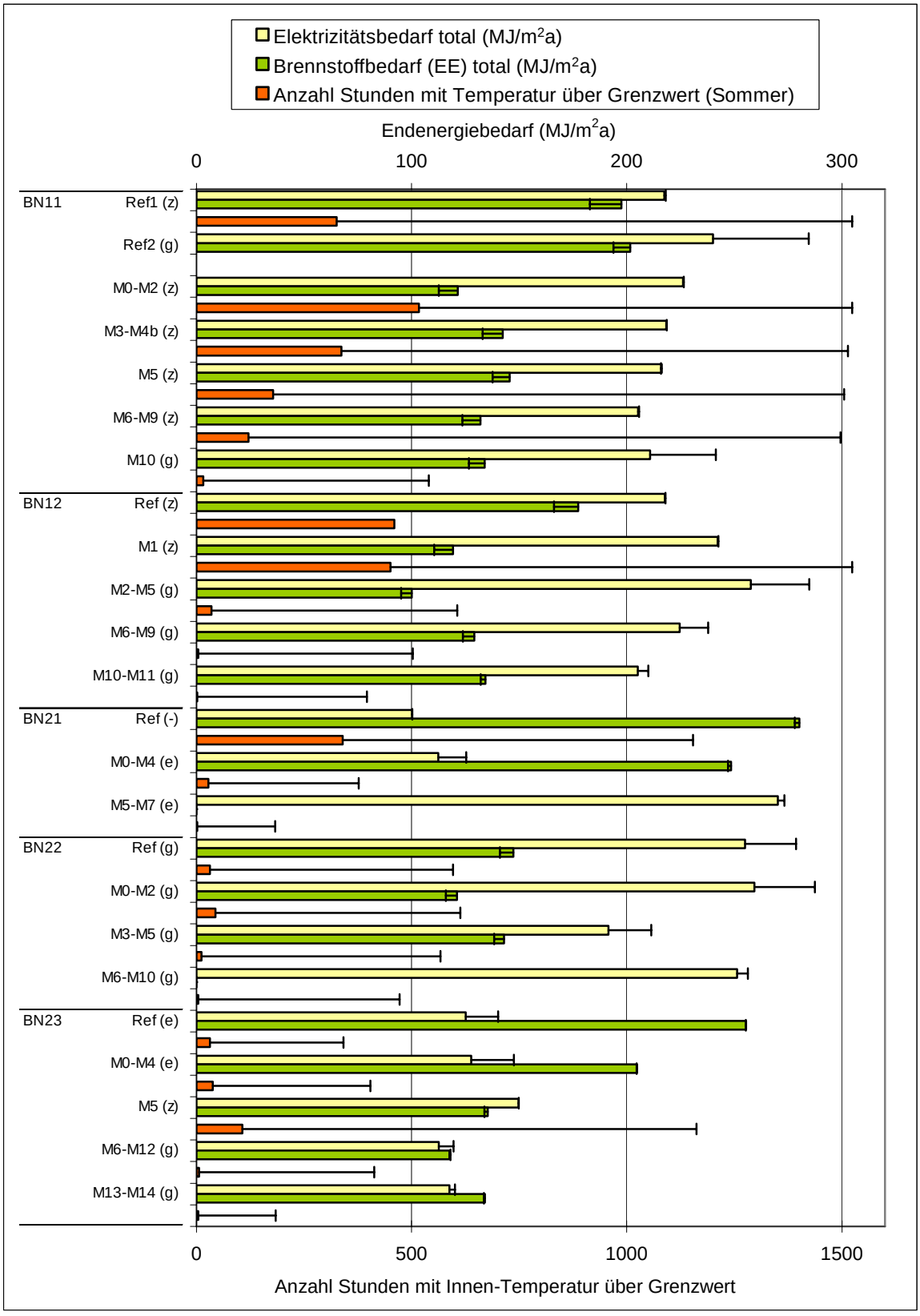


Abbildung 31 Sensitivität bzgl. „Fenster geschlossen“ im Vergleich zu „Fensteröffnung bei Überhitzung und tieferen Aussentemperaturen“ bei Energiebedarf und thermischem Komfort bei den Gebäudetypen BN1.1 bis BN2.3 (Bezeichnung der Massnahmen siehe Abbildung 13 bis Abbildung 18, S. 101 bis 109; (-) keine aktive Kühlung, (z)= Kühlung der Zuluft, (e)=Kühlelemente wie Umluftkühler, Kühldecken etc. (g)=Kühlung Zuluft und Kühlelemente gemeinsam)

		INKL Fensteröffnung bei Überhitzung, wenn Aussentemperatur 3K kühler als Raumtemperatur						OHNE Fensteröffnung bei Überhitzung					
		Brennstoffbedarf			Strombedarf			Brennstoffbedarf			Strombedarf		
Gebäudetyp	Massnahmen	Wärme total	Übriger Wärmebedarf	Lufterwärmung in Lüftungsanlage	Total	Kühlung	Übriger Bedarf	Wärme total	Übriger Wärmebedarf	Lufterwärmung in Lüftungsanlage	Total	Kühlung	Übriger Bedarf
BN11	Ref2 (g)	202	150	51	240	30	210	194	146	48	285	73	212
BN11	Ref1-M10 (g)	134	124	10	211	14	197	127	118	9	241	43	199
BN12	Ref-M5 (g)	100	93	7	258	23	235	95	88	7	285	49	236
BN12	M6-M9 (g)	129	119	10	224	13	211	124	115	9	237	25	212
BN12	M10-M11 (g)	134	124	10	205	10	194	132	122	10	209	15	194
BN21	Ref-M4 (e)	248	248	0	112	11	102	247	247	0	125	23	102
BN21	M5-M7 (e)	0	0	0	270	4	266	0	0	0	273	7	266
BN22	Ref (g)	147	97	50	255	20	235	141	94	47	279	43	236
BN22	M0-M2 (g)	121	72	49	259	22	238	116	70	45	287	49	238
BN22	M3-M5 (g)	143	91	52	191	17	174	138	89	49	211	37	175
BN22	M6-M10 (g)	0	0	0	251	9	242	0	0	0	256	14	242
BN23	Ref (e)	255	255	0	125	10	115	255	255	0	140	26	115
BN23	M0-M4 (e)	205	205	0	128	12	116	205	205	0	147	32	116
BN23	M5 (z)	135	123	13	150	7	142	134	121	12	150	7	142
BN23	M6-M12 (g)	118	105	13	113	9	103	118	105	13	119	14	106
BN23	M13-M14 (g)	134	121	13	118	8	109	134	120	13	120	10	110
BB4	Ref-M9 (g)	220	207	13	231	13	218	215	202	13	239	21	219
BB4	M10 (g)	221	208	13	221	4	217	215	203	13	227	8	219
BB2	Ref (e)	524	524	0	173	12	161	522	522	0	183	22	161
BB2	M0-M6 (e)	608	608	0	80	4	77	607	607	0	83	7	77
BB2	M7 (e)	452	452	0	82	4	78	451	451	0	86	7	78
BB2	M8 (e)	475	475	0	93	2	91	474	474	0	95	3	91
BB2	M9-M11 (g)	313	313	0	146	18	128	316	316	0	138	9	129
BB1	Ref-M11 (g)	98	78	20	237	18	219	93	75	18	261	39	221

Tabelle 49 Vergleich der Energiebedarfsstruktur zwischen „Fenster geschlossen“ und „Fensteröffnung bei Überhitzung und tieferen Aussentemperaturen“ bei den Gebäudetypen BN1.1 bis BB1
(Bezeichnungen: (-) keine aktive Kühlung, (z)= Kühlung der Zuluft, (e)=Kühlelemente wie Umluftkühler, Kühldecken etc. (g)=Kühlung Zuluft und Kühlelemente gemeinsam

Wärmebedarf: Wird das Fenster bei Überhitzung nicht geöffnet, reduziert sich der Wärmebedarf, typischerweise um 5 bis 10 MJ/m^{2}a. Die Reduktion ist damit betragsmässig weniger markant als die Erhöhung des Kühlenergiebedarfs.

Kommt der Sonnenschutz nur verzögert zum Einsatz (im berechneten exemplarischen Fall ab 500 W/m^2 Strahlung auf die entsprechende Fassade), akzentuiert sich die oben beschriebene Sensitivität etwas, v.a. beim Referenzfall (vgl. Abbildung 32 mit Abbildung 31 bzw. Tabelle 49 mit Tabelle 50).

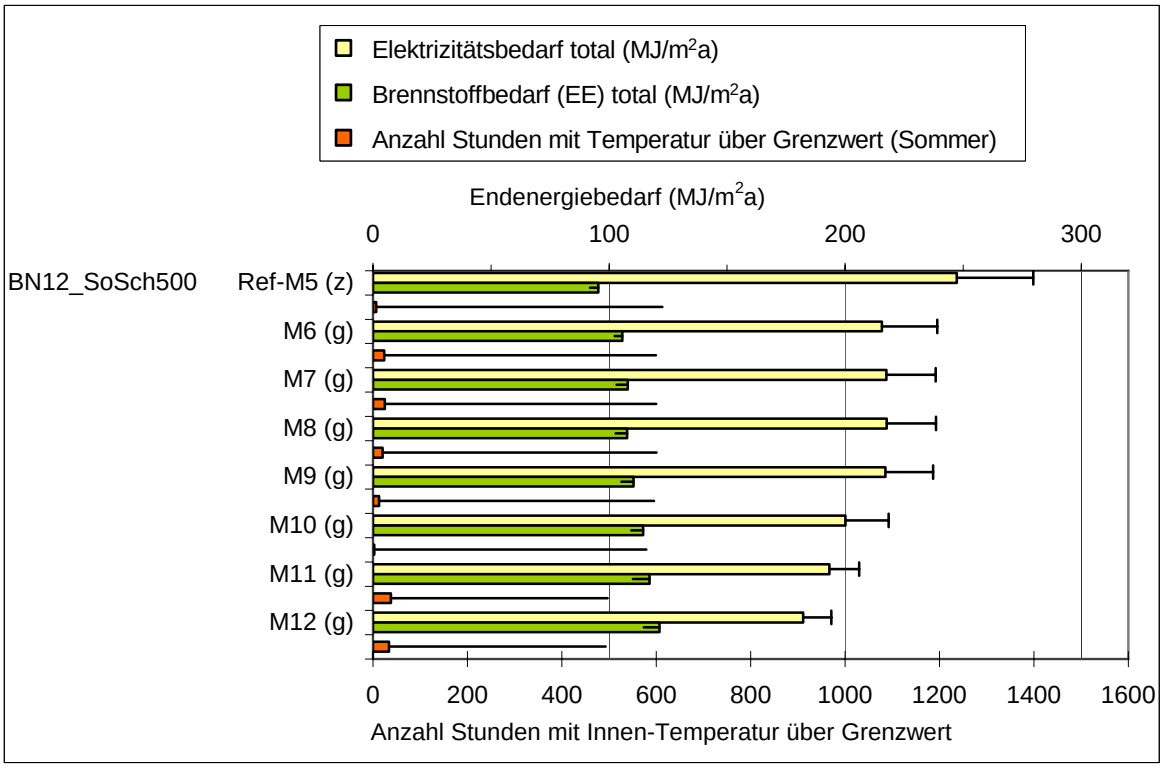


Abbildung 32 Sensitivität bzgl. „Fenster geschlossen“ im Vergleich zu „Fensteröffnung bei Überhitzung und tieferen Aussentemperaturen“ bei Energiebedarf und thermischem Komfort beim Gebäudetyp BN1.2 mit Sonnenschutzeinsatz 500 W/m² (Bezeichnung der Massnahmen Abbildung 15 S.105); (z)= Kühlung der Zuluft, (e)=Kühlelemente wie Umluftkühler, Kühldecken etc. (g)=Kühlung Zuluft und Kühlelemente gemeinsam

		INKL Fensteröffnung bei Überhitzung, wenn Aussentemperatur 3K kühler als Raumtemperatur						OHNE Fensteröffnung bei Überhitzung					
		Brennstoffbedarf			Strombedarf			Brennstoffbedarf			Strombedarf		
Gebäudetyp	Massnahmen	Wärme total	Übriger Wärmebedarf	in Lüftungsanlage	Total	Kühlung	übriger Bedarf	Wärme total	Übriger Wärmebedarf	in Lüftungsanlage	Total	Kühlung	übriger Bedarf
BN12_SoSchu	Ref-M5 (z)	95	88	7	247	23	224	92	85	7	280	54	226
	M6 (g)	106	97	9	216	19	197	102	94	8	239	41	198
	M7 (g)	108	99	9	218	20	198	103	95	8	238	40	198
	M8 (g)	108	99	9	218	20	198	103	95	8	239	40	198
	M9 (g)	110	101	9	217	19	198	105	97	8	237	39	198
	M10 (g)	114	105	9	200	19	182	109	101	9	218	36	182
	M11 (g)	117	108	9	193	13	180	110	101	9	206	25	181
	M12 (g)	121	111	10	182	13	169	115	105	9	194	24	170

Tabelle 50 Vergleich der Energiebedarfsstruktur zwischen „Fenster geschlossen“ und „Fensteröffnung bei Überhitzung und tieferen Aussentemperaturen“ beim Gebäudetyp BN1.2 mit Sonnenschutzeinsatz 500 W/m² (Bezeichnung der Massnahmen siehe Abbildung 15 S.105)

3.4.6 Sensitivität Sonnenschutzeinsatz

Wird der Schwellenwert für den Sonnenschutzeinsatz erhöht, ist bzgl. Wärmebedarf eine Reduktion zu erwarten. Bzgl. sommerlicher Situation sind im Wesentlichen zwei Effekte zu erwarten: zum einen wird der Bedarf an Kunstlicht reduziert (und damit auch der Komfort verbessert) und zum anderen wird der Kühlbedarf erhöht und/oder die Komfortsituation verschlechtert (aufgrund des erhöhten Wärmeeintrags). Die spannende Frage ist nun, welcher der beiden Effekte quantitativ überwiegt. Diese Frage wurde am Beispiel des Gebäudetyps BN1.2 untersucht, indem der Schwellenwert auf 500 W/m^2 erhöht wurde. Die Ergebnisse der Analysen zeigen, dass zwei Fälle zu unterscheiden sind:

- Fall1: Die Fenster (oder Fassadenelemente) öffnen sich bei Überhitzung, falls gleichzeitig die Aussentemperatur mindestens 3 K unter der Innentemperatur liegt.
- Fall2: Die Fenster bleiben in der Regel geschlossen

Im ersten Fall zeigt sich, dass der Effekt auf die Beleuchtung denjenigen auf den Kühlenergiebedarf deutlich überwiegt. Je nach installierter Beleuchtungsleistung und je nach Regelung der Beleuchtung reduziert sich der Beleuchtungsenergiebedarf um 7 bis 13 MJ/m^{2}a, wenn der Schwellenwert für den Sonnenschutzeinsatz erhöht wird. Der Kühlenergiebedarf erhöht sich jedoch nur um 2 bis 6 MJ/m^{2}a, typischerweise von 18 auf 20 oder von 13 auf 19 (Annahmen JAZ=2.8). Interpretation: während der kritischen Phasen ist der Sonnenschutz auch bei einem Schwellenwert von 500 W/m^2 im Einsatz, bei den weniger kritischen Phasen kann der zusätzliche Strahlungseintrag offensichtlich mindestens teilweise durch die offenen Fenster weggelüftet werden. Bei einem höheren Sonnenschutz-Schwellenwert ist nebst einer Elektrizitätsbedarfsreduktion auch eine Wärmebedarfsreduktion zu verzeichnen. Diese beträgt je nach Gebäude und Massnahmenkonstellation 5 bis 20 MJ/m^{2}a, was einer relativen Verbesserung von bis zu 15% entspricht (Abbildung 129).

							Schwellenwert Sonnenschutzeinsatz 500 W/m^2					
	Brennstoffe für Wärme	Total Strom	übriger Strombedarf	Subtotal Kühlung+ Beleuchtung	Strom Kühlung	Strom Beleuchtung	Brennstoffe für Wärme	Total Strom	übriger Strombedarf	Subtotal Kühlung+ Beleuchtung	Strom Kühlung	Strom Beleuchtung
Ref/M0 (z)	177	218	142	75	8	67	170	208	142	65	8	57
M1-M5 (g)	100	258	143	114	23	92	95	247	142	105	23	82
M6 (g)	111	223	143	79	18	61	106	216	142	74	20	54
M7 (g)	114	221	143	78	17	61	108	218	144	75	21	54
M8 (g)	113	222	143	78	17	61	108	218	144	75	21	54
M9 (g)	129	225	143	82	14	68	110	218	143	74	20	54
M10 (g)	134	208	143	65	13	52	114	201	143	57	19	38
M11 (g)	134	205	142	63	11	52	117	194	142	52	13	39
M12 (g)	139	194	142	51	11	41	121	183	142	41	13	28
M13 (g)	0	234	183	51	10	41	0	218	177	41	14	28
M14 (g)	0	233	181	52	11	41	0	217	176	42	14	27

Tabelle 51 Sensitivität bei Energiebedarf und thermischem Komfort bzgl. Sonnenschutzeinsatz (Schwellenwert 500 W/m^2) beim Gebäudetyp BN1.2, Fälle mit Fensteröffnung bei Überhitzung (Bezeichnung der Massnahmen Abbildung 15 S.105); (z)= Kühlung der Zuluft, (e)=Kühlelemente wie Umluftkühler, Kühldecken etc. (g)=Kühlung Zuluft und Kühlelemente gemeinsam

Im zweiten Fall (Fenster bleiben in der Regel geschlossen) liegen die energetischen Effekte bzgl. Kühlbedarf und bzgl. Beleuchtungsbedarf etwas näher zusammen als im Fall 1 (Fensteröffnung bei Über-

hitzung), wie aus Tabelle 52 hervorgeht. Wird der Sonnenschutz erst bei einer Strahlung von mehr als 500 W/m^2 geschlossen, reduziert sich der Beleuchtungsbedarf im Fallbeispiel BN1.2 (Neubau, 50% Glasanteil) um 7 bis 15 MJ/m^{2}a. Der Mehrbedarf beträgt für die Komfortkühlung 5 bis 14 MJ/m^{2}a. Der Nettoeffekt liegt zwischen 0 und 6 MJ/m^{2}a, d.h. ein erhöhter Schwellenwert beim Sonnenschutzeinsatz ist immer noch (leicht) zu favorisieren.

							Schwellenwert Sonnenschutzeinsatz 500 W/m^2					
	Brennstoffe für Wärme	Total Strom übriger Strombedarf	Subtotal Kühlung+ Beleuchtung	Strom Kühlung	Strom Beleuchtung		Brennstoffe für Wärme	Total Strom übriger Strombedarf	Subtotal Kühlung+ Beleuchtung	Strom Kühlung	Strom Beleuchtung	
Ref+M1 (ohne M0) (z)	110	243	142	100	8	92						
M2-M5 (g)	95	285	144	141	49	92	92	280	144	135	54	81
M6 (g)	106	241	144	97	36	61	102	239	144	95	41	54
M7 (g)	109	238	144	94	33	61	103	238	144	94	40	54
M8 (g)	108	239	144	95	34	61	103	239	144	94	40	54
M9 (g)	124	237	143	93	25	68	105	237	144	93	39	54
M10 (g)	129	218	143	75	23	52	109	218	144	74	36	38
M11 (g)	132	209	142	68	15	52	110	206	143	63	25	38
M12 (g)	137	198	142	56	15	41	115	194	143	51	24	27
M13-M14 (g)	0	237	180	57	16	41	0	228	175	53	26	27

Tabelle 52 **Sensitivität bei Energiebedarf und thermischem Komfort bzgl. Sonnenschutzeinsatz (Schwellenwert 500 W/m²) beim Gebäudetyp BN1.2, Fälle ohne Fensteröffnung bei Überhitzung** (Bezeichnung der Massnahmen Abbildung 15 S.105); (z)= Kühlung der Zuluft, (e)=Kühlelemente wie Umluftkühler, Kühldecken etc. (g)=Kühlung Zuluft und Kühlelemente gemeinsam

Wird der Sonnenschutz jedoch bereits bei tieferen Schwellenwerten eingesetzt, erhöht sich der Elektrizitätsbedarf. Wird als Kriterium nicht nur die Direktstrahlung (ab einem Aspektwinkel des Sonnenstands von 70° oder 80°) berücksichtigt, sondern die Globalstrahlung (unabhängig von der Sonnenstandsrichtung), erhöht sich der Elektrizitätsbedarf netto, wenn auch nur geringfügig (der Mehrbedarf an Beleuchtungsenergie ist leicht höher als der Minderbedarf an Kühlenergie, Tabelle 53).

Zu den Auswirkungen des Sonnenschutzeinsatzes auf die Komfortsituation können folgende Feststellungen konstatiert werden:

- Im Fall mit Fensteröffnung sind die Auswirkungen eines „verzögerten" Sonnenschutzeinsatzes auf den Komfort vernachlässigbar (sofern gesamthaft gekühlt wird). Bei dem einen gerechneten Fall ohne Kühlelemente verschlechtert sich das Komfortmass um rund 20%, wobei dieses die Anforderungen allerdings auch bei tiefem Sonnenschutzschwellenwert bei weitem nicht einhält.
- Im Fall ohne Fensteröffnung wird die Komfortanforderung bereits bei tiefem Sonnenschutzschwellenwert nicht eingehalten. Trotz Kühlung der Zuluft und trotz Kühlelementen liegen die Innenraumtemperaturen während 400 bis 600 h/Jahr über dem geforderten Grenzwert. Bei höherem Schwellenwert erhöht sich der Wert um rund 100 h/Jahr, bei den Fällen mit etwas besseren Komfortbedingungen (BN1.2, Fälle M9 bis M14, siehe Abbildung 33.

	Brennstoffe für Wärme	Total Strom	übriger Strombedarf	Subtotal Kühlung+ Beleuchtung	Strom Kühlung	Strom Beleuchtung	Schwellenwert Sonnenschutzeinsatz 180° Brennstoffe für Wärme	Total Strom	übriger Strombedarf	Subtotal Kühlung+ Beleuchtung	Strom Kühlung	Strom Beleuchtung
Ref-M9 (ohne M0) (g)	124	237	143	94	25	68	123	237	142	96	23	72
M10 (g)	129	218	143	76	23	52	130	220	143	78	21	56
M11 (g)	132	209	142	68	15	52	133	213	142	72	15	56
M12 (g)	137	198	142	56	15	41	139	201	142	60	14	45
M13-M14 (g)	0	237	180	58	16	41	0	240	180	61	15	45

Tabelle 53 Sensitivität bei Energiebedarf und thermischem Komfort bzgl. Sonnenschutzeinsatz (Schwellenwert 180°) beim Gebäudetyp BN1.2, Fälle ohne Fensteröffnung bei Überhitzung (Bezeichnung der Massnahmen Abbildung 15 S.105), (z)= Kühlung der Zuluft, (e)=Kühlelemente wie Umluftkühler, Kühldecken etc. (g)=Kühlung Zuluft und Kühlelemente gemeinsam

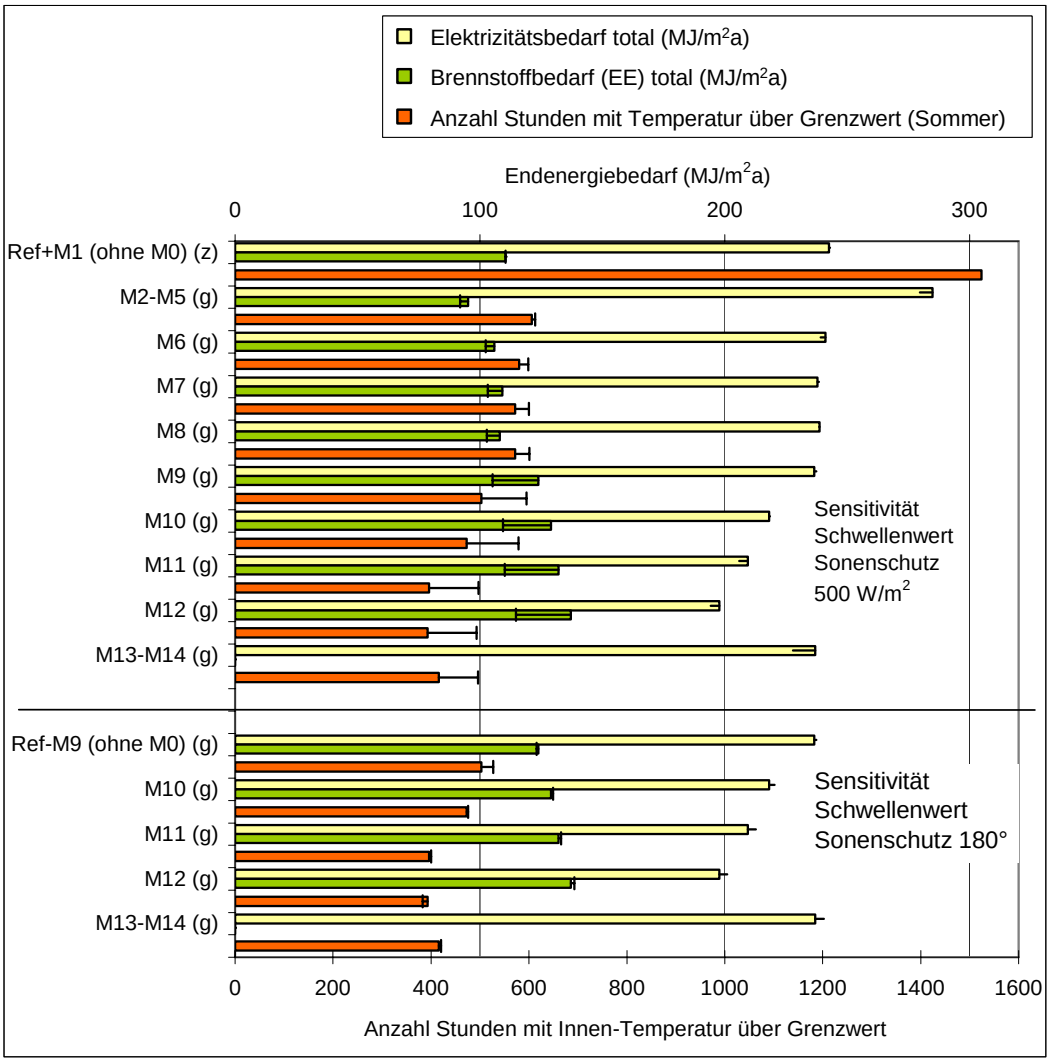


Abbildung 33 Sensitivität bei Energiebedarf und thermischem Komfort bzgl. Sonnenschutzeinsatz beim Gebäudetyp BN1.2, Fälle ohne Fensteröffnung bei Überhitzung (Bezeichnung der Massnahmen Abbildung 15 S.105); (z)= Zuluftkühlung, (e)=Kühlelemente. (g)=Kühlung Zuluft und Kühlelemente

Aus diesen Ergebnissen kann aus energetischer Sicht gefolgert werden,

- dass der Sonnenschutz eher zurückhaltend einzusetzen ist, v.a. während der nicht-überhitzungskritischen Stunden (während der Tage, während derer keine oder nur eine Teilkühlung erforderlich ist). Diese Folgerung könnte durch die stundenweise Auswertung der Ergebnisse überprüft werden.
- dass selektiven Verglasungen (hohe Lichttransmission bei tiefem g-Wert) und v.a. tageslichtoptimierten Sonnenschutzvarianten eine hohe Bedeutung zukommt (sommerliche Situation). Ein hoher Durchlassgrad kann durch das Schrägstellen der Lamellen oder durch lichtdurchlässige Sonnenschutzprodukte (z.B. aus Stoff) erreicht werden

Aus Sicht des thermischen Komforts verschlechtert sich die Situation bei höherem Sonnenschutzschwellenwert insbesondere bei den Fällen, bei denen die Komfortanforderungen bereits bei tiefem Schwellenwert nicht eingehalten werden.

3.5 Interpretation der Simulationsergebnisse

Bei der Interpretation der Simulationsergebnisse sind die angenommenen Randbedingungen und die Grenzen der Simulationen mit zu berücksichtigen. Grenzen bei der Simulierung betreffen insbesondere das Verhalten der Nutzenden und hierbei v.a. im Bereich der Beleuchtung, des Sonnenschutzeinsatzes und der Fensteröffnung.

3.5.1 Sonnenschutz und Beleuchtung:

Es wurde versucht, das Nutzerverhalten mittels adäquaten Schwellenwerten zu approximieren und zwar wie folgt:

- Sonnenschutzeinsatz: Der „manuelle" Sonnenschutzeinsatz wurde wie folgt approximiert: (vollständiger) Einsatz des Sonnenschutzes zwischen 9 und 17 Uhr ab einem Schwellenwert von 250 W/m2 und einem Aspektwinkel von 70° (gemessen an der Vertikale der Fassade), dies mit der Begründung, dass der manuelle Sonnenschutzeinsatz v.a. aus Blendschutzgründen eingesetzt wird (ausser natürlich im Hochsommer) und zwar dann, wann das Problem „sichtbar" wird, d.h. bei direkter Wahrnehmung der Sonneneinstrahlung. In der Praxis ist folgendes abweichendes Verhalten denkbar: es besteht keine störende Blendung und die Nutzenden setzen den Sonnenschutz erst dann ein, nachdem die Raumtemperatur auf ein (unangenehmes) Niveau angestiegen ist, was u.U. markant später sein kann, denn die Raumtemperatur reagiert aufgrund der Gebäudemasse mit beträchtlicher Verzögerung auf die Sonneneinstrahlung.
- Beleuchtung: es kann davon ausgegangen werden, dass bei einer nicht geregelten Beleuchtung das Licht bei zunehmender Helligkeit im Tagesverlauf erst verzögert (oder im schlimmsten Fall gar nicht) ausgeschaltet wird Simulationstechnisch wurde dies approximiert, indem der Schwellenwert für den Lichteinsatz auf 775 Lux (Tageslicht auf der definitern Arbeitsfläche) gesetzt wurde (statt 400 bis 500). Mit dieser Approximation beinhaltet jedoch letztlich auch der Fall „Lichteinsatz durch Nutzer" einen Schwellenwert basierten Einsatz, so dass Massnahmen an Verglasung und Sonnenschutz auch in diesem Fall Auswirkungen auf den Lichteinsatz haben. Die tatsächliche Reaktion auf den Lichtbedarf wird dabei möglicherweise überschätzt, besonders bei Sonnenschutzmassnahmen. Begründungen: zum einen wird der Sonnenschutz wohl – ausser an hochsommerlichen Tagen – möglichst so eingesetzt, dass kein Kunstlichtbedarf entsteht (z.B. durch entsprechende Lamellenstellung oder nur teilflächigen Einsatz), denn Tageslicht wird üblicherweise als angenehmer empfunden. Zum anderen brennt das Licht in der Praxis möglicherweise noch wesentlich länger als im Modell berechnet, so dass der zusätzliche Bedarf (bei Sonnenschutzmassnahmen) relativ gesehen geringer ausfällt.
- Fazit: Der Interaktionseffekt von Verglasungs- und Sonnenschutzmassnahmen auf den Beleuchtungsbedarf wird im Fall des manuellen Einsatzes von Beleuchtung und/oder Sonnenschutz vom

Modell möglicherweise überschätzt. Damit würde der Nutzen der entsprechenden Massnahmen bzgl. Kühlenergiebedarfsreduktion unterschätzt (d.h. die Grenzkosten überschätzt).

3.5.2 Automatische Fensteröffnung

Vor allem bei Gebäuden mit hohem Glasanteil und/oder hohen internen Lasten ist aus Komfortgründen bereits dann ein Kühlbedarf gegeben, wenn die Aussentemperatur noch 3 K (oder um einen höheren Betrag) geringer sind als die Innentemperaturen. Mit dem Mittel einer automatisierten Fensteröffnung kann das Überhitzungsrisiko stark gemindert werden. Sinngemäss gilt dies auch für Nachströmöffnungen in der Fassade. Durch eine automatisierte Fensteröffnung oder Nachströmöffnungen kann u.U. auf eine aktive Kühlung verzichtet werden. Wird trotzdem aktiv gekühlt, wird der Kühlenergiebedarf stark reduziert. Diese Aussagen gelten unter folgenden Vorbedingungen und Vorbehalten:

- Interpretation der Simulationsergebnisse: die Aufheizung der Fassade wird im Modell vernachlässigt. Während der Periode mit direkter Bestrahlung der Fassade ist damit zu rechnen, dass sich die Fassade erwärmt und die Bedingung für die Fensteröffnungen (Aussentemp. mind. 3 K unter Innentemp.) nicht mehr gegeben ist.
- Schräg gestellte Fenster können in vielen Phasen zu unangenehmen Komfortsituationen aufgrund von Kaltluftströmungen führen, v.a. in den Morgenstunden während der Übergangsphasen. Die Fensteröffnung während der Büronutzungszeit kann deshalb im Vergleich zum Modell stark eingeschränkt sein.
- Eine Einschränkung der Fensteröffnung ist auch bei Standorten mit Lärmbelastung und/oder lufthygienischen Beinträchtigen gegeben.

Fazit: Eine automatisierte Fensteröffnung oder Nachströmöffnungen können den Kühlbedarf stark reduzieren (siehe auch Baumgartner, 2003). Unter Umständen ist ihr Einsatz auf die Rand- und Nachstunden zu begrenzen. Entsprechend wichtig ist es, die Fensteröffnung nicht allein den Nutzern zu überlassen. Eine Regelung bietet den Vorteil der Wetterfestigkeit sowie des optimalen Einsatzes (auch wenn die Nutzenden nicht an eine Öffnung denken), dies auch nachts, an Wochenenden und bei Abwesenheiten. Wichtig ist in diesem Zusammenhang, eine thermisch nicht zu leichte Baukonstruktion zu wählen (entweder Decke oder Boden thermisch aktiv, d.h. keine heruntergehängte Decke bzw. kein Doppelboden), um die Gebäudemasse als Zwischenspeicher nutzen zu können. Statt der Gebäudemasse als solcher können auch Materialien mit Phasenverschiebung (PCM, phase change material) angewendet werden (vgl. Schwarz, 2006 und Pfeiffer, 2006).

3.6 Zusammenfassung und Fazit aus den Gebäudesimulationen für Energie- und Komfortbetrachtungen

Massnahmen, welche die Gebäudehülle betreffen, sind vom Wesen her multifunktional, weil sie Eigenschaften des Gebäudes verändern (z.B. natürlich einfallendes Licht, verminderte Nachtauskühlung im Sommer), die mit der optimalen Nutzung des Gebäudes im Konflikt stehen können (z.B. Verminderung des Komfortniveaus zu bestimmten Jahreszeiten, unzureichende Beleuchtung).

Die Gebäudesimulationen zeigen denn auch, dass zwischen Massnahmen im Bereich des Wärmeschutzes, des Sonnenschutzes und gebäudeinternen Massnahmen zahlreiche Interaktionseffekte bestehen. Zu nennen sind Substitutionseffekte zwischen wärme- und elektrizitätsbezogenem Energiebedarf, Interaktionseffekte zwischen verschiedenen elektrizitätsbezogenen Energiedienstleistungen (z.B. Beleuchtung und Kühlen) sowie zwischen Energiebedarf und Komfort. Unter Umständen sind Interaktionseffekte derart gross, dass das primäre Ziel der Massnahme in ihr Gegenteil verkehrt werden kann.

Im einzelnen können folgende Fazits festgehalten werden, zunächst für Massnahmen, die mit dem Ziel der Heizenergiebedarfsreduktion getroffen werden und hierauf für solche, die im Hinblick auf Elektrizitätsbedarfsreduktionen ergriffen werden:

- **Fassadenwärmedämmungen und/oder der Ersatz von Fenstern oder Verglasungen** durch solche mit geringeren U-Werten führen beim zuvor nicht wärmegeschützten Gebäudebestand zu einer markanten Reduktion des Wärmeenergiebedarfs. Insbesondere bei Gebäuden mit hohen internen Lasten ist die Reduktion zwar geringer als der rechnerische Wert der Reduktion des Transmissionswärmeverlusts, aber doch immer noch substanziell. Der Preis für diese Wärmeenergiebedarfsreduktion besteht in einer Verschlechterung der sommerlichen Komfortsituation, sofern im Gebäude keine kompensatorischen Massnahmen bereits installiert sind (z.B. Kühlung) oder getroffen werden (Reduktion der internen Lasten, automatisierte Fensteröffnung, Nachtauskühlung, verbesserter Sonnenschutz, Verglasungen mit geringeren g-Werten). Die erwähnten kompensatorischen Massnahmen können ihrerseits Auswirkungen auf den Wärme- und Stromhaushalt haben, welche jedoch durch geeignete Regelstrategien vermindert werden können. Sinngemäss treten die geschilderten Wirkungen auch im Neubaufall auf, im Vergleich zur Erneuerung des Gebäudebestandes sind sie jedoch marginal (auch die primäre Wirkung der verbesserten Wärmedämmung, d.h. Wärmeenergiebedarfsreduktion, ist relativ gesehen marginal).
- **Einbau von Lüftungsanlagen und von Wärmerückgewinnungsanlagen:** Der Einbau von (neuen) Lüftungsanlagen zum reinen Zweck der Heizenergiebedarfsreduktion ist kritisch zu beurteilen. Auch wenn sich die Anlage nach den lufthygienischen Erfordernissen orientiert, ist der Luftwechsel meistens doch höher als im Fall der (manuellen) Fensterlüftung. Der wahre Effizienzgewinn entspricht also nicht dem Wirkungsgrad der Wärmerückgewinnungsanlage, sondern nur etwa die Hälfte bis zwei Dritteln davon. Dadurch verschlechtert sich auch das Verhältnis zwischen gewonnener Effizienz bei der Heizenergie und dem erforderlichen Elektrizitätsbedarf für die Luftförderung. Dieses Substitutions-Verhältnis Strom zu Wärme beträgt typischerweise 2.5 bis 3.5, kann unter Umständen auch deutlich weniger betragen (siehe Tabelle 44). Unter Umständen ist also die Fensterlüftung und die Wärmeerzeugung mittels hocheffizienter WP aus energetischer Sicht vorzuziehen. Lüftungsanlagen können jedoch auch zur Verbesserung des thermischen Komforts (selbst ohne aktive Zuluftkühlung), und zwar während der relativ langen Perioden, während derer bereits Überhitzungsgefahr besteht, die Aussenluft kühler ist als die Raumtemperatur. Voraussetzung sind das adäquate Einbringen der Zuluft und einer entsprechenden Regulierung der Zulufttemperatur, um Kaltluftströme zu vermeiden. Bei vorhandenen oder aus lufthygienischer Sicht erforderlichen Lüftungsanlagen (z.B. auch an lärmbelasteten Lagen) ist auf möglichst tiefe Druckverluste (ein direktes Mass für den Elektrizitätsbedarf für die Luftförderung[15]) und hocheffiziente Ventilatoren zu achten, damit das Substitutions-Verhältnis Strom zu Wärme möglichst günstig ausfällt. Eine Möglichkeit für ersteres bietet das Konzept Abluft-WP und Nachströmöffnung/Brüstungsgerät (siehe Tabelle 23 und Tabelle 24 für eine Übersicht der Druckverluste).
- Die **internen Lasten** haben einen hohen Einfluss auf die Komfortbedingungen, und zwar nicht nur während des eigentlichen Hochsommers, sondern auch während langen Perioden der Übergangszeit. Dies gilt nicht nur für Gebäude mit hohem Fensterflächenanteil, sondern auch für den Gebäudebestand mit Bauweise und geometrischen Verhältnissen ähnlich denjenigen von Wohngebäuden, siehe z.B. Abbildung 127 als Fallbeispiel mit hohen internen Lasten (120 MJ/m^{2}a für Geräte, Personenbelegung 10 m^2/Person) und im Vergleich dazu Abbildung 25 als Fallbeispiel mit geringen internen Lasten (40 MJ/m^{2}a, 16 m^2/Person). Zur Reduktion der unkomfortablen Zustände kommt der Reduktion der internen Lasten deshalb eine sehr hohe Bedeutung zu. Einen signifikanten Beitrag dazu können energie-effiziente Beleuchtungen leisten (siehe nächster Spiegelpunkt), bei dichter Personenbelegung und hoher Gerätedichte ist dies jedoch nicht ausreichend. Bei hohen internen Lasten sind komfortable Zustände nur durch kompensatorische Massnahmen zu erreichen. Dazu gehören aktive Kühlung, Nachtauskühlung durch Lüftungsanlagen, Nachströmöff-

[15] Elektrizitätsbedarf für Luftförderung= Druckverlust*Luftvolumenstrom*Betriebszeit / durchschnittlicher Ventilatorwirkungsgrad

nungen und Brüstungsgeräte, automatische oder evtl. manuelle Fensteröffnung, wobei mindestens ein Teil der Wärmelast möglichst bereits während der Nutzungszeiten abzuführen ist).

- Durch die Erneuerung von **Lüftungsanlagen** im Gebäudebestand könnten hohe Energieeffizienzpotentiale genutzt werden. In der Regel wird bei Lüftungserneuerungen sowohl der Wärmeenergie- wie auch der Strombedarf reduziert. Die gesamte Erneuerung der Luftverteilung (im Sinne eines Ersatzes) ist in der Regel an umfassende Gebäudeinnenerneuerungen gebunden (ansonsten die Umtriebe und Störungen im Betriebsablauf zu gross wären und die Kosten zu hoch). Im Detailhandel, wo die Lüftung eine hohe Bedeutung hat, beträgt der Erneuerungszyklus der (grossen) Verkaufsflächen im Food- und Non-Foodbereich 10 bis 15 Jahre (in Spezialläden und Boutiquen weniger), in Bürogebäuden eher 20 bis 25 Jahre. Die Druckverluste (ein Mass für den Elektrizitätsbedarf für die Luftförderung) lassen sich bei kompletten Lüftungserneuerungen um 50% bis 70% verringern (siehe Tabelle 23 und Tabelle 24) und der Elektrizitätsbedarf entsprechend (bei jeweils unveränderter Betriebszeit) um bis zu 300 MJ_{el}/m^2a bei einem rund um die Uhr Betrieb bzw. um 100 MJ_{el}/m^2a bei einem Fünftagesbetrieb während der Büronutzungszeiten (Werte abgeleitet aus Tabelle 46). Der Elektrizitätsbedarf für Luftförderung lässt sich zudem durch den Einsatz von effizienteren Ventilatoren, insbesondere im Teillastbereich, reduzieren, und zwar um 15% bis 40%. Ausserhalb des Gebäudeerneuerungszyklus lässt sich der Energiebedarf von Lüftungen durch sogenannte Betriebsoptimierungsmassnahmen reduzieren (siehe untenstehend).
- Gemessen in Nutzenergie (als Bedarf, vor der Erzeugung durch Heizung oder Kühlanlage) kann die **Gebäudekühlung** (100 bis 150 MJ/m^2) bei einigermassen gut gedämmten Gebäuden (Neubaustandard) **einen ebenso hohen Stellenwert einnehmen wie die Gebäudewärme** (100 bis 200 MJ/m^2), besonders bei denjenigen mit hohen internen Lasten. Entsprechend ist der Kühlbedarfsminderung und hocheffizienten Kühlanlagen eine hohe Bedeutung zuzumessen, insbesondere weil zur Gebäudekühlung standardmässig hochwertige Elektrizität zum Einsatz kommt. Der Endenergiebedarf der aktiven Kühlung hingegen wird in der allgemeinen Wahrnehmung oft überschätzt; er beträgt bei effizienten Anlagen und Konzepten nur rund zehn oder einige zehn MJ/m^2a Dies gilt selbst für Kleinklimageräte, sofern die Solltemperaturen nicht allzu tief gewählt werden (zum Vergleich: Beleuchtung 70 bis 150 MJ/m^2a, Geräte 40 bis 120 MJ/m^2a, Luftförderung 30 bis über 250 MJ/m^2a). Voraussetzung für einen geringen Elektrizitätsbedarf ist eine hocheffiziente Kältebereitstellung und –verteilung (d.h. möglichst geringer Temperaturhub zwischen Verteilung und Rückkühlung, Verwendung von nassen Rückkühlern), Ausnützung der „freien Kälte“ (bei im Verglich zum Raum tieferen Aussentemperaturen), Präsenzmelder (insbesondere bei Kleinklimageräten), Kopplung der Kühlung an den Sonnenschutzeinsatz, Fensterkontakte. Anzumerken ist an dieser Stelle, dass der Kühlenergiebedarf stark sensitiv auf das Nichteinhalten der erwähnten direkten und indirekten Massnahmen (Anstieg auf über 100 $MJ_{el}/m^2_{EBF}a$), auf die Solltemperatur (das zu erreichende Temperaturniveau in den Räumen) und auf die Klimaerwärmung reagiert, wie entsprechende Sensitivitätsanalysen zeigten (letztere sind Brunner, Steinmann et al., 2006 dokumentiert). Auch der Einfluss der Nutzenden oder die real-existierende Implementation bergen das Risiko von höherem Bedarf als hier ausgewiesen. Um diesem zu begegnen, sind entsprechende technische und vor allem auch betriebliche Massnahmen vorzusehen.
- Wird die Zuluft bereits vor der Re-Investition. d.h. im Referenzfall, gekühlt (und evtl. entfeuchtet), lässt sich bei Lüftungsanlagenerneuerungen durch eine **bedarfsgerechte Zuluftkühlung** ein weiteres Effizienzpotenzial nutzen. Die Luftwechselraten im Anlagenbestand liegen meistens markant über den lufthygienischen Anforderungen (typischerweise um das Zwei- bis Dreifach). Parallel zur Reduktion der Luftwechselraten reduziert sich der Kühlenergiebedarf (gleiche Zulufttemperaturen vorausgesetzt). Der Elektrizitätsbedarf der Zuluftkühlung lässt sich damit von über 50 MJ/m^2a auf 10 bis 20 MJ/m^2a reduzieren. Wird die Luftwechselrate bei Lüftungen mit Zuluftkühlung reduziert, kann sich jedoch die thermische Komfortsituation (bzgl. Überhitzung) verschlechtern, was u.U. kompensatorische Massnahmen erforderlich macht (z.B. Einbau von Kühldecken oder Umluftkühlern). Im Neubau und auch bei umfassenden Gebäudeerneuerungen ist aus energetischer Sicht wenn möglich zwischen den Energiedienstleistungen Lüftung und Kühlung zu trennen.

- **Die Beleuchtung** ist ein typisches Beispiel einer multifunktionalen Energiedienstleistung. Multifunktional sind zum einen der primäre Zweck der Beleuchtung (angemessene Beleuchtungsstärke, harmonische Leuchtdichteverteilung, natürliche Schattigkeit, geeignete Lichtfarbe, befriedigende Farbwiedergabe etc.) sowie die Anforderungen (Schutz vor störendem Glanz, Reflexbildung und Direktblendung, Flimmerfreiheit) an diese. In den vergangenen Jahren wurde die Beleuchtung zudem immer stärker auch als innenarchitektonisches Element aufgefasst. Zum anderen hat die Beleuchtung multidimensionale Auswirkungen (Licht, Energie, Wärmeabgabe). Bei der Diskussion von Massnahmen im Beleuchtungsbereich ist dieser Multifunktionalität ein besonderes Augenmerk zu schenken. Aus energetischer Sicht und hinsichtlich thermischen Komforts macht die Beleuchtung besonders in Bürogebäuden, aber auch im Detailhandel und weiteren Gebäudetypen der verschiedenen Wirtschaftsbranchen, einen markanten Anteil aus[16]. Dies gilt besonders bei alten Beleuchtungen und bei vergleichsweise geringem Tageslichtangebot (tiefe Räume, nicht optimierter Sonnenschutz), wo der Elektrizitätsbedarf für Beleuchtung 100 bis 150 MJ/m^{2}a (Büronutzung) betragen kann. Die Verwendung von energie-effizienten Beleuchtungen im Neubau und die Erneuerung und Modernisierung von bestehenden Beleuchtungen ist entsprechend von hoher Bedeutung sowohl bzgl. elektrizitätsspezifischer Effizienzsteigerung als auch bzgl. der Verbesserung des thermischen Komforts. Der Elektrizitätsbedarf kann dank des technischen Fortschritts (effizientere Leuchten, Lampen und Vorschaltgeräte, bedarfsgerechten Konzepten und Lichtregelungen) um 50% oder mehr reduziert werden, wenn sowohl Massnahmen bzgl. der installierten Leistung wie auch bezüglich Lichtmanagement getroffen werden, siehe dazu exemplarisch die Fallbeispiele BN1.2 oder BN2.2 für den Neubau sowie BB3.1 bis BB1 für den Gebäudebestand. Der thermische Komfort verbessert sich bei Beleuchtungsmassnahmen ebenfalls merklich, siehe Fallbeispiel BB3, Massnahme M6 bis M8 in Abbildung 22 oder Massnahmen M7 bis M8, Abbildung 127. Im Detailhandel wurde und wird bei der flächenbezogenen Grundbeleuchtung ein Teil des Effizienzgewinns durch erhöhte Beleuchtungsstärke wieder kompensiert, aber insbesondere bei der Akzentbeleuchtung ist ein beachtliches Effizienzpotenzial vorhanden- Nebst den primären Nutzen, die bei Beleuchtungserneuerungen möglich und anzustreben sind (verbesserte Lichtqualität, höherer Bedienkomfort), erzeugen energie-effiziente Beleuchtungen also auch Nutzen bzgl. Elektrizitätsbedarf und bzgl. thermischem Komfort. Es handelt sich also um positive Interaktionseffekte. Durch eine gute Abstimmung mit architektonischen Elementen (geringe Raumtiefen, helle Flächen, grosszügige Fensterflächenanteile) und mit dem Sonnenschutz können diese Nutzen vergrössert werden, durch eine fehlende Abstimmung jedoch auch stark reduziert werden.
- In der Schnittmenge zwischen Kühlenergie- und Beleuchtungsbedarf steht der **Sonnenschutz**. Dabei ist zwischen statischem Sonnenschutz durch Verglasungen mit tiefen g-Werte oder fix montierten Verschattungselementen und dynamischem Sonnenschutz (Storen, Lamellen) zu unterscheiden, wobei ein statischer Sonnenschutz allein in der Regel nicht ausreichend ist. Der statische Sonnenschutz hat den Vorteil, dass der Sichtkontakt gegen aussen besser bzw. während längerer Perioden gewährleistet ist und dass bei offen stehendem dynamischem Sonnenschutz die Auswirkungen auf Energie und Komfort geringer sind. Ein dynamischer Sonnenschutz hat den Vorteil, dass dieser besser auf wechselnde (äussere oder innere) Bedingungen zu reagieren vermag, reduziert aber häufiger den Sichtkontakt gegen aussen.
  Verglasungen mit tiefem g-Wert reduzieren zwar die Anzahl Stunden mit thermischen Diskomfort, erhöhen aber in der Regel den Netto-Elektrizitätsbedarf und, geringfügig, auch den Wärmeenergiebedarf. Der Beleuchtungsbedarf erhöht sich typischerweise um …. MJ/m^{2}a (bei nicht aktiv gekühlten Gebäuden ist dies der energetische Netto-Effekt). Bei aktiv gekühlten Gebäuden reduziert sich der Kühlelektrizitätsbedarf je nach Anlagentyp, internen Lasten und Bauweise um ca. … bis … MJ/m^{2}a, so dass auch bei gekühlten Gebäuden eine Netto-Erhöhung resultiert, typischerweise eine solche von 0 bis 10 MJ/m^{2}a (siehe z.B. Tabelle 52). Der zusätzliche Wärmeenergiebedarf beträgt typischerweise 10 bis 20 MJ/m^{2}a, also relativ wenig. Die Phänomene sind bei dynamischem Sonnenschutz qualitativ analog. Die entsprechende Werte betragen bei einem automati-

[16] Bei Gebäuden mit ansonsten tiefen internen Lasten macht die Beleuchtung einen hohen Anteil aus und bei Gebäuden mit hohen internen Lasten ist der marginale Beitrag der Beleuchtung zu kritischen Komfortsituati-

schen Sonnenschutzeinsatz (bereits ab 250 oder 150 W/m^2 statt erst ab 500 W/m^2 Strahlung): 10 bis 30MJ/m^{2}a erhöhter Beleuchtungsbedarf, 5 bis 15 MJ/m^{2}a reduzierter Kühlelektrizitätsbedarf und von 0 bis 10 MJ/m^{2}a zusätzlicher Netto- Elektrizitätsbedarf, siehe z.B. Tabelle 52. Der Sonnenschutz ist letztlich so zu gestalten und zu regulieren, dass die Funktionen Sonnenschutz, Blendschutz und Tageslichtnutzungen möglichst getrennt werden.
Im Bereich des dynamischen Sonnenschutzes ist ein noch beträchtliches Effizienz- und Komfortpotential vorhanden, wobei es jedoch weiterer Forschung und Entwicklung bedarf, um dieses zu erschliessen (dynamischer g-Wert und weitere Steigerung der Selektivität).

- Regelungen: Förderung von raffinierten Steuerungen und Regulierungen: Die Energieflüsse in Wirtschaftsbauten sind einer hohen Dynamik und Interaktion unterworfen. Der heutige Stand der Mess-, Sensor- und Regeltechnik könnte der Dynamik und den Interaktionseffekten durchaus Rechnung tragen, wird aber nicht oder nur sehr beschränkt angewendet. Die Regulierung basiert häufig auf momentanen Schwellenwerten und nimmt selten auf übrige Gebäudetechnikbereiche und/oder auf die Trägheit des Gebäudes Bezug. Es fehlen völlig Regulierungen, welche vorausschauende Parameter wie Wetterprognosen mit einbeziehen. Diesem Mangel könnte durch Regulierungen abgeholfen werden, welche vernetzt sind, antizipierend agieren und nicht gegen, sondern mit der Bauphysik arbeiten.
- Die Energieanlagen und insbesondere deren Zusammenspiel verhalten sich in der Praxis häufig nicht derart ideal, wie dies die Simulationsrechnungen zeigen. Insbesondere im Fall der Gebäudekühlung kann der Elektrizitätsbedarf rasch ansteigen, z.B. durch „suboptimale" oder gar fehlerhafte Regelungen (zu tiefe oder zu hohe Sollwerte, gleichzeitige Kühlung und Heizung). Betriebsoptimierungsmassnahmen kommt deshalb eine grosse Bedeutung zu, und zwar sowohl anlässlich der Inbetriebsetzung der Anlagen beim Gebäudeneubau und bei der Erneuerung als auch in regelmässigen Abständen während des laufenden Betriebs. Bei Lüftungsanlagen z.B. kann die für die Energiebedarfsreduktion entscheidende Reduktion der Druckverluste häufig auch durch die Reduktion der Luftvolumenströme erreicht werden.

Fazit: Bei genauerer Analyse durch Gebäudesimulationen wird man zwischen einzelnen Gebäudetypen und der Frage Neubau oder Gebäudeerneuerung unterscheiden müssen, um die geeignetsten Kombinationen von Massnahmen ermitteln zu können:

- Für *Neubauten von Wirtschaftsgebäuden* lässt sich zusammenfassen, dass das Komfortniveau und der **Brennstoffbedarf durch geeignete Massnahmen erheblich verbessert bzw. vermindert** werden können. Es ist jedoch wesentlich **anspruchsvoller, auch den Strombedarf netto zu reduzieren**, sofern der oft hohe Anteil der internen Lasten durch Geräte nicht beeinflusst werden kann. Der Elektrizitätsbedarf nimmt bei einigen der berechneten Fallbeispiele gegenüber dem Referenzfall zu (um 20 bis 150%[17]), bei anderen leicht (-10 %) ab. Insgesamt haben Architekt und Fachingenieur (Beleuchtungs-, Elektro- und HLK-Planer) aus verständlichen Gründen mehr Gestaltungsspielraum beim Neubau als bei der Renovierung, eine optimale Lösung zu generieren. Der Optimierungsprozess kann mit geeigneten Simulationsmodellen und einfach handhabbaren, integrierten Softwaretools (z.B. SIA 380/4 Lichtkonfigurator und SIA 380/4 Klimatisierung) unterstützt werden, um beim Neubau sachgerechte Entscheidungen treffen zu können. Die Potenziale sind im Neubaubereich allerdings geringer als bei der Gebäudeerneuerung, weil die Energieeffizienz bereits in der Ausgangslage relativ gut ist.
- Für die *Erneuerung von Wirtschaftsgebäuden* zeigt sich infolge der unterschiedlichen Merkmale des Gebäudebestandes eine grössere Variation der möglichen oder erforderlichen Massnahmen relativ zum Neubau. Die Grundprinzipien sind aus energetischer Sicht jedoch im Gebäudebestand die selben wie beim Neubau. Im **ersten Schritt gilt es, durch geeignete Massnahmen den Energiebedarf zu senken** und im **zweiten, den verbleibenden Bedarf möglichst effizient**

---

onen von besonderer Bedeutung.

[17] Die hohe Zunahme betrifft einen Referenzfall mit relativ geringem Bedarf (geringer Bedarf für Geräte, keine Kühlung und keine Lüftung), bei dem eine Kühlung und eine Lüftung eingebaut werden und bei dem die fossile Heizung durch eine WP ersetzt wird

zu decken. Die damit erschliessbaren Energie-Effizienzpotenziale sind im Vergleich zum Neubau beträchtlich, sowohl was Heizenergie als auch was elektrische Energie betrifft. Konstruktive Interaktionseffekte möglichst zu nutzen (Beleuchtungs- und Lüftungserneuerungen, welche sowohl Wärmeenergiebedarf, Strombedarf sowie unkomfortable Situationen reduzieren). Gegenläufige Interaktionseffekte möglichst zu vermeiden (Verglasungen mit hohen g-Werten bei Gebäuden mit hohen internen Lasten, automatischer Sonnenschutz ausserhalb der kritischen Perioden). Sind adverse Effekte nicht zu vermeiden (z.B. Komfortverschlechterung bei Wärmedämmungen bei hohen internen Lasten), so ist in den meisten Fällen nicht auf die Massnahme an und für sich zu verzichten, sondern es sind kompensatorische Massnahmen zu treffen (denn der Primäreffekt der Massnahmen ist meistens von grösserer Bedeutung). Dies bedeutet insgesamt hohe Anforderungen an Architekten und Fachingenieure bei Gebäudeerneuerungen, die neben der Komplexität des Zielkonfliktes zwischen Energieeffizienz und Komfortniveau noch Denkmalschutz-Aspekte, geringe Raumverhältnisse, Schnittstellen, unterschiedliche Lebenszyklen, begrenzte Investitionsbudgets etc. mit zu berücksichtigen haben.

Grob vereinfacht drückt sich der Zielkonflikt Energieeffizienz und Komforterhalt oder -erhöhung in folgender Regel aus: Eine Verminderung des Brennstoffbedarfs ist nicht selten mit einer Zunahme des Elektrizitätsbedarfs von einem Drittel bis zur Hälfte verbunden. Umgekehrt erhöht eine Effizienzmassnahme bei Elektrizitätsanwendungen den Heizwärmebedarf wegen nicht mehr freigesetzter Wärme in der Heizperiode um einen Viertel bis halb so hohen Betrag. Die Reduktion einer kWh Elektrizität (*) kann also mit einem Brennstoffeinsatz von 0.25 bis 0.5 kWh erkauft werden. Dies ist sehr viel weniger als bei der Stromerzeugung in Kraftwerken, bei welchen pro kWh 1.7 (bei sehr guten GuD-KW) bis über 3 kWh Brennstoffe notwendig sind. Das Substitutions-Verhältnis Strom zu Wärme, sozusagen die "exchange rate", beträgt bei raumbezogenen gebäude- und haustechnischen Massnahmen also zwischen 0.25 und 0.5 bei Stromeffizienzmassnahmen und zwischen 2 bis 4 bei Wärmeeffizienzmassnahmen. Der Faktor 4 gilt auch für den Einsatz von gut konzipierten Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung und von Wärmepumpen anstelle von brennstoffbefeuerten Heizanlagen; denn der Jahresnutzungsgrad von Wärmepumpen beträgt im Neubau üblicherweise rund 4 (insbesondere bei Erdsonden oder Abluft-WP).

Die Ergebnisse der Gebäudesimulationen sind als aufschlussreich zu bezeichnen. Sie zeigen insbesondere:

- Einige der gebäudehüllen-orientierten winterlichen oder sommerlichen Wärme- oder Sonnenschutzmassnahmen (Energie-Effizienzmassnahmen, welche das Ziel haben, den Wärmebedarf oder den potenziellen Kühlenergiebedarf zu reduzieren), haben als unerwünschten Nebeneffekt zur Folge, dass sich entweder die Komfortsituation verschlechtert oder der Elektrizitätsbedarf erhöht (oder beides). Dies ist insbesondere bei Gebäuden mit hohen internen Lasten der Fall. Zu solchen Massnahmen gehören Fassadenwärmedämmungen, Fensterersatz (sofern nicht der g-Wert reduziert wird), vermehrter Einsatz des Sonnenschutzes oder Sonnenschutz mit geringer Lichttransmission.
- Mit geeigneten kompensatorischen Massnahmen lassen sich die oben erwähnten adversen Effekte weitgehend kompensieren. Zu nennen sind insbesondere die Reduktion der internen Lasten durch Geräte und Arbeitshilfen (sofern dies möglich ist), der Einsatz von energie-effizienten Beleuchtungen (geringe installierte Leistung, präsenz- und tageslichtabhängig geregelt), selektive Fenster und Sonneschutzprodukte (hohe Lichttransmission, geringer g-Wert) sowie die Nachtauskühlung. Bei letzterer genügt bereits die Nachtauskühlung über offene Fenster (geregelt, um Wetter- und Einbruchschutz sicherzustellen), sofern sie in Kombination mit den übrigen genannten Massnahmen angewendet wird. Eine Nachtauskühlung mit Lüftung (FreeCooling) ist sorgfältig zu prüfen, denn sie ist nicht a priori der aktiven Kühlung mit Klimatisierung vorzuziehen, denn die Lüftung bedingt einen relativ hohen Elektrizitätsbedarf für die Luftförderung. Der Energiebedarf der aktiven Kühlung hingegen wird in der allgemeinen Wahrnehmung oft überschätzt; er beträgt jedoch nur rund zehn oder einige wenige zehn MJ/m^{2}a. Dies gilt selbst für Kleinklimageräte. Einzig der Einfluss der Nutzenden oder die real-existierende Implementation könnte das Bild u.U. ändern. Aus diesem Grund sind entsprechend technische Massnahmen vorzusehen oder zu entwi-

ckeln: hocheffiziente Kältebereitstellung und –verteilung insbesondere durch die Verwendung von nassen Rückkühlern und möglichst hohen Kaltwassertemperaturen, Kleinklimageräte mit Präsenzmeldern, Kopplung der Kühlung an den Sonnenschutzeinsatz, Fensterkontakte etc.

4 Kostenerhebungen und Beschrieb der Einzelmassnahmen

Die Kosten werden in diesem Kapitel zunächst spezifisch angegeben und je nach Komponente und Massnahmentyp auf den Leistungsbedarf, die zu fördernde Luftmenge, die zu erneuernde, zu belüftende oder zu beheizende Fläche etc. bezogen. Die einzelnen Kostenelemente können teilweise zu Massnahmenbündeln kombiniert werden. So sind z.B. WRG-Verbesserungen sowohl bei neuen als auch bei bestehenden Lüftungsanlagen möglich. In den meisten Fällen sind energie-effizientere Varianten der selben Energiedienstleistung mit höheren (Initial-)kosten verbunden. Inwieweit diese durch geringere laufende Kosten, insbesondere Energiekosten, wieder wettgemacht werden können, ist Gegenstand von Kap. 5 und Kap. 6. Im nächsten Hauptkapitel (Kap. 5) erfolgt die Grenzkostenbetrachtung und/oder die Gegenüberstellung der Kosten und Nutzen verschiedener Varianten auf der Basis der spezifischen Kostenelemente oder für typische Massnahmenbündel. Ausgehend von diesen Einzelmassnahmen werden im Kap. 6 die gebäudespezifischen Massnahmenpakete geschnürt. Durch Multiplikation der spezifischen Werte mit dem Mengengerüst (Flächen, Leistungen, etc.) des Gebäudes resultieren absolute Kosten je Gebäude. Die Kosten der verschiedenen Massnahmevarianten werden mit den energetischen Berechnungen (Kap. 3.4) in Beziehung gebracht.

4.1 Methodik

Die Erhebung der Investitionskosten für verschiedene Massnahmen basiert primär auf empirischen Daten verschiedener Quellen mit Stand Frühling/Sommer 2004. Das systematische Vorgehen umfasst die folgenden Punkte.

- In Abstimmung auf die Gebäudekategorien wurden Einzelmassnahmen im Bereich der Gebäudehülle (z.B. Nachdämmungen), der Gebäudetechnik (Heizung, Lüftung, Elektro, etc.) und der Betriebsoptimierung (betriebliche Massnahmen) und deren spezifischen Kosten (Kostenkennwerte) definiert. Diese spezifischen Kosten weisen immer eine massnahmenspezifische Bezugsgrösse aus wie Energiebezugsfläche, Leistungsbedarf für Heizen oder Kühlen, Luftmenge, etc. Damit werden sie für eine grosse Vielfalt von Gebäuden anwendbar. Diese Bezugsgrössen sind typischerweise Flächenmasse, Anlagen- oder Bedarfsleistungen, Luftvolumenströme etc.
- Bei den meisten Kostenkennwerten wird im Hinblick auf den Grenzkostenansatz zwischen verschiedenen energetischen Qualitätsverläufen oder -stufen unterschieden (z.B. Kosten als Funktion des U-Wertes, des Nutzungsgrades und weiteren Energieeffizienzmassen). Bei einigen Kostenelementen stehen Grenzkostenbetrachtungen eher zwischen verschiedenen Kostenelementen im Vordergrund als innerhalb eines selben Kostenelements (z.B. WP statt fossile Heizung).
- Inhaltlich umfassen die Kostenkennwerte sowohl investive Elemente wie auch Instandhaltungs- und Unterhaltsmassnahmen sowie Betriebsoptimierungsmassnahmen.
- Enthalten sind grundsätzlich sämtliche Leistungen, die zur Neuinstallation oder zur Erneuerung notwendig sind: Planungskosten, Installationskosten sowie bauliche Nebenarbeiten. Alle Kostenwerte weisen eine Genauigkeit von ca. 30% (Phase Vorstudie) auf.
- Die spezifischen Preise (CHF/kW, CHF/m^2) variieren in aller Regel mit der Grösse (Leistung, Fläche, etc) der einzelnen Anlagekomponenten, weshalb ein Kostenkatalog aufgebaut wurde, der diese Skaleneffekte berücksichtigt.
- Die aktuellen Marktpreise können für alle Komponenten um 15 bis 20% gegen oben oder gegen unten abweichen, je nach Vergabeverfahren und Konkurrenzsituation. Im Erneuerungsbereich können die Kostenkennwerte massiv differieren, da in solchen Fällen die örtlichen Gegebenheiten (Platzbedarf, elektrische Erschliessungen, baulicher Zustand, etc.) einen wesentlichen Einfluss auf die Kosten ausmachen können.

4.2 Marktmechanismen bei der Preisgestaltung

Bei der Preisbildung im schweizerischen Baumarkt sind verschiedenste Mechanismen zu beobachten, die letztendlich die Endkosten von einem Bauprodukt (Aussendämmung, Kältemaschinen, etc.) wesentlich beeinflussen.

Standardisierung: Die im schweizerischen Markt noch geringe Standardisierung der Bauprodukte führt tendenziell zu höheren Investitionskosten durch eine ungünstige Wirkungskette. Das Fehlen von genormten Produkten erhöht die Kosten in der Herstellung (Sonderanfertigungen, Kleinmengen, etc.), in der Planung und am Schluss auch bei der Installation und Inbetriebnahme/Abnahme. Vermutet werden kann, dass die energetische Optimierung durch die Standardisierung eher negativ beeinflusst wird, weil objektspezifische Auslegungen und Dimensionierungen eher erschwert werden.

Fallbeispiel Kältemaschine: Die wesentlichen Anlagekomponenten (Kompressoren, Wärmetauscher) werden importiert und in der Schweiz konfektioniert. Kleinere Anlagen werden direkt als Kompakteinheiten (Units) eingekauft und auf der Baustelle installiert. Die Wertschöpfung der schweizerischen Anlagenanbieter (Heizung, Lüftung) reduziert sich daher auf ca. 30% für Planung, Montage, hydraulische Einbindung, Regelung etc.

Strukturelle Gründe können ein Produkt der Kältemaschine verteuern:

- Hohe Lärmanforderungen führen zu einer Reduktion der Ventilatorleistung, d.h. höhere Rückkühler-Rücklauftemperaturen mit grösseren Tauscherflächen müssen eingesetzt werden.
- Da bei Rückkühlern keine Dampffahnen geduldet werden, müssen teure hybride Kühltürme eingesetzt werden, um die gleiche energetische Effizienz zu erreichen wie Nasskühler.
- Die fehlende integrale Planung (die zwar seit 20 Jahren gefordert wird) führt oftmals zu suboptimalen und eher teuren Lösungen.

Fallbeispiel Glas/Fenster:

- Das Floatglas wird weitgehend importiert und durch die wenigen in der Schweiz ansässigen Glasanbieter zu objektspezifischen Verglasungen (Wärmschutzglas, Schallschutzglas, etc.) verarbeitet (Beschichtung, Konfektionierung, Gasfüllung, Glasverbund) und an die Fensterproduzenten geliefert.
- Kleine und mittlere Fensterhersteller und bei kleineren bis mittleren Bauaufträgen werden die Verglasungen von schweizerischen Glasanbietern bezogen. Grössere Fensterhersteller und Fassadenunternehmen beziehen Verglasungen bei grösseren Aufträgen aus dem Ausland, wodurch sie einen Preisvorteil erzielen.
- Gemäss Schröder (2005) bestehen bei der Fensterherstellung in der Schweiz Überkapazitäten. Aufgrund des daraus resultierenden Preiskampfes ist davon auszugehen, dass das Preisniveau bereits relativ tief ist. Die Überkapazitäten erhöhen den Druck für Marktbereinigung und Strukturwandel. Je nach Verlauf dieses Prozesses sind weitere Preissenkungen (wenn sich im Bereich Standardfenster tendenziell die grösseren Unternehmen am Markt behaupten) und/oder Marktsegmentierungen (z.B. durch innovative Produktentwicklungen) zu erwarten.

4.3 Fassaden

Die Kosten von Bauelementen und Effizienz-Massnahmen, die für Wirtschaftsbauten spezifisch sind, werden nachstehend dargestellt. Für Kostenelemente, welche auch für Wohngebäude typisch sind (verputzte Mauerwerke, hinterlüftete Fassaden), sei auf die Erkenntnisse aus dem Projekt „Grenzkosten bei forcierten Energieeffizienzmassnahmen bei Wohngebäuden" (Jakob et. al. 2002) verwiesen.

4.3.1 Neue Gebäude

Die spezifischen Investitionskosten beim Neubau umfassen die Gesamtkosten inkl. allen Nebenkosten. Bei der in Abbildung 34 dargestellten vorgehängten Metallfassade wird von einem Fensteranteil von 50% (bezogen auf die gesamte Fassadenfläche) ausgegangen. Bei den Fenstern handelt es sich um Bandfenster (im vorliegenden Fall mit Metallrahmen). Der Rahmenanteil beträgt aus diesem Grund trotz relativ grossen Fensterflächen rund 30%. Bei einem Glas-U-Wert Ug von 1.1 W/m^{2}K und einem Rahmen-U-Wert Uf von 2.5 W/m^{2}K ergibt sich im Referenzfall ein Gesamtfenster-U-Wert von rund 1.5 W/m^{2}K. Der U-Wert der opaken Bauteile beträgt im Referenzfall 0.4 W/m^{2}K (inkl. Wärmebrücken der Fensteranschlüsse), woraus sich ein gewichteter U-Wert der gesamten Metallfassade von rund 1.0 W/m^{2}K ergibt. Die gesamten Investitionskosten der Metallfassade betragen im Referenzfall rund 1000 CHF/m^2 (Stufe Vorprojekt) bzw. rund 870 CHF/m^2 (Stufe Projekt/marktnahe Richtpreise). Deutliche Unterschiede zwischen den beiden Projektphasen zeigen sich auch beim Kostenanstieg als Funktion geringerer U-Werte der Fassadenelemente und der Metallfenster: +120 CHF/m^2 auf Stufe Vorprojekt und +60 bis +70 CHF/m^2 auf Stufe Projekt. Ähnlich Unterschiede im Kostenanstieg sind bei der Glasfassade zu verzeichnen: +260 bzw. +110 CHF/m^2 bei einer Verbesserung von 1.5 auf 0.8 W/m^{2}K.

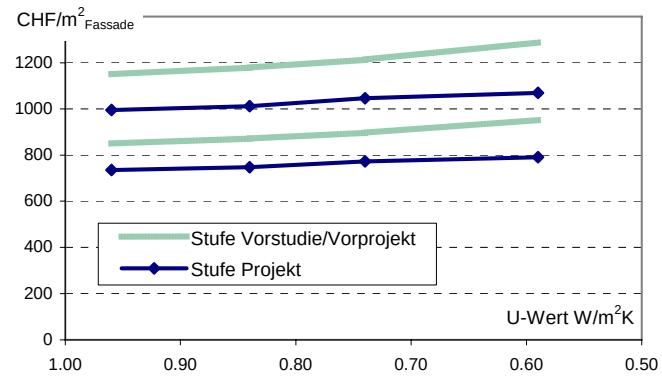
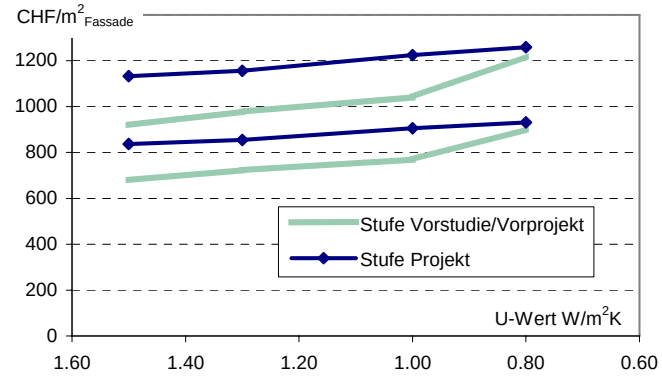
Vorgehängte Metallfassade, Bandfenster, Fensteranteil 50% 	Skelettbauweise, Betondecken, vorgehängte Metallfassade, Sandwich-Brüstung, Metall-Bandfenster mit Rahmenanteil 30%, Fensteranteil 50%. **Kostenelemente:** Komplette Metallfassade inkl. allen Nebenarbeiten **Wärmeschutz:** U-Wert Fenster: 1.5 – 1.0 W/m^{2}K U-Wert Brüstungen: 0.4 – 0.2 W/m^{2}K
Glasfassade 	Skelettbauweise, Betondecken, Glas-Metallfassade, Glasanteil 80-100%, Rahmenanteil 30%, **Kostenteilelemente:** Einbau neue Glas-Metallfassade inkl. allen Nebenarbeiten **Wärmeschutz:** U-Wert Fassade:1.5 – 0.8 W/m^{2}K

Abbildung 34 **Spezifische Investitionskosten (CHF/m^2) von Fassaden bei Neubauten (Stufe Vorprojekt und Stufe Projekt)** (Quelle: Amstein+Walthert, Steiner AG, Schweizer AG, versch. Fensterunternehmen)

4.3.2 Bestehende Bauten

Bei der Instandsetzung und Erneuerung bestehender Fassaden sind im Hinblick auf die Grenzkostenbetrachtung verschiedene Fälle zu unterscheiden.

- Instandhaltung
- Instandsetzung (Wiederherstellung des neuwertigen Zustandes)
- Erneuerung (ohne oder inkl. energetische Verbesserung)

Bei der vorgehängten Metallfassade beinhaltet die **Instandhaltung** Reinigung, Kontrolle und Auffrischung der Blechteile und der Fugen und wird in einem Rhythmus von 5 bis 10 Jahren durchgeführt. Dafür ist mit Kosten von 65 CHF/m^2 zu rechnen. Bei der **Instandsetzung** werden typischerweise neue Bekleidungselemente und ein neuer Sonnenschutz angebracht, während Unterbau und Wärmedämmung (falls vorhanden) bestehen bleiben. Dabei ist mit Kosten von 600 bis 700 CHF/m^2 zu rechnen, welche Gerüst, Demontage der Bekleidungselemente , neuer Aufbau und Material umfassen. Die typische Lebensdauer dieser Massnahme beträgt 40 Jahre. Die **Erneuerung** beinhaltet nebst den erwähnten Kostenelemente die Kosten für eine (zusätzliche) Wärmedämmung. Die Kosten in Funktion des U-Wertes nach der energetischen Erneuerung sind in Abbildung 35 dargestellt. Im Vergleich zu den Neubauten entstehen bei Instandsetzung und Erneuerung zusätzliche Kosten durch den Rückbau (Demontage) und Entsorgung. Teilweise bestehen zudem technische Hemmnisse um einen vollständigen Wärmeschutz (Wärmebrücken) applizieren zu können; dieser Umstand ist bei der U-Wert Berechnung eingeflossen. Wie beim Neubau sind beträchtliche Unterschiede zwischen der Stufe Konzept/Vorprojekt und der Stufe Projekt/marktnahe Richtpreise zu verzeichnen, sowohl im Niveau als auch bzgl. Steigung des Kostenverlaufs.

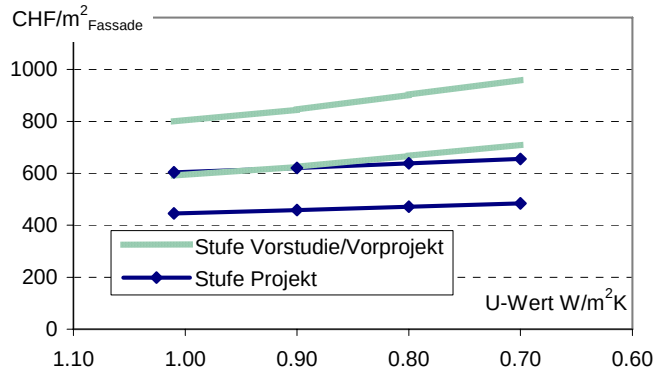
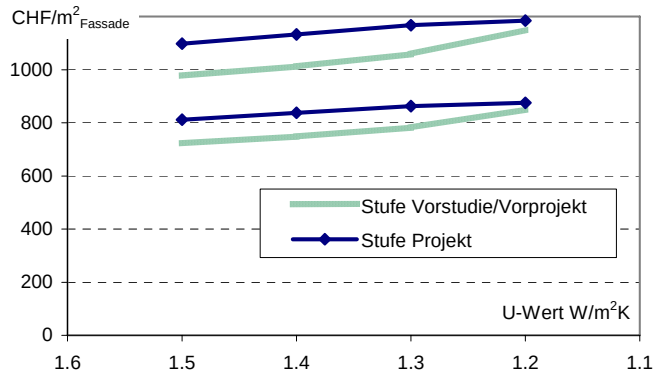
Vorgehängte Metallfassade, Fensteranteil 50% 	Skelettbauweise, Betondecken, vorgehängte Metallfassade, Sandwich-Brüstung, Metall-Bandfenster mit Rahmenanteil 30%, Fensteranteil 50%. Kostenelemente: Gerüst, Demontage, neue Dämmung, neue Fenster, neue Blechverkleidungen Wärmeschutz: U-Wert Fenster: 1.5 – 1.2 W/m2K U-Wert Brüstungen: 0.5 – 0.2 W/m2K
Glasfassade, Glasanteil (inkl. Rahmen) 80% bis 100% 	Skelettbauweise, Betondecken, Glas-Metallfassade, Glasanteil 80-100% (inkl. Rahmen/Fixierung), Rahmenanteil 30% Kostenteilelemente: Gerüst, Demontage, Einbau neue Glas- Metallfassade inkl. allen Nebenarbeiten und Entsorgung Wärmeschutz: U-Wert Fenster: 1.5 – 0.8 W/m2K

Abbildung 35 Spezifische Investitionskosten (CHF/m^2) von Fassadenerneuerungen, Stufe Vorprojekt und Stufe Projekt (Quelle: Amstein+Walthert, Steiner AG, Schweizer AG, versch. Fensterunternehmen)

4.4 Fenster und Verglasungen

Ein Verbesserungspotenzial im Sinn von tieferen U-Werten besteht sowohl beim Rahmen wie bei der Verglasung. Zweifach-Wärmeschutzverglasungen können, ausgehend vom heutigen Standard von ca. 1.1 W/m^{2}K, durch Massnahmen bei Beschichtungen, Glasabstandshalter und Gasfüllungen des Glaszwischenraums bis auf etwa 0.8 W/m^{2}K verbessert werden. Um tiefere Werte zu erreichen, ist beim heutigen Stand der Technik eine Dreifachverglasung notwendig.

Seit den Erhebungen, die im Zusammenhang mit dem Projekt „Grenzkosten bei Wohngebäuden" im Jahr 2001/2002 durchgeführt wurden, sind im Fenster- und Verglasungsbereich signifikante technische Fortschritte erzielt worden. 2001/2002 war eine Verbesserung beim Glas-U-Wert (ein tieferer Wert) meistens mit einer deutlichen Verschlechterung des g-Wertes (d.h. ebenfalls ein tieferer Wert) verbunden. Bei den aktuellen Erhebungen im Frühjahr/Sommer 2005 wurde festgestellt, dass die g-Wert-Reduktion bei einer U-Wert-Reduktion weit geringer ist als sie 2001/2002 war.

4.4.1 Verglasungen

Bei zwei bedeutenden schweizerischen Verglasungslieferanten wurden Kostenkennwerte für Verglasungen unterschiedlicher technischer Kennwerte erhoben (siehe Tabelle 54).

Unternehmen	Variante	Verglasung	Glas-U-Wert (W/m^{2}K)	g-Wert	Richtpreis (CHF/m^2)	Mehrpreis im Vergleich zu Referenz (CHF/m^2)
Unternehmen 1	Referenz 0	zweifach	1.1	0.56	59	
	Referenz 1 (*)	zweifach	1.1	0.6	55	
	Variante 1.0	zweifach	1.0	0.55	81	22
	Variante 1.1 (*)	zweifach	1.0	0.6	80	25 (**)
	Variante1.2 (*)	zweifach	1.0	0.56	85	30 (**)
	Variante 1.3 (*)	dreifach	0.8	0.55	110	55 (**)
	Variante 2.0	dreifach	0.7	0.52	129	70
	Variante 2.1 (*)	dreifach	0.7	0.52	120	65 (**)
	Variante 3.0	dreifach	0.6	0.58	140	81
	Variante 3.1 (*)	dreifach	0.6	0.52	130	75 (**)
	Variante 4.0	dreifach	0.5	0.52	161	102
	Variante 4.1 (*)	dreifach	0.5	0.52	150	95 (**)
Unternehmen 2	Variante 0	zweifach	1.4	56%	72	-6
	Referenz	zweifach	1.1	56%	78	
	Variante 1b	zweifach	1.1	67%	105	27
	Variante 1c	zweifach	1.0	Standard	94	16
	Variante 2a	zweifach	1.1	42%	82	3
	Variante 2b	zweifach	1.1	27%	147	68
	Variante 4a	dreifach	0.7	43%	108	29
	Variante 4b	dreifach	0.8	62%	146	68
	Variante 5a	dreifach	0.5	42%	139	60
	Variante 5b	dreifach	0.5	57%	185	107

Tabelle 54 Erhobene Richtpreise bei zwei grossen schweizerischen Fensterglaslieferanten (Preisstand Mitte 2005, inkl. MWST, ausser (*) Preisstand Ende Januar 2006), Erhebung CEPE
(**) Mehrpreis gegenüber Referenz 1

Die Preisanfragen bezogen sich auf die Erneuerung des ETH-Bürogebäudes Zürichbergstr. 18, welche den Ersatz von rund 70 meist zweiflügeligen Fenstern mit insgesamt rund 240 m² Fläche umfasst. Mit Verweis auf Optimierungsrechnungen zwischen sommerlichem und winterlichem Wärmeschutz beinhaltete die Anfrage sowohl verschiedene U-Werte wie auch verschiedene g-Werte. Die Anfragen wurden im Frühsommer 2005 gestellt. Beim Unternehmen 1 fand zwischen der ersten Erhebung und der Vernehmlassung des Berichtsentwurfs anfangs 2006 eine Produkte- und Preisentwicklung statt (die entsprechenden Varianten sind in Tabelle 54 mit einem (*) gekennzeichnet).

4.4.2 Fenster bei Neubauten und Gebäudeerneuerung

Im Folgenden wird methodisch zwischen Kostenkennwerten auf Stufe Vorprojekt und auf Stufe Kostenvoranschlag unterschieden. Die Kennwerte auf Stufe Vorprojekt weisen eine grössere Ungenauigkeit auf und beinhalten alle Nebenarbeiten (Montage, Abdichten, Anpassungsarbeiten an Sonnenschutz, Fensterbank oder Fassade sowie, bei der Gebäudeerneuerung, das Gerüst). Die Kostenkennwerte auf Stufe Vorprojekt sind in der Regel weniger stark bzgl. technischen Kennwerten spezifiziert und strukturiert.

Bei **Metallfenstern** beinhaltet die **Instandhaltung** (innen und aussen) das Abdichten der Fensterdichtung und das Erneuern der Fugen, was typischerweise alle 5 bis 10 Jahre durchgeführt wird. Dies führt zu Kosten von 20 CHF/m². Bei der **Instandsetzung** werden die Beschläge erneuert und, falls notwendig, einzelne Gläser ersetzt, typischerweise in einem Zyklus von 10 bis 15 Jahren. Die Kosten der Instandsetzung betragen rund 20 CHF/m². Die Erneuerung umfasst das Auswechseln der Fenster; die entsprechenden Kosten sind in Abbildung 36 dargestellt.

Bei **Holzfenstern** beinhaltet die **Instandhaltung** das Streichen der Fensterrahmen (innen und aussen), die Erneuerung der Fensterdichtung und das Erneuern der Fugen, was typischerweise alle 5 bis 10 Jahre durchgeführt wird. Dies führt zu Kosten 25 CHF/m². Bei der Instandsetzung werden die Beschläge erneuert und, falls notwendig, einzelne Gläser ersetzt, typischerweise in einem Zyklus von 10 bis 15 Jahren. Die Kosten der Instandsetzung betragen rund 40 CHF/m².

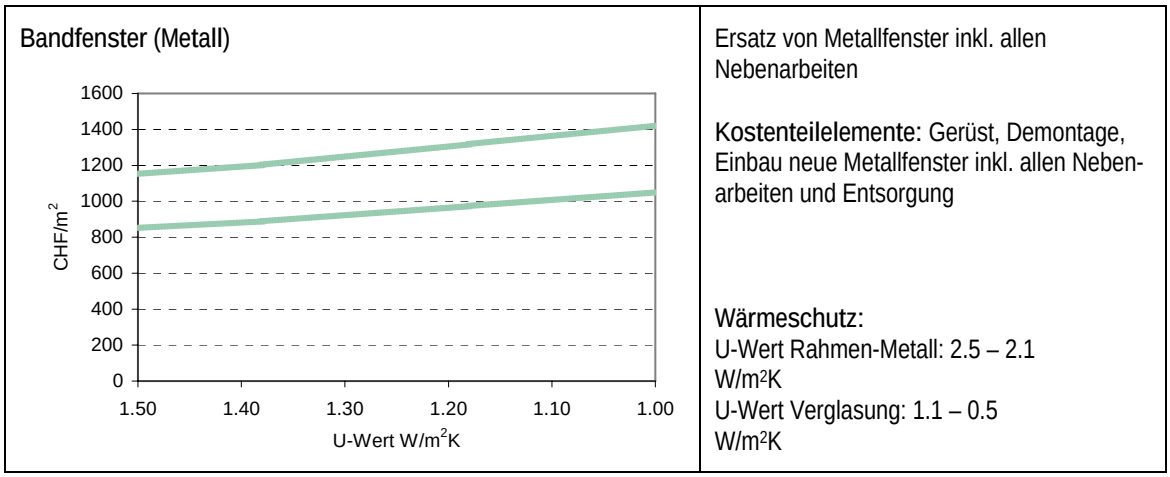


Abbildung 36 Spezifische Investitionskosten (CHF/m²) von Fenstererneuerungen Stufe Vorstudie (Quelle Amstein+Walthert, Steiner AG)

In Abbildung 37 sind die spezifischen Investitionskosten von Fenstern im Neubau für typische Büro-, Verwaltungs- und Schulgebäude auf Stufe Vorprojekt dargestellt. Im Gegensatz zum Wohngebäudebereich kommen bei den erstgenannten Gebäudetypen v.a. Bandfenster zum Einsatz. Bei Büro- und Verwaltungsgebäuden sind es v.a. Metall- oder Holz-/Metallfenster, währenddem die Kunststofffenster eine untergeordnete Rolle spielen (Wüest&Partner, 2002, Baumarkt Schweiz). Beim Wechsel von Zweifach- zu Dreifachverglasung ist mit einem Kostensprung zu rechnen, insbesondere weil es sich bei

den hier betrachteten Gebäudetypen um eher grossflächige Fenster handelt. Durch das zusätzliche Gewicht der Dreifachverglasung entsteht bei grossflächigen Fenstern ein Mehraufwand für die entsprechend notwendige Verstärkung der Rahmen und Beschläge.

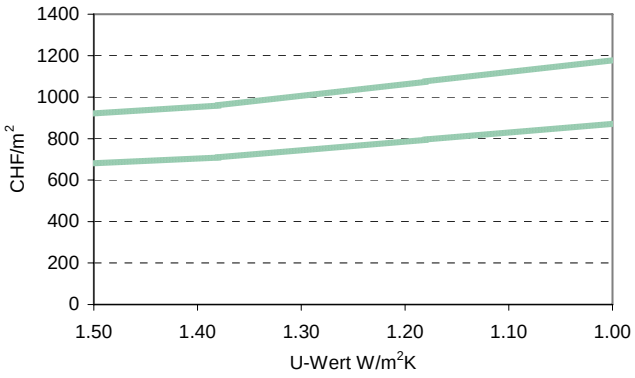
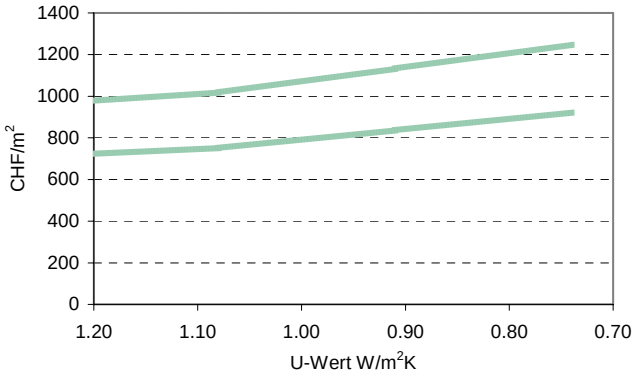
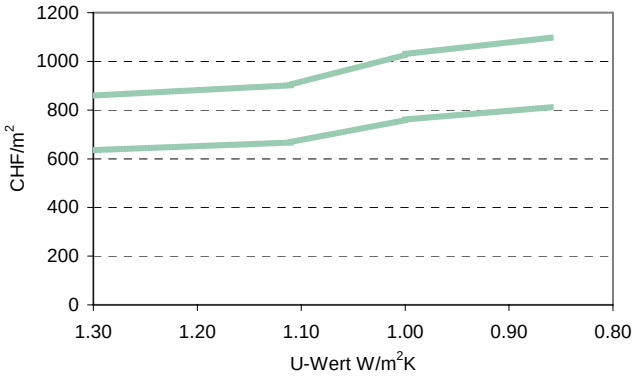
Bandfenster (Metall)  	Metallrahmen thermisch getrennt, Rahmenanteil 30%, Kostenteilelemente: Einbau neuer Fenster inkl. allen Nebenarbeiten Wärmeschutz: U-Wert Rahmen Metall: 2.5 – 2.1 W/m²K U-Wert Verglasung:1.1 – 0.5 W/m²K
Bandfenster (Holz-Metall)  	Holz- Metallrahmen, Rahmenanteil 30%, Kostenteilelemente: Einbau neuer Holz-Fenster inkl. allen Nebenarbeiten Wärmeschutz: U-Wert Rahmen Holz-Metall: 1.5–1.3 W/m²K U-Wert Verglasung: 1.1 – 0.5 W/m²K
Bandfenster (Holz oder Kunststoff)  	Holz- oder Kunststoffrahmen, Rahmenanteil 30%, Kostenteilelemente: Einbau neuer Fenster inkl. allen Nebenarbeiten Wärmeschutz: U-Wert Rahmen Holz: 1.5 – 1.3 W/m²K U-Wert Rahmen Kunststoff: 1.8 – 1.7 W/m²K U-Wert Verglasung: 1.1 – 0.5 W/m²K

Abbildung 37 Spezifische Kostenkennwerte (CHF/m²) von Fenstern bei Neubauten, Stufe Vorstudie (Quelle Amstein+Walthert, Steiner AG)

Für die Eruierung der Kostenkennwerte auf Stufe Kostenvoranschlag wurden Erhebungen bei kleinen und mittleren sowie bei grossen schweizerischen Fensterunternehmen durchgeführt. Wie bei der Verglasung wurde die Erhebung der Richtpreise auf die Erneuerung des ETH-Bürogebäudes Zürichbergstr. 18 bezogen. Dabei handelt es sich eines der ersten modernen Bürogebäude mit Baujahr Ende der

1950er-Jahre. Die geplante Erneuerung beinhaltet den Ersatz von rund 70 meist zweiflügeligen, asymmetrischen Fenstern, wobei je zwei Fenster mit Mittelpfosten einem Zweipersonenbüro zugeordnet sind. Die Unternehmen wurden gebeten, möglichst marktnahe Richtpreise anzugeben. Die Unternehmen wurden informiert, dass mit den Angaben Optimierungsrechnungen zwischen sommerlichem und winterlichem Wärmeschutz zuhanden der ETH-internen Bauabteilung durchgeführt würden und dass die definitive Ausschreibung durch die Bauabteilung erfolgen würde.

Die Anfragen wurden im Frühsommer 2005 gestellt. Die Auswahl der Unternehmen erfolgte nach zwei Kriterien: Zum einen Berücksichtigung von drei bis vier grossen Fensterunternehmen, um einen signifikanten Marktanteil abzudecken. Zum anderen gezielte Anfrage bei kleinen und mittleren Unternehmen, von denen bekannt war, dass sie innovative Produkte anbieten, v.a. im Bereich der Fensterrahmen. Diese Unternehmen waren aus (Jakob, Jochem et al. 2002) sowie aus (Windays 2005) bekannt.

In Tabelle 55 sind die Ergebnisse der Erhebung aufgeführt. Bei den Fenstern handelt es sich um Holz-, Holz-Metall oder – in einem Fall – um Kunststofffenster. Der Fenster-U-Wert wurde unter Berücksichtigung der geometrischen Masse und der längenbasierten Psi-Werte (W/mK) sowie der Flächen-U-Werte von Verglasung und Rahmen durchgeführt (Berechnungsformel siehe z.B. Doku zu SIA 380/1). Die Richtpreise wurden auf spezifische m^2-Preise umgerechnet. Die Preise für den Neubau wurden anhand der Kostenstruktur von den Angaben zur Erneuerung auf den Neubaufall berechnet. In Abbildung 38 sind die erhobenen Richtpreise (d.h. die für die Investierenden entstehenden Kosten) als Funktion des Gesamtfenster-U-Wertes dargestellt, und zwar für den Fall Erneuerung (linke Abbildung) sowie für den Neubaufall. Zwischen den Unternehmen besteht eine gewisse Differenzierung im Preisniveau, welche jedoch teilweise oder gar weitgehend mit der unterschiedlichen Rahmenart (Holz, Holz-Metall, Kunststoff) erklärt werden kann (siehe auch Tabelle 55). Wie aus der Abbildung hervorgeht, haben Investierende mit einem Anstieg der Investitionskosten von ca. 100 bis 150 CHF/m^2 zu rechnen, falls sie statt eines üblichen Standardfensters mit einem Gesamtfenster-U-Wertes von rund 1.5 W/m^2K ein solches mit einem Gesamtfenster-U-Wert von 0.8 W/m^2K anstreben (Reduktion um rund die Hälfte).

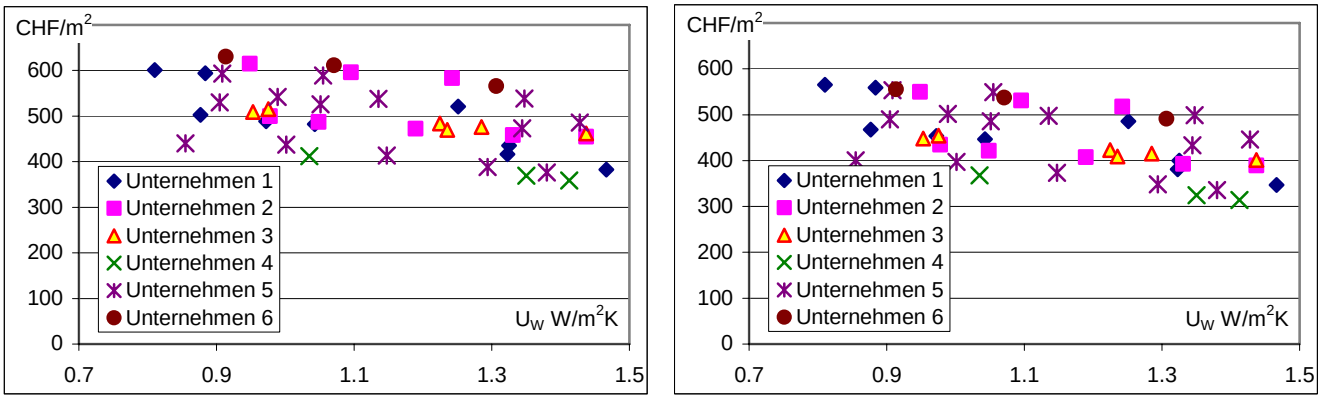


Abbildung 38 **Richtpreise (Stufe Kostenvoranschlag, Preisstand Mitte 2005, inkl. MWST) als Funktion des Gesamtfenster-U-Wertes für Erneuerung (links) und Neubau (rechts)**, Erhebung und Darstellung CEPE (Werte gemäss Tabelle 55)

Unternehmen	Beschreibung	Energietechnische Kennwerte Ug	g-Wert	Uf	Psi	Uw	Längenmasse psi	Breite	Höhe	Flächenmasse Frame	Window	Rahmenanteil	Preis CHF/m² Erneuerung	Neubau
Unternehmen 1														
Holz bzw. Holz-Verbundmaterialien	1_Referenz	1.1	0.55	1.5	0.07	1.47	20	3.4	1.6	1.7	5.63	0.29	382	347
	4_Nur Uf	1.1	0.55	1.3	0.05	1.32	20	3.4	1.6	1.5	5.63	0.27	390	354
	2_ Ug	1.0	0.55	1.5	0.05	1.33	20	3.4	1.6	1.7	5.63	0.29	408	373
	2_ Ug	0.6	0.51	1.5	0.05	1.04	20	3.4	1.6	1.7	5.63	0.29	442	407
	2_ Ug	0.5	0.51	1.5	0.05	0.97	20	3.4	1.6	1.7	5.63	0.29	449	413
	4_Nur Uf	1.1	0.55	1.0	0.05	1.25	20	3.4	1.6	1.5	5.63	0.27	494	459
	5_Ug und Uf	0.5	0.51	1.3	0.05	0.88	20	3.4	1.6	1.5	5.63	0.27	463	427
	5_Ug und Uf	0.6	0.51	1.0	0.05	0.88	20	3.4	1.6	1.5	5.63	0.27	554	519
	5_Ug und Uf	0.5	0.51	1.0	0.05	0.81	20	3.4	1.6	1.5	5.63	0.27	561	525
	2_ Ug	1.1	0.62	1.3	0.05	1.32	20	3.4	1.6	1.5	5.63	0.27	443	408
	6_Ug und g-Wert	1.0	0.62	1.5	0.05	1.33	20	3.4	1.6	1.7	5.63	0.29	462	427
	6_Ug und g-Wert	0.6	0.59	1.5	0.05	1.04	20	3.4	1.6	1.7	5.63	0.29	522	487
	6_Ug und g-Wert	0.5	0.59	1.5	0.05	0.97	20	3.4	1.6	1.7	5.63	0.29	529	494
	Uf und g-Wert	1.1	0.62	1.0	0.05	1.25	20	3.4	1.6	1.5	5.63	0.27	548	513
	Ug, Uf und g-Wert	0.5	0.59	1.3	0.05	0.88	20	3.4	1.6	1.5	5.63	0.27	543	507
	Ug, Uf und g-Wert	0.6	0.59	1.0	0.05	0.88	20	3.4	1.6	1.5	5.63	0.27	634	599
	Ug, Uf und g-Wert	0.5	0.59	1.0	0.05	0.81	20	3.4	1.6	1.5	5.63	0.27	641	606
Unternehmen 2														
Holz bzw. HM bzw. Holz-Glas	1_Referenz	1.1	0.54	1.4	0.07	1.44	20	3.4	1.6	1.7	5.63	0.29	455	390
	2_ Ug	1.1	0.51	1.4	0.04	1.33	20	3.4	1.6	1.7	5.63	0.29	459	393
	2_ Ug	0.9	0.51	1.4	0.04	1.19	20	3.4	1.6	1.7	5.63	0.29	473	407
	2_ Ug	0.7	0.51	1.4	0.04	1.05	20	3.4	1.6	1.7	5.63	0.29	487	422
	2_ Ug	0.6	0.51	1.4	0.04	0.98	20	3.4	1.6	1.7	5.63	0.29	500	435
	4_Nur Uf	1.1	0.54	1.1	0.04	1.24	20	3.4	1.6	1.5	5.63	0.27	583	518
	5_Ug und Uf	0.9	0.51	1.1	0.04	1.10	20	3.4	1.6	1.5	5.63	0.27	596	531
	5_Ug und Uf	0.7	0.51	1.1	0.04	0.95	20	3.4	1.6	1.5	5.63	0.27	615	550
Unternehmen 3														
Holz-Alu / Holz-Glas	1_Referenz	1.1	0.55	1.4	0.07	1.44	20	3.4	1.6	1.7	5.63	0.29	462	401
	3_Ug (nur Spacer)	1.1	0.51	1.3	0.025	1.24	20	3.4	1.6	1.7	5.63	0.29	470	409
	2_ Ug	0.7	0.51	1.3	0.025	0.95	20	3.4	1.6	1.7	5.63	0.29	509	448
	4_Nur Uf	1.1	0.55	1.3	0.04	1.28	20	3.4	1.6	1.3	5.63	0.23	476	415
	3_Ug (nur Spacer)	1.1	0.51	1.3	0.025	1.22	20	3.4	1.6	1.3	5.63	0.23	484	423
	2_ Ug	0.7	0.51	1.3	0.04	0.98	20	3.4	1.6	1.3	5.63	0.23	515	455
Unternehmen 4														
Kunststoff	1_Referenz	1.1	0.54	1.4	0.07	1.41	20	3.4	1.6	1.2	5.63	0.21	359	314
	3_Ug (nur Spacer)	1.1	0.54	1.4	0.05	1.35	20	3.4	1.6	1.2	5.63	0.21	369	325
	2_ Ug	0.7	0.51	1.4	0.05	1.03	20	3.4	1.6	1.2	5.63	0.21	412	368
Unternehmen 5														
Kunststoff	1_Referenz	1.2	0.63	1.4	0.034	1.38	20	3.4	1.6	1.7	5.63	0.29	376	336
	4_Nur Uf	1.2	0.63	1.1	0.034	1.29	20	3.4	1.6	1.5	5.63	0.27	388	348
	5_Ug und Uf	1.0	0.53	1.1	0.034	1.15	20	3.4	1.6	1.5	5.63	0.27	413	373
	5_Ug und Uf	0.8	0.50	1.1	0.034	1.00	20	3.4	1.6	1.5	5.63	0.27	437	397
	5_Ug und Uf	0.6	0.50	1.1	0.034	0.85	20	3.4	1.6	1.5	5.63	0.27	440	400
Holz-Alu	1_Referenz	1.2	0.63	1.6	0.034	1.43	20	3.4	1.6	1.5	5.63	0.27	486	446
	4_Nur Uf	1.2	0.63	1.3	0.034	1.35	20	3.4	1.6	1.5	5.63	0.27	539	499
	2_ Ug	0.8	0.51	1.6	0.034	1.14	20	3.4	1.6	1.5	5.63	0.27	538	498
	2_ Ug	0.6	0.50	1.6	0.034	0.99	20	3.4	1.6	1.5	5.63	0.27	542	502
	5_Ug und Uf	0.8	0.51	1.3	0.034	1.05	20	3.4	1.6	1.5	5.63	0.27	589	549
	5_Ug und Uf	0.6	0.50	1.3	0.034	0.91	20	3.4	1.6	1.5	5.63	0.27	593	553
Holz	1_Referenz	1.2	0.63	1.3	0.033	1.34	20	3.4	1.6	1.5	5.63	0.27	473	433
	2_ Ug	0.8	0.51	1.3	0.033	1.05	20	3.4	1.6	1.5	5.63	0.27	526	486
	2_ Ug	0.6	0.50	1.3	0.033	0.90	20	3.4	1.6	1.5	5.63	0.27	530	490
Unternehmen 6														
Holz-Alu	1_Referenz	1.1	0.55	1.5	0.034	1.31	20	3.4	1.6	1.2	5.63	0.21	602	528
	2_ Ug	0.8	0.51	1.5	0.034	1.07	20	3.4	1.6	1.2	5.63	0.21	649	574
	2_ Ug	0.6	0.51	1.5	0.034	0.91	20	3.4	1.6	1.2	5.63	0.21	668	593
Holz	1_Referenz	1.1	0.55	1.5	0.034	1.31	20	3.4	1.6	1.2	5.63	0.21	529	454
	2_ Ug	0.8	0.51	1.5	0.034	1.07	20	3.4	1.6	1.2	5.63	0.21	574	500
	2_ Ug	0.6	0.51	1.5	0.034	0.91	20	3.4	1.6	1.2	5.63	0.21	593	518

Tabelle 55 Erhobene Richtpreise bei kleinen und mittleren sowie grossen Fensterunternehmen, Stufe Kostenvoranschlag (Preisstand Mitte 2005, inkl. MWST), Erhebung CEPE

Des Gesamtfenster-U-Wert kann durch verschiedene Massnahmen im Bereich Rahmen und Verglasung reduziert werden. In Abbildung 39 sind die erhobenen Richtpreise nach dem Massnahmentyp der Energieeffizienzverbesserung dargestellt.

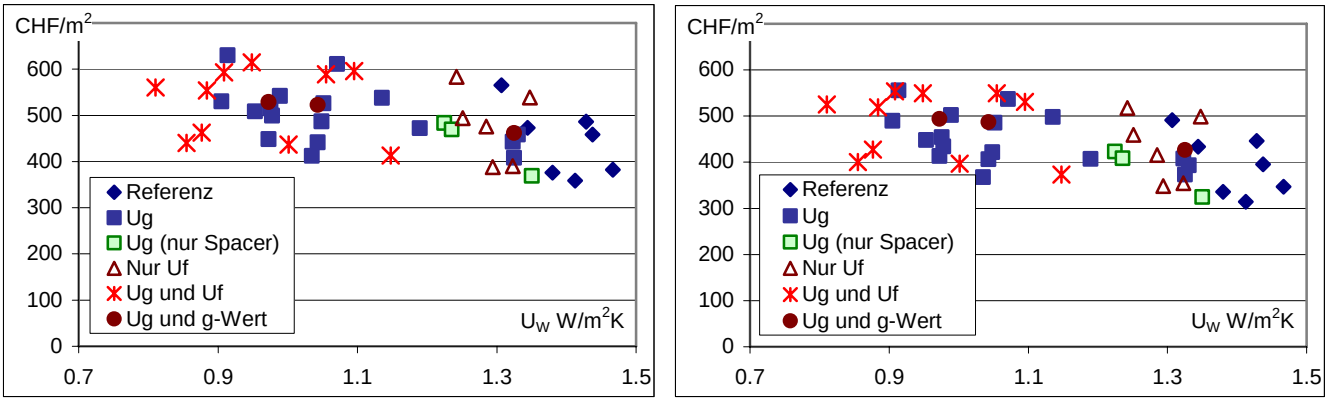


Abbildung 39 **Richtpreise (Stufe Kostenvoranschlag) als Funktion des Gesamtfenster-U-Wertes (Preisstand Mitte 2005, inkl. MWST), differenziert nach Energieeffizienztyp, Erhebung und Darstellung CEPE** (Werte Tabelle 55)

Aus Abbildung 39 wird deutlich:

- Die relativ grösste Verbesserung wird mit einer verbesserten Verglasung erreicht.
- Die gesamthaft grösste Verbesserung wird mit einer Kombination von Rahmen- und Glasverbesserungen erreicht.
- Mittels eines verbesserten Glasabstandshalters (Spacer) kann bereits eine deutliche Reduktion des Gesamtfenster-U-Werts erreicht werden und dies zu relativ geringen Mehrkosten.
- Die mögliche Verbesserung im Rahmenbereich liegt in einer ähnlichen Grössenordnung wie diejenige, welche durch verbesserte Glasabstandshalter möglich ist. Die Mehrkosten liegen teilweise ähnlich tief, teilweise jedoch markant höher.

4.5 Sonnenschutz

Der sommerliche Wärmeschutz kann im Bereich der Fassade durch grundsätzlich drei verschiedene Arten sichergestellt werden:

- Sonnenschutzverglasung
- Fix montierte Sonnenschutzvorrichtungen (Fassadenelemente, bei kleinen Gebäuden auch Dachvorsprünge)
- Bewegliche Sonnenschutzsysteme

Zur Sicherstellung des sommerlichen Wärmeschutzes kommt dem beweglichen Sonnenschutz in Bürogebäuden eine hohe Bedeutung zu, insbesondere in solchen mit hohem Glasanteil. Der sommerliche Wärmeschutz kann zwar bis zu einem gewissen Mass auch durch den Einsatz von Sonnenschutzverglasungen erfolgen. Diesem Vorgehen sind jedoch gewisse Grenzen gesetzt, v.a. bei Gebäuden mit hohen Glasanteilen. Sonnenschutzverglasungen haben zudem den Nachteil, dass die Nutzung der solaren Gewinne während der Übergangszeit und im Winter eingeschränkt wird. Bei sehr tiefen g-Werten können zudem Farbverschiebungen auftreten.

Die Kosten von Verglasungen inkl. Sonnenschutzverglasungen werden im Kap. 4.4 dargestellt. In diesem Kapitel 4.5 werden die beweglichen Sonnenschutzsysteme gemäss Tabelle 56 betrachtet. Dabei werden aussen-, zwischen- und innenliegende Varianten mit einbezogen, u.a. im Hinblick auf unterschiedliche Anwendungen (z.B. Hochhäuser) und zwecks Aufzeigen der Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Möglichkeiten.

Der Einsatz von getrenntem Blend- und Sonnenschutz wird in diesem Projekt nur grob berücksichtigt (mittels des Sonnenschutzes mit einem Anteil perforierten Lamellen). Ebenfall sehr interessant sind dynamische Sonnenschutzsysteme, bei denen die Lamellenstellung dem Sonnenstand entsprechend ausgerichtet wird, um einen möglichst hohen Tageslichteinfall bei gleichzeitig geringem Gesamtenergiedurchlassgrad zu ermöglichen (auch als cut-off Technologie bezeichnet). Diese Systeme werden im vorliegenden Projekt nicht behandelt. Zu typischen Kennwerten bzgl. Lichttransmission und Gesamtenergiedurchlassgrad fehlen laut Sonnenschutzherstellern und laut EMPA zurzeit (2005) sowohl Modell- wie Erfahrungswerte. Für die Abschätzung der energie- und lichttechnischen Wirkung wären deshalb weitere aufwändige und spezialisierte Simulationsrechnungen notwendig. Dasselbe gilt für die optimierende, übergreifende, gebäudeumfassende Regulierung von Sonnenschutz, Beleuchtung, Lüftung, Kühlung und Komfort.

Die Kosten der verschiedenen Sonnenschutzsysteme wurden im Rahmen der Erneuerung des ETH-Bürogebäudes Zürichbergstr. 18 erhoben. Das Gebäude verfügt über sogenannte Bandfenster, wobei die Raumeinteilung in der Regel zwei Fenster mit den Massen B*H 1.71 m * 1.65 m ergibt. Das Gebäude verfügt über 55 entsprechende Büroräume

Die Demontage der bestehenden Lamellenstoren wird für die 55 Räume mit rund 5000 CHF veranschlagt, was spezifischen Kosten von gut 16 CHF/m^2_{Fe} entspricht (Quelle: Sonnenschutzunternehmen 1, Juni 2005). In Tabelle 56 sind die spezifischen Kosten für verschiedene Sonnenschutzsysteme dargestellt. Teilweise handelt es sich um die selben Sonnenschutzprodukte, welche jedoch je nach Ort der Montage (aussenliegend, zwischenliegend oder innenliegend, d.h. raumseitig) energietechnisch unterschiedlich zu charakterisieren sind. Gemäss Angaben des Sonnenschutzhersteller sind die Kosten der eigentlichen Sonnenschutzprodukte jedoch grundsätzlich unabhängig vom Montageort (d.h. innen und aussen kommen die selben Produkte zur Anwendung). Bei den Produkten mit den Bezeichnungen G2 und G5 handelt es sich um eine Alu-Lamellenstore, bei G4, G6 und G8 um ein alufarbenes Stoffprodukt mit guter Durchsicht und noch akzeptabler Entblendung. Beim Produkt G3 handelt es sich um das selbe Produkt abgesehen davon, dass die Lamellen im oberen Bereich des Fensters perforiert sind, um eine erhöhte Tageslichtnutzung zu ermöglichen und trotzdem die Entblendung (von Bildschirmarbeitsplätzen) zu gewährleisten. Mit Motor- statt Gelenkkurbelantrieb erhöhen sich die Kosten beim G2 um 16 CHF/m^2, beim G3 um 20 CHF/m^2 und beim G4 um 21 CHF/m^2, was ca. 16% entspricht.

Zu diesen Kosten der motorischen Antriebe sind bei automatischem Einsatz die Kosten von Montage, Installation, Sonnen- und Windsensoren, Steuerung (entweder proprietär oder gebäudeseitig) und Programmierung dazu zu addieren. Diese betragen typischerweise ..... d.h. .... CHF/m^2 (je nachdem, wieviel Individualität bei der Ansteuerung gewählt oder gefordert wird.

Bei G5 und G6 sind die Einbaubaukosten in die Verglasung bzw. die Zusatzkosten für Kastenfenster oder Doppelglasfassaden in den Kostenangaben nicht enthalten. Verglasungen mit innenliegendem Sonnenschutz werden von Glasherstellern angeboten. Das Kostenniveau ist mit rund 1000 CHF/m^2 allerdings wesentlich höher als die Kombination Fenster und externer Sonnenschutz (zum Vergleich: die m^2-Kosten für Fenster betragen für Flächenmasse und Mengen, wie sie bei Wirtschaftsbauten typisch sind, 400 CHF/m^2 oder weniger). Auch bei Doppelglasfassaden (DGF) liegt das Kostenniveau in der Grössenordnung von tausend CHF pro m^2, wobei bei DGF zudem eine aufwendige Steuerung der meistens vorhanden Öffnungen notwendig wird, um einen Wärmestau und damit eine Überhitzung des Zwischenraums zwischen äusserer Glasschicht und innerer Wärmeschutzverglasung zu ver-

meiden[18]. Werden bei Hochhäusern jedoch hohe Glasanteile aus architektonischen oder anderen Gründen gewählt, kann ein zwischenliegender Sonnenschutz unter Umständen eine bessere Sonnenschutzwirkung erzielen als ein aussenliegender Sonnenschutz, der in kritischen Situationen teilweise nach oben gefahren werden muss (bei zu hohen Windgeschwindigkeiten). In der Regel ist ein zwischenliegender Sonnenschutz aus bauphysikalischer Sicht auch einem innenliegenden Sonnenschutz vorzuziehen. Der innerhalb von Verglasungen liegende Sonnenschutz (mit automatisiertem Einsatz) wurde von einigen Gesprächspartnern aus den Bereichen Sonnenschutz, Glasherstellung und Bauträgerschaften kritisch beurteilt (Reparaturanfälligkeit, hohe Kosten bei Ausfall der Elektroantriebe, Beschädigungsgefahr der Glasbeschichtungen). Andere Gesprächspartner waren der Ansicht, dass die genannten Schwierigkeit überwunden sind und Verglasungen mit integriertem und automatisiertem Sonnenschutz durchaus eine „valable" Option der Fassadengestaltung beinhalten.

	Alter Lamellenstoren aussen	g-Wert (*) Sonnenschutz + Fenster	Reduktionsfaktor sichtbares Licht	CHF/m²
G2	Neuer Sonnenschutz aussen, Alu	0.02	0.02	102
G3	Neuer Sonnenschutz aussen „optimiert"	0.07	0.05	121
G4	Neuer Sonnenschutz aussen opt., Soff, alufarbig	0.09	0.09	131
G5	Neuer Sonnenschutz zwischenliegend, Alu	0.12	0.01	102 (**)
G6	Neuer Sonnenschutz zwischen, Stoff, alufarbig	0.18	0.09	131 (**)
G7	Neuer Sonnenschutz innen (Spiegellamelle)	0.25	0.03	233
G8	Neuer Sonnenschutz innen, Stoff, alufarbig	0.41	0.09	131
(*) Werte mit Glas: g=0.61, U=1.4 W/m²K				
(**) ohne Einbau- bzw. Zusatzkosten in Verglasung bzw. für Kastenfenster oder Doppelglasfassaden				

Tabelle 56: Spezifische Investitionskosten von verschiedenen Sonnenschutzsystemen mit Gelenkkurbelantrieb, Bezeichnungen gemäss Tabelle 18 (Quelle: Sonnenschutzunternehmen 1)

Mit gut 100 CHF/m² liegt das Kostenniveau von Sonnenschutzsystem im Vergleich zu den spezifischen Fensterkosten bei rund einem Viertel.

4.6 Wärmeerzeugung und -verteilung

4.6.1 Investitionskosten der Wärmeerzeugung

Die spezifischen Kosten (CHF/kW) sind je System in Abhängigkeit der thermischen Leistung definiert, jeweils für die Neubausituation wie auch für den Fall der Erneuerung. Im Neubaufall wird von einer Gesamtsystembetrachtung ausgegangen, um einen methodisch richtigen Vergleich zwischen Anlagen verschiedener Energieträger zu ermöglichen. Die Kosten umfassen bei den fossilen Energieträgern nebst dem Kessel die hydraulische Einbindung, Regulierung Gasanschluss bzw. Öltank und Kamin. Die entsprechenden Investitionskosten sind in Abbildung 40 dargestellt. Die spezifischen Kosten steigen bei kleinerer Leistung stark an. Bei der Erneuerung wird von einer vollständigen Erneuerung ausgegangen. Bei schrittweiser Erneuerung (z.B. nur Brenner- oder Kesselersatz) können die Kosten (eines einzelnen Schritts) tiefer liegen als in Abbildung 40 angegeben.

[18] Eine Doppelglasfassade besteht aus einer üblichen Wärmeschutzverglasung (Zweifachverglasung) und einer davor gehängten und hinterlüfteten Glasfassade in einem Abstand von typischerweise 20 cm, wobei die äussere Verglasung offene Zwischenräume oder geregelte Öffnungen aufweist

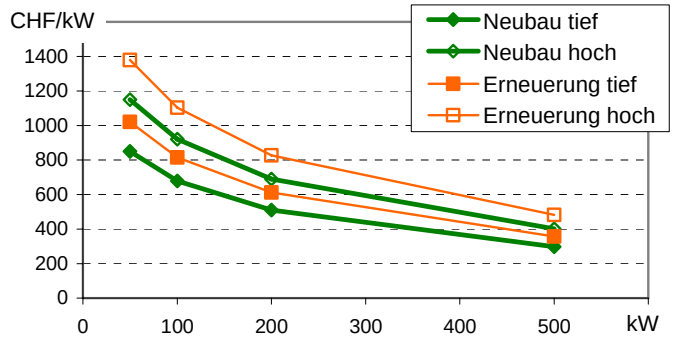
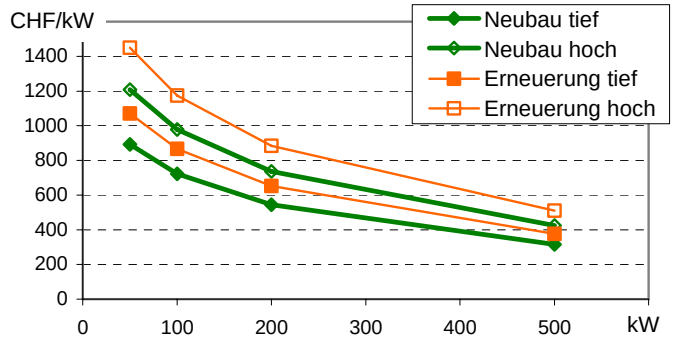
Spezifische Kosten Neubau / Erneuerung	Beschrieb Neubau / Erneuerung
W1: Öl- oder Gasheizung (konventioneller Kessel) 	Neubau: Wärmeerzeugung Öl oder Gas konventionell, komplett inkl. Hydraulik, Regulierung und Kamin inkl. Oeltank und Gasanschluss (jedoch ohne Raumbewertung). Nutzungsgrad Wärmeerzeugung: 92%
	Erneuerung: Demontage Kesselanlage inkl. Hydraulik , komplett neue Wärmeerzeugung Öl oder Gas konventionell inkl. Hydraulik, Regulierung und Kaminsanierung Nutzungsgrad Wärmeerzeugung: 92%
W2: Öl- oder Gasheizung (kondensierender Kessel) 	Neubau: Wärmeerzeugung Öl oder Gas kondensierend, komplett inkl. Hydraulik, Regulierung und Kamin, inkl. Oeltank und Gasanschluss (jedoch ohne Raumbewertung). Nutzungsgrad Wärmeerzeugung: 97%
	Erneuerung: Demontage Kesselanlage inkl. Hydraulik, komplett neue Wärmeerzeugung Öl oder Gas, kondensierend, inkl. Hydraulik, Regulierung und Kaminsanierung Nutzungsgrad Wärmeerzeugung: 97%

Abbildung 40 Spezifische Investitionskosten (CHF/kW) von Wärmeerzeugungsanlagen mit fossilen Energieträgern

Bei Neuinstallationen von Gasfeuerungen – aber auch beim Ersatz – werden heute grösstenteils kondensierende Kessel eingesetzt. Bei Ölkesseln sind vergleichbare Produkte auf dem Markt, die Verbreitung ist aber noch relativ gering. Der Jahresnutzungs-grad kann gegenüber konventionellen Anlagen bei Gas um ca. 5-7%, bei Öl um ca. 3-4% verbessert werden, notabene bei nur geringfügig höheren Investitionskosten. Aus Gründen der Vergleichbarkeit sind auch die Kosten für konventionelle Öl- und Gasfeuerungen (Kessel-Brenner-Kombination) dokumentiert.

Die spezifischen Kostenkennwerte sind – soweit vergleichbar – mehr oder weniger konsistent mit ähnlichen früheren oder aktuellen Untersuchungen (Gantner et al, 1999, Bally, Busin, 2001, Eicher und Pauli 2004, WWF 2006). Die spezifischen Kostenkennwerte der website www.bestellerkompetenz.ch (Eicher und Pauli, 2004) liegen etwas tiefer, wobei in diesen Werten lediglich die Kosten gemäss BKP 242 enthalten sind und insbesondere die Kosten für Tankanlage bzw. Gasanschluss fehlen. Gemäss der Kostenvergleichsstudie von Ambio liegt das Niveau der Kostenkennwerte für Oelheizungen generell höher, insbesondere weil der Raumbedarf des Tankraums mit in die Bewertung miteinbezogen wird (Bally, Busin, 2001). Ohne diese Bewertung sind die Kostenkennwerte im unteren Leistungsbereich eher etwas tiefer (bis zu 20%) und im oberen Leistungsbereich 25% bis 35% höher (100 bis 500 kW), d.h. der Kostenverlauf verläuft bei Ambio flacher. Gemäss aktuellster Quelle, dem Heizkostenvergleich des WWF (WWF, 2006), ergeben sich im für MFH typischen Leistungsbereich spezifische Investitionskosten von rund 1200 CHF/kW für eine Oelheizung und von rund 1050 CHF/kW für eine Gasheizung (42 kW für 1200 m^2 EBF, Annahme CEPE), also sehr ähnliche Werte wie in Abbildung

40. Der Heizkostenvergleich des WWF wurde in Zusammenarbeit mit den verschiedenen Energieträgerbranchen erstellt und kann als relativ zuverlässige Quelle betrachtet werden.

Bei Wärmepumpenheizungen ist zwischen den verschiedenen Wärmequellen zu unterscheiden, wobei im Bereich der Wirtschaftsbauten als die wichtigsten die Erdwärme (Erdsonden-WP), das Wasser (Grund-, Fluss-, See- oder Abwasser) und die Luft (Aussenluft oder Abluft) zu nennen sind. Weiter ist zwischen monovalenten und bivalenten Anlagen zu unterscheiden. Bei letzteren handelt es sich um kombinierte Anlagen mit zwei Wärmeerzeugern, wobei die WP typischerweise die Grundlast und der (meist fossile) brennstoffbasierte Kessel die Spitzenlast deckt. Die spezifischen Kosten reduzierten sich in den letzten Jahren durch das vergrösserte Marktvolumen deutlich (siehe auch Eicher et al. 2003 und FWS 2006) für den unteren Leistungsbereich. In Abbildung 41 sind die spezifischen Investitionskosten von monovalenten und bivalenten WP-Anlagen angegeben, wobei die Erschliessung der Wärmequelle (Wärmetauscher, Sonde etc.) mit enthalten ist. Die Investitionskosten von Wasser-Wasser-WP sowie von Luft-Wasser-WP hängen stark von den lokalen Verhältnissen und Möglichkeiten ab. Gerade im oberen Leistungsbereich ist die Wärmequelle Wasser besonders attraktiv, da die entsprechenden spezifischen Investitionskosten (pro kW) mit zunehmender Leistung oft stark degressiv sind.

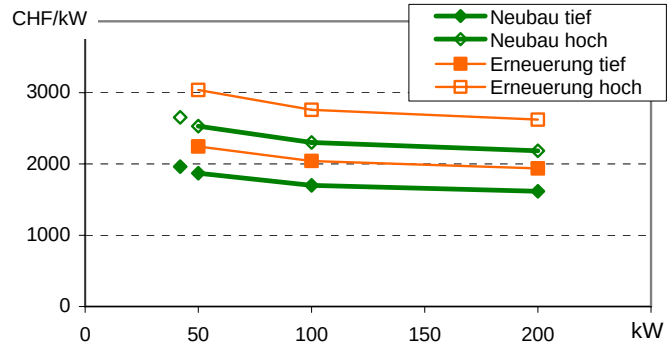
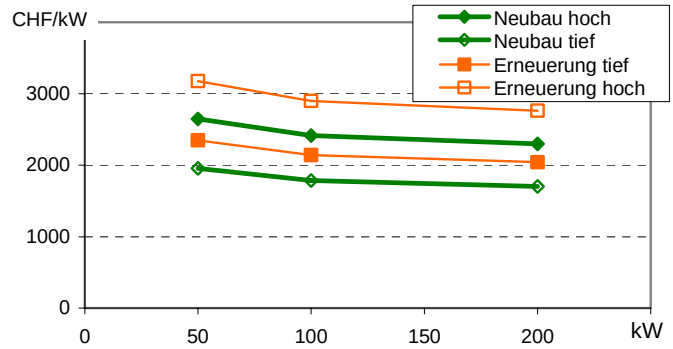
Spezifische Kosten Neubau / Erneuerung	Beschrieb Neubau / Erneuerung
W3: Erdsonden-Wärmepumpe monovalent 	Komplette Wärmepumpenanlage Wasser-Sole mit Erdsonden, inkl Pufferspeicher, Hydraulik und Regulierung Mittlere Jahresarbeitszahl, JAZ: 3.0 bis 4.0
	Demontage bestehende Wärmeerzeugung, komplette neue Wärmepumpenanlage Wasser-Sole mit Erdsonden, inkl Pufferspeicher, Hydraulik und Regulierung Mittlere Jahresarbeitszahl, JAZ: 2.5
W4: Erdsonden-Wärmepumpe bivalent mit Spitzelastkessel 	Komplette Wärmeerzeugung mit Wärmepumpe Luft-Wasser und Spitzenkessel, inkl. Hydraulik, Regulierung und Kamin Nutzungsgrad Wärmeerzeugung: 97% Mittlere Jahresarbeitszahl, JAZ: 3.0 bis 4.0
	Demontage bestehende Wärmeerzeugung, komplette Wärmeerzeugung mit Erdsonden-Wärmepumpe und Spitzenkessel, inkl. Hydraulik, Regulierung und Kaminsanierung, bauliche Anpassungen. Nutzungsgrad Wärmeerzeugung: 97% Mittlere Jahresarbeitszahl, JAZ: 2.5

Abbildung 41 Spezifische Investitionskosten (CHF/kW) von Wärmepumpenanlagen (Quelle: Amstein+ Walthert, WWF, 2006)

Die Pelletsfeuerung ist heute eine echte alternative Wärmeerzeugung im Leistungsbereich von 10 bis ca. 1000 kW. Bei grösseren Leistungen kommen Holzschnitzelanlagen zur Anwendung, wobei sich die Leistungsbereiche der beiden Techniken teilweise überlappen. Bei 500 kW kann etwa 900 CHF/kW gerechnet werden und bei 1000 kW mit rund 700 CHF/kW (Abbildung 42).

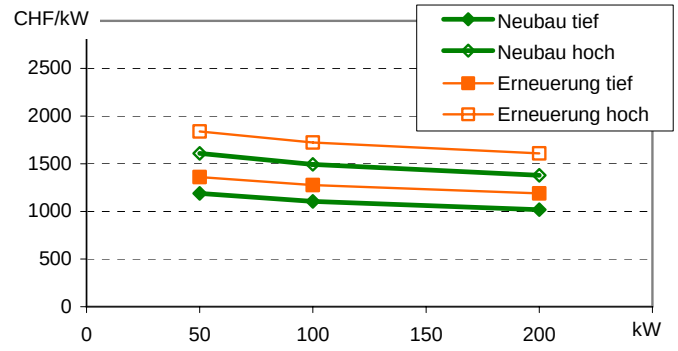
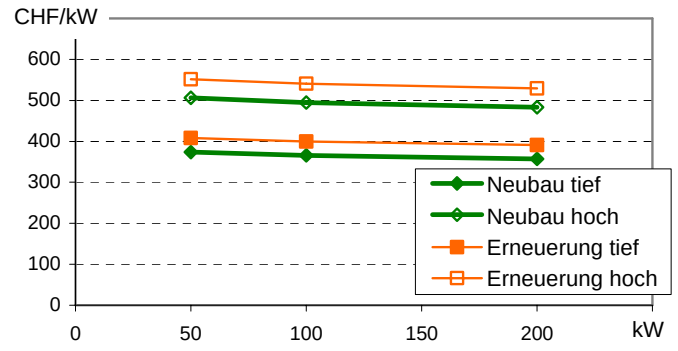
Spezifische Kosten Neubau / Erneuerung	Beschrieb Neubau / Erneuerung
W5: Holzheizung Pellet  	Komplette Wärmeerzeugung mit Holzfeuerung (Pellet oder Schnitzel) inkl. Hydraulik, Regulierung und Kamin Nutzungsgrad Wärmeerzeugung: 92%
	Demontage bestehende Wärmeerzeugung, komplette Wärmeerzeugung mit Holzfeuerung (Pellet oder Schnitzel) inkl. Hydraulik, Regulierung und Kamin Nutzungsgrad Wärmeerzeugung: 90%
W6: Anschluss Fernwärme  	Anschluss an ein Wärmeversorgungsnetz: Komplett mit Wärmetauscher, Hydraulik, Messeinrichtung und Regulierung, jedoch ohne Anschlussgebühren Nutzungsgrad Wärmetauscher: 98% (Sekundär-Nutzungsgrad, Primärwert abhängig von System)
	Demontage bestehende Wärmeerzeugung, Anschluss an ein Wärmeversorgungsnetz: Komplett mit Wärmetauscher, Hydraulik, Messeinrichtung und Regulierung Nutzungsgrad Wärmetauscher: 98%

Abbildung 42 Spezifische Investitionskosten (CHF/kW) von Holzheizungen und Fernwärmeanlagen (Quelle Amstein+ Walthert

4.6.2 Betrieb- und Unterhaltskosten der Wärmeerzeugung

Die jährlichen Betriebs- und Unterhaltskosten werden als Anteil der Investitionskosten angegeben (Tabelle 57). Die Werte stützen sich auf Gantner et al (1999), Bally, Busin (2001), Eicher und Pauli (2004) und WWF (2006), und basieren teilweise auf Angaben zu Service-Abonnements.

Anlagetyp	Oel	Gas	WP (Erdsonde)	Holz	Fernwärme
Betriebs- und Unterhaltskosten	2%	1.7%	0.2%-0.5%	3%-4%	0.2%-0.5%

Tabelle 57 Spezifische jährliche Betriebs- und Unterhaltskosten als Anteil der Investitionskosten

4.6.3 Wärmeverteilung

Für die wassergeführte Wärmeverteilung werden heute im Wesentlichen drei Systeme verwendet (siehe Abbildung 43):

- Radiatorenheizung (Systemtemperatur 50/40°C)
- Bodenheizung (Systemtemperatur 40/30°C)
- Thermoaktive Bauteilheizung TAB (Systemtemperatur 27/22°C)

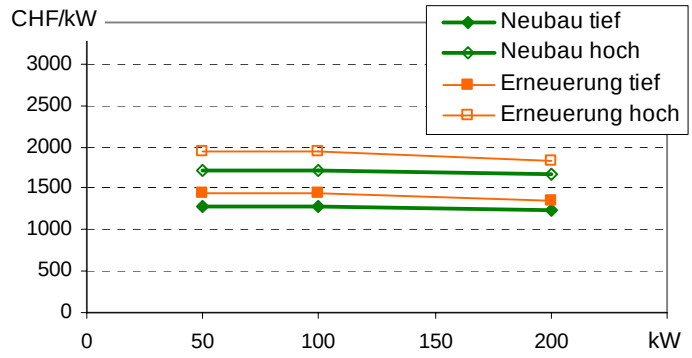
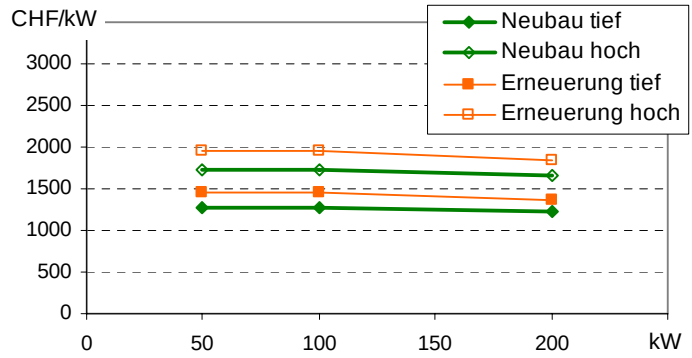
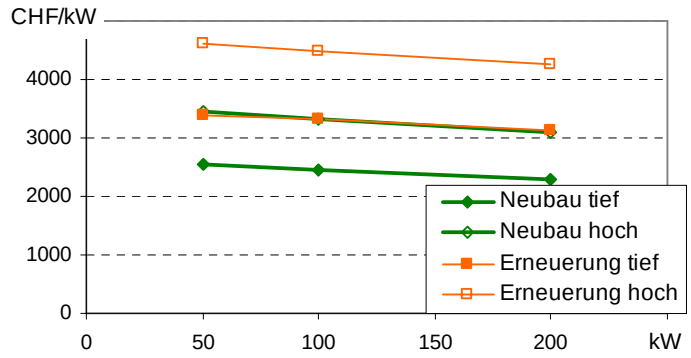
Spez. Kosten Neubau / Erneuerung	Beschrieb Neubau / Erneuerung
WV1: Radiatorenheizung 	Einbau von neuen Radiatoren mit thermo. Ventilen, inkl. Sekundärverteilung, Pumpe und Regulierung.
	Demontage bestehendes System, Einbau von neuen Radiatoren mit thermostatischen. Ventilen, inkl. Sekundärverteilung, Pumpe und Regulierung.
WV2: Bodenheizung 	Einbau einer neuen Bodenheizung, inkl. Einzelraumregulierung, Sekundärverteilung, Pumpe und Regulierung.
	Demontage bestehendes System, Einbau einer neuen Bodenheizung, inkl. Einzelraumregulierung, Sekundärverteilung, Pumpe und Regulierung
WV2: Bodenheizung 	Einbau einer thermoaktiven Bauteilheizung, Kunststoffrohre in Betondecke eingelegt, Sekundärverteilung, Pumpe und Regulierung (zonenweise).
	Einbau einer thermoaktiven Bauteilheizung, Heiz-Kühlelement an Betondecke thermisch gekoppelt (unten an Decke montiert), Sekundärverteilung, Pumpe und Regulierung

Abbildung 43 Spezifische Investitionskosten (CHF/kW) von konventionellen Wärmeverteilungen und TABS

Die Verbesserung der energetischen Effizienz verlangt Vorlauftemperaturen kleiner 30°C; dies bedeutet grössere Tauscherflächen und somit teurere Verteilsysteme. Der energetische Vorteil kommt insbesondere beim Einsatz von Wärmepumpen zum Tragen, weil dadurch die Leistungsziffer markant gesteigert werden kann. Das TAB System kann – im Gegensatz zu den beiden anderen Systemen – auch für den Kühlfall im Sommer verwendet werden und als aufgesetztes System auch im Erneuerungsfall eingesetzt werden. Wurden die Verteilrohre bisher in die Betondecke einbetoniert, werden aus Gründen der Flexibilität die Systeme (Wärmetauscherflächen) auf die Decke aufgesetzt. Ein Co-Benefiz entsteht dadurch, dass die Elemente auch zu akustischen Zwecken genutzt werden können. Bei geringer Gebäudemasse können TABS mit sogenannten Latentspeichermaterialien (z.B. Parafin) verwendet werden (Koschenz, Lehmann, 2004).

4.7 Lüftungsanlagen und automatisierte Fensterlüftung

Bei den Lüftungsanlagen werden die folgenden Systeme mit Kostenkennzahlen erfasst, wobei generell zwischen Neubau und Gebäudeerneuerung unterschieden wird:

- Mechanische Fensterlüftung mit automatisierten Antrieben
- Erneuerung der Lüftungsanlage (Ersatz Monobloc) mit unterschiedlichen Ventilator- und WRG-Wirkungsgraden.
- Komplett neue Lüftungsanlage (Zu- und Abluft mit WRG und Verteilung), kompl. mit Steuerung
- Einbau einer WRG bei einer bestehenden Lüftungsanlage
- Einbau einer verbesserten WRG (effizienterer Wärmetauscher) bei Einbau einer WRG in eine bestehende Lüftungsanlage (mit oder ohne WRG), beim Einbau einer neuen Lüftungsanlage in bestehenden Gebäuden oder im Neubau
- Dezentrale Lüftungssysteme, z.B. Brüstungsgeräte oder Abluft-WP mit Nachströmöffnungen

Die Lüftungsanlagen weisen eine geringere economy of scale auf als die Heizanlagen. Die spezifischen Kosten gemessen in (CHF/m^3/h) einer Lüftungsanlage inkl. WRG (aber ohne Verteilung) nehmen mit zunehmender Grösse (ausgedrückt in zu befördernder Luftmenge in m^3/h) mit der Potenz 0.9 (Neubau) bzw. 0.91 (Erneuerung) zu (bei Heizanlagen beträgt dieser Wert ungefähr 0.75) (siehe L2 in Abbildung 45).

Bei der Luftverteilung ist zwischen grossen und kleinen Gebäuden bzw. Anlagen zu unterscheiden, es tritt aber kein eigentlicher Skaleneffekt auf; ab einer Grösse von 6000 m^3/h bleiben die Kosten konstant bei 6 bis 8 CHF/(m^3/h) im Neubaufall bzw. bei rund 7 bis 10 CHF/(m^3/h), falls keine bestehende Verteilung zu demontieren ist bzw. knapp 8 bis gut 13 CHF/(m^3/h). Bei der Erneuerung ist die Spannweite der Kosten wesentlich grösser als beim Neubau, dies aufgrund der jeweiligen konkreten Randbedingungen und Platzverhältnisse, welche den Einbau einer Luftverteilung verteuern könnten. Bei einer Installation einer Luftverteilung im Gebäudeinnern ist mit starken Beeinträchtigungen (Staub, Lärm) zu rechnen, falls die Büros während der Bauzeit belegt bleiben. Falls gleichzeitig eine Fassadenerneuerung durchgeführt wird, ist eine Integration der Luftverteilung in die Fassade denkbar (Luftführung z.B. im Brüstungsbereich, je nach Fassadentyp). Voraussetzung ist eine hohe Dämmstärke (16cm, eher 20 cm), so dass eine genügende Überdeckung der Luftkanäle mit WD gewährleistet ist, um das Abkühlen der Luft zu verhindern (oder im Sommer das Aufwärmen).

Die einzelnen Kostenelemente können teilweise zu Massnahmenbündeln kombiniert werden. So sind WRG-Verbesserungen sowohl bei neuen als auch bei bestehenden Lüftungsanlagen möglich. Die spezifischen Kostenelemente werden bei der Grenzkostenbetrachtung oder bei der Gegenüberstellung der Kosten und Nutzen verschiedener Varianten (Kap. 5) zu typischen Massnahmenbündeln und Varianten aggregiert und mit den energetischen Berechnungen (Kap. 3) in Beziehung gebracht.

Die automatisierte Fensterlüftung kann nicht als vollwertige Alternative zu einem Lüftungssystem mit Zu- und Abluftsystem beurteilt werden. Insbesondere deshalb, weil die Wirkung (Lüftungseffizienz) – auch bei optimaler Anordnung der Fenster – sehr direkt von den äussern Windverhältnissen abhängig ist. Im Erneuerungsbereich ergeben sich jedoch interessante und kostengünstige Lösungen, um die von der Gesetzgebung geforderten Aussenluftwechselraten zu erreichen. Die automatisierte Fensterlüftung ermöglicht zudem eine Nachtauskühlung. Voraussetzung ist eine Regelung, welche einen ausreichenden Wetterschutz sicher stellt (Schliessen der Fenster bei hohen Windgeschwindigkeiten und/oder Regen). Diese Funktionalität ist auch bei automatisierten Sonnenschutzsystemen vorzufinden und kann als Stand der Gebäudetechnik und -regelung bezeichnet werden. Die Kosten eines solchen Systems betragen 900 bis 1000 CHF/Fenster (inkl. Montage). Je nach Anzahl Fenster pro Raum und je nach EBF/Raum ergeben sich dabei Kosten von 30 bis 40 CHF/m^2, bei kleinen Räumen

und hohem Ausrüstungsgrad können die Kosten auch höher liegen (z.B. wenn alle Fenster pro Raum ausgerüstet werden).

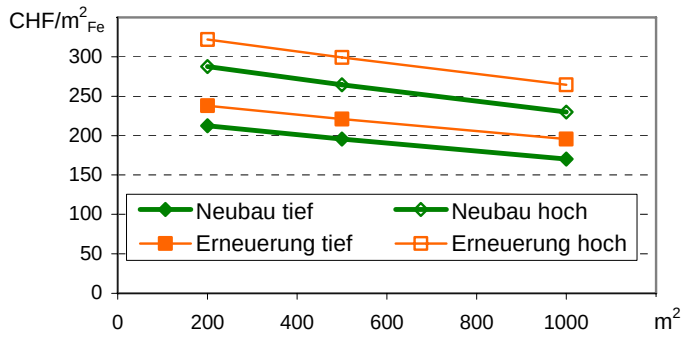
Spez. Kosten Neubau / Erneuerung	Beschrieb Neubau / Erneuerung
L1: Automatisierte Fensterlüftung 	Automatischer Fensterantrieb inkl. Regulierung. Fenstertyp kann unabhängig vom Antriebssystem gewählt werden. Lüftungseffizienz je nach Fenstergeometrie und Fensteranordnung im Gebäude. Die spezifischen Kostenangaben beziehen sich auf m² Fensterfläche Die Wirkung der automatisierten Fensterlüftung wird von der Branche unterschiedlich beurteilt. Nach unserer Beurteilung ist ein Einsatz primär im Erneuerungsbereich zu suchen.

Abbildung 44 Spezifische Investitionskosten (CHF/m^2_{Fe}) von geregelter Fensteröffnung

4.7.1 Mechanische Lüftungssysteme

Büroarbeitsplätze werden – zumindest im städtischen Bereich – zunehmend gelüftet und damit in aller Regel im Sommer auch gekühlt. Das Wissen hat sich heute weitgehend durchgesetzt, dass die Aussenluftwechselrate nur auf den hygienisch notwendigen Wert ausgelegt wird und nicht zusätzliche Heiz- oder Kühlleistungen übernommen werden (abgesehen von der Vorwärmung der Zuluft mittels WRG und dem minimalen Kühlen der Zuluft, um das Einbringen von warmer Aussenluft zu verringern). Der Einsatz von Lüftungsanlagen ist nicht kostenlos zu haben: Nebst den Investitionskosten (siehe Abbildung 45) fallen zusätzliche jährliche Kosten für den Betrieb und Unterhalt in der Grössenordnung von 2-4% der Anlagekosten an. Der Nutzen kann anderseits relativ hoch angesetzt werden: Gutes Innenraumklima und dadurch hohe Produktivität, weniger Lärm (je nach Standort), tendenziell geringerer Energieverbrauch, etc.

Energetisch bilden die bestehenden Lüftungsanlagen (vielfach noch ohne Wärmerückgewinnung) ein interessantes Energie-Effizienzpotential. Anlagen, die vor 1980 installiert wurden, kommen nun in den Ersatz und müssen mit neuerer Technologie aufgerüstet werden. Damit lässt sich in der Regel sowohl der Wärme- wie der Elektrizitätsbedarf markant verringern, dies aufgrund der Anpassung der Luftmengen und der Betriebszeiten, aufgrund höherer thermischer Wirkungsgrade der WRG sowie aufgrund geringerer Druckverluste (siehe Tabelle 24) und effizienterer Ventilatoren. Die Kosten L2 und L3.1 beziehen sich auf Standardanlagen (Druckverlust rund 1200 Pa). Bei neuen Anlagen kann bei optimierten Anlagen, d.h. bei grösseren Querschnitten, von einem geringeren Druckverlust ausgegangen werden, typischerweise von 800 Pa. Für solche Anlagen ist im Vergleich zu Abbildung 45 mit Mehrkosten von ca. +10% (L2) und ca. 15% (L3.1) zu rechnen.

Bei geringeren Luftmengen reduzieren sich die Investitionskosten für die Luftaufbereitung und –verteilung. Die Luftmengen können insbesondere mittels bedarfsgerechter Dimensionierung reduziert werden. Erreicht werden kann dies u.a. durch die seit kurzem auf dem Markt etablierte CO_2-basierte Regelung mit kontrollierter lokaler Absaugung gemäss lokaler CO_2-Konzentration). Im Dimensionierungsfall kann die Luftmenge um schätzungsweise 20 bis 30% reduziert werden (über das Jahr gemittelt ist die Reduktion grösser, schätzungsweise 30-50%, denn die CO_2-Regelung übernimmt eine ähnliche Funktionalität wie ein Präsenzmelder und insbesondere in den Randstunden und in nicht besetzten Räumen kann die geförderte Luftmenge markant reduziert werden). Den geringeren Kosten für die Luftaufbereitung und –verteilung stehen zusätzliche Kosten für die erforderliche Regelung mit

lokalem Sensor und Klappenmotor gegenüber. Die Kostenreduktion kann anhand der Kurvenverläufe der Diagramme L2 und L3.1 ermittelt werden (Reduktion um 30-50%, jedoch gegebenenfalls Erhöhung der spezifischen Kosten). Die Mehrkosten für die Regelung mit lokalen Sensoren (ein Sensor pro 4 bis 5 m² belüftete Fläche) und Klappenmotoren betragen ca. 5-6 CHF/(m³/h).

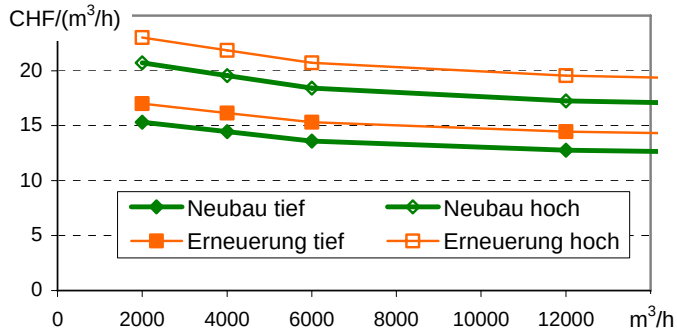
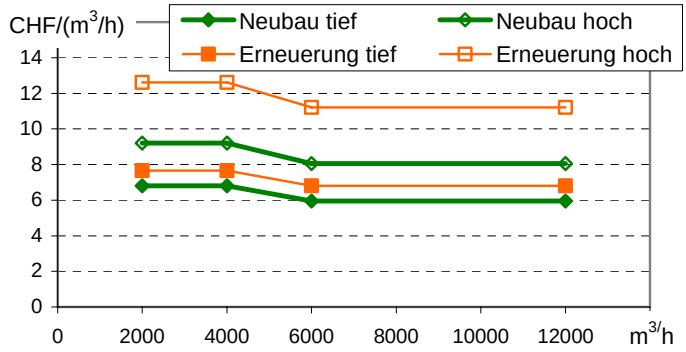
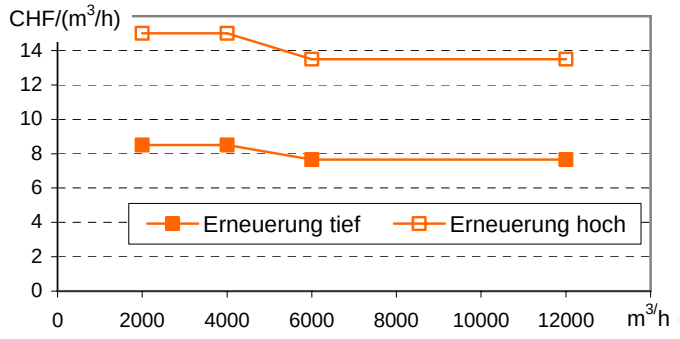
Spez. Kosten Neubau / Erneuerung	Beschrieb Neubau / Erneuerung
L2: Neue Lüftungsanlage, exkl. Verteilung  	**Neubau:** Einbau Monobloc Zuluft-Abluft inkl. Wärmerückgewinnung (WRG), hydraulische Einbindung und Regulierung. Thermischer Wirkungsgrad WRG: 65%
	Erneuerung: Demontage bestehende Anlage, Einbau neuer Monobloc Zuluft-Abluft inkl, Wärmerückgewinnung, hydraulische Einbindung und Regulierung Thermischer Wirkungsgrad WRG: 65%
L3.1: Neue Lüftungsverteilung  	**Neubau:** Montage von einem neuen Kanalsystem komplett montiert inkl. Dämmungen, Zonenventilen und Luftauslässen
	Gebäudebestand: (Situation ohne bestehende Lüftung): Montage eines neuen Kanalsystems, komplett montiert inkl. Dämmungen, Zonenventilen und Luftauslässen. Bauliche Anpassungen für Baumeister, Elektriker, Gipser, Maler
L3.2: Neue Lüftungsverteilung inkl. Demontage alte Verteilung  	**Neubau:** Nicht relevant
	Erneuerung: Demontage bestehendes System und Montage von einem neuen Kanalsystem komplett montiert inkl. Dämmungen, Zonenventilen und Luftauslässen. Bauliche Anpassungen für Baumeister, Elektriker, Gipser, Maler

Abbildung 45 Spezifische Investitionskosten von Lüftungsanlagen, CHF/(m³/h), Quelle Amstein+Walthert

Unter Annahme einer Luftmenge von 4 (m³/h)/m² und gemäss oben beschriebenem Umrechnungsverfahren für CO_2-geregelte Lüftungen (Annahme: 25% geringere Luftmengen im Dimensionierungsfall) ergeben sich die spezifischen Investitionskosten pro m² belüftete Fläche, Abbildung 46 dargestellt am Beispiel des Neubaus (basierend auf mittleren Kostenkennwerten aus L2 und L3.1 in Abbildung 45). Erwartungsgemäss liegen die Investitionskosten von Anlagen mit geringeren Druckverlusten und ent-

sprechend höherer Elektrizitätseffizienz über den Kosten der Standardanlagen. Bemerkenswert ist jedoch, dass die energie-effizienteren Anlagen mit geringeren Luftmengen aufgrund der CO_2-Regelung geringere Investitionskosten aufweisen als die entsprechenden Anlagen ohne eine solche Regelung.

Ein weiteres beträchtliches Energie-Effizienzpotenzial besteht, indem nicht nur die Luftmenge, sondern auch der Druck variabel geregelt wird, siehe dazu z.B. Nitz (2006).

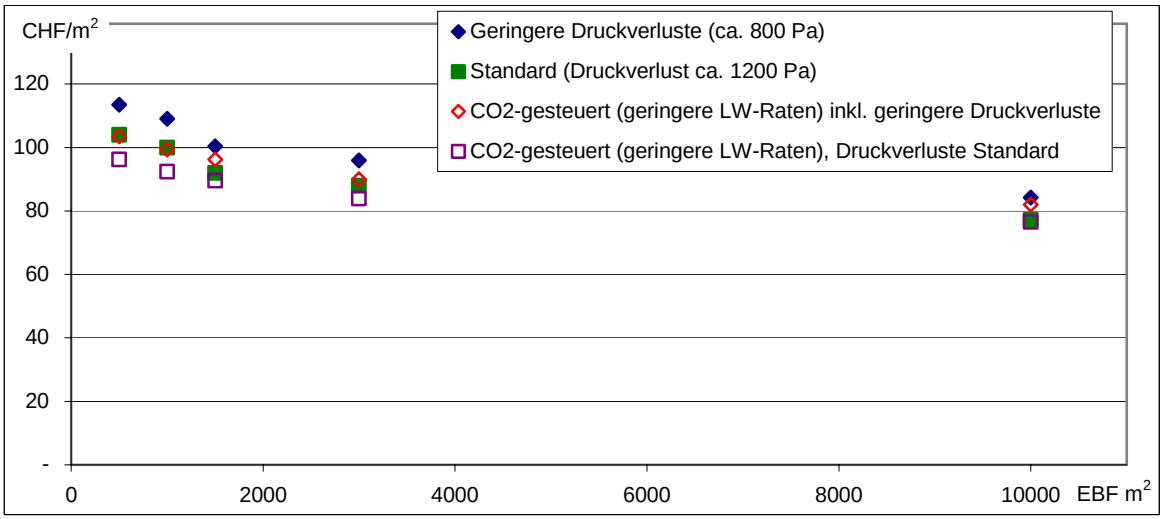


Abbildung 46 Spezifische Investitionskosten von Lüftungsanlagen bei Neubauten (CHF/m²)

Die Kosten einer Abluftanlage setzen sich aus den Kosten der Lüftungsanlage (L2 gemäss Abbildung 45) und rund einem Drittel bis der Hälfte der Kosten der Lüftungsverteilung (L3.1) zusammen.

4.7.2 Wärmerückgewinnungsanlagen (WRG)

Im Gebäudebestand kann als Minimaleingriff der Ersatz der Wärmerückgewinnung bezeichnet werden. Das eigentliche WRG-System (z.B. Plattentauscher) wird ersetzt durch ein neues Produkt mit einer höheren Rückwärmezahl (thermischer Wirkungsgrad). Diese oftmals wirtschaftliche Lösung findet jedoch kaum Verbreitung. In aller Regel werden die gesamten bestehenden Installationen komplett demontiert und von Grund auf neu installiert. Wesentliche Kostentreiber sind erschwerte Zugänglichkeit und die enge Raumverhältnisse.

Die energetische Optimierung von WRG- Anlagen wird auch im Neubaufall kaum gemacht. Ein höherer Nutzungsgrad bedeutet in der Regel höhere Erstinvestitionen und weil fast immer auf der Ebene der Investitionskosten entschieden wird, werden diese Optionen nicht weiterverfolgt. Eine Beurteilung der Lebenszykluskosten wird in aller Regel nicht gemacht, obwohl die Wirtschaftlichkeit unter diesem Blickwinkel oftmals gegeben ist.

Je nach Situation bezüglich Technik, Platzbedarf und wirtschaftlichen Überlegungen kommen unterschiedliche WRG-Systeme zum Einsatz:

- Regenearative Systeme (Rotationswärmetauscher) mit oder ohne Enthalpie-Übertragung:
  Rückwärmezahl 65 – 80%
- Kreislauf-Verbundysteme , Aussenluft und Fortluft sind geografisch getrennt:
  Rückwärmezahl 35 – 70%
- Plattenwärmetauscher:
  Rückwärmezahl 40 – 65%
- Wärmerohr:
  Rückwärmezahl 40 – 65%

Die Investitionskosten von WRG-Anlagen mit unterschiedlichem thermischem Wirkungsgrad sind in Abbildung 47 dargestellt. Ein höherer thermischer Wirkungsgrad bedingt grössere Wärmetauscherflächen, was zu höheren Investitionskosten führt. Unter Umständen kann ein höherer thermischer Wirkungsgrad auch zu höherem Druckverlust führen, bei den in Abbildung 47 dargestellten Kosten wurde jedoch von konstantem Druckverlust ausgegangen.

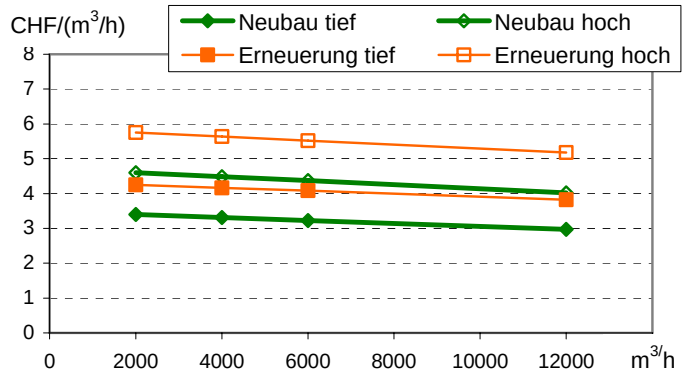
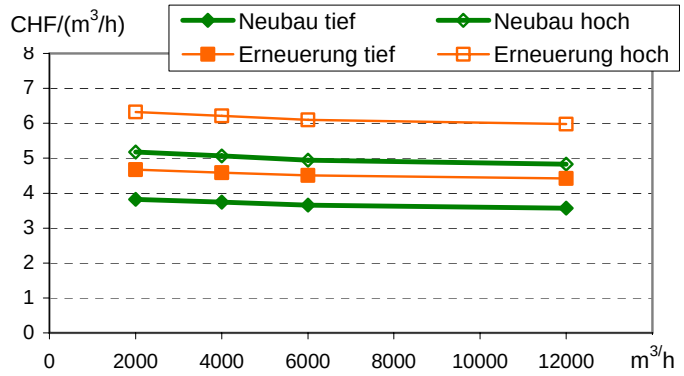
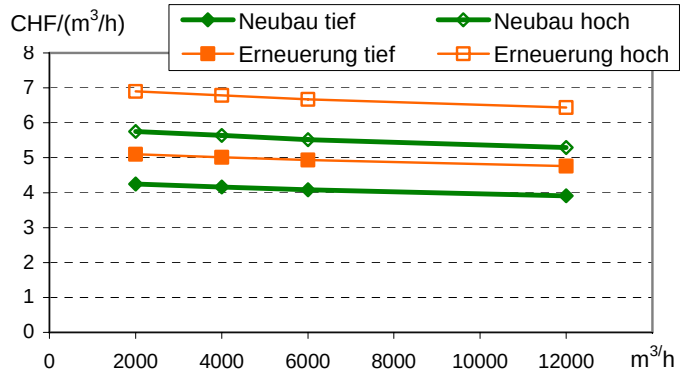
Spezifische Kosten Neubau / Erneuerung	Beschrieb Neubau / Erneuerung
L4.1: Einbau WRG (65%) 	Neue Lüftungsanlage: Integration der Wärmerückgewinnung inkl. hydraulische Einbindung und Regulierung Thermischer Wirkungsgrad (Rückgewinnungszahl): 65%
	Bestehende Lüftungsanlage: Nachrüstung einer Wärmerückgewinnung inkl. hydraulische Einbindung und Regulierung Thermischer Wirkungsgrad: 65%
L4.2: Einbau WRG (80%) 	Neue Lüftungsanlage: Integration der Wärmerückgewinnung inkl. hydraulische Einbindung und Regulierung Thermischer Wirkungsgrad: 80%
	Bestehende Lüftungsanlage: Nachrüstung einer Wärmerückgewinnung inkl. hydraulische Einbindung und Regulierung, Thermischer Wirkungsgrad: 80%
L4.3: Einbau WRG (80%) 	Neue Lüftungsanlage: Integration der Wärmerückgewinnung inkl. hydraulische Einbindung und Regulierung Thermischer Wirkungsgrad: 90%
	Bestehende Lüftungsanlage: Nachrüstung einer Wärmerückgewinnung inkl. hydraulische Einbindung und Regulierung, Thermischer Wirkungsgrad: 90%

Abbildung 47 Spezifische Investitionskosten (CHF/m³/h) von Wärmerückgewinnungsanlagen (WRG)

4.7.3 Dezentrale Lüftungsanlagen

Wie erwähnt wird der Ersatz resp. die Integration neuer Lüftungsanlagen in bestehende Dienstleistungsbauten das grosse Thema der Zukunft sein. Bestehende ineffiziente Systeme müssen demontiert und neu installiert werden. Wesentliche Kostentreiber sind dann in diesem Falle die erschwerte Zugänglichkeit und die engen Raumverhältnisse, die in vielen Fällen anzutreffen sind. Standardlösungen sind dann kaum möglich, sondern es sind objektspezifische innovative und kreative Lösungen gesucht. Diese Ausgangslage führt rasch zu verschiedenen dezentralen Lösungsansätzen:

- Einbau von Nachströmelementen in der Fassade, zentrales Abluftsystem (meist WRG über WP). Je nach Komfortansprüchen wird die Zuluft in der Heizperiode erwärmt resp. im Sommer gekühlt.
- Brüstungslüftungsgerät mit Zu- und Abluft und WRG. Wahlweise können diese Geräte auch zum Heizen und Kühlen eingesetzt werden (Anschluss an Heiz-, resp. Kühlwassernetz). Der grosse Vorteil dieser Geräte kommt tatsächlich im Erneuerungsbereich zum Tragen, da wesentliche Teile der Verteilkanäle entfallen.

Die Thematik der dezentralen Lüftungs- und Klimatechnologie wird etwas vertiefter im Kapitel 4.9 „Hybride Wärme-, Kälte- und Lüftungssysteme“ behandelt.

4.8 Kälteerzeugung und -verteilung

Der Bedarf an Sommerkälte nimmt in der Schweiz stetig zu wegen höheren Komfortansprüchen und einer weiteren Technisierung der Bürogebäude. Die behördlichen Anforderungen wurden zudem eher gelockert weil sie doch in verschiedensten Fällen innovative Lösungen verhindert haben. Im Neubau werden vermehrt wieder dezentrale Geräte eingesetzt; je nach Ausstattungsgrad der Geräte kann damit gelüftet, geheizt und gekühlt werden.

Im Bestand werden oftmals Kleingeräte (Kältekompressoren) lediglich für die Sommerkühlung eingesetzt. Bezüglich Komfort und Energieeffizienz nicht zu vergleichen mit den übrigen Systemen, energiepolitisch jedoch nicht zu vernachlässigen wegen ihrer zunehmend grossen Verbreitung. Die Aufstellung dieser Geräte erfolgt innen, aussen oder als Split-Anlage. Der Nutzungsgrad ist relativ gering (Leistungsziffern 1.0 – 2.0) und kann eher als Notlösung bezeichnet werden.

Der Einbau einer Kälteerzeugung dient bei dem in diesem Projekt verfolgten Grenzkostenansatz folgenden Zwecken:

- Die (evtl. zusätzliche) Kälteerzeugung ist Bestandteil des Referenzfalls (es wird eine Kühlung aus Komfortgründen ohnehin eingebaut). In diesem Fall stellt sich die Frage der Kosten und Nutzen im Vergleich zum standardmässigen Vorgehen energie-effizienteren Lösungen.
- Die Kälteerzeugung dient der Wiederherstellung des ursprünglichen Komfortniveaus, welches durch andere energetische Massnahmen allenfalls reduziert wurde (ob und inwiefern dieser Fall relevant ist, ist aus den Simulationsergebnissen im Kapitel 3 ersichtlich)

Im Gebäudebestand kann entweder eine bestehende Kälteerzeugung verbessert werden oder eine neue Kälteerzeugung eingebaut werden. In letzterem Fall sind die Kosten und die Möglichkeiten abhängig von der bestehenden Situation. Beim Einbau eines Kühlgeräts ist z.B. zu prüfen, ob die Kosten unterschiedlich sind, wenn die Kühlung entweder zusammen (im gleichen Vorhaben) mit einer neuen Lüftung installiert wird oder wenn bereits eine Lüftung vorhanden ist.

4.8.1 Zentrale Kälteerzeugung

In Abbildung 48 sind die spezifischen Investitionskosten von Kälteerzeugungsanlagen dargestellt, und zwar für den Fall der Kühlung der Zuluft von Lüftungsanlagen. Enthalten sind die Kosten der Kältemaschine, des Luftkühlers (d.h. des Wärmetauschers im „Monobloc“ der Lüftung), des Rückkühlers (d.h.

des Wärmetauschers der Kältemaschine-Abwärme mit der Umgebungsluft), der Pumpen, der hydraulischen Einbindung (Verrohrung inkl. Wärmedämmung, Regelung) sowie der Elektro-Installation. Beim Rückkühler wird von einem Trockenrückkühler ausgegangen. Es wird zwischen konventionellen Anlagen (mit K1 bezeichnet) und Anlagen mit Free Cooling unterschieden (K2). Das sogenannte Free Cooling ist eine der Möglichkeiten, den Energiebedarf der Kälteerzeugung zu reduzieren. Beim Free Cooling-Betrieb wird die Kältemaschine mit einem Bypass umgangen und die dem Rücklauf des Kaltwassernetzes entnommene Wärme wird direkt über den Rückkühler an die Umgebung abgegeben.

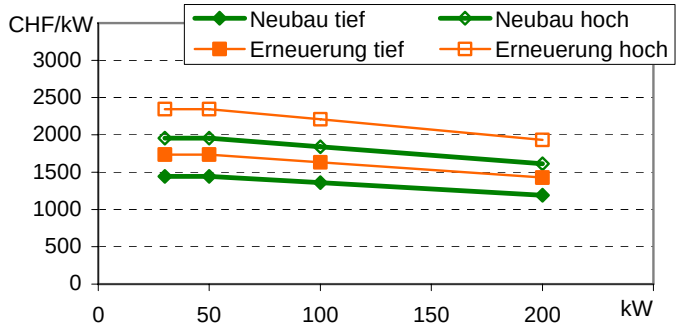
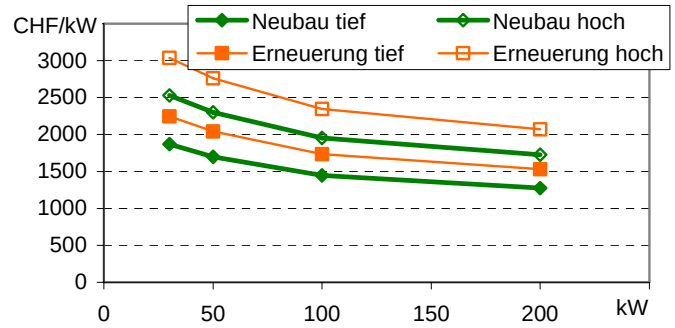
Spez. Kosten Neubau / Erneuerung	Beschrieb Neubau / Erneuerung
K1: Einbau neue Kältemaschine (Luftkühlung) 	**Neubau:** Einbau einer zentralen Kältemaschine (KM) mit Trockenrückkühler inkl. Luftkühler in Monobloc (Kosten ohne neuen Monobloc) Leistungsziffer Kältemaschine: 4.0
	Erneuerung: Demontage bestehender Anlagenteile, Einbau einer Kältemaschine mit Trockenrückkühler inkl. Luftkühler in bestehenden Monobloc Leistungsziffer Kältemaschine: 4.0
K2: Einbau neue Kältemaschine (Luftkühlung) inkl. Free Cooling 	**Neubau:** Einbau einer Kältemaschine (KM) mit Trockenrückkühler inkl. Luftkühler in Monobloc, hydraulische Umschaltung auf Free Cooling-Betrieb, Kosten inkl. kompl. Regulierung Leistungsziffer KM:3.0 (während Betrieb Kompressor, 50% Kompressorbetrieb, Free Cooling während der Übergangszeit)
	Erneuerung: Demontage bestehende Anlage, Einbau einer Kältemaschine mit Trockenrückkühler inkl. Luftkühler in bestehenden Monobloc, hydraulische Umschaltung auf Free Cooling-Betrieb Leistungsziffer KM: 3.0 (während Betrieb Kompressor, FreeCooling während der Übergangszeit)

Abbildung 48 **Spezifische Investitionskosten (CHF/kW) von Kälteerzeugungsanlagen** (Quelle: Amstein + Walthert)

In Abbildung 49 sind die Kosten der adiabatischen Kühlung der Zuluft dargestellt. Bei der adiabatischen Kühlung erfolgt die Kühlung der Zuluft über einen (rotierenden) Wärmetauscher mit der Fortluft, welche über einen Befeuchter adiabatisch gekühlt wird. Die Fortluft ist zwar bereits während vieler Stunden kühler als die Zuluft (besonders wenn eine aktive Kühlung vorhanden ist), aber durch die zusätzliche Befeuchtung der Fortluft und der damit verbundenen Temperaturreduktion um einige Grad reduziert sich die Anzahl Stunden mit Überhitzung markant. Entsprechend ist der Nutzen der adiabatischen Kühlung dreifach: da die zu kühlende Zuluft bereits vorgekühlt ist, reduziert sich erstens die Anzahl Betriebsstunden der Kältemaschine und zweitens der Kühlleistungsbedarf während der Betriebszeit. Drittens wird der Energiebedarf der Kältemaschine indirekt reduziert, weil sich die JAZ aufgrund der geringeren Temperaturdifferenz erhöht. Je nach Gebäude und Komfortanforderung kann durch die adiabatische Kühlung unter Umständen auf die Kältemaschine verzichtet werden.

K3: Einbau adiabatische Kühlung	Für die Kühlung der Zuluft wird in der Rückluft eine adiabatische Kühlung (Befeuchtung) eingebaut. Die Kühlung der Zuluft erfolgt über einen rotierenden Wärmetauscher. Kosten inkl. komplette Wasseraufbereitung

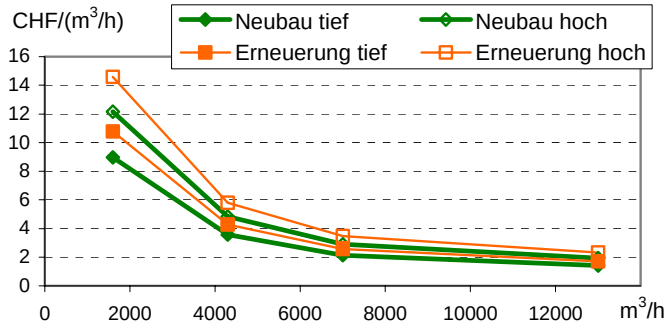


Abbildung 49 Spezifische Investitionskosten (CHF/m³) einer adiabatischen Kühlung (Quelle: Amstein+Walthert)

Abbildung 50 zeigt die spezifischen Investitionskosten des Einbaus einer Kältemaschine inkl. Kaltwasserverteilung, an welche Umluftkühler angeschlossen werden Kosten Umluftkühler nicht inbegriffen). Mit dieser Konfiguration können in Gebäuden hohe (und stark schwankende) Wärmelasten z.B. aus Räumen mit hohen Glasanteilen, Sitzungsräumen und Serverräumen abgeführt werden.

K4: Einbau neue Kältemaschine inkl. Kaltwasserverteilung auf Umluftkühler	Einbau einer zentraler Kältemaschine mit Trockenrückkühler inkl. Kaltwassernetz auf dezentrale Umluftkühler (Kosten Umluftkühler nicht inbegriffen). Leistungsziffer KM: 4.0 (während Betrieb Kompressor)

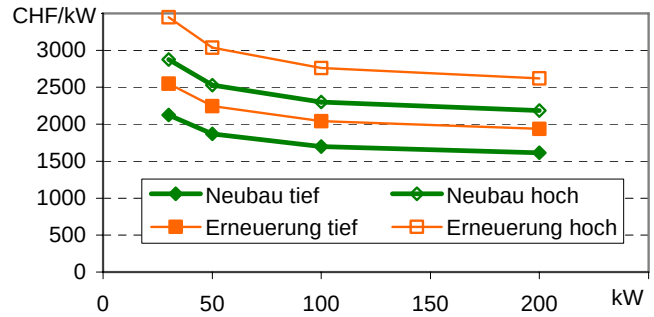


Abbildung 50 Spezifische Investitionskosten (CHF/kW) von Kältemaschine und Kälteverteilung (ohne Kälteabgabe, d.h. ohne Umluftkühler) (Quelle: Amstein+Walthert)

Der Coefficient of Performance (COP) und die Jahresarbeitszahl (JAZ) einer Kältemaschine hängen u.a. von der Bauart des Verdampfers und vom Verdichtertyp (Scroll, Kolben, Schrauben, Turbo, Absorber) sowie von der Regulierung (konstante Drehzahl, variable Drehzahl) ab, wobei die einzelnen Verdichtertypen für jeweils spezifische Leistungsbereiche erhältlich sind (siehe u.a. Landert, 2005). Für einen bestimmten Leistungsbereich können unterschiedliche Kältemaschinen eingesetzt werden, wobei effizientere Varianten meistens mit höheren Investitionskosten verbunden sind (vgl. Tabelle 58).

		Referenz: KM mit Schraubenverdichter, Trockenexpansionsverdichter)	Typ 1: KM mit Schraubenverdichter, überfluteter Verdampfer)	Typ 2: Quantum (ölfreier Verdichter, überfluteter Verdampfer)
Thermische Kälteleistung	kW_{th}	600	600	600
COP Kältemaschine bei Auslegung		4.5	5.5	5.4
Jahresarbeitszahl Kältemaschine (KM)		5.5	6.7	10.5
Hilfsaggregate (Kältemittelpumpen, Rückkühler etc.)	kWe	30	30	30
Jahresarbeitszahl inkl. Hilfsaggregate		4.3	5.0	6.9
Marktnaher Richtpreis, Kältemaschine	CHF	75000	85000	110000
Montage, Inbetriebsetzung, MWST	CHF	30000	35000	44000
Total Kälteerzeugung (inkl. MWST)	CHF	105000	120000	154000
Kälteerzeugung (ohne Rückkühlung)	CHF/kW_{th}	175	200	257

Tabelle 58: Investitionskosten und technische Kennwerte von unterschiedlich effizienten Kältemaschinen am Beispiel einer Kälteleistung von 600 kW_{th} (Quelle Kälteunternehmen 1, Erhebung CEPE)

Eine weitere Möglichkeit der Steigerung der Energie-Effizienz besteht darin, den Temperaturhub zwischen Kälteabgabe und Rückkühlung zu verringern (siehe Wellig et al., 2006 für eine detaillierte Übersicht). Bei gegebener Kältemaschine erhöht sich dadurch der COP (und die JAZ). Wird dies bereits bei der Dimensionierung berücksichtigt, kann dadurch häufig eine kleinere und damit kostengünstigere Kältemaschine verwendet werden. Gleichzeitig reduziert sich die an die Umwelt abzugebende Rückkühlleistung (da sich diese aus der aus den Räumen abgeführten thermischen Leistung und der aufgenommenen elektrischen Leistung der Kältemaschine zusammensetzt), was ebenfalls zur Reduktion von Investitionskosten führt. In Tabelle 59 ist dies dargestellt am Beispiel einer thermischen Kälteleistung von rund 200 kW_{th}.

		KM mit Trockenrückkühler KM 6°/12°, RK 40°/50°	KM mit Trockenrückkühler KM 8°/14°, RK 40°/50°	KM mit Trockenrückkühler KM 13°/19°, RK 35°/45°
Kälteleistung	kW_{th}	204	190	196
Geräteaufnahme	kW_e	78	69	49
COP ohne Pumpen		2.61	2.78	3.87
Pumpenleistung Kältemittelkreislauf (*)	kW	10	10	10
COP mit Pumpen		2.3	2.4	3.3
Jahresarbeitszahl gewichtet (ARI) mit Pumpen		2.5	2.6	3.6
Kältemaschine (KM)	CHF	64000	60000	54000
Rückkühler (RK)	CHF	30000	29000	26000
Montage (exkl. Regelung, hyd. Einbindung) (*)	CHF	32900	32900	32900
Total Kälteerzeugung	CHF	126900	121900	112900
Kältemaschine	CHF/kW_{th}	314	316	276
Rückkühler	CHF/kW_{th}	147	153	133
Total (inkl. Montage, Regelung)	CHF/kW_{th}	622	642	576

Tabelle 59 Investitionsosten und technische Kennwerte von Kälteerzeugungen mit unterschiedlicher Rückkühlung (Quelle Kälteunternehmen 2, Erhebung CEPE) (*) Schätzung CEPE

Anzumerken ist an dieser Stelle, dass bei höherem Temperaturniveau bei der Kältemaschine (z.B. 13°C/19°C statt 8°/14°C) auch die Entfeuchtungsleistung reduziert wird. Unter Umständen sind alternative Entfeuchtungsmöglichkeiten vorzusehen oder das höhere Temperaturniveau kann „nur" im Betrieb, nicht aber bei der Dimensionierung genutzt werden (in diesem Fall bleiben die Investitionskosten konstant, die laufenden Energiekosten werden jedoch trotzdem reduziert). Ebenfalls anzumerken ist, dass bei höheren KM-Temperaturen u.U. die Kälteabgabe anzupassen ist. Je nach System kann dies zu Mehrkosten führen.

In Tabelle 60 sind die Kennwerte eines weiteren Datenlieferanten zusammengestellt, wobei eine Variante ebenfalls einen geringeren Temperaturhub zwischen KM und Rückkühlung aufweist (Variante 1b) und die andere von einem alternativen Kältemittel ausgeht (Variante 2), wobei beide Varianten einen höheren COP aufweisen. Bei höherem COP reduziert sich zum einen die Rückkühlleistung (und damit die auf die Kälteleistung bezogenen Kosten) und zum anderen können sich die spezifischen, auf die Rückkühlleistung bezogenen Kosten erhöhen. Bei der Variante 1b kompensieren sich die beiden Effekte in etwa. Bei der Variante 2 ist wie bei der KM auch beim Rückkühler aufgrund des Kältemittels Ammoniak mit Zusatzkosten zu rechnen. Diese sind bei der kleineren Anlage von 100 kWth relativ gesehen höher als bei der leistungsstärkeren Anlage von 500 kWth (Schätzwerte:+40% bzw. +20%).

Kälteleistung (**)	kW_{th}	Kälteleistung 100 kWth			Kälteleistung 500 kWth		
		Variante 1a KM: 12°/18° RK: 40°/45°	Variante 1b KM: 15°/21° RK: 30°/36°	Variante 2 Kältemittel Ammoniak	Variante 1a KM: 12°/18° RK: 40°/45°	Variante 1b KM: 15°/21° RK: 30°/36°	Variante 2 Kältemittel Ammoniak
Kälteleistung original	kW_{th}	115	112	126.5	525	494	463
Kältemaschine, original	CHF	16715	15718	67128	63000	53745	114713
Kältemaschine (KM) (**)	CHF	14535	14034	53066	60000	54398	123880
COP ohne Pumpen		2.85	4.7	7.19	3.3	4.7	7.06
Pumpenleistung (*)	kW	8	8	8	30	30	30
JAZ inkl. Pumpen (*), (**)		2.5	3.7	4.8	3.0	3.9	5.3
Kältemaschine (KM) (**)	CHF/kW_{th}	145	140	531	120	109	248
Rückkühler (RK) (*)	CHF/kW_{th}	203	200	239	130	133	137
Montage, Regelung, (*)	CHF/kW_{th}	116	115	160	60	59	71
Total Kälteerzeugung	CHF/kW_{th}	464	456	930	310	301	456
(*) Schätzung CEPE	(*) Umrechnung CEPE						

Tabelle 60 **Investitionskosten und technische Kennwerte von Kälteerzeugungen mit unterschiedlichem Temperaturhub und unterschiedlichem Kältemittel** (Quelle Kälteunternehmen 3, Erhebung und Umrechnungen CEPE)

Ein geringerer Temperaturhub kann auch durch die Verwendung von hybriden oder nassen Rückkühlern erreicht werden. Bei hybriden Rückkühlern erfolgt die Rückkühlung bei einem Teil der Betriebszeit durch die Verdunstung von Wasser (gemäss Angabe des Kälteunternehmens 4 beträgt der Bedarf 2.6 bis 3 Liter pro kWh rückzukühlende Abwärme). Dabei ist investitionsseitig zwar mit Mehrkosten zu rechnen, aber der Jahresnutzungsgrad kann deutlich gesteigert werden (siehe Tabelle 61).

Im normalen Dienstleistungsbau wird heute vorwiegend über wassergeführte, statische Systeme (Kühldecken) gekühlt und auch geheizt. Es gibt eine Vielzahl von Systemen, die wie gemäss Tabelle 62 charakterisiert werden können. Die meisten Systeme können auch zum Heizen und als raumakustisches Element eingesetzt werden und bieten daher auch wirtschaftliche Vorteile.

Rückkühler (RK)		Trocken-RK	Hybrid	Trocken-RK	Hybrid
Kältemittel		FKW	FKW	Ammoniak	Ammoniak
Kälteleistung	kW_{th}	600	600	600	600
Kälteerzeugung total (KM, RK, Montage)	CHF	350000	400000	410000 (*)	460000
Minderpreis höherer VL-T.	CHF	15000	15000	10000	10000
COP ohne Pumpen (**)		5.0	5.6	5.7 (*)	8.3
JAZ ohne Pumpen (**)		3.8	4.7	4.8 (*)	6.9
JAZ inkl. Pumpen (**)		4.8	5.6	5.7 (*)	8.5
Kältemaschine (KM)	CHF/kW_{th}	283	267	333	333
Rückkühler (RK)	CHF/kW_{th}	133	233	150 (*)	233
Montage, Regelung,	CHF/kW_{th}	167	167	200	200
Total Kälteerzeugung (VL Standard)	CHF/kW_{th}	583	667	683	767
Total Kälteerzeugung (höhere VL-T.)	CHF/kW_{th}	558	642	667	750
(*) Schätzung CEPE (**) bei erhöhten Kälteverteilungs-Vorlauftemperaturen					

Tabelle 61 Investitionskosten und technische Kennwerte von Kälteerzeugungen mit unterschiedlichem Temperaturhub und unterschiedlichem Kältemittel (Quelle Kälteunternehmen 4, Erhebung und Umrechnungen CEPE)

4.8.2 Kälteabgabe

Die Kosten der Umluftkühlgeräte hängen stark von der Auslegung und damit von der Energieeffizienz ab. Bei geringeren Luftgeschwindigkeiten erhöhen sich zum einen die notwendige Wärmetauscherfläche (mehr oder weniger umgekehrt proportional) und entsprechend die Kosten (typischerweise mit einer Potenz von 0.75), zum anderen verringert sich der Druckverlust und damit der Energiebedarf für die Luftumwälzung (typischerweise mit einer Potenz von 1.5). Der Eigen-Elektrizitätsbedarf von Umluftkühler ist nicht ganz vernachlässigbar und beträgt im Standardfall typischerweise 11 MJ/m^2a und bei energieeffizienteren Variante 5 MJ/m^2a.

Beschrieb	Kosten (grobe Richtwerte)
Umluftkühler (20'000 m3/h): Standard (300 Pa) energie-effizient (140 Pa)	450 CHF/kW, d.h. 20 $CHF/m^2_{Bodenfläche}$ (@ 50 W/m^2) 950 CHF/kW, d.h. 50 $CHF/m^2_{Bodenfläche}$ (@ 50 W/m^2)
Kunststoffrohre, die an die rohe Betondecke befestigt und in der Folge verputzt werden	200 bis 500 $CHF/m^2_{Bodenfläche}$
Kunststoffrohre, die in die Betondecke eingelassen werden	60 $CHF/m^2_{Bodenfläche}$ ohne Akustikelemente, > 120 CHF $CHF/m^2_{Bodenfläche}$ inkl. Akustikelemente
Abgehängte Metalldecken mit eingelegten Metallrohren (kontaktiert auf die Plattenelemente), evtl. kombiniert mit Zu- und Abluftfunktion	200 bis 500 $CHF/m^2_{Bodenfläche}$
Eigenständige Kühldeckenelemente mit oder ohne Kontaktierung der Betondecke (thermische Bauteilaktivierung, TABS)	≥ 120 CHF $CHF/m^2_{Bodenfläche}$

Tabelle 62 Spezifische Kosten von verschiedenen Kälteabgabesystemen (raumbezogene Kosten ohne gebäudeinterne Verteilung). Quellen: Amstein+Walthert, diverse

4.8.3 Dezentrale Kleinklimageräte

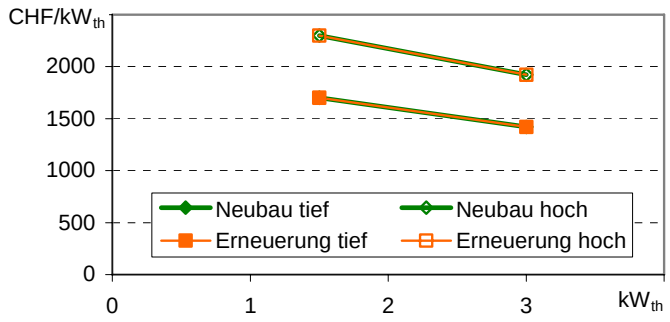
Die heute grundsätzlich höheren Komfortansprüche im Dienstleistungsbereich aber auch beim Wohnen führen zum vermehrten Einsatz solcher Kleingeräte und ist damit energetisch bedeutsam geworden und entsprechende Verkaufszahlen haben sich vervielfacht. Dies ist eine ungünstige Entwicklung,

weil die energetische Effizienz wie erwähnt ausserordentlich zweifelhaft ist. Eine gewisse Verbesserung kann erwartet werden, wenn die Geräte mit einer EU-Energieetikette zertifiziert werden. Die Luft-Luft-Kälteaggregate umfassen alle Komponenten die auch grössere Geräte aufweisen: Kompressor, Verdampfer, Kondensator sowie zwei Ventilatoren, je einmal für die Raumluftkühlung und die Wärmeabfuhr. Der typische Leistungsbereich liegt zwischen zirka 1- 10 kW thermische Kühlleistung. Bei der Bauart dieser Geräte kann zwischen verschiedenen Typen unterschieden werden (siehe Tabelle 63). Der grosse Nachteil von innen aufgestellten Kleinklimageräten besteht darin, dass die Abwärme des Kompressors in den Raum abgegeben wird und weggeführt oder weggekühlt werden muss. Deshalb resultieren bei diesen Geräten sehr tiefe Netto-Nutzungsgrade (Verhältnis zwischen Netto-Kühlenergie und aufgenommener elektrischer Energie, siehe z.B. (Nipkow, 2004)); als Beispiel beträgt bei einer Verdampferleistung von 2,5 kW die effektive Kühlleistung nur ca. 60% davon, d.h. 1,5 kW_t. Die Kosten von einfacheren Geräten im kleinen Leistungsbereich (z.B. 1 kW Verdampferleistung, d.h. rund 600 W thermische Leistung), die in Baufachmärkten erhältlich sind, betragen teilweise deutlich weniger als 1000 CHF. Die Kosten sind in Abbildung 51 dargestellt.

Typ	Beschrieb	Leistungs-ziffer (1)	Leistungs-ziffer (2)
Mobil / Schlauch	Geräteaufstellung im Raum, Abwärme wird über Schlauch nach aussen gefördert. Bauart mit 2. Schlauch für Luftansaugung von aussen	2.0	2.6
Mobil / Split	Verdampfer und Kompressor im Raum, Kondensator mit Abwärmeventil. aussen	2.5	3.2
Fix / Split	Verdampfer im Raum, Kompressor, Kondensator mit Abwärmeventilator aussen	2.5	3.2
Einbau-KG	Einbau des Kompaktgerätes (KG) in Fenster- oder Mauernische	2.3	3.0

Tabelle 63 **Übersicht über die verschiedenen Typen bei Kleinklimageräten** (Quellen: (1) Durchschnittliche Leistungsziffern nach U. Sprengart, Panasonic (Westamatic, D- Eschborn), (2) Vorgaben europäische Energieetikette für A-Geräte (Entwurf 2005)

K5: Kleinklimageräte: Innenaufstellung

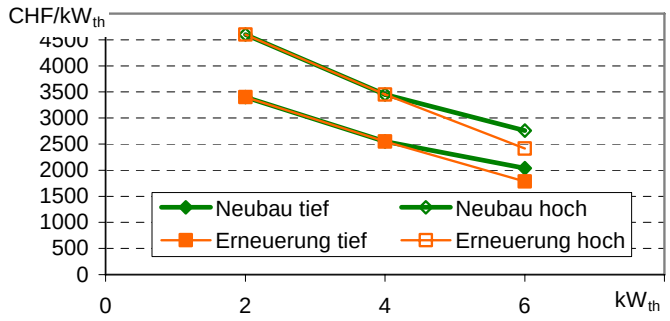


Neubau: Sollte in der Neubausituation nicht verwendet werden

Gebäudebestand:

Leistungsziffer: 1.3 bis 1.7

K6: Kleinklimagerät: Splitgerät (feste Installation)



Neubau: Sollte in der Neubausituation nicht verwendet werden

Gebäudebestand: Einbau dezentraler Splitgeräte. Der Kompressor und der Kondensatorteil liegen ausserhalb vom Gebäude

Leistungsziffer Kältemaschine: 2.5

Abbildung 51 **Spezifische Investitionskosten (CHF/kW) von dezentralen Klimageräten** (Quelle: A+W)

4.9 Hybride Wärme-, Kälte- und Lüftungssysteme

Die Raumkonditionierung mit Heizen, Kühlen und Lüften kann, mindestens teilweise, auch kombiniert erfüllt werden. Typischerweise wird die Aussenluft in entsprechenden Geräten in den Raum gebracht und je nach Bedarf vorgewärmt bzw. vorgekühlt. Dabei wird bei einigen Systemen nicht der gesamte Wärme- und/oder nicht der gesamte Kühlbedarf abgedeckt; die Systeme werden dann mit einem statischen System und/oder einer zentralen Lüftungsanlage (z.B. Abluftanlage) ergänzt.

Mögliche Bauarten der dezentralen Gerätekonfigurationen sind:

- Lüftungsgerät mit Zu- und Abluft mit integrierter Wärmerückgewinnung in der Brüstung oder im Doppelboden. Die Aussenluft wird über die Heizungsverteilung geheizt (2-Leiter) und bei Bedarf auch gekühlt (2- oder 4-Leiter). In der Regel zusätzliches statisches Heizsystem Bodenheizung, TAB, etc). Die Regelung dieser Geräte erfolgt heute in der Regel eindeutig; entweder wird geheizt oder gekühlt (change over). Im Gegensatz zum übrigen Europa ist diese Technologie in der Schweiz noch wenig verbreitet. Dies hat möglicherweise mit den doch relativ hohen Behaglichkeits- Anforderungen in der Schweiz zu tun.
- Das oben beschriebene Gerät kann so konfektioniert werden, dass bei ausgeschalteter Lüftung über den integrierten Wärmetauscher geheizt werden kann und damit keine ergänzende statische Heizung mehr notwendig ist. Weitere Produkte gehen soweit, dass zusätzlich im Kompaktgerät eine Wärmepumpe eingesetzt wird und damit auf eine zentrale Versorgung verzichtet werden kann.
- Kombinierte Heiz- und Kühldecke, mit oder ohne thermische Kopplung der Deckenmasse. Mittels einer zentralen Aufbereitung wird über ein wassergeführtes Verteilnetz wahlweise Wärme- oder Kälte dem Raum zugeführt. Die Lufterneuerung könnte grundsätzlich natürlich über die Fenster erfolgen, ist aber wegen der Gefahr von Oberflächenkondensat zu vermeiden. Sinnvoller ist der Einbau einer mechanischen Lüftungsanlage mit einer entsprechenden Vorkonditionierung.

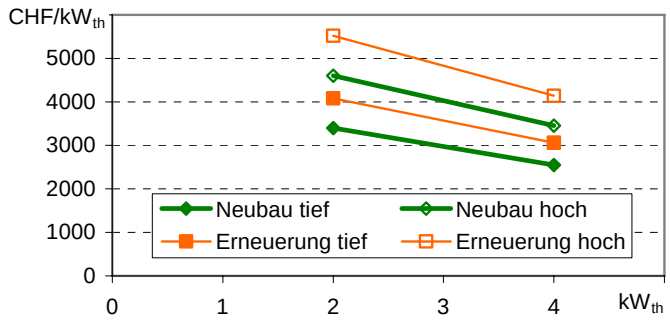
In Abbildung 52 sind die Kosten der dezentralen Fassadengeräte der erstgenannten Kombinationsmöglichkeit dargestellt: Die Geräte werden in die Fassade oder in den Doppelboden integriert und sind mit einem Zuluft- und Fortluftventilator und einer Wärmerückgewinnung (WRG) ausgestattet. Der Nutzungsgrad der WRG beträgt typischerweise 50-55%. Die Zuluft wird nebst der Vorwärmung mittels WRG ergänzend über die Heizungsverteilung auf das notwendige Temperaturniveau gebracht. Im Kühlfall wird die Aussenluft über das zentrale Kaltwassernetz gekühlt. Die bauliche Integration kann je nach Situation in die Brüstung oder in den Doppelboden integriert werden. Die Kosten enthalten das Gerät, dessen Montage, den Anschluss an die Kälte- und Wärmeverteilung sowie die bauseitigen Arbeiten (bauliche Integration). Die Kosten für ein ergänzendes statisches System sind in diesen Kosten nicht enthalten.

Die beschriebenen Geräte sind aufgrund der Schnittstellen und Anpassungsarbeiten für den Gebäudebestand etwas weniger geeignet als für den Neubau. Sie sind aber grundsätzlich auch im Gebäudebestand anwendbar, sofern dies Gegebenheiten bzgl. Fassadenstruktur und Wärme- und Kälteverteilung zulassen. Von besonderem Interesse sind die zwei erstgenannten Systeme (Lüftungsgerät mit Zu- und Abluft mit integrierter Wärmerückgewinnung; dezentrales Fassadengerät mit Aussenluft, Erwärmung und Kühlung der Zuluft) für Gebäude, in denen die Installation einer Lüftungsverteilung aufgrund der Platzverhältnisse nicht möglich ist oder mit hohen Kosten verbunden wäre.

Die hybride (dezentrale) Technologie hat bezüglich Flexibilität einige Vorteile, was in Dienstleistungsbauten nicht zu unterschätzen ist. Anderseits steigen die Instandhaltungs- und auch die Instandsetzungsarbeiten gegenüber zentraler Technologie.

Die systematische Gegenüberstellung der verschiedenen Systeme bezüglich Technologie, Komfortaspekte und Lebenszykluskosten ist ausserordentlich komplex, insbesondere weil die Schnittstellen und Abhängigkeiten zum Gebäude (Masse, interne Lasten, etc.) und zum Nutzer (Betriebsführung) zu berücksichtigen sind. Zudem sind die technischen Entwicklungen teilweise rasant; ein gutes Beispiel sind Kühl- und Heizdecken, die in unterschiedlichsten Varianten angeboten werden. Diese Ausgangslage führt dazu, dass Planer und/oder Unternehmer relativ intuitiv Systementscheide fällen, die vielfach zu suboptimalen Systemen führen. Wünschenswert wären daher auch in diesem Bereich unterstützende Planungstool- oder Expertensysteme, die aus dem Entwurf (Simulationen) heraus die Grundlagen für die Systemevaluation ermöglichen würden.

H1: Einbau dezentrale Heiz-, Lüftungs- und Kühlgeräte



Neubau: Einbau dezentrales Kompaktgerät zum Heizen, Lüften und Kühlen, integriert in Fassade. Anschluss an zentrale Heiz- und Kälteversorgung.

Erneuerung: Wie Neubau, zusätzlich mit den notwendigen Anpassungen in der Fassade oder Doppelboden (Heizverteilung vorhanden)

Abbildung 52 **Spezifische Investitionskosten (CHF/kW) von dezentralen Heiz-, Lüftungs- und Kühl-Kombigeräten** (Quelle: Amstein+Walthert)

4.10 Beleuchtung

Im Dienstleistungsbereich kommt der Beleuchtung eine zentrale Bedeutung zu. Bei Beleuchtungen in Neubauten und bei Beleuchtungserneuerungen sollten folgende optische Kriterien beachtet werden, in der Reihenfolge ihrer Bedeutung (Quelle: RAVEL-Handbuch, S. 12ff).

- Schutz vor störendem Glanz und Reflexbildung
- Schutz vor Direktblendung
- Angemessene Beleuchtungsstärke
- Harmonische Leuchtdichteverteilung
- Natürliche Schattigkeit
- Geeignete Lichtfarbe
- Befriedigende Farbwiedergabe
- Flimmerfreiheit.

Die Beleuchtung ist ein energetisch relevanter Faktor und deshalb sind Grenzkostenbetrachtungen in diesem Bereich von grossem Interesse. Zur Effizienzsteigerung und Elektrizitätsbedarfsreduktion stehen zahlreiche Möglichkeiten zur Verfügung, fallweise anwendbar im Bereich Neubau oder bei Erneuerungen bestehender Gebäude oder Situationen.

Massnahmen, die mit dem Ziel der Steigerung der Energie- und Kosteneffizienz getroffen werden, sind gleichzeitig bzgl. der oben erwähnten Kriterien mitzubeurteilen. Die im Folgenden betrachteten Massnahmen werden so ausgestaltet, dass sie im Ergebnis bzgl. optischer Kriterien immer mindestens

gleich gut oder besser als der Ausgangszustand oder als die Anforderung seitens der Normen sind. Energie-Effizienz soll also nicht mit einer Einbusse auf Seite der optischen Kriterien erkauft werden, sondern wenn möglich den Beleuchtungskomfort verbessern. Verbessern sich die optischen Kriterien durch Energie-Effizienzmassnahmen massiv oder tritt eine markante Wertsteigerung ein, so ist ein Teil der Kosten aus methodischen Gründen nicht der Energie-Effizienz zuzuordnen.

Folgende Massnahmen stehen grundsätzlich zur Verfügung, um die Energie-Effizienz bei Beleuchtungen zu erhöhen.

- Architektonische Massnahmen (grössere Fensterflächen, geringere Raumtiefen, Innenhöfe mit Oberlichtern etc.), unterschiedliche Fensterqualität
- Einsatz von lichtdurchlässigerem Sonnenschutz (Stoffwahl, unterschiedliche Lamellenstellungen etc.), Trennen des Blend- und Sonneschutzes
- Optimierende, übergreifende Regulierung von Sonnenschutz, Lüftung, Kühlung und Komfort.
- Anpassung des Beleuchtungskonzepts (z.B. bedarfsorientierte Stehleuchten statt flächendeckende Beleuchtung, Kombination von Flächen- und Punktbeleuchtung, Farb- und Materialwahl)
- Einsatz effizienterer Elektronik, effizienteren Lampen und Leuchten
- Regulierung: Präsenzbasierte und/oder tageslichtabhängig (Ausschalten, Aus-/Einschalten, Konstantlichtregelung, d.h. Dimmen), höherer Nutzerbedienkomfort

Einige der oben erwähnten Massnahmen sind in einer übergeordneten Betrachtung (wie in diesem Projekt vorliegend) kaum quantitativ verallgemeinernd zu erfassen, können im Einzelfall jedoch durchaus von hoher Relevanz sein. Dazu gehören z.B. die architektonische Grundgestaltung des Gebäudes sowie Farbwahl und Materialisierung der Innenräume. Die **architektonische Massnahme grösserer Fensterflächen** (bei Neubauten), **unterschiedliche Fenster, verschiedene Sonnenschutzqualitäten inkl. Regelung** und deren Elementkosten werden in den entsprechenden Unterkapiteln behandelt. In der Grenzkostenbetrachtung sind diese Kosten nicht allein der Beleuchtung zuzuordnen, sondern es ist die gesamte Auswirkung dieser Massnahme auf Beleuchtungsbedarf, Einsatz des Sonnenschutzes, Wärme- und Kühlbedarf und Komfort mit einzubeziehen.

Im Bereich Bürogebäude und Schulen sind **Beleuchtungen mit Leuchtstofflampen** (auch FL-Lampen genannt) **am häufigsten anzutreffen** - um nicht zu sagen ausschliesslich. Dieser Beleuchtungstyp ist aber auch in manch weiteren Gebäudetypen im Bereich Wirtschaftsbauten sehr weit verbreitet und die meisten der nachfolgenden Ausführungen können sinngemäss oder mittels Analogieüberlegungen auf diese übertragen werden. In einigen Anwendungsbereichen werden Beleuchtungen mit Leuchtstofflampen als Grundbeleuchtung eingesetzt und mit weiteren Beleuchtungsarten kombiniert, im Bereich Detailhandel typischerweise mit Akzentbeleuchtung mittels „konventionellen" Halogenlampen oder Halogenmetalldampflampen. Auf die Akzentbeleuchtung wird in einem separaten Unterkapitel eingegangen, nachfolgend werden die verschiedenen Massnahmen zur Erhöhung der Energie- und Beleuchtungs-Effizienz bei Beleuchtungen mit Leuchtstofflampen dargestellt, und zwar in der Reihenfolge ihrer Eingriffstiefe. Es ist davon auszugehen, dass in einem Teil des Gebäudebestandes der genannten Gebäudetypen die Beleuchtung bereits umfassend erneuert wurde und das Potenzial für die nachfolgenden Massnahmen entsprechend eingeschränkt ist.

Tabelle 64 zeigt die Massnahmentypen, nach denen im Folgenden unterschieden wird, sowie die dazu zugeordneten Referenzfälle. Im Unterschied zu den übrigen Bereichen besteht bei der Beleuchtung die Möglichkeit, sogenannte Sofortmassnahmen zu ergreifen. Diese sind aus Sicht der langfristigen Investitionsplanung und der Lichttechnik nicht in allen Fällen ideal, bieten aber doch die Chance, den Elektrizitätsbedarf und die laufenden Kosten auch ausserhalb der „normalen" Instandsetzungs- und Erneuerungszyklen zu reduzieren. Bei der Grenzkostenbetrachtung werden Standarderneuerungsmassnahmen (typischerweise Leuchtenersatz) mit Instandsetzungsmassnahmen verglichen und weitergehende Erneuerungsmassnahmen (typischerweise Lichtregelungsansätze) mit Standarderneuerungsmassnahmen. Der Massnahmetyp „Instandsetzung" erhöht die Energie-Effizienz in der Regel nicht.

Die Kosten dieses Massnahmentyps sind jedoch trotzdem sehr wichtig, weil sie als Referenz für Erneuerungsmassnahmen dienen und auf die Wirtschaftlichkeit von Erneuerungsmassnahmen einen sensitiven Einfluss haben können.

Massnahmentyp	Grenzkostenbetrachtung im Vergleich zu folgenden Referenzfällen:
Sofortmassnahme	Laufende Elektrizitätskosten
Instandsetzung	-
Standarderneuerung	Instandsetzung, laufende Elektrizitätskosten
Weitergehende Erneuerung	Standarderneuerung, laufende Elektrizitätskosten

Tabelle 64 Übersicht über die verschiedenen Massnahmetypen

Die Standarderneuerungsmassnahmen und die weitergehenden Erneuerungsmassnahmen werden aus methodischen Gründen zudem mit den laufenden Energiekosten verglichen, dies im Sinne einer (partiellen) Ursachenanalyse: Ist die Wirtschaftlichkeit unter diesem Blickwinkel allenfalls nicht gegeben und könnte dies zur Erklärung der geringen Erneuerungstätigkeit beitragen oder wären Erneuerungsmassnahmen selbst im Vergleich zu den laufenden Energiekosten wirtschaftlich, was bedeuten würde, dass die Hemmnisse in anderen Bereichen zu suchen wären.

Im Sinne der erwähnten Ursachenanalyse stellen die nachfolgenden Ausführungen nicht **in jedem Fall das aus Sicht der Lichtplanung optimale Vorgehen dar, sondern sind als Beschreibung und Erklärung des aktuellen Akteursverhaltens zu sehen.**

4.10.1 Technische Grundlagen und potenzielle Massnahmemöglichkeiten zur Steigerung der Energieeffizienz

Die auf den ersten Blick einfachste Massnahme besteht darin, effizientere Leuchtmittel (Lampen) einzusetzen. Dabei sind jedoch elektro- und lichttechnische Einschränkungen zu beachten. Bzgl. grundsätzlicher technischer Machbarkeit eines Lampenwechsels ist zu beachten:

- Länge der Lampe und damit verbundene auf dem Markt erhältliche Lampenleistungen
- Fassungssockel
- Kompatibilität bzgl. Vorschaltgerät
- Leuchtengeometrie (Lichtlenkung, thermischer Haushalt)

Bei den Leuchtstofflampen wird im Wesentlichen zwischen drei Generationen unterschieden, nämlich zwischen T12, T8 und T5 Lampen (bzw. 38mm, 26mm, 16mm), wobei sich die Ziffern auf den Durchmesser in 1/8-inch beziehen. In neuen Planungen kommen die T12-Lampen zwar in der Regel nicht mehr zur Anwendung, sie sind aber in bestehenden Beleuchtungen heute noch im Einsatz. Selbst die älteste Generation (die T12) hat eine relativ hohe Effizienz, v.a. im Vergleich zu Glüh- oder Halogenlampen. Tabelle 65 zeigt typische Werte für Lichtausbeute der drei erwähnten Lampen-Generationen inkl. der wichtigsten Vorschaltgerätetypen. Gleiche lichttechnische Leuchteneffizienz und gleiche Raumeffizienz vorausgesetzt ist nicht der Lampentyp allein entscheidend, sondern die Kombination Lampe plus Vorschaltgerät plus Leuchte (letztere wegen des thermischen Haushalts, welcher die Effizienz beeinflusst). Bei den Vorschaltgeräten wird zwischen konventionellen Vorschaltgeräten (KVG), verlustarmen konventionellen Vorschaltgeräten (VVG) und elektronischen Vorschaltgeräten (EVG) unterschieden. Während sich die mittlere Lampengeneration (T8) grundsätzlich auch mit EVG betreiben lässt, bedingt die neuste Generation (T5 bzw. T16) elektronische Vorschaltgeräte. Bereits daraus ist ersichtlich, dass die verschiedenen Lampentypen nicht beliebig mit geringem Aufwand substituierbar sind.

	Lampe plus Vorschaltgerät Lm/W
Älteste Generation T12 (38 mm) mit KVG	72
Mittlere Generation T8 (26 mm)	90 mit KVG, 104 mit EVG
Neuste Generation T5 (16 mm)	high efficiency: 93 (104 bei 35°C) high output: 82 (93 bei 35°C)

Tabelle 65 Übersicht über die Lichtausbeute von Lampen mit Vorschaltgerät bei Leuchtstoff-Lampen (FL) bei jeweils optimalen thermischen Bedingen

Abbildung 53 zeigt eine im Vergleich zur Tabelle 65 differenziertere und erweiterte Darstellung der Lichtausbeute für verschiedene Lampen-Vorschaltgeräte-Kombinationen und zwar als Funktion der entsprechenden Systemleistung bei einer typischen Betriebstemperatur (analog dazu zeigt die Abbildung 132 im Anhang die entsprechenden Werte als Funktion der handelüblichen Lampenbezeichnungen; in Tabelle 98 sind die verwendeten Grundlagedaten dokumentiert). Die geraden FL-Lampen sind den gefalteten Kompakt-Leuchtstofflampen in punkto Lichtausbeute (Lm/W) ebenbürtig oder klar überlegen. Innerhalb der geraden Leuchtstofflampen sind die Kombinationen mit EVG denjenigen mit KVG überlegen. Im unteren Leistungsbereich (bis 40 W) sind die neuen T5-Lampen (immer mit EVG), d.h. die T5 high efficiency, den T8 mit EVG überlegen. Im oberen Leistungsbereich hingegen sind die T8-Lampen mit EVG den T5-Lampen (high output) vorzuziehen.

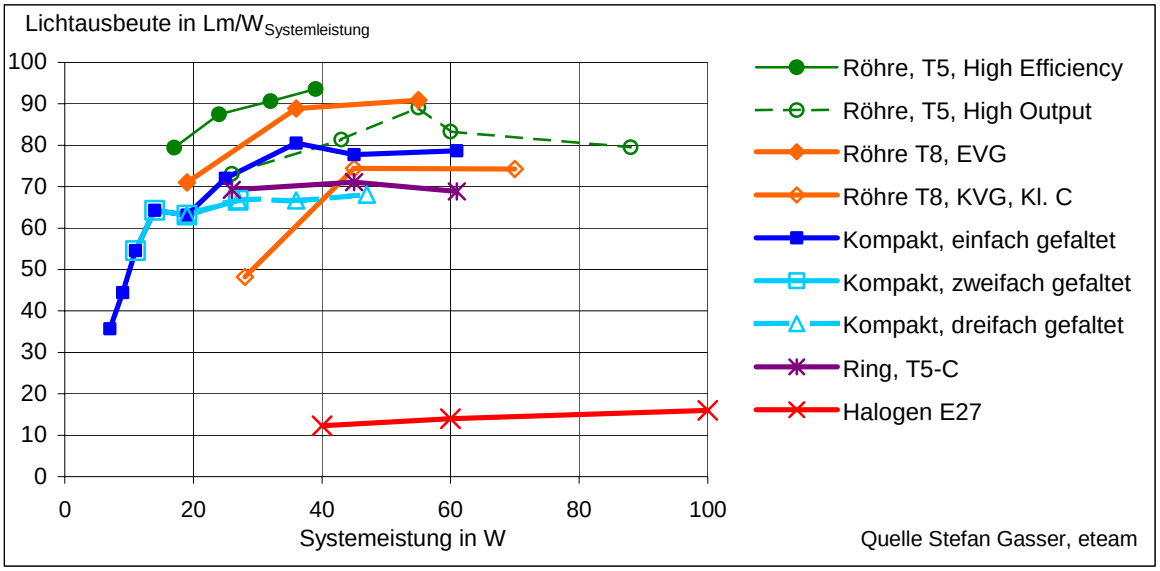


Abbildung 53 Übersicht über die Lichtausbeute von Lampen inkl. Vorschaltgerät als Funktion der Systemleistung (Lampe inkl. Vorschaltgerät). Quellen Osram—Katalog 2005 (Lichtströme), CELMA, Berechnungen und Darstellung St. Gasser (eteam)

Tabelle 66 zeigt eine Übersicht über Leistung und Länge der drei Lampengenerationen. Daraus ist ersichtlich, dass die T8-Lampen bzgl. Länge mit den T12 Lampen kompatibel sind, nicht jedoch die T5-Lampen mit den beiden älteren Lampen-Typen. T12-Lampen können aus technischen Gründen in den meisten Fällen durch energie-effizientere T8-Lampen ersetzt werden. Die erhältlichen Leistungsabstufungen der T8-Lampen wurden u.a. dergestalt konzipiert, um im Vergleich zu den T12 eine Energieeinsparung zu ermöglichen, d.h. die Leistung ist um einige Watt geringer (z.B. 58 W bei der T8 statt 65 W bei der T12 bzw. 36 W statt 40 W). Die praktische Erfahrung habe jedoch gezeigt, dass dies mit einem Nachteil verbunden ist: die Lebensdauer der Lampe wird wegen der im Vergleich zur Lampe zu hohen Leistung des KVG reduziert. Die Fassungen sind zudem in manchen Fällen relativ alt, so dass die Rotorfassungen häufig in einem schlechten Zustand sind, was zu schlechten Kontakten führen kann oder die Fassungen sind nicht mehr bedienbar. In diesen Fällen ist ein Umbau oder Ersatz der Leuchten angezeigt. Über die Verbreitung von T12-Lampen im Beleuchtungsbestand bestehen seitens

der befragten Experten unterschiedliche Ansichten. Zu vermuten ist, dass die 1.5m langen T12-Lampen insbesondere in Turnhallen in Schulen im Einsatz sind. Abgesehen davon, dass die Produktion der T12 mittelfristig von einigen Lampenherstellern möglicherweise eingestellt wird, werden diese Beleuchtungsanlagen in den nächsten Jahren auch aufgrund des Erreichens der Lebensdauer der Leuchten zu erneuern sein.

	Älteste Generation: T12	Mittlere Generation: T8		Neuste Generation: T5	
Länge (mm)	1199; 1500	1200	1500	1149	1449
Lampenleistung (W)	40; 65	36 W Lampe (32W mit EVG)	58 W Lampe (50W mit EVG)	28 (*) 54 (**)	35 (*) 49; 80 (**)
Leistung inkl. VG (W)	49; 76	45 (KVG Kl. C) 36.5 EVG	70 (KVG Kl. C) 56 (EVG)	31.5 (*) 58 (**)	38.5 (*) 54; 86.5 (**)
(*) high efficiency (**) high output					

Tabelle 66 Übersicht über weit verbreitete FL-Lampen bzgl. Leistung und Länge (mm)

Im Hinblick auf mögliche auslösende Faktoren für Beleuchtungserneuerungen, aber auch als Input für Wirtschaftlichkeitsrechnungen, sind in Tabelle 67 die Lebensdauerwerte der betrachteten Lampen, Starter und Vorschaltgeräte dargestellt. Die Vorschaltgeräte sind wesentlich langlebiger als die Starter und die Lampen. Insbesondere die konventionellen Vorschaltgeräte, also diejenigen in den potenziell zu erneuernden Beleuchtungen, sind sehr langlebig. Als Auslöser für Massnahmen in einem relativ raschen Rhythmus kommen eher Lampen und Starter in Frage (je nach Jahresvolllaststunden bei den KVG alle 4 bis 8 Jahre bei 2000 bzw. 1000 Jahresvolllaststunden; bei den EVG sind die entsprechenden Zeiten doppelt so lang). Aus Auslöser für Beleuchtungserneuerungen kommen die Vorschaltgeräte kaum in Betracht, dies wegen der längeren Lebensdauer. Bei 1000 Jahresstunden beträgt die Lebensdauer rein rechnerisch 100 Jahre, bei 2000 immer noch 50 Jahre, faktisch wird mit 15 bis 25 Jahren gerechnet, sie ist also auf jeden Fall länger als diejenige der übrigen kritischen Komponenten der Beleuchtung.

	Älteste Generation: T12	Mittlere Generation: T8		Neuste Generation: T5
Lampenleistung	KVG	KVG / VVG	EVG	EVG
Lebensdauer Lampe	8000	8000	16000	16'000[MJ51]
Lebensdauer Starter	8'000-10'000	8000-10000 (*)	Nicht erforderlich	Nicht erforderlich
Lebensdauer VG	>100'000	>100'000[MJ52]	50'000	50'000
(*) ist von der Anzahl der Schaltvorgänge abhängig				

Tabelle 67 Typische Nutzlebensdauer von Lampen und Vorschaltgeräten (VG)

Nebst der höheren Lichtausbeute und der längeren Lebensdauer gibt es zwei weitere Motivationen, elektronische Vorschaltgeräte einzusetzen: Mit EVG ergibt sich ein weit geringerer Leistungsabfall nach einer gewissen Anzahl Nutzungsstunden als mit KVG. Und last but not least wird mit EVG das wichtige Ziel der Flimmerfreiheit erreicht.

In Tabelle 68 sind die potenziellen Massnahmemöglichkeiten im Bereich Beleuchtung in einer Übersicht dargestellt. Es ist zu beachten, dass die aufgeführten Massnahmen nicht alle die selben (lichttechnischen und ergonomischen) Nutzen aufweisen und dass die Neuwertigkeit der Beleuchtungen nach dem Durchführen der Massnahmen unterschiedlich ist.

Massnahmentyp, Massnahme		Anwendungsbereich, Beschrieb	Eingriffstiefe, Kosten	Wirkung
Unterhalt	Reinigung	Alle Lampentypen, insbesondere bei T8 und T5	Gering	Bringt Beleuchtungsstärke wieder auf ursprüngliches Niveau
	Lampenersatz (gleiche L.)	Alle Lampentypen, insbesondere T12	Gering	
Sofortmass-nahme	Lampenersatz (effizientere Lampen)	- T12 mit KVG: Ersatz mit T8, bedingt neue Fassungen	Gering bis mittel	Reduktion elektrische Leistung um 10% bis 15%
		- T8 mit KVG: Ohne weiteren Massnahmen kein Ersatz mit effizienteren Lampen möglich	-	-
		- T8 mit EVG: Ersatz mit T5 nur mit Leuchtenumbau oder Adaptern möglich (unterschiedliche Lampenlänge) (*)	Siehe untenste-hend	Potenzielle energetische Wirkung gering. Siehe untenstehend
	Ersatz EVG (und Lampe)	- KVG: Ersatz mit VVG:	Gering bis mittel	Reduktion elektrische Leistung um 10% bis 15%
		- KVG mit EVG: bedingt Neuverdrahtung der Leuchte, ermöglicht Einsatz effizienterer Lampen, z.B. T8 / T5 (*)	Gering bis mittel	Reduktion der elektrischen Leistungsaufnahme um 20% bis 25% bei optimalen Bedingungen
	Leuchten-Umbau mit EVG-Adaptern und Reflektoren	Leuchten mit KVG: Einbau EVG oder EVG-Adapter, Ersatz T12 oder T8 mit T8 oder T5, Ersatz oder Einbau Reflektor (*)	Gering bis mittel	Reduktion der elektrischen Leistungsaufnahme um 25% bis 40%, je nach Ausgangslage und je nach Bedingung
Instandsetzung	Leuchten-Umbau komplett	Pendel- und Deckenleuchten, Einbauleuchten: Ersatz Vorschaltgerät, Starter, Sockel, Reflektoren, Neuverdrahtung	Mittel bis hoch (meistens Demontage, Umbau, Reinigung im Werk)	Reduktion der elektrischen Leistungsaufnahme um 25% bis 40%, je nach Ausgangslage und je nach Bedingung. Erneuerung der thermisch belasteten Teile der Leuchte auf Neuzustand
Standard-erneuerung	Leuchtenersatz	Pendel- und Deckenleuchten, Einbauleuchten: Kompletter Ersatz, häufig bei gleichzeitiger Raumerneuerung	Mittel bis hoch (gleichzeitig mit Raumerneuerung, sonst Mehrkosten)	Reduktion der elektrischen Leistungsaufnahme um 25% bis 40%, je nach Ausgangslage. Erneuert Beleuchtung komplett und bringt sie auf den aktuellen Stand der Lichttechnik. Erleichtert Einsatz von Lichtregelungssystemen
Weitergehende Erneuerung	Lichtregulierung mit Präsenzmeldern	- Bestehende Beleuchtung: Präsenzmelder pro Leuchte oder pro Reihe/Bereich (je nach Schaltung)	Mittel bis hoch	Kann in Kombination mit den meisten oben stehenden Massnahmen eingesetzt werden. Bewirkt zusätzlich eine Reduktion der Volllaststunden um 15% bis 30%, v.a. bei kleinen Büros oder bei arbeitsplatzbezogenen Beleuchtungen (Stehleuchten)
		- Neue oder erneuerte Beleuchtung: Präsenzmelder pro Leuchte oder pro Reihe/Bereich (je nach Schaltung)	Mittel	
	Tageslichtabhängige Konstantlichtregulierung	- Vor allem bei neuen und erneuerten Beleuchtungen	Hoch	Kann in Kombination mit den meisten oben stehenden Massnahmen eingesetzt werden. Bewirkt zusätzlich eine Reduktion der Volllaststunden um 15% bis 50%, v.a. bei kleinen Büros oder bei arbeitsplatzbezogenen Beleuchtungen (Stehleuchten)
Abkürzungen: KVG: Konventionelles Vorschaltgerät, VVG: Verlustarmes (konventionelles) Vorschaltgerät, EVG: Elektronisches Vorschaltgerät				
(*) Lichttechnisch suboptimal: Leuchtengeometrie passt nicht zu geringerem Durchmesser der T5-Lampe, erhöhtes Blendrisiko (höhere Leuchtdichte), thermisches Verhalten der Leuchte nicht auf Lampentyp abgestimmt. Anwendungsbereich eingeschränkt: Leuchten mit opaler Abdeckung, Zonen mit geringen lichttechnischen Anforderungen (z.B. Verkehrsflächen)				

Tabelle 68 Übersicht über grundsätzliche Massnahmemöglichkeiten bei Beleuchtungen mit FL-Lampen

4.10.2 Laufender Unterhalt

Bei Beleuchtungen mit Leuchtstofflampen sind Unterhaltsmassnahmen erforderlich, um die Beleuchtungsqualität auf einem einheitlichen Qualitätsniveau zu halten. Insbesondere bei T12-Lampen bewirkt das Auswechseln der (u.U. noch funktionstüchtigen Lampen) eine erhöhte Beleuchtungsstärke, denn die Leuchtstofflampen verlieren im Lauf ihrer Lebensdauer an Effizienz, besonders die älteren Generationen (T8 und T12-Lampen). Die Lebensdauer beträgt zwar 8000 – 10000 h, die Lampeneffizienz nimmt aber bereits vorher markant ab. Ausgehend von 72 lm/W bei T12-Lampen im Neuzustand geht die Lampeneffizienz nach 5000 h auf 95% und nach 10000 h auf 75% zurück. Bei den neueren T8-Lampen geht die Lampeneffizienz weit weniger stark zurück, besonders bei Verwendung von Warmstart-EVG. Ausgehend von ca. 95 lm/W. beträgt der Wert nach 5'000 h 99%, nach 10'000 h 98% und nach 15'000 95% davon. Bei diesem Lampentyp ist entsprechend v.a. das Reinigen der Leuchten und Lampen eine wichtige Unterhaltsmassnahme. Der laufende Unterhalt ermöglicht also v.a. mehr nutzbares Licht bei gleich bleibendem Energiebedarf. Bei gewissen Konstellationen kann eine Überprüfung der erzielten Beleuchtungsstärke mit den Erfordernissen aufgrund der Nutzung eine Reduktion des Energiebedarfs ermöglichen (indem z.B. bei dreiflammigen Leuchten nur noch zwei statt drei Lampen eingesetzt werden oder bei zweiflammigen nur noch eine Lampe, mindestens bei einem Teil der Leuchten). Die Kosten des laufenden Unterhalts setzen sich zusammen aus Material- und Arbeitskosten. Bei zweiflammigen Leuchten betragen die Materialkosten je nach Bezugsmenge zwischen 14 und 20 CHF/Leuchte (siehe Tabelle 69)

	T12	Mittlere Generation: T8		Neuste Generation: T5	
Lampenleistung	2*40 W	2*36 W mit KVG / VVG	2*36 W mit EVG	2 * 28 (1)	54 (2)
Kosten Lampe (CHF)		2*6.5	2*6.5	2*7	8
Kosten Starter (CHF)		2*1	-	-	-
Kosten VG (CHF)		2* (30-40)[MJ56]	2*(60-70)	80-90 (3)	60-70
(1) high efficiency (2) high output (3) Zwillings-EVG					

Tabelle 69 Typische Kostenkennwerte bzw. Richtpreise von Lampen und Vorschaltgeräten (VG)

Die Arbeitskosten für Lampenersatz und Reinigung sind von der Konstellation und von der Betrachtungsweise der Entscheidenden abhängig:

- **Unterhalt 1:** Es wird kein Unterhalt betrieben oder die Arbeiten „nebenbei" oder unter Ausnutzung von temporär freien Personalkapazitäten erledigt. In diesen Fällen werden die Kosten des laufenden Unterhalts von den Unternehmen möglicherweise als sehr gering wahrgenommen. Obwohl das Vorgehen von spezialisierten Beleuchtungsunternehmen und Planern nicht empfohlen wird, trägt es zur Erklärung bei, warum weitergehende Massnahmen (wie komplette Beleuchtungserneuerungen) nicht ergriffen werden, denn die Wirtschaftlichkeit schneidet rein aus methodischen Gründen schlechter ab wenn beim Unterhalt nicht Vollkosten veranschlagt werden (wie beim Unterhalt 2).
- **Unterhalt 2:** Zu empfehlen ist aus lichttechnischen Gesichtspunkten jedoch ein Gruppenersatz, indem pro Raum oder pro Stockwerk etc. alle Lampen ersetzt werden. Dies bietet eine gleichmässige Leuchtdichteverteilung und ermöglicht eine Kontrolle der Lampenwechselaktivitäten. In diesem Fall sind für den Lampenwechsel Vollkosten einzusetzen. Die Opportunitätskosten des betriebseigenen Personals oder bei Vergabe an Drittfirmen (spezialisierte Gebäudeunterhalts- oder Facility Management-Firmen) betragen die Kosten 10 bis 20 CHF/Leuchte für den Lampenwechsel und 10 bis 30 CHF/Leuchte für die Reinigung, je nach Zugänglichkeit und Verschmutzung[MJ60].

In Abbildung 60 sind die resultierenden Unterhaltskosten pro Leuchte über eine Betrachtungsdauer von 16'000 h dargestellt (dieser Zeitraum entspricht ungefähr dem kleinsten gemeinsamen Vielfachen der Lebensdauer der VG bzw. 8 bis 16 Jahre Betriebszeit, je nach Jahresvolllaststunden).

	T12	Mittlere Generation: T8		Neuste Generation: T5	
Lampenleistung	2*40 W	2*36 W mit KVG / VVG	2*36 W mit EVG	2 * 28 (1)	54 (2)
Kosten total ohne Erneuerung des Vorschaltgeräts (CHF)		30 (4) 60 (5)	13 (4) 28 (5)	14 (4) 29 (5)(	16 (4) 31 (5)
Kosten total inkl. Erneuerung des Vorschaltgeräts (CHF)		90-110 (4) 120-140 (5)	133-153 (4) 148-168 (5)	94-104 (4) 109-119 (5)(	76-86 (4) 91-101 (5)

(1) high efficiency (2) high output (3) Zwillings-EVG
(4) ohne Arbeitskosten bei Lampen/Starter-Wechsel
(5) inkl. Arbeitskosten bei Lampen/Starter-Wechsel 15 CHF/Leuchte

Tabelle 70 Resultierende Unterhaltskosten für den Wechsel von Lampen und Vorschaltgeräten (VG) über eine Betrachtungsdauer von 16'000 h

4.10.3 Sofortmassnahmen

Im Beleuchtungsbereich besteht die Möglichkeit, ausserhalb der Instandsetzungs- oder Erneuerungszyklen Sofortmassnahmen zu ergreifen: Lampenersatz (effizientere Lampen), VG-Ersatz (meistens inkl. Lampe) oder Leuchten-Umbau mit EVG-Adaptern und Reflektoren. Sofortmassnahmen sind aus Sicht der Energieeffizienz und wegen der relativ geringen Eingriffstiefe attraktiv. Lichttechnisch führen sie jedoch teilweise zu unbefriedigenden Lösungen. Weil die Leuchtengeometrie der bestehenden Leuchten nicht zu geringeren Durchmessern der neuen Leuchtmittel (Lampen) passt und aufgrund der höheren Leuchtdichte besteht erhöhtes Blendrisiko. Zudem ist das thermische Verhalten der alten Leuchte nicht auf den Lampentyp abgestimmt, was unter Umständen zu einer Einbusse der Lampeneffizienz führen kann (insbesondere die neuen T5 haben eine nicht ganz vernachlässigbare Temperaturabhängig). Der Anwendungsbereich von einigen Sofortmassnahmen ist also eingeschränkt: Leuchten mit opaler Abdeckung, Zonen mit geringen lichttechnischen Anforderungen (z.B. Verkehrsflächen). Die nachfolgenden Ausführungen sind also unter Berücksichtigung dieser Vorbehalte zu betrachten.

Einsatz effizienterer Lampen: Sollen T12-Lampen durch (effizientere) T8-Lampen ersetzt werden, sind aufgrund des unterschiedlichen Durchmessers neue Fassungen erforderlich. Dies bedingt eine Umverdrahtung, was als relativ aufwändig erachtet wird. Bei Leuchten mit KVG können T8 nicht ohne einen Wechsel des Vorschaltgeräts durch T5 ersetzt werden (siehe unten). Bei Leuchten mit T8 und EVG wäre bei einem Ersatz mit T5-Lampen nur eine sehr geringe Verbesserung zu erzielen (siehe Tabelle 65) und zudem stimmen die Längen der beiden Lampentypen nicht überein, was weitere Massnahmen erforderlich machen würde. Der Ersatz von T8 mit EVG mit T5 mit EVG wird deshalb nicht weiter betrachtet.

Einsatz effizienterer Vorschaltgeräte (inkl. Lampen): Eine grundsätzlich mögliche Maßnahme bei vorhandenen Leuchten mit konventionellem Vorschaltgeräten (KVG) besteht in einem Ersatz der Vorschaltgeräte allein oder der Vorschaltgeräte und Lampen zusammen. Dabei werden die Leuchten umgerüstet mit dem Ziel, die bestehenden KVG und Starter mit effizienteren Vorschaltgeräten (EVG, evtl. VVG) und Lampen zu ersetzen. Ein KVG kann im Prinzip ohne Eingriff in die Elektrik durch ein neues, effizienteres KVG oder allenfalls ein VVG ersetzt werden (da der Energieeffizienzgewinn im Vergleich zu einem Ersatz mit EVG relativ gering ist und auch die übrigen Vorteile des EVG nicht zum Zuge kommen, ist diese Massnahme in der Praxis von geringer Bedeutung). Der Ersatz eines KVG (oder VVG) durch ein EVG ist aufwändiger, denn dies erfordert in der Regel ein Umbauen der Leuchte. Es ist

mit Kosten von 120 bis 140 CHF pro zweiflammige Leuchte zu rechnen. Alternativ dazu ist in gewissen Situationen auch die Verwendung eines Adapters möglich, siehe Kasten. Beim Ersatz KVG durch EVG ist auch ein Wechsel der Leuchtmittel erforderlich oder angezeigt (theoretisch könnten zwar T8-Lampen weiterverwendet werden). Im Allgemeinen ist der Einsatz effizienterer Vorschaltgeräte und/oder Lampen im Gebäudebestand also aus technischen Gründen mit einem Umrüsten der Leuchten oder mit einem Leuchtenwechsel verbunden.

Im Neubaufall besteht „naturgemäss" ein grösserer Handlungsspielraum. In der Schweiz kommen im allgemeinen Leuchten mit EVG zum Einsatz (in den Bereichen, in denen FL-Lampen zur Anwendung kommen), denn mit den EVG sind substanzielle qualitative Vorteile verbunden (flackerfreies Licht, längere Lebensdauer des Leuchtmittels, besonders bei Warmstart-EVG). Bei den EVG sind zudem dimmfähige Versionen erhältlich. Dimmfähige EVG und Warmstart-EVG bieten die Voraussetzung, die Volllaststunden der Beleuchtung zu reduzieren, ohne wesentliche Nachteile in Kauf nehmen zu müssen, wie dies bei den KVG und den alten T12-Lampen der Fall war (insbesondere verkürzte Lebensdauer).

Effizienzsteigerung der Leuchten durch Anpassungsarbeiten: Um die Leuchteneffizienz zu erhöhen, werden die Leuchten mit EVG-Adaptoren ergänzt (Überwindung des Längenunterschieds, wobei das alte Vorschaltgerät bei einigen Adaptertypen nicht entfernt wird) und mit neuen Lampen und evtl.[mj63]aufsteckbaren Reflektoren versehen. Damit lassen sich manche ältere Beleuchtungsanlagen mit relativ geringer Eingriffstiefe erneuern. Aus beleuchtungstechnischen Gesichtspunkten kommen jedoch nicht alle bestehenden Beleuchtungen in Frage (siehe auch Nipkow 2004b). Am ehesten sind es ältere Decken- oder Pendelleuchten ohne Reflektoren oder solche mit dunklen Reflektoren und/oder ältere Leuchten mit Abdeckungen (z.B. aus Plexiglas). Erhältliche Reflektoren passen in die meisten älteren Leuchten (Rasterleuchten, freistrahlende Industrieleuchten oder die für Klassenzimmer typischen Anbauleuchten mit Prismenwanne oder opaler, z.B. weißer Wanne). Weniger geeignet sind offene Leuchten oder solche mit Rastern, sofern diese nicht ersetzt werden können (Geometrie von neuer Lampe und altem Raster stimmen nicht mehr überein), in Räumen mit erhöhter Anforderung (Büroarbeitsplätze, Schulen, Verkaufsflächen etc.). Das Einhalten der Normen bzgl. Entblendung ist in jedem Einzelfall sind zu prüfen. Mittels aufsteckbarem Reflektor T5-Leuchtstofflampe inkl. EVG-Adapter kann die Lichtausbeute älterer Leuchten (mit T8- oder T12-Lampen mit konventionellen Vorschaltgeräten) um 25% bis 40% erhöht werden. Vergleichsbasis sind ältere Leuchten ohne Reflektoren oder mit dunklen Reflektoren und/oder ältere Leuchten mit Abdeckungen (z.B. aus Plexiglas).

Die Verwendung von EVG-Adaptern, aufsteckbaren Reflektoren und von Leuchten-Umrüstungen wird von den involvierten Branchen (Lampen- und Leuchtenanbieter, Beleuchtungsplaner, Elektroplaner, Energieberatungsunternehmen, grosse Anwender etc.) kontrovers beurteilt (siehe auch Nipkow 2004b). Unter anderem wird in Frage gestellt

- ob die aktuell gültigen Entblendungsnormen eingehalten werden können, v.a. in Räumen mit höheren Anforderungen (veränderte geometrische Verhältnisse, zusätzliche Blendrisiken aufgrund der höheren Leuchtdichte der neuen Lampen (Cd/m^2), was zu erhöhter Blendwirkung führen kann: Direktblendung durch die Lampe oder Reflexblendung, z.B. durch den Bildschirm oder andere stark reflektierende Oberflächen).
- ob den weiteren beleuchtungstechnischen Gesichtspunkten genügend Rechnung getragen werden kann (u.U. zu wenig Indirektanteil bei halboffenen Pendelleuchten aufgrund des Reflektors, was zum so genannten Höhleneffekt führen kann).
- ob die Lampen in der optimalen Betriebstemperatur betrieben werden können
- ob die elektrotechnischen Normen eingehalten werden können (elektromagnetische Verträglichkeit, z.B. unerwünschtes Auftreten von Oberwellen, Kompatibilität mit bestehenden Vorschaltgeräten, sofern diese nicht ersetzt werden)

- ob die EVG-Adapter eine genügende Qualität aufweisen, um die von den Lampenherstellern angegebene Lebensdauer zu erreichen

Die aufgeworfenen Fragen können in diesem Projekt nicht abschliessend geklärt werden. Im Einzelfall ist das Einhalten der Normen bzgl. Entblendung, Aspekte der Betriebstemperatur, Kompatibilität mit bestehenden Vorschaltgeräten etc. zu prüfen. Weitere Fragen zum Beispiel zur Lebensdauer der Lampen im Zusammenspiel mit den EVG-Adaptern sind zwischen EVG-Adaptor-Anbietern und der Lampenbranche zu klären (z.B. durch Zertifizierung).

Kosten: Wird nur ein Reflektor montiert (ohne EVG und neue Lampen), sind die Kosten aufgrund der einfachen Montage als Aufsteckreflektor ohne Arbeiten an der Elektrik sehr gering (rund 10 CHF pro Reflektor plus ein Montageaufwand ca. 10 bis 20 CHF pro Leuchte). Die Kosten inkl. EVG-Adaptorset betragen rund 60 bis 70 CHF pro Leuchte, zuzüglich eines Montageaufwandes von rund 20 CHF pro Leuchte). Bei 20 bis gut 30 Leuchten pro 100 m^2 zu beleuchtende Fläche ergeben sich damit Kosten von 15 bis 30 CHF/m^2.

4.10.4 Instandsetzung: Leuchtenumbau und Leuchten umrüsten

Das **Umrüsten der Leuchten** wird zwar von spezialisierten Lichtplanungs-, Elektroplanungs- und Leuchtenunternehmen teilweise kritisch beurteilt, u.a. weil wegen der im Vergleich zum Leuchtenersatz relativ hohen Kosten, welche als Ergebnis doch keine komplett erneuerte Beleuchtung haben. Beim Umrüsten der Leuchten können jedoch u.U. relativ teure Anpassungsarbeiten an der Decke vermieden werden (Gipser- und Malerarbeiten oder Arbeiten des „Deckenbauers"), weshalb auch diese Massnahme durchaus von Interesse ist. Die Kosten des Umrüstens werden von den befragten Unternehmen mit 120 bis 230 CHF/Leuchte angegeben. Umgerechnet sind dies 20 bis 50 CHF/m^2, je nach Anzahl Leuchten pro Raum bzw. pro m^2. Kostenstruktur: rund 80 bis 130 CHF/Leuchte entfallen auf das eigentliche Umrüsten der Leuchte inkl. Kosten für EVG und Lampen. Die übrigen Kostenanteile sind Arbeitskosten (Demontieren und Wiedermontieren der Leuchten oder Umrüsten on site). In diesen Kostenangaben sind Anpassungsarbeiten nicht enthalten. Die Kosten von Malerarbeiten und allfällig notwendige Ausbesserungen an der Decke betragen schätzungsweise 10 CHF/m^2. Bei heruntergehängten Decken beträgt der Montagemehraufwand 5 bis 10 CHF/m^2 (falls der spezialisierte Deckenbauer nicht beigezogen werden muss). Festzuhalten ist, dass die genannten Kosten für „bauseitige" Anpassungsarbeiten beim Leuchtenersatz mindestens so hoch wie beim Umrüsten der Leuchten sind.

Beim **Leuchtenumbau** wird das Innere der Leuchte soweit notwendig ausgebaut und durch neue Teile ersetzt (EVG, neue T5-Lampen, evtl. Reflektoren und Raster). Meistens ist dabei eine Demontage der Leuchten zweckmässig, was u.a. auch eine Nassreinigung ermöglicht. Die oben genannten Überlegungen bzgl. Blendung und Einschränkungen bzgl. Anwendbarkeit gelten teilweise ebenfalls beim umfassenden Umbau der Leuchte. Allerdings können u.U. die Raster ersetzt und an die neue Geometrie der schlankeren T5-Lampen angepasst werden.

Energetische Wirkung der Massnahmen: Bei zweiflammigen Leuchten kann die Anzahl Lampen teilweise von zwei auf eine Lampe pro Leuchte reduziert werden. Auch bei einflammigen Leuchten kann ein wahrnehmbarer Energieeffizienzgewinn erzielt werden, denn durch den nachträglichen Einsatz des neuen Reflektors erhöht sich die Lichtmenge (bei gleichem Strombedarf). Typischerweise kann eine 35 W T8-Lampe (45 W inkl. KVG) durch eine 28 W T5-Lampe (25 W inkl EVG) ersetzt werden oder eine 58 W T8 (70 W inkl. KVG Kl. C) durch eine 49 W T5-Lampe (54 W inkl. EVG) oder unter Umständen durch eine 35 W T5-Lampe (38.5 W inkl. EVG).

4.10.5 Leuchtenersatz

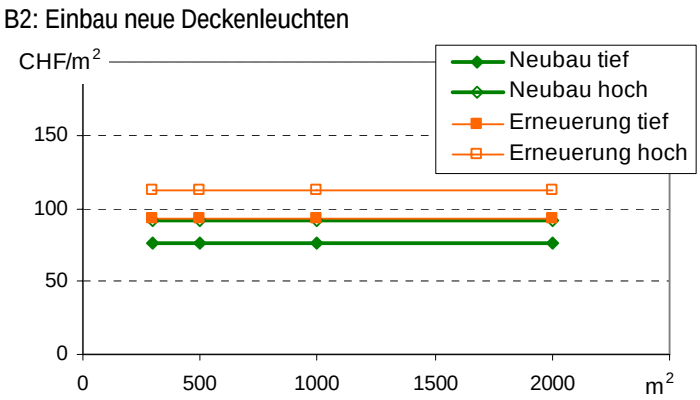
Leuchtenersatz bei Deckenbeleuchtungen: Mit dem Leuchtenersatz sind verschiedene Vorteile verbunden: zum einen kann die neuste Vorschalt- und Lampengeneration eingesetzt werden, wobei die Leuchten optimal auf diese abgestimmt sind (d.h. u.a., dass die Normen bzgl. Entblendung eingehalten werden können). Zum anderen kann die erneuerte Beleuchtung optimal auf den Raum und die Nutzungsbedürfnisse angepasst werden und in den meisten Fällen kann die installierte Leistung reduziert werden, u.U. mit dem Task Area Konzept[19]. Je nach bisheriger Anordnung kann u.U. auch eine Lichtreihe aufgehoben werden oder es muss je nach Nutzung nur ein Teil der Lampen im Raum eingeschaltet werden, um die geforderte Lichtstärke zu erhalten. Bei zweilampigen Leuchten kann die Anzahl Lampen teilweise von zwei auf eine Lampe pro Leuchte reduziert werden. Auch bei einlampigen Leuchten kann ein wahrnehmbarer Energieeffizienzgewinn erzielt werden, denn durch den nachträglichen Einsatz des neuen Reflektors erhöht sich die Lichtmenge (bei gleichem Strombedarf). Typischerweise kann eine 35 W T8-Lampe (45 W inkl. KVG) durch eine 28 W T5-Lampe (25 W inkl EVG) ersetzt werden oder eine 58 W T8 (70 W inkl. KVG Kl. C) durch eine 49 W T5-Lampe (54 W inkl. EVG) oder unter Umständen durch eine 35 W T5-Lampe (38.5 W inkl. EVG).

Nachteil des Leuchtenersatzes sind die höheren Initialkosten und der damit verbundene Finanzbedarf. Richtwerte für Kosten des **vollständigen Ersatzes bestehender Leuchten** sind in Abbildung 54 dargestellt (inkl. Präsenzsteuerung). Die entsprechenden Kosten ohne Präsenzsteuerung sind ca. 10 bis 12 CHF/m^2 geringer, d.h. die Kosten ohne Lichtregulierung betragen ca. 90 bis 100 CHF/m^2. Zum Vergleich sind in derselben Abbildung die Kosten des Einbaus von Deckenbeleuchtungen im Neubaufall aufgeführt (ebenfalls inkl. Präsenzsteuerung). Weitere Kostenangaben sind auch in Abbildung 59 im nächsten Unterkapitel zu finden.

Beim vollständigen Leuchtenersatz ist die Schnittstelle zum Raum zu beachten. Je nach Situation und Vorgehensweise ist mit höheren oder geringen „bauseiten" **Kosten für Anpassungsarbeiten** zu rechnen. Idealerweise sollte die Beleuchtungserneuerung gleichzeitig mit einer Innenrennovation vorgenommen werden, und zwar aus zwei Gründen. Zum einen hellt das Neustreichen der Wände und Decken (sofern es sich Gips- oder Betondecken und nicht z.B. um heruntergehängte Metalldecken handelt) den Raum auf, was den Bedarf an installierter Beleuchtungsleistung reduziert, insbesondere bei Leuchten mit Indirektanteil. Zum anderen entstehen für die Beleuchtungserneuerung nur geringe bauseitige Zusatzkosten, denn das Neustreichen der Decke ist der Raumrenovation zuzuordnen. Ist eine gleichzeitige Raumrenovation vorgesehen, fallen ca. 25 CHF/m^2 für das Neustreichen der Decke an. Ist eine Renovation z.B. aus betrieblichen oder zeitlichen Gründen nicht möglich oder angezeigt (z.B. weil die Decke bereits vor nicht langer Zeit gestrichen wurde), können die Leuchten u.U. dergestalt ersetzt, dass nur geringe Anpassungsarbeiten notwendig werden. Bei Anbauleuchten kann z.B. die Grundplatte u.U. wieder verwendet werden. Bei heruntergehängten Decken bietet sich eine Zwischenlösung zwischen Leuchten-Umrüsten und vollständigem Leuchten-Ersatz an: das Gehäuse (Blechbox innerhalb der Decke) wird belassen, während die übrigen Teile der Leuchte ersetzt werden. Auf den neusten Stand gebracht werden insbesondere die Elektrotechnik (EVG, Lampen) sowie die Lichttechnik (Raster, Reflektoren), wobei die beiden Bereiche aufeinander abgestimmt sind (Leuchtdichte und Durchmesser der Lampe mit der Lichttechnik). Die Kosten für diese Massnahme betragen insgesamt gut 50 CHF/m^2 bis 60 CHF/m^2 (falls der spezialisierte Deckenbauer nicht beigezogen werden muss). Bei den energetischen Kosten-Nutzenbetrachtungen gehen wir von geringen bis keinen bauseitigen Anpassungsarbeiten aus.

---

[19] Dieses ist Bestandteil der europäischen Normen und erlaubt, die Beleuchtung innerhalb der Räume nutzungsspezifisch zu konzipieren. Damit kann die Beleuchtungsstärke in Verkehrszonen z.B. eines Grossraumbüros im Vergleich zu den eigentlichen Arbeitsplätzen reduziert werden. Das Task Area Konzept kann auch im Neubaufall zur Anwendung kommen.



Komplette Montage neuer Deckenleuchten in abgehängte Decke oder als Direktmontage auf die Betondecke, inkl. Präsenzsteuerung.

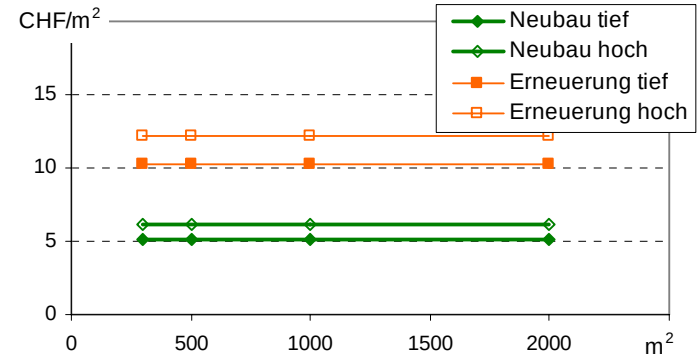
Abbildung 54 Spezifische Investitionskosten (CHF/m²) von Beleuchtungssystemen (Quelle Amstein+Walthert)

Regulierung, Licht-Management: Nebst dem Ansatz, die installierte Leistung der Beleuchtung mit möglichst effizienten Lampen, Vorschaltgeräten und Leuchten und einer guten Lichtplanung zu reduzieren, kann die Energieeffizienz von Beleuchtungen mit so genanntem Licht-Management erhöht werden. Licht-Management hat zum Ziel, die Beleuchtung möglichst bedarfsgerecht einzusetzen und mit der damit möglichen Reduktion der Volllaststunden den Elektrizitätsbedarf zu reduzieren. Dies gilt insbesondere auch für den Neubaubereich, wo die technischen Möglichkeiten der Reduktion der installierten Leistung bereits im Referenzfall relativ gut genutzt werden.

Durch die Entwicklung der elektronischen Vorschaltgeräte (EVG) wurde das Regulieren von Beleuchtungen mit Leuchtstofflampen erleichtert: Mit den EVG werden die Lampen weniger belastend betrieben, insbesondere beim Einschalten der Beleuchtung (Warmstart EVG). Deshalb wird die Lebensdauer der Lampen auch durch häufiges Ein- und Ausschalten nicht wesentlich verkürzt. Zudem ermöglichen dimmbare EVG das Dimmen der Beleuchtung, wobei der Zusammenhang zwischen reduzierter Beleuchtungsstärke und elektrischer Leistungsaufnahme im oberen Dimmlevel relativ konstant verläuft. Es wird zwischen präsenzabhängiger und tageslichtabhängiger Regelung unterschieden, wobei die beiden Regelungsarten auch kombiniert werden können. Grundsätzlich kommen folgende Regelstrategien zur Anwendung. 1. Präsenzsteuerung: Präsenzabhängiges Aus- und Einschalten (Präsenzzeit min. 15-20min sonst geht es auf die Lebensdauer der Lampe) unabhängig von der tageslichtbedingten Helligkeit im Raum), 2. Präsenzsteuerung kombiniert mit tageslichtabhängigem Aus- und Einschalten, 3. Präsenzsteuerung mit tageslichtabhängigem Ausschalten und manuellem Einschalten, 4. Präsenzsteuerung mit tageslichtabhängigem Dimmen (Konstantlichtregelung). Denkbar ist auch tageslichtabhängiges Dimmen ohne Präsenzsteuerung. Um zu verhindern, dass bei dieser Variante die Beleuchtung beim Eindunkeln eingeschaltet wird und evtl. die ganze Nacht in Betrieb bleibt, obwohl niemand im Raum ist, ist diese Variante entweder mit manuellem Einschalten und/oder programmierten Ausschaltzeiten zu kombinieren. Die Regelungsstrategien können entweder leuchten-, leuchtenstrang- oder raumspezifisch realisiert werden. Bei der leuchtenspezifischen Variante wird jede Lampe mit Sensor ausgestattet. Dazu sind keine zusätzlichen Verdrahtungen notwendig (ein Übersteuern der geregelten Ausschaltung ist dann allerdings nicht möglich, was evtl. die Akzeptanz der Massnahme verringert), aber möglich. Bei der leuchtenstrang- oder raumspezifischen Variante decken ein oder mehrere Sensoren einen Teil des Raums oder den gesamten Raum ab, was u.U. kostengünstiger ist als ein Sensor pro Leuchte. Die verschiedenen Regelungsstrategien können teilweise mit bestehenden oder neuen Gebäudeleitsystemen kombiniert werden.

In Abbildung 55 dargestellt sind die Kosten der Nachrüstung bzw. Zusatzausrüstung bestehender bzw. neuer Beleuchtungsanlagen mit einer **Präsenzsteuerung**. Im Vergleich zum Neubau ist bei dieser Massnahme ein beträchtlicher Kostenunterschied festzustellen. Im Vergleich zu den Gesamtkosten der Beleuchtung sind die Zusatzkosten jedoch als gering zu bezeichnen (gut 10% im Gebäudebestand, wenn die Beleuchtung ohnehin erneuert wird bzw. gut 5% bei Deckenbeleuchtungen im Neubaufall).

Eine **tageslichtabhängige Regelung** ist im Vergleich zur reinen Präsenzsteuerung etwas anspruchsvoller, v.a. wenn die Regelung nicht an jeder einzelnen Leuchte vorgenommen wird, sondern mit einem oder mehreren Sensoren. Die Angaben der befragten Unternehmen differieren diesbezüglich allerdings relativ stark. Einige Unternehmen gehen nicht von Mehrkosten aus, weil die zum Einsatz kommenden Sensoren mit beiden Funktionen ausgestattet sind und der Einregulieraufwand nicht viel höher sei.



Neubau: Mehrkosten von Präsenzsteuerungen bei Beleuchtungsanlagen inkl. Mehrkosten bei EVG (dimmbar), Präsenzmelder, Verkabelung, Einregulierung etc.

Gebäudebestand: Nachrüstung bestehender Beleuchtungsanlagen mit einer Präsenzsteuerung inkl. notwendigen Anpassungen an Vorschaltgeräten, etc.

Abbildung 55 Spezifische Investitionskosten (CHF/m²) von Beleuchtungsregulierungen (Quelle Amstein+Walthert)

Stehleuchten: Sowohl im Neubaubereich wie auch bei der Erneuerung bestehender Beleuchtungen bieten Stehleuchten insbesondere im Bürobereich die Möglichkeit, die oben genannten Effizienzmassnahmen als Gesamtheit zu realisieren. Da Stehleuchten meist einen beachtlichen Anteil Indirektlicht aufweisen, stellt sich die Anforderung, dass die Räume nicht allzu hoch sind und dass Decken und Wände möglichst hell sein sollten. Bei zu hohen Räumen und bei dunklen, d.h. wenig reflektierenden Flächen reduziert sich die Beleuchtungseffizienz stark (der so genannte Raumwirkungsgrad geht zurück, siehe z.B. Entwurf SIA 380/4 und die entsprechenden Berechnungstools, vgl. Gasser 2006).

Bei den Stehleuchten ist zwischen den einfachen Standardleuchten ohne Regelung (oder mit manueller Regelung) und ohne spezielle Energieeffizienz und energieeffizienteren Varianten mit Präsenzmeldern und Tageslichtsensoren und geringen Standby-Verlusten zu unterscheiden. Letztere werden häufig mit dem Begriff „Minergie-Leuchten" bezeichnet (obwohl der Verein Minergie keine solche definiert hat, Stand Anfang 2006). Bei Stehleuchten mit Lichtregelung besteht die Regelung meistens in einer kombinierten Präsenz- und tageslichtabhängigen Konstantlichtregelung.

Die Richtpreise (aus Sicht der Unternehmen oder Lieferanten) bzw. die Kostenrichtwerte (aus Sicht der Bauträgerschaft) bewegen sich bei Stehleuchten innerhalb einer besonders hohen Bandbreite. Die starke Streuung ist durch eine Vielzahl verschiedener Faktoren bedingt. Dazu gehören u.a. die „beleuchtungsspezifische Performance" (Entblendung, Direktlichtanteil), die Energie-Effizienz (Leuchtenwirkungsgrad, Direktlichtanteil, Regelung), der Bedienkomfort, das Design (Ästhetik, Materialisierung)

sowie der „brand“ der Leuchte bzw. des Beleuchtungsunternehmens und die damit verbundenen Qualitätsdienstleistungen (Beratung, Planung etc.). Besonders anspruchsvoll und damit kostenintensiv ist laut Experten die Kombination eines gewissen Direktlichtanteils mit einem hohen Leuchtenwirkungsgrad. Stark preisbeeinflussend ist des weiteren die Preis- und Rabattpolitik der Unternehmen. Preisrabatte werden in sehr unterschiedlicher Höhe gewährt. Eher geringe Rabatte sind zu erwarten, wenn nur wenige Leuchten an einen Besteller geliefert werden können und wenn zudem kein weiterer künftiger Bedarf an Stehleuchten zu erwarten ist. In solchen Fällen beträgt der Rabatt nur einige wenige Prozent. Bei Bestellmengen von einigen duzend bis hundert Stück von einem Besteller mit grossem Gebäudebestand (Öffentliche Verwaltung, grosse Unternehmen) oder künftigem Absatzpotenzial kann der Rabatt jedoch bis zu 60% betragen. Aufgrund des hohen Anteils der Leuchte an der Kostenstruktur von Beleuchtungen, welche mit Stehleuchten realisiert werden, hat diese Rabattpolitik grosse Auswirkungen auf das Total der Kostenrichtwerte.

In Abbildung 56 sind Richtwerte von Standardstehleuchten (ohne Regelung) für Gebäudebestand und Neubau dargestellt, und zwar umgerechnet auf spezifische Werte pro m^2 Bürofläche (Annahme: 12 m^2 pro Stehleuchte). Beim Gebäudebestand sind in den Werten die Kosten für Demontage und Entsorgung der bestehenden Deckenbeleuchtung **nicht** mit inbegriffen.

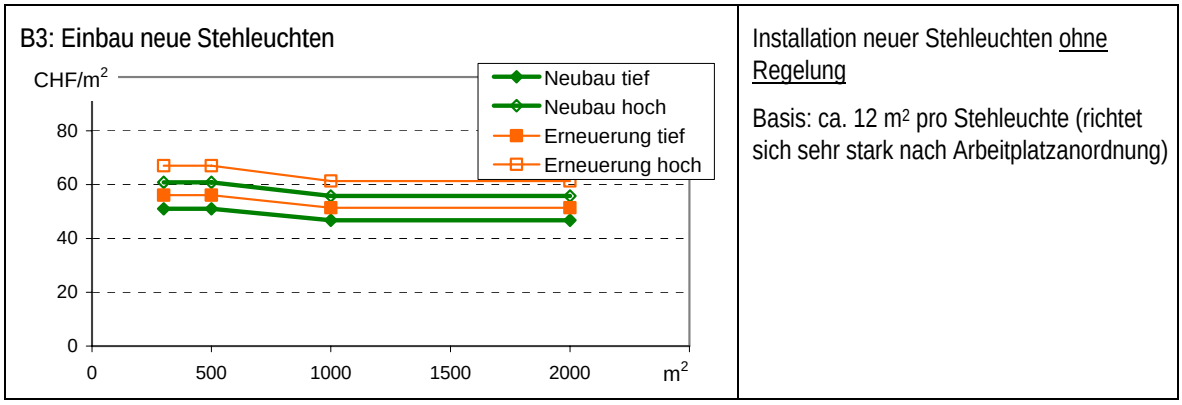


Abbildung 56 Spezifische Investitionskosten (CHF/m^2) von Bürobeleuchtungen mittels Stehleuchten (Quelle Amstein+Walthert)

In Abbildung 57 sind die Kosten (aus Sicht des Gebäudenutzenden) von energieeffizienten Stehleuchten gemäss Zusammenstellung von „top ten“ als Funktion des jährlichen Energiebedarfs dargestellt Zum Vergleich ebenfalls dargestellt ist der ungefähre Preis von Standardleuchten (umgerechnet aus Abbildung 56). Bei den Preisangaben der website topten.ch handelt es sich um Brutto-Richtpreise. Bei der hier vorliegenden Betrachtung wurde von einem mittleren Rabatt von 33% ausgegangen. Die Mehrkosten einer energieeffizienten Leuchte mit Direktlichtanteil (und inkl. Kombinierter Präsenz- und tageslichtabhängigen Konstantlichtregelung, geringen Standby-Verlusten) betragen demnach zwischen 100 bis 700 CHF/Leuchte). Diese Mehrkosten sind jedoch nicht der Energie-Effizienz allein zuzuordnen, denn die topten-Leuchten weisen in der Regel eine überdurchschnittliche Qualität auf (z.B. Direktlichtanteil).

Mittels eines hedonischen Preismodells könnte die Preisdifferenzierung den einzelnen Qualitätsmerkmalen zugeordnet werden (aus Tabelle 99) (im Anhang sind die verfügbaren Qualitätsmerkmale ersichtlich). Damit könnten der implizite Preis der Energie-Effizienz bestimmt und darauf aufbauend Kosten-Nutzen-Rechnungen erstellt werden. Aufgrund der geringen Anzahl an verfügbaren Daten ist ein solcher Ansatz mit den vorliegenden Datengrundlagen leider nicht möglich (eine Herausforderung wäre zudem die Charakterisierung der Attribute wie Design und Ästhetik).

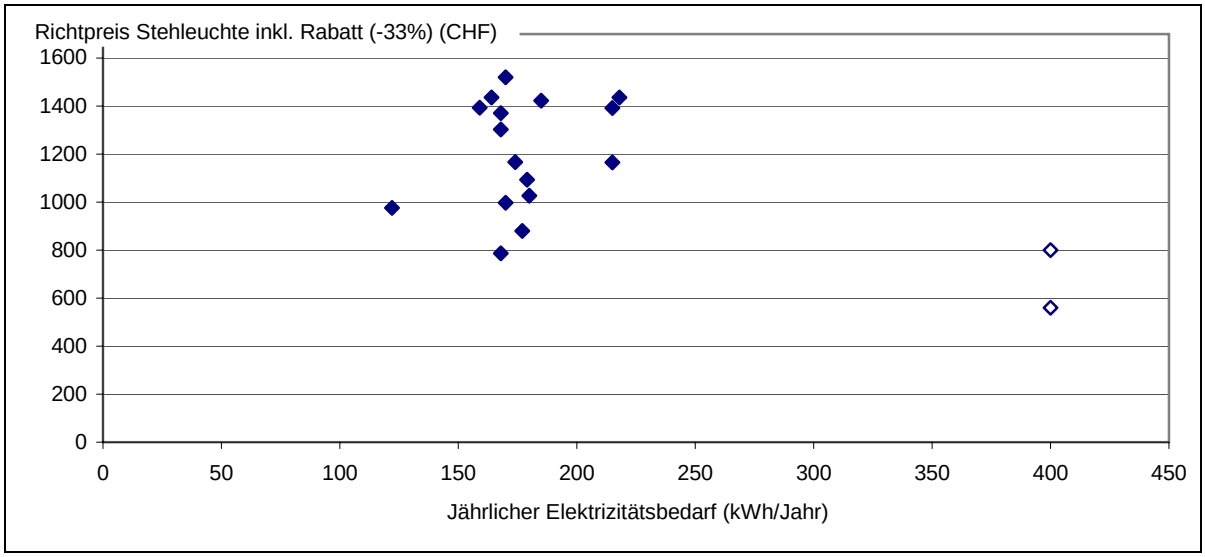


Abbildung 57 Spezifische Investitionskosten (CHF/m²) von Stehleuchten (Quellen: www.topten.ch, Stand 17.11.2005, siehe auch Tabelle 99, Annahme Rabatt (-33%) CEPE; sowie Abbildung 56), Darstellung CEPE

Unter Umständen kann eine Beleuchtungsvariante mit Stehleuchten inkl. Präsenzsteuerung und tageslichtabhängiger Konstantlichtregelung mit geringeren Investitionskosten realisiert werden als eine Deckenbeleuchtung ohne jede Regelung und mit höherer installierter Leistung. Die Energie-Effizienz der Stehleuchten wäre in diesem Fall sogar mit negativen Grenzkosten verbunden (trotz höherer Energieeffizienz, d.h. tieferen Energiekosten, sind die Kapitalkosten geringer). Ob eine Beleuchtung wirtschaftlicher und energie-effizienter mit Stehleuchten oder mit Deckenbeleuchtung zu realisieren ist, lässt sich nicht allein aufgrund der obenstehenden Richtwerte beantworten. In diesen Entscheid mit einzubeziehen sind die Aspekte der Nutzung, der zu erzielenden Lichtqualität (auch bzgl. Arbeitsplatzergonomie), der Abgrenzung (zwischen Innenausbau seitens Gebäudeinvestor und Mieterausbau) und letztlich auch der Architektur und Ästhetik. Die Beleuchtung hat während der letzten Jahre innerhalb der Architektur einen immer höheren Stellenwert erfahren. Die Mehrkosten für Namen, Materialien und Design können ein Mehrfaches der Mehrkosten für Präsenzsteuerung und tageslichtabhängiger Regelung betragen, wobei erstere allerdings nicht der Energie-Effizienz zuzuordnen sind.

4.10.6 Beleuchtungen mit Leuchtstofflampen: Erhebung von Kosten und technischen Kennwerten im Vergleich

Kosten-Nutzen-Betrachtungen erfordern eine relativ hohe Präzision bei Kostendaten und technischen Kennwerten, u.a. weil es sich meistens um Differenzbetrachtungen handelt. Bei Beleuchtungen können die Randbedingungen (Ausgangssituation, Raumkonfiguration inkl. geometrische Verhältnisse und Materialien, Nutzungsanforderungen etc.) einen relativ hohen Einfluss auf die Kosten und technischen Kennwerte ausüben. Auch bei der Realisierung der Beleuchtungen bei konkreten Situationen besteht ein mehr oder weniger grosser Spielraum (Art und Anordnung der Leuchten, ein- oder mehrflammige Leuchten etc.).

Aus diesen Gründen wurden einige typische Fälle von Ausgangssituationen und möglichen Massnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz konkretisiert mit dem Ziel, bei spezialisierten Lichtplanungs-, Elektroplanungs- und Leuchtenunternehmen Kostendaten und dazu passende technische Kennwerte zu erheben. Zu diesem Zweck wurde in Zusammenarbeit mit St. Gasser (S.A.F.E.) je ein Erhebungsraster konzipiert (siehe Kap. 9.6.3, S. 303 im Anhang).

Die betrachteten Situationen sind

Fall 1: Neubau, Nutzung Büro (Gruppenbüro) oder Schulen, Fläche 80 m^2 pro Raum, 7 m Raumtiefe

Fall 2: Gebäudebestand, alte Beleuchtung mit Deckenanbauleuchten mit opaler Abdeckung, Nutzung Büro oder Schulen

Fall 3: Gebäudebestand, Erneuerung bestehende Indirektbeleuchtung (mit Stehleuchten), Nutzung Büro

Die angefragten Unternehmen wurden gebeten, die entsprechenden Erhebungsraster mit Kostenkennwerten zu ergänzen und falls notwendig die vorgegebenen technischen Kennwerte anzupassen. Mit den angefragten Unternehmen wurde entweder vorgängig oder im Nachhinein ein intensives Gespräch geführt, um die Vergleichbarkeit zwischen den Angaben der verschiedenen Unternehmen sicherzustellen, denn ein Erhebungsraster in der hier vorliegenden Art bietet immer einen gewissen Interpretationsspielraum.

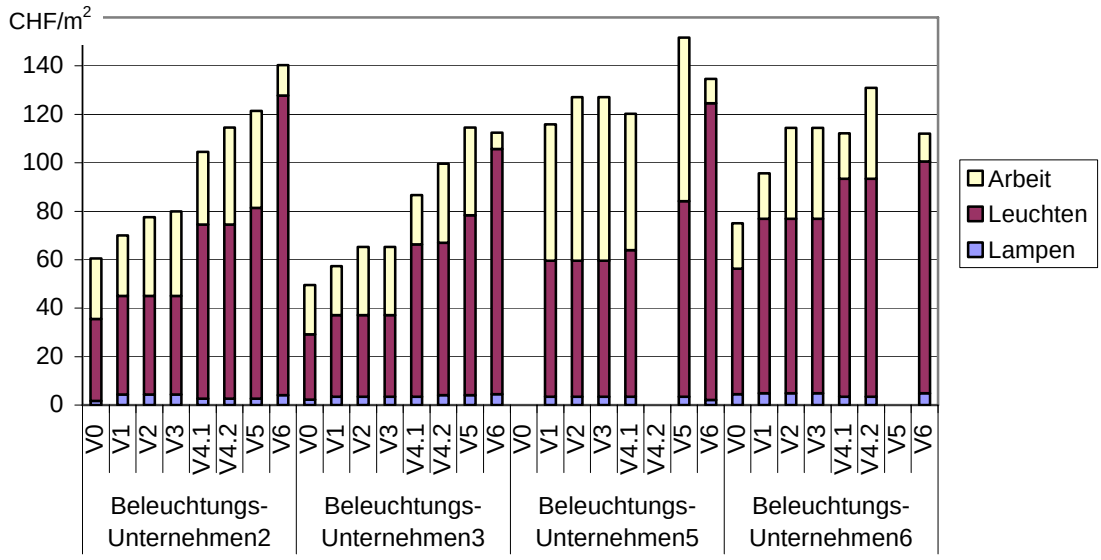
An dieser Stelle ist anzumerken, dass die beschriebenen Fälle bis zu einem gewissen Mass generalisiert und vereinfacht sind im Vergleich zu möglichen tatsächlich auftretenden Situationen. Zwischen Schulräumen und Gruppenbüro bestehen unterschiedliche spezifische Anforderungen (z.B. muss bei ersteren der Frontbereich separat ansteuerbar sein), aber der durch die Vereinfachung verursachte Einfluss auf die Kosten bzw. auf die v.a. interessierenden Kostendifferenzen zwischen verschiedenen Energie-Effizienzlösungen ist relativ gering. **Die gemachten Angaben der Unternehmen dürfen zwar nicht eins zu eins auf real existierende Fälle übertragen werden.** Die Darstellungen sind aber **doch geeignet, die Zusammenhänge zwischen Kosten und Nutzen (siehe Kap. 5.5) repräsentativ aufzuzeigen**. Denn bis zu einem gewissen Mass sind die Kostenangaben auf andere Raumgeometrien übertragbar, denn ein hoher Anteil der Kosten ist abhängig von der Anzahl Leuchten. Dies erlaubt eine Umrechnung über die Anzahl Leuchten (notwendige Anzahl im neuen Raum und hierbei angenommene Anzahl). Bei Lichtregelungen treten je nach Anwendung gewisse Fixkosten auf, falls diese eher raumbasiert und nicht leuchtenbasiert realisiert wird. Da prinzipiell beide Möglichkeiten anwendbar sind, kann im Einzelfall die jeweils kostengünstigere Lösung gewählt werden.

Fall 1, Neubau, Nutzung Büro oder Schulen, Fläche 80 m^2 pro Raum, 7 m Raumtiefe: Beim Neubau wurde von der Arbeitshypothese ausgegangen, dass bei einem standardmässigen Vorgehen üblicherweise relativ kostengünstige Leuchten mit zwar verlustarmen, aber konventionellen Vorschaltgeräten zur Anwendung kommen. Weiter wurde von der Hypothese ausgegangen, dass sich die Energieeffizienz durch effizientere Lampen und Vorschaltgeräte, teurere Leuchten mit höherem Wirkungsgrad und/oder Lichtmanagement steigern lässt. Die Erhebungen zeigten jedoch:

- Im Referenzfall kommen bei Neubau mit grosser Mehrheit nur noch elektronische Vorschaltgeräte und die effizienteste Lampengeneration zum Einsatz (T5)
- Die Unterscheidung zwischen kostengünstigen, aber wenig effizienten Leuchten und teureren, aber energie-effizienteren Leuchten ist nicht ohne weiteres möglich. Kostengünstige Leuchten können durchaus einen hohen Wirkungsgrad aufweisen und umgekehrt können auch relativ teure Leuchten einen geringen Wirkungsgrad aufweisen. Die Preise der Leuchten (und damit die Kosten für die Bauträgerschaften) werden nicht nur bzgl. Energieeffizienz differenziert, sondern auch und u.U. in verstärktem Mass bzgl. Blendung, Materialisierung und Design.

Die Ergebnisse der Erhebungen zum Neubaufall (Fall 1) sind in Abbildung 58 dargestellt. Zunächst fällt auf, dass bereits bei den kostengünstigen Leuchten grosse Unterschiede bestehen. Die angegebenen Kosten der Unternehmen 2 und 3 sind mit 120 bis 150 CHF/Leuchte markant tiefer als die übrigen Kostenangaben. Die nachträgliche Klärung ergab, dass die Unternehmen 2 und 3 bei den Varianten

V0 bis V3 von Leuchten ausgingen, welche den hohen Anforderungen an die Bildschirmtauglichkeit nicht genügen. Im günstigen Fall betragen die Kosten von Leuchten, die diesen Anforderungen genügen, rund 300 CHF/Leuchte.

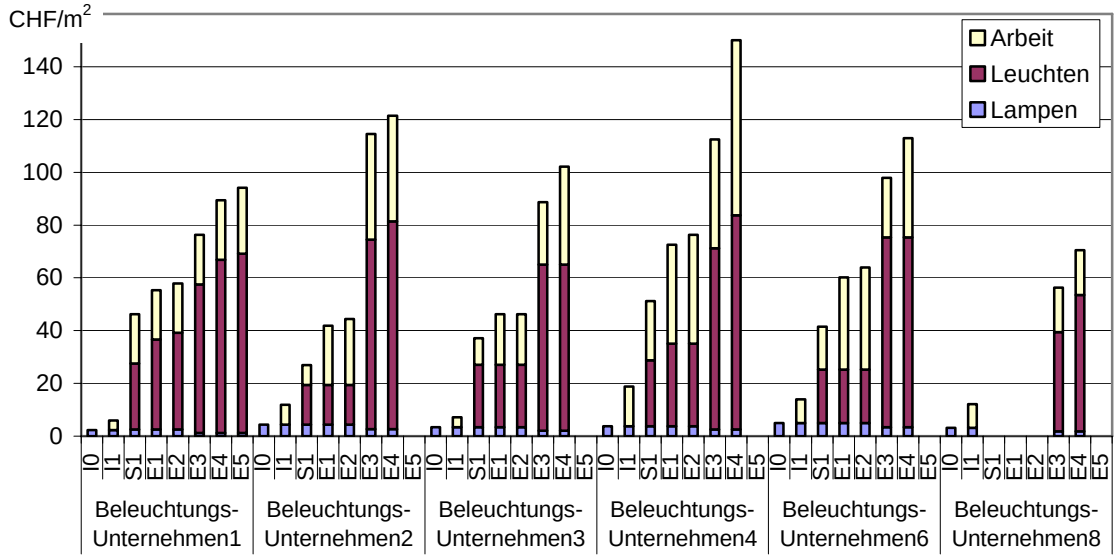


V0	Kostengünstige Pendel- oder Deckenleuchte mit VVG und T8-Leuchtstofflampen
V1	Wie V0, aber Leuchtstoffröhren 16 mm mit EVG statt Leuchtstoffröhren 26 mm
V2	Wie V1, aber zusätzlich mit Präsenzsteuerung
V3	Wie V2, aber zusätzlich mit Tageslichtsteuerung, (Ein-/Aus-Schaltung, kein Dimmen)
V4.1	Wie V1, aber energie-effizientere Leuchten
V4.2	Wie V4.1, aber energie-effizientere Leuchten inkl. Präsenzsteuerung, tageslicht-abhängiges Ausschalten
V5	Wie V4.2, jedoch mit Konstantlichtregelung (Dimmen) statt tageslicht-abhängiges Ausschalten
V6	„Minergie-Stehleuchten“ plus evtl. Decken-Grundbeleuchtung

Abbildung 58 Spezifische Investitionskosten (CHF/m²) von Beleuchtungen bei Büro- und Schul-Neubauten, Fallbeispiel Gruppenbüro oder Klassenzimmer (Quelle: Beleuchtungsunternehmen 2, 3, 5 und 6, Erhebung und Darstellung CEPE)

Die Mehrinvestitionskosten von kompletten Lichtregelungen betragen 17 bis rund 30 CHF/m² (gleiche Leuchten vorausgesetzt), siehe Abbildung 58. Die Mehrkosten werden durch die notwendige Dimmfähigkeit der EVG (nicht jedes EVG ist dimmfähig), die Sensoren (Präsenzmelder und Lichtsensoren), allfällige Steuerungen und den Mehraufwand bei der Montage verursacht (höherer Verkabelungsaufwand, Einregulierung der Beleuchtung etc.) Der schrittweise Anstieg der Kosten von Präsenzmeldern, tageslichtabhängigem Aus-Einschalten (oder nur Ausschalten) bis zur Konstantlichtregelung ist je nach befragtem Unternehmen unterschiedlich. Einige Unternehmen unterscheiden beispielsweise nicht zwischen Präsenzmeldern und tageslichtabhängigem Aus-Einschalten (bzw. beidem), da die meisten der auf dem Markt erhältlichen Sensoren mit beiden Funktionen ausgerüstet sind.

Fall 2, Erneuerung alte Beleuchtung (Deckenanbauleuchten mit Abdeckung) in Büro oder Schulen: In Abbildung 59 sind Kosten des Ist-Zustands einer bestehenden Deckenleuchte, des laufenden Unterhalts (Reinigung) und von Energieeffizienz-Massnahmen mit zunehmender Eingriffstiefe dargestellt (die technischen Kennwerte sind aus dem Erhebungsraster (Kap. 9.6.3 ersichtlich).



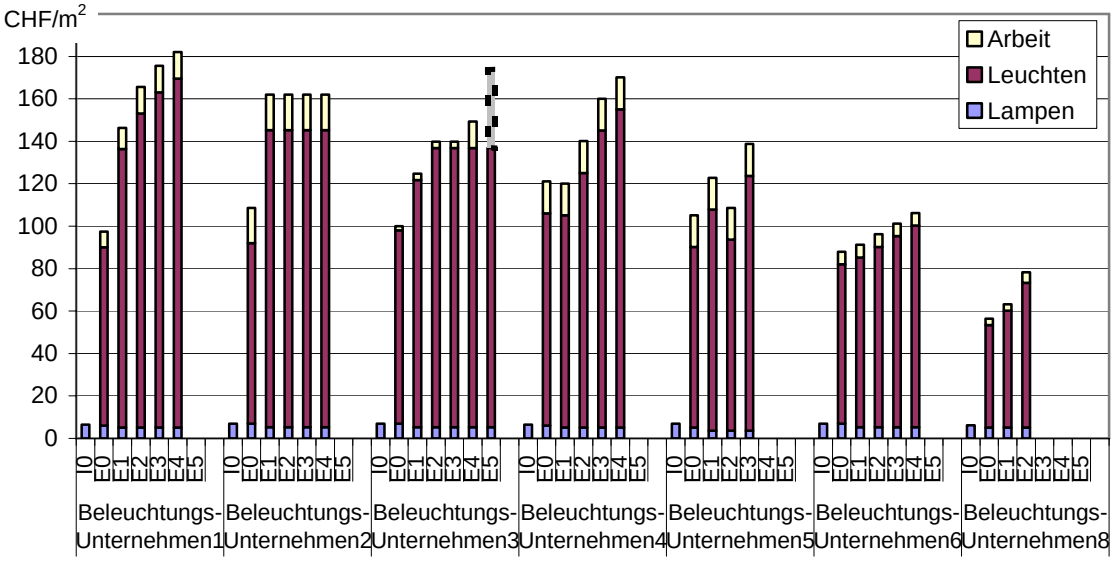
I0	Ist-Zustand: laufende Kosten für Lampenwechsel
I1	Instandhaltung: Leuchte reinigen (inkl. Lampenwechsel)
S1	Sofortmassnahme: Ersatz der Leuchtstoffröhren 26 mm durch 16 mm, entweder mit EVG-Adapter und aufsteckbarem Reflektor oder mittels Umbau / Umrüsten der Leuchten
E1	Wie S1, aber zusätzlich Installation einer Präsenzsteuerung
E2	Wie E1, aber zusätzlich Installation einer Tageslichtsteuerung (Ein-/Aus, kein Dimmen)
E3	Leuchtenersatz (ohne Lichtregelung)
E4	Leuchtenersatz inkl. Tageslicht- und Präsenzsteuerung
E5	Leuchtenersatz inkl. Tageslicht- und Präsenzsteuerung (inkl. Dimmen)

Abbildung 59 Spezifische Kosten (CHF/m²) von Beleuchtungen bei Instandhaltung und Erneuerung, Fallbeispiel Gruppenbüro oder Klassenzimmer (Quelle: Beleuchtungsunternehmen 1, 2, 3, 4, 6 und 8, Erhebung und Darstellung CEPE)

Bei allen Unternehmen gemeinsam ist der doch beachtliche Unterschied zwischen den Sofortmassnahmen (Umbau der Leuchten, ohne oder mit Nachrüsten von Lichtregelungen) und dem kompletten Ersatz der Leuchten (mit E3 bis E5 bezeichnet). In den meisten Fällen nehmen die Arbeitskosten einen substanziellen Anteil ein. Zur Interpretation: bei Unternehmen 8 handelt es sich um die Erneuerung einer in die heruntergehängte Decke integrierte Beleuchtung, wobei das Gehäuse nicht ersetzt wird. Kostenmässig kommt dies einem Teilersatz gleich, aber elektro- und lichttechnisch wird der neuste Stand der Technik erreicht.

Fall 3: Erneuerung bestehende Indirektbeleuchtung (Stehleuchten), Zweipersonenbüro (20 m²):

Abbildung 60 zeigt die Kosten von Erneuerungen bestehender Stehleuchten-Indirektbeleuchtungen. Beim Unternehmen 3 sind bei der Massnahme E5 bauliche Kosten für die Erneuerung der Decken eingerechnet. Beim Unternehmen 8 wird von nur einer Leuchte für die beiden Arbeitsplätze ausgegangen. Bedingung dafür ist eine entsprechende Anordnung der Arbeitsplätze (z.B. gegenüberstehend) sowie eine adäquate Leuchte (z.B. asymmetrisch für seitliche Aufstellbarkeit zwecks Vermeidung von Reflexblendung).

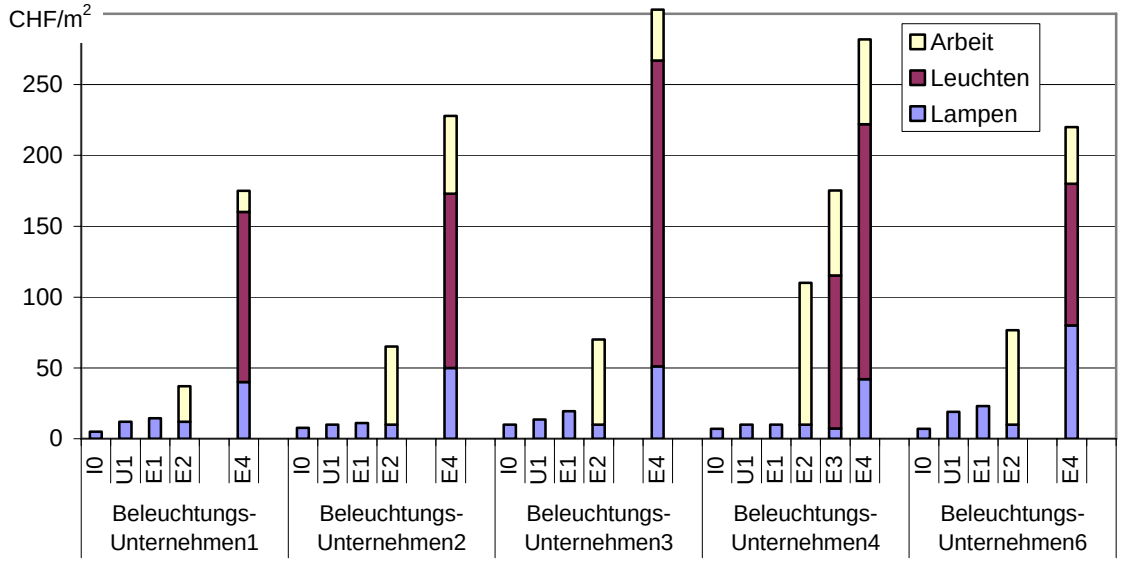


I0	Ist-Zustand
E0	Neue Leuchte „Standard“ (Indirektleuchte)
E1	Neue Leuchte direkt/indirekt
E2	Neue Leuchte direkt/indirekt inkl. Regelung
E3	Neue Leuchte direkt/indirekt inkl. Regelung und reduzierter Standby
E4	Neue Leuchte direkt/indirekt inkl. Regelung und Standby-Abschaltung
E5	Neue Leuchte (wie Erneuerung 4), zusätzlich Deckenerneuerung

Abbildung 60 Spezifische Kosten (CHF/m²) von Beleuchtungen bei Instandhaltung und Erneuerung, Fallbeispiel Zweierbüro, bestehende Indirektbeleuchtung mit Stehleuchten (Quelle: Beleuchtungsunternehmen 1, 2, 3, 4, 5, 6 und 8, Erhebung und Darstellung CEPE)

4.10.7 Detailhandel

Bei der Beleuchtung im Detailhandel wird zwischen flächenbezogener Beleuchtung und Akzentbeleuchtung unterschieden. Bei der flächenbezogenen Beleuchtung kommen ähnliche Techniken und Massnahmen zur Anwendung wie im Bürobereich, wobei aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen und Gegebenheiten selbstverständlich gewisse Unterschiede bestehen. Insbesondere die präsenz-, v.a. aber die tageslichtbasierte Steuerung haben im Detailhandel nur eine geringe oder keine Bedeutung. Lichtmanagement kann und wird teilweise eingesetzt für unterschiedliche Nutzungsphasen, wobei zwischen Gestellauffüllung, Reinigung und Verkauf unterschieden wird. Laut Aussagen der befragten Branchenvertreter ist die flächenbezogene Beleuchtung weitgehend auf dem neusten Stand der Technik, dies aufgrund der relativ kurzen Erneuerungszyklen (Verkaufsflächen werden alle zehn bis fünfzehn Jahre vollständig, d.h. inklusive der Beleuchtung, erneuert) und der hohen Anzahl Nutzungsstunden, welche die Wirtschaftlichkeit von effizienten Anwendungen sicher stellen. Ein Effizienzpotenzial besteht laut Aussagen der befragten Experten und Branchenvertreter im Bereich der Akzentbeleuchtung. Diese basiert häufig auf konventionellen Halogenbeleuchtungen, teilweise im Niedervoltbereich. Alternative Möglichkeiten waren lange mit Nachteilen verbunden. Mittlerweile bietet der Markt jedoch durchaus attraktive Lösungen an und weitere sind kurz vor der Markteinführung (z.B. Spots mit Halogenmetalldampflampen auch im kleinen Leistungsbereich von 20 W). Die Kosten (CHF/m²) von Akzent-Beleuchtungen im Detailhandel sind in Abbildung 61 dargestellt.



I0	Laufender Unterhalt: Halogenspots wechseln (Anzahl: 100), nur Lampenkosten
U1	Laufender Unterhalt: Halogenspots wechseln (Anzahl: 100), inkl. Lampen- und Arbeitskosten für Wechsel
E1	Ersatz der Standard-Halogen-Lampen durch IRC Halogenlampen (Anzahl: 100)
E2	Erneuerung der Niedervolthalogenbeleuchtung (Anzahl: 100)
E3	Leuchtenersatz: Neue Leuchten (Strahler) mit PL-Leuchtmitteln (Kompaktleuchtstofflampen), Anzahl: 50-60
E4	Leuchtenersatz: Spots mit Halogenmetalldampflampen 35 W oder 20 W, Anzahl: 50-60

Abbildung 61 Spezifische Kosten (CHF/m²) von Akzent-Beleuchtungen im Detailhandel bei Instandhaltung und Erneuerung (Quelle: Beleuchtungsunternehmen 1, 2, 3, 4 und 6, Erhebung CEPE)

4.11 Betriebsoptimierung (BO)

Die Energieeffizienz der gebäudetechnischen Anlagen ist wesentlich abhängig von der Betriebsweise und den technischen Einstellungen. Durch Betriebsoptimierung (BO) lassen sich wesentliche Energiepotenziale kostengünstig erschliessen. BO ist keine einmalige Angelegenheit, sondern eine Daueraufgabe. Selbst bei vielen Neuanlagen sind Potenziale vorhanden, wenn keine sorgfältige Inbetriebnahme statt gefunden hat. Die Verbesserung lassen sich auf drei Ebenen erzielen:

- Wärme (Wärmeerzeugung und Verteilung, Warmwasser, etc.)
- Elektrizität (Luftförderungen, Kältemaschinen, Beleuchtung, etc.)
- Wasser (Bedarfsreduktion, Befeuchtungssystem, etc.)

4.11.1 BO bei der Wärmeerzeugung- und verteilung

Die betriebliche Optimierung konventioneller Gas- und Ölkessel kann unter Beachtung physikalischer Grenzen (Kondensations- und Korrosionsgefahr) erhebliche Einsparungen bringen. Eine tiefere Kesselwassertemperatur reduziert die Bereitschaftsverluste während einer Betriebszeit von rund 5400 h/a bei Heizbetrieb, resp. 8760 h/a wenn im Sommer zusätzlich Warmwasser erzeugt wird. Die Kosten der BO-Massnahmen sind in Abbildung 62 dargestellt.

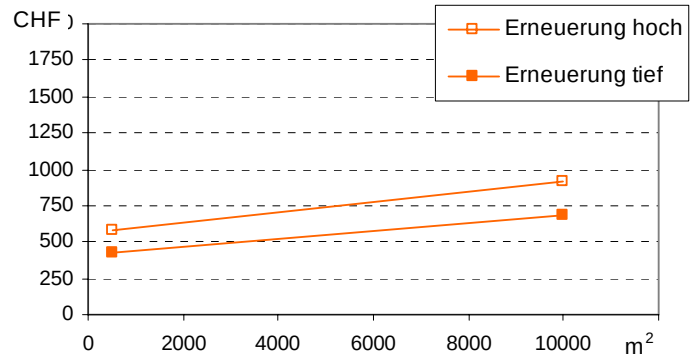
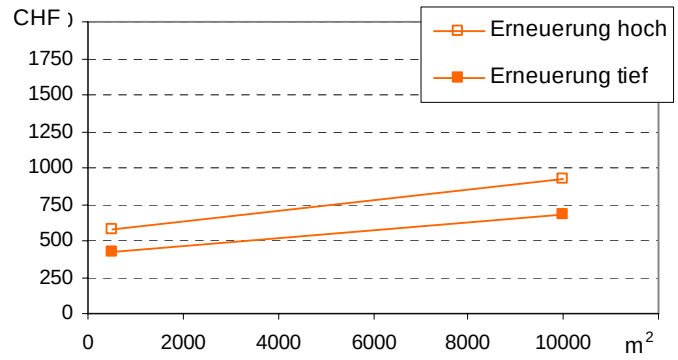
B01:Wärmeerzeugung (Reduktion Kesselwassertemperatur) 	Kesselwassertemperatur um 10 K reduzieren 2% E-Reduktion bezogen auf Jahres-Endenergie
B02: Wärmeerzeugung (Reduktion Rücklauftemperatur) 	Rücklauftemperatur in Kessel um 15 K reduzieren Bei kondensierenden Kesseln: 2%–5% E-Reduktion bezogen auf Endenergie bei tR < 45°C wenn vorher t Rl > 60°C

Abbildung 62 Kosten (CHF) von Betriebsoptimierungsmassnahmen bei Wärmeerzeugung und –verteilung (Quelle Amstein+Walthert)

4.11.2 BO bei der Warmwasseraufbereitung und -verteilung

Im Dienstleistungsbereich spielt der Warmwasserverbrauch in der Regel eine untergeordnete Rolle. In bestehenden Bauten finden sich jedoch immer noch hohe Sparpotenziale praktisch zum Nulltarif. Die Reduktion der Warmwassertemperatur auf ca. 55–60°C ist bei vielen Systemen ohne Komforteinbusse möglich. Die kontrovers diskutierte Frage der Legionellengefahr bei Wassertemperaturen unter 55°C ist insbesondere bei Risikogruppen (Schulen, Altersheime, Spitäler, etc.) zu beachten. Mit einer sogenannten "Legionellenschaltung" (Hochfahren der WW-Temperatur einmal pro Woche) kann diesem Problem jedoch begegnet werden ohne auf das energetische Sparpotenzial zu verzichten.

Der Einsatz von Durchflussbegrenzern auf den Ausflussarmaturen reduziert den Warmwasserverbrauch und damit auch den Energieaufwand für die Erwärmung. Bei bestehenden Installationen können die Armaturen mit sogenannten Sparsets nachgerüstet werden. Deren Einsatz wird allerdings von der Sanitär- und Wasserbranche kritisch beurteilt. Bei ungünstigen Druckverhältnissen können die Hygiene-Grundsätze des "Schweizerischen Vereins für Gas und Wasser" (SGW) nicht in allen Fällen eingehalten werden. Für den Neubaubereich bietet der Markt heute speziell Armaturen mit dem internationalen GEEF Label an, deren Vorteile unbestritten sind.

Um bei allen Zapfstellen zu jeder Zeit warmes Wasser zapfen zu können, werden sogenannte Zirkulationssysteme eingebaut, sofern eine zentrale Warmwasseraufbereitung vorhanden ist. Grundsätzlich kommen zwei Systeme zur Anwendung. Ein umfassender Vergleich des Bundesamts für Energie nach energetischen Kriterien hat gezeigt, dass die beiden Systeme in etwa gleichwertig sind. Unter Berück-

sichtigung ökologischer und ökonomischer Aspekte ergeben sich leichte Vorteile für das Zirkulationssystem, weil weniger (teure) elektrische Energie verbraucht wird.

- Parallel zur Warmwasserverteilung wird eine Zirkulationsleitung mit einer entsprechenden (zeitgesteuerten) Umwälzpumpe eingebaut
- Die Warmwasserverteilung wird mit einer elektrischen Begleitheizung (Elektrische Widerstandsheizung) ausgerüstet. Diese kann zeitlich mit einer einfachen Schaltuhr gesteuert werden.

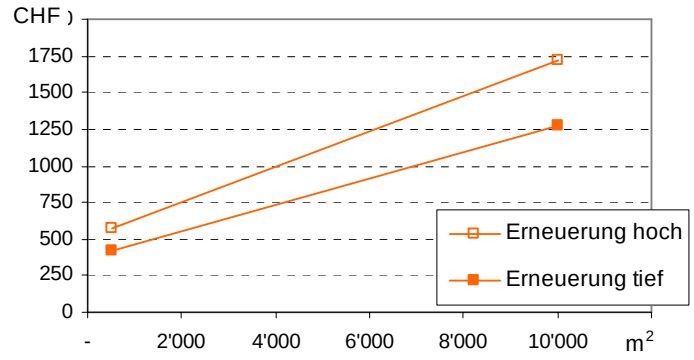
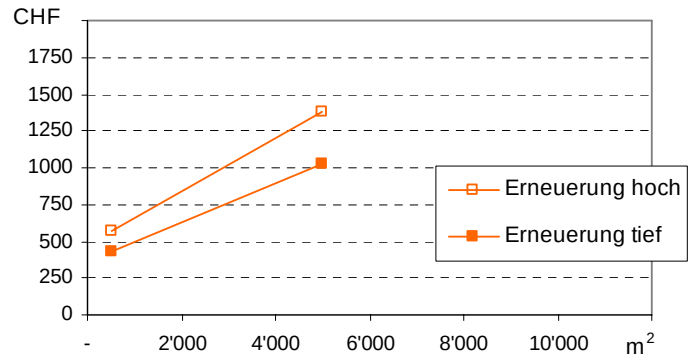
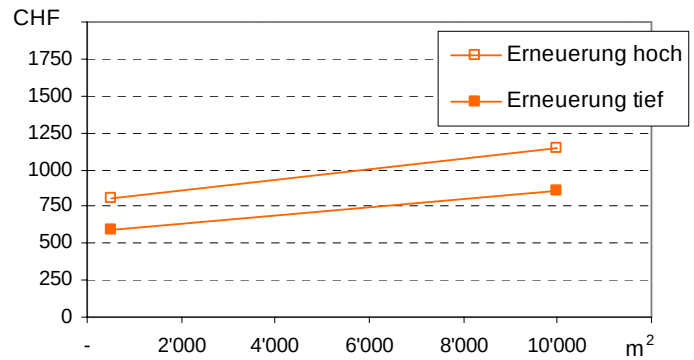
B03: Warmwasser Temperaturreduktion 	Temperatur reduzieren um 10 K im Speicher u. Zirkulation Reduktion der Wärmeverluste Zirkulationsleitungen, weniger Elektroenergie für die Zirkulationspumpe
B04: Warmwasser Durchflussbegrenzer 	Durchflussbegrenzer Lavabos anstelle 8 l/m neu 5 l/min.
B05: Warmwasser-Zirkulation 	Nachrüstung Schaltuhr, anstelle 24 h Betrieb neu Mo - Fr. noch 06 00 - 18 00 Reduktion der Wärmeverluste Zirkulationsleitungen, weniger Elektroenergie für Zirkulationspumpen

Abbildung 63 Kosten (CHF) von Betriebsoptimierungsmassnahmen bei Warmwasserzeugung und –verteilung

Die oben stehende Abbildung 63 zeigt die Kosten von BO-Massnahmen im Bereich Warmwasser in der Übersicht. Die Kosten nehmen mit der Gebäudegrösse zu, da mit der Gebäudegrösse üblicherweise die Komplexität der Anlagen etwas zunimmt. Allen Massnahmen gemein ist die Tatsache, dass die Kosten nicht direkt proportional zur Gebäudefläche zunehmen, sondern dass die Massnahmen mit einem Initialaufwand verbunden sind, der bei kleinen Gebäuden stärker ins Gewicht fällt als bei grossen Gebäuden. Bei den spezifischen Kosten pro m^2 ergeben sich deshalb fallende Kosten in Funktion der zunehmenden Gebäudefläche, so dass zu erwarten ist, dass die Wirtschaftlichkeit der Massnahmen bei grossen Gebäuden besser ausfällt als bei kleinen.

4.11.3 BO bei Kälteerzeugung und -verteilung

Die effizienteste Optimierungsmassnahme bei thermischen Kälteanlagen ist die Reduktion der Temperaturspreizung zwischen Erzeuger (Kältemaschine) und Verbraucher (Kälteabgabe); die Leistungsziffer ist direkt proportional abhängig. Die Kosten von entsprechenden Massnahmen sind in Abbildung 64 dargestellt. Im Bereich Kälteerzeugung und -verteilung ist die Bedeutung des Initialaufwandes beinahe noch ausgeprägter als im Wärmebereich.

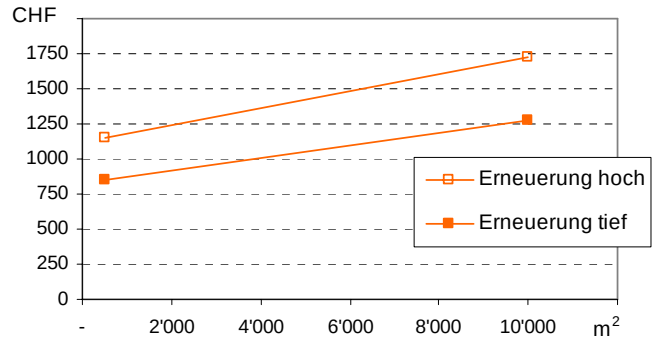
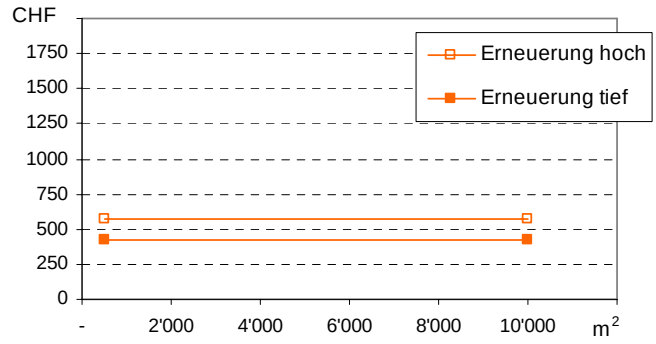
B06: Kälte  	Kaltwassertemperatur um 5 K erhöhen Verbesserung der Leistungszahl der Kältemaschine um 15 % von E = 3.5 auf E = 4.0
B07: Kälte  	Rückkühltemperatur um 5 K reduzieren Verbesserung der Leistungszahl der Kältemaschine um 15 % von E = 3.5 auf E = 4.0

Abbildung 64 Kosten (CHF) von Betriebsoptimierungsmassnahmen bei der Kälteerzeugung (Quelle A+W)

4.11.4 BO bei Lüftungs- und Klimaanlagen

In der Regel das grösste energetische Sparpotenzial stellen in bestehenden Bauten die Lüftungsanlagen – mit oder ohne Kälte – dar, deren Betriebszeiten in vielen Fällen reduziert werden können, ohne dass die Raumluftqualität negativ beeinflusst wird. In grösseren Räumen (Sitzungszimmer, Empfangshallen, Kongressräume, etc.) kommen zudem vermehrt bedarfsgesteuerte Anlagen zum Einsatz, die in

Abhängigkeit vom CO_2-Gehalt der Raumluft die Ersatzluft variabel in den Raum bringen, d.h. bei weniger Personen im Raum werden das Luftvolumen und damit der thermische und elektrische Energiebedarf reduziert. Die Kosten von BO im Bereich Lüftung- und Klima sind in Abbildung 65 dargestellt.

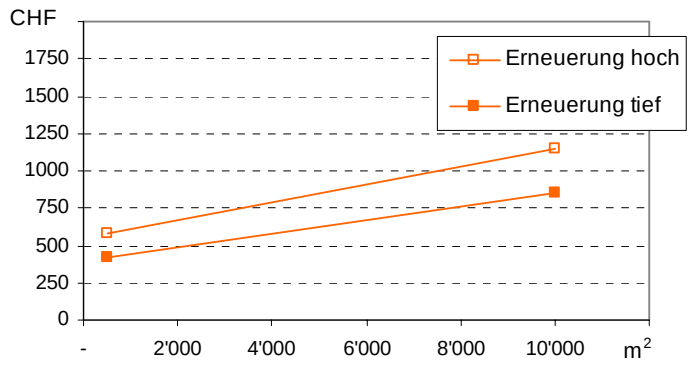
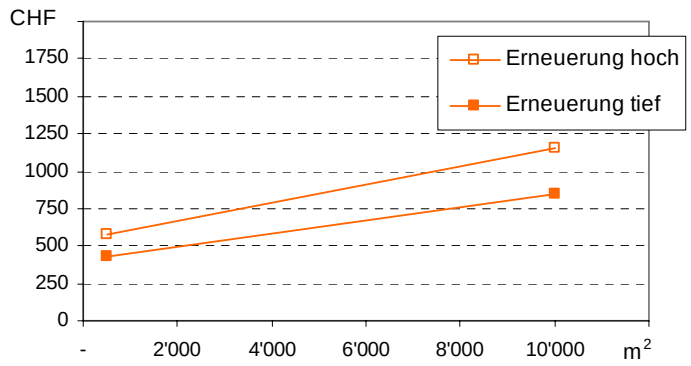
B08: Lüftung 	Betriebszeiten reduzieren durch Schaltuhranpassung 1h/d weniger Reduktion Elektrobedarf für Antrieb Ventilatoren, und weniger Wärme für Lufterhitzer
B09: Klimaanlage 	Betriebszeiten reduzieren durch Schaltuhranpassung (1h/d weniger) Reduktion Elektrobedarf für Antrieb Ventilatoren und weniger Kälte, und weniger Wärme für Lufterhitzer

Abbildung 65 Kosten (CHF) von Betriebsoptimierungsmassnahmen bei Lüftungs- und Klimaanlagen (A+W)

4.11.5 BO bei Beleuchtungsanlagen

Die betrieblichen Massnahmen und deren energetische Wirkung von Beleuchtungsanlagen sind unter dem Kapitel 4.10 im Detail beschrieben. Der Einbau von Präsenzsteuerungen – mit oder ohne Tageslichtsteuerung – hat sich breit durchgesetzt. Bereits schon im Heimbereich wird diese einfache Technologie angewendet. Die Kosten betragen 3500 bis 4500 CHF für kleine Gebäude (500 m^2) und 35'000 bis 40'000 CHF für grosse Gebäude (10'000 m^2) und bei etwa 70% der Flächen lässt sich damit der spezifische Elektrizitätsbedarf von etwa 22 kWh/m^2a auf etwa 11 kWh/m^2a reduzieren.

4.11.6 Übergreifende Betriebsoptimierung (BO) und Inbetriebnahme

Insbesondere bei gekühlten und mechanisch belüfteten Gebäuden sowie im allgemeinen bei technisierten Gebäuden kommt der systemübergreifenden Betriebsoptimierung und Inbetriebnahme eine hohe Bedeutung zu, weil sonst das Risiko besteht, dass die verschiedenen Gebäudetechnikkomponen-

ten und –systeme gegeneinander arbeiten. Dieses Risiko besteht sowohl im Bereich Beleuchtung, Sonnen- und Blendschutz als auch im Bereich Heizen und Kühlen, insbesondere während der Übergangszeit, während der sich Heiz- und Kühlbedarf kurzfristig abwechseln (innerhalb des Tagesablaufs und von verschiedenen Tagen), so dass bei ungünstiger Regelung ein hoher Energiebedarf resultiert (vgl. Tödtli, Gwerder et al., 2006 für eine Vertiefung des Themas). Ohne kontinuierliche Betriebsoptimierung besteht zudem das Risiko eines hohen sogenannten „Stand-by"-Verbrauchs (Menti, 1999).

4.12 Fazit der Kostenerhebungen

Die Kostenerhebungen und die Erarbeitung der Kostenkennwerte sind nicht nur aus inhaltlichen Gründen aufgrund ihrer Anwendbarkeit von Interesse, sondern sie sind auch indirekt aufschlussreich.

Die Kostenerhebungen haben deutlich vor Augen geführt, dass die beim Bau von neuen Gebäuden und bei der Instandsetzung und Erneuerung des Gebäudebestandes involvierten Branchen **stark arbeitsteilig und häufig klein strukturiert sind**. Obwohl eine Hemmnisanalyse nicht explizites Untersuchungsziel der vorliegenden Studie war, haben die Kostenerhebungen gezeigt, dass sowohl die Arbeitsteilung sowie die Grössenstruktur der Unternehmen für die Energie-Effizienz ein systemimmanentes Hemmnis darstellt. Die Arbeitsteilung führt dazu, dass auf jeder Stufe ein Druck besteht, die anzubietenden Leistungen möglichst kostengünstig zu erbringen. **Das Prinzip der Investitionskostenminimierung ist entsprechend teilweise strukturell bedingt und steht dem Lebenszykluskostenansatz entgegen** (sowohl bzgl. allgemeinem Gebäudeunterhalt als auch bzgl. Energiebedarf und -erzeugung). Dies steht energie-effizienten Varianten entgegen, die in der Regel mit höheren Initialkosten und geringeren laufenden Kosten verbunden sind. Die Arbeitsteilung führt auch zu vielen Schnittstellen. Dies führt für die Bauträger beim Anstreben von energie-effizienten Lösungen zu hohen Informations- und Suchkosten. Die Arbeitsteilung und die Schnittstellen vermindern die Kostentransparenz und erschweren die Vergleichbarkeit von verschiedenen Varianten aufgrund der unterschiedlichen Abgrenzungen und der oft nicht vernachlässigbaren sogenannten „bauseitigen" Kosten.

Hierzu sei an dieser Stelle der HLK-Bereich exemplarisch herausgegriffen. Selbst die einzelnen Teilbereiche Heizung, Lüftung und Kühlung/Klimatisierung sind ihrerseits wieder arbeitsteilig organisiert. Bei der Gebäudekühlung beispielsweise werden Kältemaschine, Rückkühlung, Kälteverteilung und –abgabe sowie die Installation, meistens von jeweils verschiedenen spezialisierten Unternehmen angeboten, dimensioniert und ausgeführt. Aufgrund des jeweiligen Kostendrucks werden die technischen Vorgaben der Planer häufig nicht eingehalten. Dabei muss häufig nicht nur eine energietechnische Minderperformance bei der entsprechenden Komponente in Kauf genommen werden, **sondern es wird auch das Zusammenspiel der verschiedenen Komponenten beeinträchtigt.** Bei der technischen Planung und bei der Kostenplanung sind zudem die einzelnen Arbeitsschritte jedes Mal wieder aufs Neue durchzuführen (z.B. das Einholen von Kostendaten), d.h. **der Mengenskaleneffekt ist gering**. Jeder Planer und jeder Anbieter optimiert nur seine jeweilige Komponente (falls überhaupt) bzw. versucht v.a., seine Kosten zu senken. Dies erschwert oder verunmöglicht eine effektive, effiziente, routinemässige und übergreifende Optimierung und Standardisierung. Dies umso mehr, als dass den Ingenieur- und Planungsbüros häufig nur knappe Budgets zugestanden werden, welche für eine angemessene Optimierung unzureichend sind.

Weiter haben die Erhebungen gezeigt, dass Technik orientierte Fachleute oft wenig Kenntnis bzgl. Kostenkennwerten und noch weniger bzgl. Kosten-Nutzen-Relationen haben. Kosten orientierte Fachleute haben umgekehrt wenig Kenntnisse über technische Kennwerte. Einer weitergehenden Energieeffizienz stehen also insbesondere auch strukturelle und markt-organisatorische Hemmnisse im Weg.

5 Kosten-Nutzenanalyse und Grenzkostenbetrachtung auf Element- und Anlagenebene

5.1 Fassaden

Erste Hinweise über die Wirtschaftlichkeit von weitergehenden energetischen Standards im Bereich Fassaden geben die angenäherten Jahres- sowie Brutto-Grenzkosten auf Basis Fassadenkosten und der Transmissionsverluste, d.h. unter Vernachlässigung der gebäudephysikalischen Dynamik sowie der energetischen und kostenseitigen Interaktionseffekte. Vernachlässigt werden in diesem Kapitel insbesondere die Auswirkungen des Wärmeschutzes auf die Solargewinne und auf die „freie Wärme", allfällige Auswirkungen auf den Elektrizitätsbedarf sowie kostenseitige Auswirkungen (z.B. geringere Wärmegestehungskosten bei gleichzeitiger Heizanlagenerneuerung oder bei integrierter Planung im Neubaubereich). Die Vernachlässigung der gebäudephysikalischen Effekte führt dabei eher zu einer Unterschätzung (weil die energetische Wirkung überschätzt wird, siehe Kap. 3.3.1), die Vernachlässigung der kostenseitigen Interaktionseffekte eher zu einer Überschätzung der Grenzkosten.

Bei den auf die Nutzenergie bezogenen Brutto-Grenzkosten werden zudem die Umwandlungs- und Verteilverluste der Wärmeerzeugung und Verteilung vernachlässigt (diese sind in die marginalen Wärmegestehungskosten einzurechnen).

5.1.1 Neubau

Beim Verlauf der Jahreskosten zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen der Stufe Vorstudie/Vorprojekt und der Stufe Projekt / marktnahe Richtpreise. Während auf Stufe Vorstudie/Vorprojekt ein sichtbarer Anstieg der Jahreskosten im Verlauf der zunehmenden Energie-Effizienz (geringere U-Werte) zu verzeichnen ist, ist der Verlauf der Jahreskosten mit den Kostendaten auf Stufe Projekt/marktnahe Richtpreise beinahe konstant und zwar sowohl bei der Metallfassade mit Bandfenstern als auch bei der eigentlichen Glasfassade (siehe Abbildung 66).

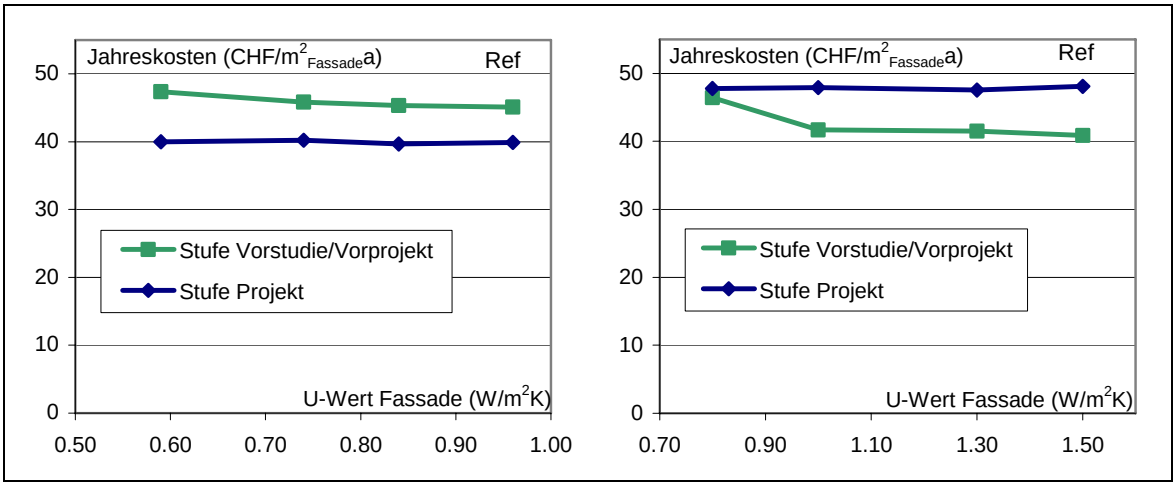


Abbildung 66 Gesamte Jahreskosten (Energie-, Unterhalts- und Kapitalkosten) von Metallfassaden (50% Fensteranteil, linke Abbildung) und Glasfassaden (rechte Abbildung) bei Neubauten (Nutzenergie = U-Wert * 3500 HGT *24h/Tag, Realzinssatz=3%, Lebensdauer=40 Jahre, Energiepreis=0.07 CHF/kWh, Nutzungsgrad Heizanlage 90%)

Ausgehend vom Referenzfall (in Abbildung 66 mit Ref bezeichnet) lassen sich anhand der Mehrkapitalkosten und der Reduktion der Transmissionswärmeverluste die Brutto-Durchschnittskosten (oder Projektgrenzkosten) berechnen. Diese liegen für beide Fassadentypen für die erste Effizienzstufe unter dem anzunehmenden Energiepreis, d.h. auch unter den marginalen Wärmegestehungskosten und bei der dritten Stufe liegen sie nur knapp darüber (vgl. Tabelle 71). Dies deutet darauf hin, dass bei einem Schritt auf die Dreifachverglasung die Wahl des besten der betrachteten U-Werte (0.5 W/m^{2}K) zu empfehlen ist.

		E 1 - Ref	E 2 – Ref	E 3 –Ref
Delta U-Wert Gesamtfassade (Metallfassade)	W/m^{2}K	-0.12	-0.22	-0.37
Delta U-Wert Gesamtfassade (Glasfassade)	W/m^{2}K	-0.20	-0.50	-0.70
Mehr-Kapitalkosten (Metallfassade)	CHF/m^{2}a	0.6	1.7	2.5
Mehr-Kapitalkosten (Glasfassade)	CHF/m^{2}a	0.8	3.1	4.3
Brutto-Durchschnittskosten (Metallfassade)	CHF/kWh$_{NE}$	0.06	0.14	0.09
Brutto- Durchschnittskosten (Glasfassade)	CHF/kWh$_{NE}$	0.05	0.09	0.08

Tabelle 71: **Abschätzung der Brutto-Durchschnittskosten bei Erneuerungen von Metallfassaden (50% Fensteranteil) und für Glasfassaden** (NE: Nutzenergie = U-Wert * 3500 HGT *24h/Tag, Realzinssatz=3%, Lebensdauer=40 Jahre)

5.1.2 Bestehende Bauten

Der U-Wert des opaken Teils der nicht-erneuerten Fassade liegt bei Metallfassaden auf 0.8 bis deutlich über 1.0 W/m^{2}K, je nach Bauperiode und Ausführungsqualität. Insbesondere bei Metallfassaden kann der gewichtete U-Wert aufgrund von Wärmebrücken den U-Wert von Mauerwerk-Aussenwänden deutlich überschreiten. Um die Wirkung der energetischen Erneuerung nicht zu überschätzen, wird konservativ von einem Wert von 1.0 W/m^{2}K ausgegangen. Auch beim Fenster wird mit einem Gesamtfenster-U-Wert von auf 2.0 bis 2.5 W/m^{2}K eine eher konservative Annahme getroffen. Daraus resultiert ein gewichteter U-Wert über die ganze Fassadenfläche von 1.75 W/m^{2}K. Bei gleichzeitiger Fassaden- und Fenstererneuerung kann dieser Wert beim heute üblichen Standard auf ca. 1.0 W/m^{2}K reduziert werden. Bei der Glasfassade beträgt der U-Wert in der Ausgangslage typischerweise 2.5 W/m^{2}K (inkl. Wärmebrücken von mechanischen Befestigungen und Anschlüssen. Dieser Wert kann bei einer umfassenden Erneuerung in Standardqualität auf rund 1.5 W/m^{2}K reduziert werden.

Wie aus Abbildung 67 hervorgeht, weist eine Erneuerung einer Metallfassade mit zusätzlicher Wärmedämmung und neuen Fenstern höhere Jahreskosten auf als eine Instandhaltung (Reinigung, Auffrischung Blechteile, Fugen ausbessern, Lebensdauer 5 Jahre). Noch deutlich ist der Unterschied bei der Glasfassade. Im Vergleich zu einer aufwändigeren Instandsetzung, welche eine Demontage und ein Neuaufbau der Fassade voraussetzt (Lebensdauer 20 Jahre), ist jedoch eine energetische Erneuerung (Lebensdauer 40 Jahre) wirtschaftlich, denn ihre Jahreskosten liegen tiefer. Dies ist im Gegensatz zur Glasfassade, bei der eine energetische Erneuerung auch im Vergleich zu einer Instandsetzung deutlich höherer Jahreskosten aufweist, v.a. weil bei der Instandsetzung der Glasfassade im Vergleich zur Metallfassade von einer geringeren Eingriffstiefe und von geringeren Kosten ausgegangen wurde (Beschläge erneuern, einzelne Gläser ersetzen).

Aus Abbildung 67 ist auch ersichtlich, dass beim Verlauf der Jahreskosten in Funktion zunehmend tieferer Fassaden-U-Werte ein grosser Unterschied zwischen den Stufen Vorstudie/Vorprojekt und Projekt / marktnahe Richtpreise besteht. Währenddem auf Stufe Vorstudie/Vorprojekt der Schluss gezogen werden könnte, dass ein weitergehender energetischer Standard auch in der Jahreskostenbetrachtung mit deutlichen Mehrkosten verbunden ist, ist dies auf Projektstufe nicht mehr der Fall: es besteht kein Kostenanstieg mehr (Metallfassade) oder nur noch ein geringer Kostenanstieg.

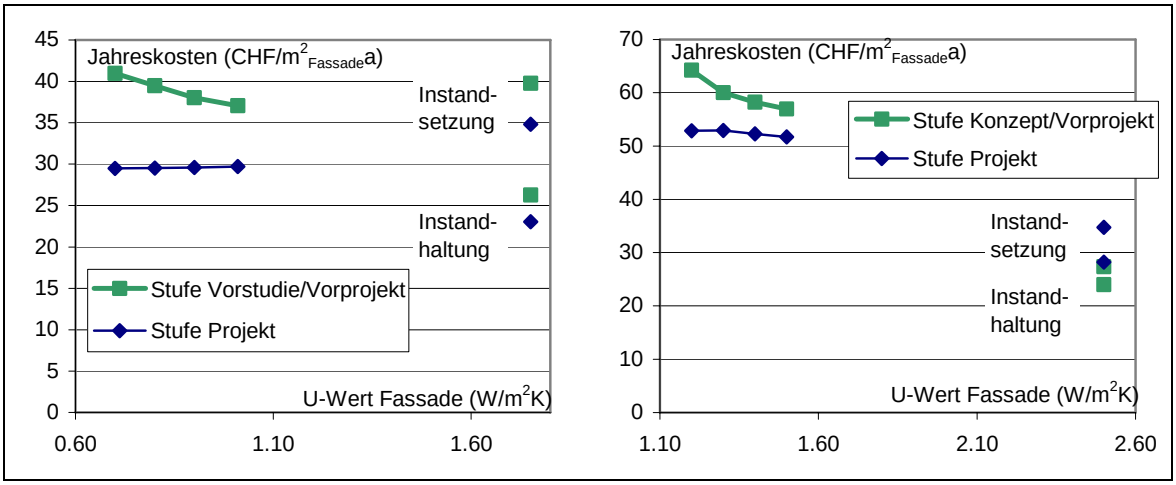


Abbildung 67 **Gesamte Jahreskosten (Energie-, Unterhalts- und Kapitalkosten) von Instandhaltung, Instandsetzung und Erneuerungen von Metallfassaden (50% Fensteranteil, linke Abbildung) und Glasfassaden (rechte Abbildung)** (Nutzenergie = U-Wert * 3500 HGT *24h/Tag, Realzinssatz=3%, Lebensdauer=40 Jahre, Energiepreis=0.07 CHF/kWh, Nutzungsgrad Heizanlage 85%)

Die Grenzkosten der energetischen Standard-Erneuerung (ES) liegen im Vergleich zur Instandhaltung (IH) deutlich über den variablen Wärmegestehungskosten (die kurzfristigen variablen oder marginalen Wärmegestehungskosten ergeben sich aus dem Energiepreis dividiert durch den Nutzungsgrad). Im Vergleich zur aufwändigeren Instandsetzung (IS) liegen sie bei der Metallfassade jedoch unter den variablen Wärmegestehungskosten, dabei bei diesem Fassadentyp bei einer zusätzlichen Wärmedämmung im Vergleich zu einem komplett neuen Fassadenaufbau kaum Mehrkosten entstehen (vgl. Tabelle 72).

Bei der Metallfassade weisen energetisch weitergehende Erneuerungen mit tieferen U-Werten im Vergleich zur energetischen Standarderneuerung Grenzkosten im Bereich der marginalen Wärmekosten auf. Bei der Glasfassade liegen die spezifischen Durchschnittskosten mit 12 bis 15 Rp/kWh$_{NE}$ jedoch höher als die kurzfristigen variablen Wärmekosten. Ein weitergehender energetischer Standard könnte jedoch auch bei einer Glasfassade wirtschaftlich sein, wenn gleichzeitig die Heizanlage erneuert wird und diese Erneuerung aufgrund des geringeren Wärmeleistungsbedarfs kostengünstiger realisiert werden kann. Auf eine markante Reduktion des Wärmeleistungsbedarfs deuten die Simulationsergebnisse (Kap. 3) hin und auf die damit verbundenen kostenseitigen Auswirkungen im Kontext des Gesamtgebäudes wird im Kap. 6.2 eingegangen.

		ES gegenüber IH	E S gegenüber IS	E 2 - ES	E 3 – ES	E 4 –ES
Delta U-Wert Gesamtfassade (Metallfassade)	W/m²K	-0.74	-0.74	-0.11	-0.21	-0.31
Delta U-Wert Gesamtfassade (Glasfassade)	W/m²K	-1.00	-0.10	-0.20	-0.30	-1.00
Mehr-Kapitalkosten (Metallfassade)	CHF/m²a	11.8	0.0	0.6	1.3	1.9
Mehr-Kapitalkosten (Glasfassade)	CHF/m²a	19.3	12.3	1.3	2.6	3.2
Brutto- Durchschnittskosten (Metallfassade)	CHF/kWh$_{NE}$	0.19	0.00	0.07	0.08	0.08
Brutto- Durchschnittskosten (Glasfassade)	CHF/kWh$_{NE}$	0.23	0.15	0.15	0.15	0.12

Tabelle 72: **Abschätzung der Brutto-Durchschnittskosten bei Erneuerungen von Metallfassaden (50% Fensteranteil) und für Glasfassaden** (NE: Nutzenergie)

5.2 Fenster und Verglasungen

Seit den Erhebungen zu spezifischen Kosten und energietechnischen Kennwerten, die im Zusammenhang mit dem Projekt „Grenzkosten bei Wohngebäuden" (Jakob, Jochem et al., 2002) im Jahr 2001/2002 durchgeführt wurden, sind im Fenster- und Verglasungsbereich signifikante technische Fortschritte erzielt worden. 2001/2002 war eine Verbesserung beim Glas-U-Wert (ein tieferer Wert) meistens mit einer deutlichen Verschlechterung des g-Wertes (d.h. ebenfalls ein tieferer Wert) verbunden. Aus diesem Grund konnte mit einer Dreifachverglasung bei vielen Situationen nur eine geringe Heizwärmebedarfsreduktion erzielt werden. Im Süden mit wenig Verschattung resultierte eine vernachlässigbare Verbesserung und auch bei den Orientierungen Ost und West bei mittlerer Verschattung war die Verbesserung relativ gering. Dies führte dazu, dass die Grenzkosten der Glas-U-Wert-Verbesserung für diese Fälle relativ hoch waren.

Bei den aktuellen Erhebungen im Frühjahr/Sommer 2005 wurde festgestellt, dass die g-Wert-Reduktion bei einer U-Wert-Reduktion weit geringer ist als sie 2001/2002 war.

Den Betrachtungen auf Komponentenebene bei Verglasungen und Fenstern in den Kapiteln 5.2.1 bis 5.2.3 liegen nicht Simulationsrechnungen, sondern vereinfachte energetische Berechnungen zugrunde. Diese beinhalten eine Energiebilanz der Transmissionsverluste und der Solargewinne auf der Ebene Nutzenergie (NE), d.h. auf der Ebene Heizwärmebedarf (Qh) gemäss SIA 380/1 unter Berücksichtigung des Ausnutzungsgrades und der Verschattung. Als Grundlage für die Berechnung der Solargewinne dienten die Werte in Tabelle 73. Vernachlässigt werden bei dieser Betrachtung der Komfortaspekt und Interaktionseffekte (Auswirkungen auf den Ausnutzungsgrad der freien Wärme, Nutzen aufgrund geringeren Kühlenergiebedarfs und höherem Beleuchtungsbedarf bei Verglasungen mit geringerem g-Wert[20] und vice versa).

	Süd	Ost	West	Nord
Globalstrahlung MJ/m²a	3240	2526	2616	1459

Tabelle 73 Verwendete Werte der Globalstrahlung in MJ/m²a (Grundlage für die Berechnung der Solargewinne)

5.2.1 Verglasungen

Den Ergebnissen zur Energiebilanz in Tabelle 74 liegen folgende Annahmen zugrunde: Verschattung durch Rahmen 25%, Verschattungsfaktor durch Sonnenschutz Orientierung Süd 0.5 (d.h. 50% der Solarstrahlungsenergie gelangt nicht in den Raum), Ost 0.65, West 0.65, Nord 0.8, Ausnutzungsgrad freie Wärme 60%. Bei diesen Annahmen wird davon ausgegangen, dass bei den Orientierungen Süd der Verschattungsbedarf am grössten ist, gefolgt von Ost und West. Im Norden ist der Verschattungsbedarf am geringsten; die angenommenen 20% beinhalten auch die Verschattung durch andere Gebäude und die Umgebung.

Die Brutto-Grenzkosten[21] der Heizwärmebedarfsreduktion von energie-effizienteren Zweifachverglasungen (Ug=1.0) anstelle der Referenz-Zweifachverglasung (Ug=1.1) liegen zwischen 16 und gut 20 Rp/kWh$_{NE}$. Demgegenüber weisen Dreifachverglasungen (Ug<1.0) anstelle der Referenz-Zweifachverglasung deutlich tiefere Grenzkosten auf, sie liegen zwischen 5 und 12 Rp/kWh$_{NE}$ (ohne Solargewinnverglasungen), wenn die Auswirkungen auf die Solargewinne vernachlässigt werden (Tabelle

[20] Entscheidend für den Beleuchtungsbedarf ist nicht der g-Wert, sondern Lichttransmissionswert. Dieser ist sehr häufig mit dem g-Wert korreliert. Aktuelle Bestrebungen im Entwicklungsbereich zielen jedoch auf eine stärkere Selektivität hin, d.h. auf eine stärkere Entkopplung zwischen Lichttransmission und Energiegewinn.

[21] Brutto-Grenzkosten: Kapital-Mehrkosten (CHF/m2a) dividiert durch Heizwärmebedarfsreduktion (MJ$_{NE}$/m2a) , d.h. ohne Abzug der geringeren Heizenergiekosten

74, Spalte o.GS., d.h. ohne Globalstrahlung) bzw. zwischen 10 bis 15 Rp/kWh$_{NE}$, wenn die Auswirkungen auf die Solargewinne mitberücksichtigt werden (in Einzelfällen bei denen der g-Wert deutlich zurück geht, über 20 Rp/kWh$_{NE}$). Zum Vergleich: die Grenzkosten der Wärmeerzeugung liegen im Gebäudebestand kurzfristig (d.h. nur Berücksichtigung der Energiekosten) bei ca. 6 bzw. 8 Rp/kWh$_{NE}$ (bei Energiepreisen von 5 bzw. 7 Rp/kWh$_{EE}$) und im Neubau bzw. langfristig im Gebäudebestand bei 7.5 bzw. rund 10 Rp/kWh$_{NE}$ (d.h. Brutto-Grenzkosten der Energieeffizienz, welche tiefer liegen, sind als wirtschaftlich zu bezeichnen).

Unternehmen	Variante	Ug W/m²K	g-Wert	Richtpreis CHF/m²	Transmissionsverlust MJ/m²$_{Fe}$a	Differenz Energiebilanz (MJ/m²$_{Verglasung}$a) im Vergleich zu Referenz					Brutto-Grenzkosten (CHF/kWh$_{NE}$) im Vergleich zu Referenz					Jahreskosten CHF/m²$_{Verglasung}$a			
						o.GS.	Süd	Ost	West	Nord	o.GS.	Süd	Ost	West	Nord	Süd	Ost	West	Nord
U1	Ref 0	1.1	0.56	59	-333											1.5	1.4	1.0	4.3
	Ref 1 (*)	1.1	0.60	55	-333											0.6	0.4	0.0	3.6
	V 1.0	1.0	0.55	81	-302	30	23	23	23	25	0.15	0.19	0.19	0.20	0.18	2.2	2.1	1.7	4.9
	V 1.1 (*)	1.0	0.6	80	-302	30	30	30	30	30	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	1.3	1.1	0.7	4.2
	V1.2 (*)	1.0	0.56	85	-302	30	1	1	0	9	0.20	5.7	9.0	-16.6	0.7	2.3	2.1	1.8	5.0
	V 1.3 (*)	0.8	0.55	110	-242	91	54	54	52	64	0.12	0.21	0.21	0.22	0.18	2.4	2.3	1.9	5.1
	V 2.0	0.7	0.52	129	-212	121	92	91	90	100	0.12	0.16	0.16	0.16	0.14	3.3	3.1	2.8	5.9
	V 2.1 (*)	0.7	0.52	120	-212	121	63	62	60	79	0.11	0.21	0.22	0.22	0.17	2.8	2.6	2.3	5.3
	V 3.0	0.6	0.58	140	-212	121	136	136	136	131	0.14	0.12	0.12	0.12	0.13	2.8	2.7	2.3	5.7
	V 3.1 (*)	0.6	0.52	130	-181	151	93	92	90	109	0.10	0.17	0.17	0.17	0.14	2.6	2.5	2.1	5.2
	V 4.0	0.5	0.52	161	-181	151	122	122	121	130	0.14	0.17	0.17	0.17	0.16	4.4	4.2	3.9	7.0
	V 4.1 (*)	0.5	0.52	150	-151	181	123	122	120	139	0.11	0.16	0.16	0.16	0.14	3.0	2.9	2.5	5.6
U2	V 0	1.4	56%	72	-423	-91	-91	-91	-91	-91	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	4.5	4.4	4.0	7.3
	Ref	1.1	56%	78	-333											2.6	2.5	2.1	5.4
	V 1b	1.1	67%	105	-333	0	80	81	84	58	k.A.	0.07	0.07	0.07	0.10	2.2	2.0	1.6	5.5
	V 1c	1.0	54%	94	-302	30	16	15	15	20	0.11	0.21	0.21	0.22	0.16	3.1	3.0	2.7	5.8
	V 2a	1.1	42%	82	-333	0	-102	-103	-107	-74	Fragestellung nicht relevant, da nur Sonnenschutz (Ug wie Referenz)					5.3	5.2	4.9	7.4
	V 2b	1.1	27%	147	-333	0	-211	-214	-222	-152						11.7	11.6	11.4	13.0
	V 4a	0.7	43%	108	-212	121	26	25	21	53	0.05	0.23	0.24	0.28	0.11	3.7	3.6	3.3	5.8
	V 4b	0.8	62%	146	-242	91	134	135	137	122	0.15	0.10	0.10	0.10	0.11	3.2	3.1	2.7	6.3
	V 5a	0.5	42%	139	-151	181	87	85	82	113	0.07	0.14	0.15	0.15	0.11	4.0	3.9	3.6	6.1
	V 5b	0.5	57%	185	-151	181	189	189	189	187	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	4.1	4.0	3.6	6.9

Tabelle 74 **Richtpreise sowie Energiebilanz und Grenzkosten von verschiedenen Verglasungsvarianten im Vergleich zur Referenzverglasung.** Basis: Richtpreise bei zwei grossen schweizerischen Fensterglaslieferanten (Preisstand Mitte 2005, inkl. MWST ausser (*): Anfang 2006). Erhebung und Berechnungen CEPE (Annahmen: Realzinssatz 3%, Lebensdauer 25 Jahre, Verschattung durch Rahmen 25%, Verschattungsfaktor durch Sonnenschutz Orientierung Süd 0.5, Ost 0.65, West 0.65, Nord 0.8, Ausnutzungsgrad freie Wärme 60%. Annahmen für Energiekosten: Energiepreis 0.07 CHF/kWh, Nutzungsgrad 0.9, variabler Anteil Wärmeerzeugung: 0.01 CHF/kWh = 0.087 Rp/kWh)

In Tabelle 74 sind auch die Jahreskosten (Kapitalkosten der Verglasung plus Energiekosten, je pro m_2 Verglasung) dargestellt. Hierbei ist weniger das Kostenniveau entscheidend (denn die weiteren Kosten eines Fensters oder einer Glasfassade sind nicht enthalten), sondern vielmehr die resultierenden Differenzkosten im Vergleich zur Referenz in CHF/m$^2_{Verglasung}$a. Diese Differenzkosten liegen zwischen -0.5 bis rund 3 CHF/m$^2_{Verglasung}$a (ausser bei ausgeprägten Sonnenschutzverglasungen, wenn der entsprechende

Nutzen wegen verminderter Überhitzung oder reduziertem Kühlenergiebedarf nicht eingerechnet wird, wie es an dieser Stelle der Fall ist; entsprechende Überlegungen erfolgen im Kap. 6).

Anzufügen ist an dieser Stelle, dass das Niveau der Jahreskosten der Verglasung u.a. deshalb relativ tief ist, weil die Verglasung in den meisten Fällen in der Gesamtjahresbetrachtung zu einem Heizwärmegewinn führt (Ausnahmen: ausgeprägte Sonnenschutzverglasung, Nordorientierung auch Standardverglasung). Die reinen Kapitalkosten der Verglasung liegen in diesen Fällen höher als die Gesamtjahreskosten (siehe Tabelle 100 im Anhang).

Bei geringerer Verschattung (im Vergleich zu den Annahmen gem. Tabelle 74) erhöhen sich die Grenzkosten der Heizwärmebedarfsreduktion in den Fällen, bei denen der g-Wert der betrachteten Verglasung geringer ist als der g-Wert der Referenzverglasung (die geringere Gewinnmöglichkeit aufgrund des geringeren g-Werts wirkt sich stärker aus). Bei eigentlichen Solargewinnverglasungen mit einem höheren g-Wert als in der Referenz verringern sich die Grenzkosten (Unternehmen U1, Variante 3, Unternehmen 2, Varianten 1b und 4b), wenn auch teilweise nur geringfügig (siehe Tabelle 101 im Anhang)

Fazit: Unter dem alleinigen Kriterium der Heizwärmebedarfsreduktion (bzw. der Heizkostenreduktion) deuten die Ergebnisse darauf hin, dass die Mehrkosten von Verglasungen mit tieferen U-Werten in den meisten Fällen knapp nicht amortisiert werden können (bei einem Energiepreis von 7 Rp/kWh$_{EE}$ bzw. variablen Wärmekosten von 8.7 Rp/kWh$_{EE}$ ergeben sich Netto-Mehrkosten von 0 bis 3 CHF/m$^2_{Verglasung}$a). Dazu müssten die Mehrinvestitionskosten etwas geringer sein bzw. der Energiepreis 1 bis 3 Rp/kWh höher. Dies mag mit erklären, weshalb Dreifachverglasungen keine grössere Marktverbreitung finden. Es sei jedoch an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass der Nutzen von Verglasungen mit geringeren U-Werten (und/oder höheren oder tieferen g-Werten, je nach Fall) über die reine Heizkostenreduktion hinaus geht. In der Tat ermöglichen geringere U-Werte und geringere g-Werte eine komfortablere Nutzung, vor allem im nahen Bereich der Fenster bzw. Verglasungen (verminderter Kaltluftabfall, höhere Oberflächentemperaturen[22] während Winter und Übergangszeit, während der Perioden ohne Solarstrahlung bzw. geringere Oberflächentemperaturen während Sommer und Übergangszeit, insbesondere bei Sonnenschein). Dies ist besonders ausgeprägt bei (Büro-)räumen mit hohem Verglasungsanteil und starker Nutzflächenauslastung. Eine bessere Ausnutzung der Nutzfläche sowie geringere Produktivitätseinbussen vermögen die geringen Netto-Mehrkosten mehr als aufzuheben.

5.2.2 Fenster bei neuen Gebäuden

In Tabelle 75 sind die Grenzkosten der Energie-Effizienz sowie die Jahreskosten bei Fenstern exemplarisch aufgrund der Angaben von sechs Unternehmen dargestellt. Es wird unterschieden zwischen folgenden Massnahmentypen:

- Nur Glas-U-Wert wird verbessert (teilweise inkl. Glasabstandshalter)
- Nur der Glasabstandshalter allein wird verbessert
- Nur Rahmen-U-Wert wird verbessert
- Rahmen- und Glas-U-Wert werden gleichzeitig verbessert (teilweise inkl. Glasabstandshalter)
- U-Wert und g-Wert werden gemeinsam verbessert
- g-Wert wird zusammen mit Rahmen-U-Wert verbessert
- U-Wert und g-Wert werden wird zusammen mit Rahmen-U-Wert verbessert

[22] Die Oberflächentemperaturen sind nebst der Raumtemperatur einer der entscheidenden Faktoren, welche den thermischen Komfort beeinflussen

Unternehmen		Energietechnische Kennwerte					Längenmasse			Flächenmasse		Rahmen-	Preis CHF/m²		Jahreskosten CHF/m²$_{Fe}$a				Grenzkosten (*) CHF/kWh$_{NE}$			
	Beschreibung	Ug	g-Wert	Uf	Psi	Uw	psi	Breite	Höhe	Frame	Window	anteil	Erneuern	Neubau	Süd	Ost	West	Nord	Süd	Ost	West	Nord
Unternehmen 1																						
Holz bzw. Holz-Verbundmaterialien	1_Referenz	1.1	0.55	1.5	0.07	1.47	20	3.4	1.6	1.7	5.63	0.29	382	347	28	28	28	31				
	4_Nur Uf	1.1	0.55	1.3	0.05	1.32	20	3.4	1.6	1.5	5.63	0.27	390	354	27	27	27	30	0.03	0.03	0.03	0.03
	2_ Ug	1.0	0.55	1.5	0.05	1.33	20	3.4	1.6	1.7	5.63	0.29	408	373	29	29	29	32	0.13	0.13	0.13	0.13
	2_ Ug	0.6	0.51	1.5	0.05	1.04	20	3.4	1.6	1.7	5.63	0.29	442	407	30	30	30	33	0.12	0.12	0.12	0.11
	2_ Ug	0.5	0.51	1.5	0.05	0.97	20	3.4	1.6	1.7	5.63	0.29	449	413	30	30	30	33	0.11	0.11	0.11	0.10
	4_Nur Uf	1.1	0.55	1.0	0.05	1.25	20	3.4	1.6	1.5	5.63	0.27	494	459	35	35	35	38	0.28	0.28	0.28	0.30
	5_Ug und Uf	0.5	0.51	1.3	0.05	0.88	20	3.4	1.6	1.5	5.63	0.27	463	427	30	30	30	33	0.10	0.10	0.10	0.10
	5_Ug und Uf	0.6	0.51	1.0	0.05	0.88	20	3.4	1.6	1.5	5.63	0.27	554	519	38	37	37	40	0.22	0.22	0.22	0.21
	5_Ug und Uf	0.5	0.51	1.0	0.05	0.81	20	3.4	1.6	1.5	5.63	0.27	561	525	38	37	37	40	0.20	0.20	0.20	0.19
	2_ Ug	1.1	0.62	1.3	0.05	1.32	20	3.4	1.6	1.5	5.63	0.27	443	408	30	30	30	33	0.11	0.11	0.11	0.14
	6_Ug und g-Wert	1.0	0.62	1.5	0.05	1.33	20	3.4	1.6	1.7	5.63	0.29	462	427	32	32	32	35	0.18	0.18	0.18	0.21
	6_Ug und g-Wert	0.6	0.59	1.5	0.05	1.04	20	3.4	1.6	1.7	5.63	0.29	522	487	35	35	35	38	0.18	0.18	0.18	0.19
	6_Ug und g-Wert	0.5	0.59	1.5	0.05	0.97	20	3.4	1.6	1.7	5.63	0.29	529	494	35	35	35	38	0.17	0.17	0.17	0.18
	Uf und g-Wert	1.1	0.62	1.0	0.05	1.25	20	3.4	1.6	1.5	5.63	0.27	548	513	38	38	37	41	0.26	0.26	0.25	0.30
	Ug, Uf und g-Wert	0.5	0.59	1.3	0.05	0.88	20	3.4	1.6	1.5	5.63	0.27	543	507	35	35	35	38	0.15	0.15	0.15	0.16
	Ug, Uf und g-Wert	0.6	0.59	1.0	0.05	0.88	20	3.4	1.6	1.5	5.63	0.27	634	599	42	42	42	45	0.23	0.23	0.23	0.25
	Ug, Uf und g-Wert	0.5	0.59	1.0	0.05	0.81	20	3.4	1.6	1.5	5.63	0.27	641	606	42	42	42	45	0.22	0.22	0.22	0.23
Unternehmen 2																						
Holz bzw. HM bzw. Holz-Glas	1_Referenz	1.1	0.54	1.4	0.07	1.44	20	3.4	1.6	1.7	5.63	0.29	455	390	32	31	31	34				
	2_ Ug	1.1	0.51	1.4	0.04	1.33	20	3.4	1.6	1.7	5.63	0.29	459	393	32	31	31	34	0.06	0.06	0.07	0.04
	2_ Ug	0.9	0.51	1.4	0.04	1.19	20	3.4	1.6	1.7	5.63	0.29	473	407	30	29	29	32	0.07	0.07	0.07	0.06
	2_ Ug	0.7	0.51	1.4	0.04	1.05	20	3.4	1.6	1.7	5.63	0.29	487	422	30	29	29	32	0.07	0.07	0.07	0.06
	2_ Ug	0.6	0.51	1.4	0.04	0.98	20	3.4	1.6	1.7	5.63	0.29	500	435	30	30	30	32	0.08	0.08	0.08	0.07
	4_Nur Uf	1.1	0.54	1.1	0.04	1.24	20	3.4	1.6	1.5	5.63	0.27	583	518	34	34	34	37	0.35	0.35	0.35	0.38
	5_Ug und Uf	0.9	0.51	1.1	0.04	1.10	20	3.4	1.6	1.5	5.63	0.27	596	531	35	35	34	37	0.30	0.30	0.30	0.29
	5_Ug und Uf	0.7	0.51	1.1	0.04	0.95	20	3.4	1.6	1.5	5.63	0.27	615	550	35	35	35	37	0.23	0.23	0.23	0.23
Unternehmen 3																						
Holz-Alu / Holz-Glas	1_Referenz	1.1	0.55	1.4	0.07	1.44	20	3.4	1.6	1.7	5.63	0.29	462	401	28	28	28	31				
	3_Ug (nur Spacer)	1.1	0.51	1.3	0.025	1.24	20	3.4	1.6	1.7	5.63	0.29	470	409	28	28	28	30	0.05	0.05	0.05	0.04
	2_ Ug	0.7	0.51	1.3	0.025	0.95	20	3.4	1.6	1.7	5.63	0.29	509	448	29	28	28	31	0.08	0.08	0.08	0.08
	4_Nur Uf	1.1	0.55	1.3	0.04	1.28	20	3.4	1.6	1.3	5.63	0.23	476	415	27	27	27	30	0.04	0.04	0.03	0.04
	3_Ug (nur Spacer)	1.1	0.51	1.3	0.025	1.22	20	3.4	1.6	1.3	5.63	0.23	484	423	28	28	28	31	0.06	0.06	0.06	0.07
	2_ Ug	0.7	0.51	1.3	0.04	0.98	20	3.4	1.6	1.3	5.63	0.23	515	455	28	28	28	31	0.08	0.08	0.08	0.08
Unternehmen 4																						
Kunststoff	1_Referenz	1.1	0.54	1.4	0.07	1.41	20	3.4	1.6	1.2	5.63	0.21	359	314	21	21	21	24				
	3_Ug (nur Spacer)	1.1	0.54	1.4	0.05	1.35	20	3.4	1.6	1.2	5.63	0.21	369	325	22	21	21	24	0.11	0.11	0.11	0.11
	2_ Ug	0.7	0.51	1.4	0.05	1.03	20	3.4	1.6	1.2	5.63	0.21	412	368	23	23	22	25	0.12	0.12	0.12	0.11
Unternehmen 5																						
Kunststoff	1_Referenz	1.2	0.63	1.4	0.034	1.38	20	3.4	1.6	1.7	5.63	0.29	376	336	22	22	22	25				
	4_Nur Uf	1.2	0.63	1.1	0.034	1.29	20	3.4	1.6	1.5	5.63	0.27	388	348	22	22	21	25	0.06	0.06	0.06	0.07
	5_Ug und Uf	1.0	0.53	1.1	0.034	1.15	20	3.4	1.6	1.5	5.63	0.27	413	373	24	24	24	27	0.50	0.53	0.61	0.25
	5_Ug und Uf	0.8	0.50	1.1	0.034	1.00	20	3.4	1.6	1.5	5.63	0.27	437	397	25	25	25	28	0.33	0.34	0.36	0.21
	5_Ug und Uf	0.6	0.50	1.1	0.034	0.85	20	3.4	1.6	1.5	5.63	0.27	440	400	24	24	24	27	0.16	0.16	0.17	0.13
Holz-Alu	1_Referenz	1.2	0.63	1.6	0.034	1.43	20	3.4	1.6	1.5	5.63	0.27	486	446	29	29	29	33				
	4_Nur Uf	1.2	0.63	1.3	0.034	1.35	20	3.4	1.6	1.5	5.63	0.27	539	499	32	32	32	35	0.44	0.44	0.44	0.44
	2_ Ug	0.8	0.51	1.6	0.034	1.14	20	3.4	1.6	1.5	5.63	0.27	538	498	33	33	32	35	*3.36*	*5.28*	*-9.8*	*0.39*
	2_ Ug	0.6	0.50	1.6	0.034	0.99	20	3.4	1.6	1.5	5.63	0.27	542	502	32	32	32	35	0.28	0.29	0.32	0.17
	5_Ug und Uf	0.8	0.51	1.3	0.034	1.05	20	3.4	1.6	1.5	5.63	0.27	589	549	36	36	35	38	0.77	0.80	0.91	0.41
	5_Ug und Uf	0.6	0.50	1.3	0.034	0.91	20	3.4	1.6	1.5	5.63	0.27	593	553	35	35	35	38	0.34	0.35	0.37	0.24
Holz	1_Referenz	1.2	0.63	*1.3*	0.033	1.34	20	3.4	1.6	1.5	5.63	0.27	473	433	32	32	32	35				
	2_ Ug	0.8	0.51	*1.3*	0.033	1.05	20	3.4	1.6	1.5	5.63	0.27	526	486	36	36	36	39	*3.41*	*5.35*	*-9.91*	*0.40*
	2_ Ug	0.6	0.50	*1.3*	0.033	0.90	20	3.4	1.6	1.5	5.63	0.27	530	490	36	36	35	38	0.29	0.30	0.33	0.18
Unternehmen 6																						
Holz-Alu	1_Referenz	1.1	0.55	1.5	0.034	1.31	20	3.4	1.6	1.2	5.63	0.21	602	528	35	35	34	38				
	2_ Ug	0.8	0.51	1.5	0.034	1.07	20	3.4	1.6	1.2	5.63	0.21	649	574	37	37	36	40	0.23	0.24	0.24	0.19
	2_ Ug	0.6	0.51	1.5	0.034	0.91	20	3.4	1.6	1.2	5.63	0.21	668	593	37	37	37	40	0.15	0.15	0.15	0.14
Holz	1_Referenz	1.1	0.55	1.5	0.034	1.31	20	3.4	1.6	1.2	5.63	0.21	529	454	34	34	34	37				
	2_ Ug	0.8	0.51	1.5	0.034	1.07	20	3.4	1.6	1.2	5.63	0.21	574	500	37	37	36	40	0.23	0.23	0.24	0.19
	2_ Ug	0.6	0.51	1.5	0.034	0.91	20	3.4	1.6	1.2	5.63	0.21	593	518	37	37	37	40	0.15	0.15	0.15	0.14

Tabelle 75 Technische Kennwerte, Investitions- und Grenzkosten (* gegenüber jeweiligem Referenzfenster) der Energie-Effizienz bei Fenstern am Beispiel von sechs Fensterunternehmen, (Erhebung und Berechnungen CEPE)

Die energetische Wirkung wird wie bei der Verglasung (Kap. 5.2.1) vereinfacht über die Reduktion der Transmissionsverluste und die Differenz der solaren Gewinne berechnet (Verschattungsfaktor durch Sonnenschutz Orientierung Süd 0.5, Ost 0.65, West 0.65, Nord 0.8, Ausnutzungsgrad freie Wärme 60%) mit einem Ausnutzungsgrad der freien Wärme von 0.6.

Die Brutto-Grenzkosten streuen stark, wie aus den Ergebnissen in Tabelle 75 und in Abbildung 68 hervorgeht. Im ungünstigen Fall können bereits geringe Verbesserungen des Gesamt-Fenster-U-Werts zu hohen Brutto-Grenzkosten führen. Die Streuung ist im Bereich Rahmenverbesserungen besonders stark. Der untere Bereich der Brutto-Grenzkosten liegt hingegen bei nur 2 bis 3 Rp/kWh$_{NE}$ und bei zahlreichen Fenstern liegen die Brutto-Grenzkosten unter 10 Rp/kWh$_{NE}$. Bis zu diesen Brutto-Grenzkosten (10 Rp/kWh$_{NE}$) kann im best-pratice Fall ein Fenster-U-Wert von etwas unter 0.9 W/m^{2}K erreicht werden (zum Vergleich: zur Erfüllung des Minergie-Moduls Fenster muss ein Wert von Uw=1.0 W/m^{2}K erreicht werden). Nur wenn ein noch geringerer Fenster-U-Wert angestrebt wird, ist mit höheren Grenzkosten zu rechnen.

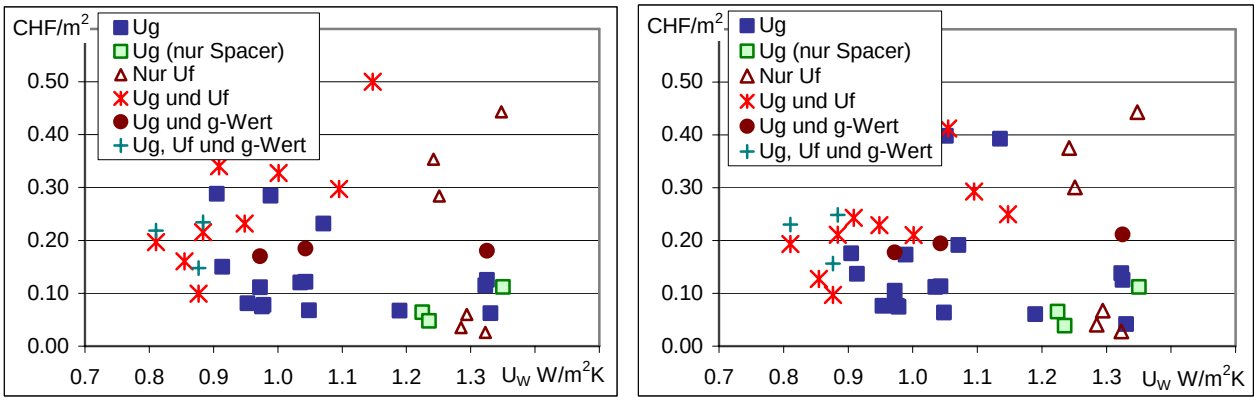


Abbildung 68 **Grenzkosten (CHF/kWh$_{NE}$) im Vergleich zum jeweiligen Referenzfenster als Funktion des erreichten Fenster-U-Werts Uw für die Orientierungen Süd (links) und Nord (rechts)**

Abbildung 69 zeigt die Brutto-Grenzkosten als Funktion der erreichten Heizwärmereduktion (Nutzenergiereduktion, d.h. Reduktion Qh in MJ$_{NE}$/m^{2}a). Der obere Bereich der Brutto-Grenzkosten ist bei geringen Heizwärmereduktionen maximal (dies ist plausibel, denn die Heizwärmereduktion geht im Nenner in die Grenzkostenberechnung ein) und fällt dann zunehmend ab, je höher die erreichte Heizwärmereduktion wird. Der untere Bereich der Brutto-Grenzkosten liegt bei 2 bis 3 Rp/kWh$_{NE}$ und bei zahlreichen Fenstern liegen die Brutto-Grenzkosten unter 10 Rp/kWh$_{NE}$. Bis zu diesen Brutto-Grenzkosten (10 Rp/kWh$_{NE}$) kann im best-pratice Fall eine Heizwärmereduktion von gut 150 MJ/m$^2_{Fe}$a erreicht werden. Nur wenn eine noch höhere Reduktion pro m^2 Fenster angestrebt wird, ist mit höheren Grenzkosten zu rechnen.

Alternativ zur Grenzkostendarstellung können die Ergebnisse auch als Jahreskosten ausgewiesen werden. Die Jahreskosten setzen sich aus den Kapitalkosten der Fenster (inkl. Montage) und den Energiekosten zusammen. Den Energiekosten wurde die Energiebilanz (Wärmeverlust-genutzter Anteil Solargewinn), ein Energiepreis von 7 Rp/kWh, ein Nutzungsgrad des Heizsystems von 0.9 sowie ein variabler Anteil der Wärmeerzeugung von 1 Rp/kWh zugrunde gelegt. Die jährlichen Unterhaltskosten wurden bei den Holzfenstern mit 2% der Investitionssumme und bei den Holz-Metallfenstern, den glasbedeckten Rahmen sowie den Kunststofffenstern mit 1% veranschlagt.

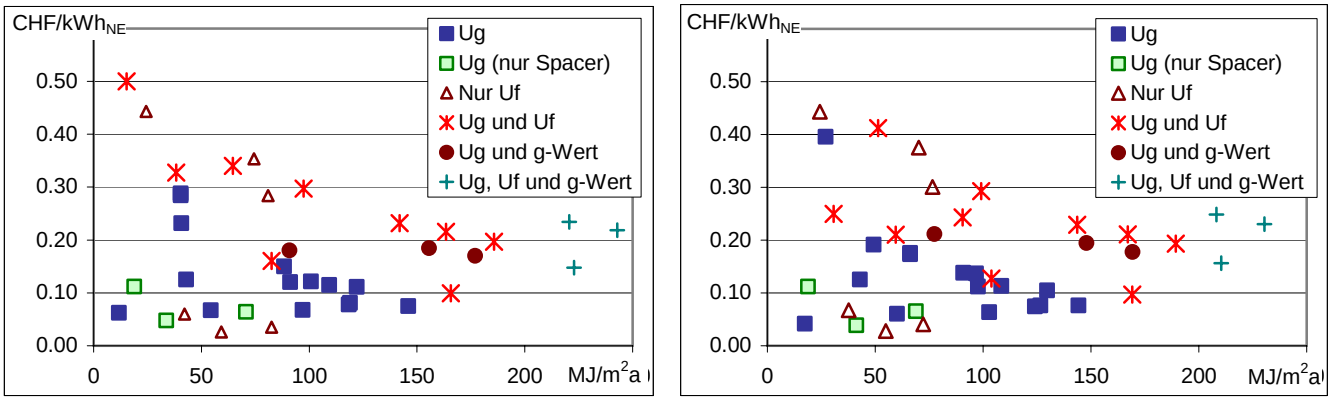


Abbildung 69 Grenzkosten (CHF/kWh$_{NE}$) im Vergleich zum jeweiligen Referenzfenster als Funktion der erreichten Heizwärmereduktion (Nutzenergiereduktion MJ$_{NE}$/m^{2}a) für die Orientierungen Süd (links) und Nord (rechts)

Die Ergebnisse sind in Abbildung 70 als Funktion des erreichten Fenster-U-Werts dargestellt. Bereits die Referenzfenster der verschiedenen Unternehmen weisen eine gewisse Streuung auf, sowohl bzgl. Preis wie auch bzgl. Fenster-U-Wert (einen gewissen Einfluss spielt dabei das Rahmenmaterial, siehe dazu auch die Grundlagendaten in Tabelle 75). Über alle Unternehmen gesehen sind die Jahreskosten in einem Bereich von Uw=1.5 W/m^{2}K bis etwa 1.0 W/m^{2}K in etwa konstant. Im Einzelfall (best practice) ist sogar ein Fenster-U-Wert von 0.85 zu etwa gleich hohen Jahreskosten erreichbar; im Mittel steigen die Jahreskosten gegen tiefe U-Werte leicht an.

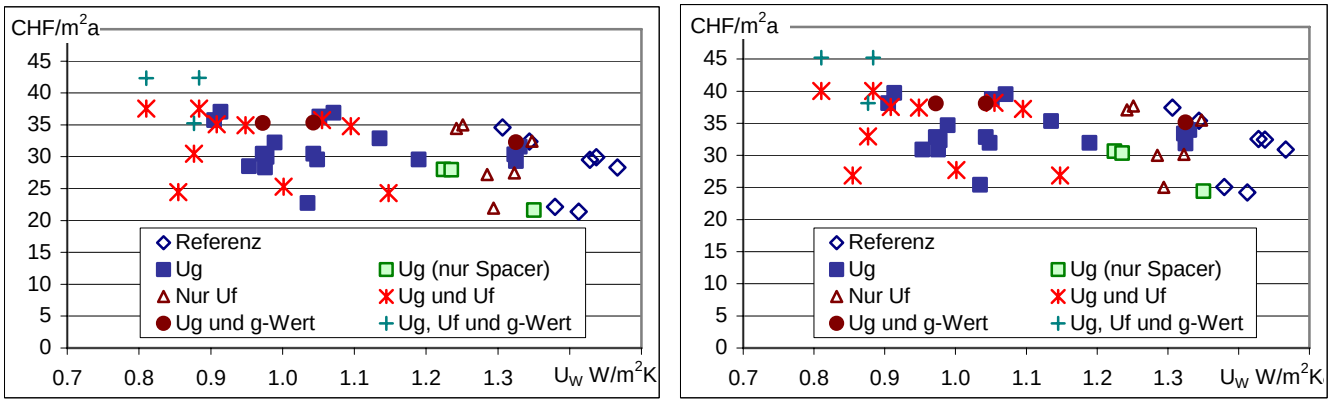


Abbildung 70 Jahreskosten (CHF/m$^2_{Fe}$a) als Funktion des erreichten Fenster-U-Werts Uw für die Orientierungen Süd (links) und Nord (rechts) (Energiepreis 7 Rp/kWh, Realzins 3%)

5.2.3 Fenster bei bestehenden Gebäuden

Eine ähnliche Betrachtung wie beim Neubau kann bei der Fenstererneuerung gemacht werden. Da es sich bei Grenzkosten um Differenzbetrachtungen handelt, sind die Grenzkosten einer Verbesserung gegenüber einem neuen Standardfenster, das ohnehin ersetzt würde, gleich wie beim Neubau. Auf der Ebene der Jahreskosten ergibt sich für alle Fenster, d.h. für Referenzfenster wie für energieeffizientere Fenster, eine vertikale Verschiebung nach oben (für die Demontage und die Entsorgung der alten Fenster). Diese beträgt je nach Unternehmen ca. 2 bis 4 CHF/m^{2}a.

Unterschiedlich zu behandeln sind die Referenzfälle „Instandsetzung“ und „laufende Energiekosten“.

- Referenzfall „laufende Energiekosten“: Zu jedem beliebigem Zeitpunkt (auch ausserhalb des Erneuerungszyklus) kann die Frage gestellt werden, ob die laufenden Energiekosten mit alten Fens-

tern höher sind als die Vollkosten eines Fensterersatzes. Sind Kapital- und Energiekosten des neuen Fensters geringer als die laufenden Energiekosten, ist ein Ersatz wirtschaftlich

- Referenzfall „Instandsetzung": Zum Zeitpunkt einer notwendigen Instandsetzung (bei Holzfenstern typischerweise alle 12 bis 18 Jahre) kann die Frage gestellt werden, ob die laufenden Energiekosten plus die Instandsetzungskosten (umgelegt auf Jahreskosten) höher oder tiefer sind als die Vollkosten eines Ersatzes. Die Kosten einer Fensterinstandsetzung betragen bei Holzfenstern bei fachgerechter Ausführung rund 60 bis 100 CHF/m^2 (bei geringem Auftragsvolumen eher 70 bis rund 120 CHF/m^2Fe).

In Tabelle 76 sind die Jahreskosten der Fälle „laufende Energiekosten" und „Instandsetzung" dargestellt. Bei der Berechnung der Energiekosten wurden nebst den Transmissionsverlusten und den Solargewinnen die Lüftungsverluste mitberücksichtigt (Annahme: 80 MJ/m^2_{Fe}a). Die Kosten einer Fensterinstandsetzung betragen bei Holzfenstern bei fachgerechter Ausführung rund 60 bis 100 CHF/m^2 (bei geringem Auftragsvolumen eher 70 bis rund 120 CHF/m^2Fe).

	Ug (W/m²K)	g-Wert	Uf (W/m²K)	Psi	Rahmen-anteil	Uw (W/m²K)	Jahreskosten CHF/m^2_{FE}a Orientierung Süd	Ost	West	Nord
Laufende Energiekosten	2.2	72%	1.5	0.07	0.29	2.2	6.4	6.3	5.8	9.8
Laufende Energiekosten	3.0	72%	1.5	0.07	0.29	2.8	11	10	10	14
Instandsetzung (u.W)	2.2	72%	1.5	0.07	0.29	2.2	11	11	11	15
Instandsetzung (o.W.)	3.0	72%	1.5	0.07	0.29	2.8	19	19	18	22
Annahme unterer Wert (u.W.): 60 CHF/m2, Annahme oberer Wert (o.W.): 100 CHF/m2(Lebensdauer je 15 Jahre)										

Tabelle 76: **Jahreskosten der Fälle „laufende Energiekosten" und „Instandsetzung" bei Fenstern** (Energiepreis 7 Rp/kWh, Nutzungsgrad Heizsystem 0.9, variabler Anteil Wärmeerzeugungskosten 1 Rp/kWh)

Sowohl im Referenzfall „Instandsetzung", v.a. aber im Referenzfall „laufende Energiekosten" sind die resultierenden Jahreskosten in den meisten Fällen tiefer als die Jahreskosten eines Fensterersatzes (vgl. mit Abbildung 70 zuzüglich ca. 2 bis 4 CHF/m^2a), z.T. markant tiefer. Wirtschaftlich wird ein Fensterersatz nur,

- wenn die Instandsetzungskosten 120 bis 150 CHF/m^2 überschreiten oder
- wenn damit gerechnet werden muss, dass die Lebensdauer der Instandsetzung markant unter 15 Jahren liegt, oder
- wenn der Energiepreis markant höher liegen würde (d.h. ohne die Neuwertigkeit eines neuen Fensters speziell zu bewerten). Damit ein Fensterersatz zum Zeitpunkt der Instandsetzung wirtschaftlich wird (mit oben stehenden Annahmen), müsste der Energiepreis 9 Rp/kWh betragen (Fall Instandsetzungskosten=100 CHF/m^2, Ug=3.0) bzw. 18 Rp/kWh (Fall Instandsetzungskosten=60 CHF/m^2, Ug=2.2). Damit ein Fensterersatz zu jedem beliebigen Zeitpunkt wirtschaftlich wird, müsste der Energiepreis 14 Rp/kWh betragen (Fall Ug=3.0, Orientierung Nord) bzw. ca. 17 Rp/kWh (Fall Ug=3.0, Orientierungen Ost, Süd, West).
- wenn das Kostenniveau des Fensterersatzes markant geringer wäre.

Daraus wird insgesamt plausibel, dass ein Fensterersatz in den allermeisten Fällen nicht aus energetischen Gründen oder aus Kostengründen vorgenommen wird (entscheidend sind vielmehr die Lebensdauer, der Zustand, der über die Machbarkeit einer Instandsetzung entscheidet, sowie Komfortüberlegungen, z.B. Zugserscheinungen).

5.3 Lüftungsanlagen

Die Energieeffizienz bei Lüftungsanlagen kann in zweierlei Hinsicht gesteigert werden, nämlich zum einen bezüglich Wärmebedarf und zum anderen bzgl. Elektrizitätsbedarf. Bei den Massnahmen, sowohl bei den betrieblichen als auch bei den investiven, lassen Wärme- und Elektrizitätsbedarf gleichzeitig reduzieren. Besonders im Gebäudebestand ist die Ausgangslage im Bereich Lüftung vielfältig und entsprechend vielfältig präsentiert sich im folgenden das Massnahmenspektrum.

5.3.1 Einbau einer Lüftungslage mit Wärmerückgewinnung

Der Hauptnutzen von Lüftungsanlagen ist in der Sicherstellung der Luftqualität (Lufthygiene, geringe Konzentration an CO_2, Schadstoffen, Gerüchen etc.), der Verringerung der Aussenlärmbelastung und – bei Zuluftkühlung – in der Verbesserung des thermischen Komforts zu sehen. Historisch gesehen wurden Lüftungsanlagen zunächst zu diesen Zwecken eingebaut und das Thema der Energieeffizienz folgte erst in einem nächsten Schritt. So gesehen ist der mit Lüftungsanlagen oder Lüftungskonzepten verbundene Energieeffizienzgewinn als Zusatznutzen zu betrachten.

Werden Lüftungsanlagen (mit der einen oder anderen Form von Wärmerückgewinnung) trotzdem als reine Energie-Effizienzmassnahme betrachtet, so ist deren Einbau auch im Bereich Dienstleistungsgebäude mit relativ hohen Grenzkosten bzw. mit Netto-Jahresmehrkosten verbunden. Gegenüber dem Referenzfall der manuellen Fensterlüftung betragen diese Nettomehrkosten im Neubau 7 bis 9 CHF/m²a. Gegenüber der automatisieren Fensteröffnung, welche bis zu einem gewissen Mass eine ähnliche lufthygienische und komfortthermische Funktionalität wie die Lüftungsanlage wahrnehmen kann, sind die Mehrkosten wesentlich geringer, nämlich nur 2 bis gut 3 CHF/m²a (siehe Tabelle 77). Im Vergleich zur manuellen Fensteröffnung betragen die Grenzkosten der gewonnenen (Brennstoff)-Energieeffizienz im günstigsten Fall knapp 40 Rp/kWh und im Vergleich zur automatisieren Fensteröffnung liegen sie zwischen 17 und 30 Rp/kWh.

Die entsprechenden Werte der Mehrkosten bzw. Grenzkosten liegen im Gebäudebestand noch etwas höher, weil das Niveau der Investitionskosten aufgrund von baulichen Anpassungsarbeiten und allfälligen Abbrucharbeiten höher liegt (siehe Abbildung 45 bis Abbildung 47). Entsprechend erhöhen sich die Kapital- und damit die Jahreskosten in Tabelle 77).

	EKZ_{Brst}	EKZ_{el}	Investition	Jahreskosten CHF/m²a					Grenzkosten
	MJ/m²a	MJ/m²a	CHF/m²	Kapital	Unterhalt	Brennstoffe	Elektrizität	Total	CHF/kWh
Keine mech. Lüftung, man. Fensteröffn.	206					4.0	0.0	4.0	
Automatische Fensteröffnung	206		58 *	4.9	0.6	4.0	0.0	9.5	
Lüftung mit WRG	134	27	92 **	7.4	1.8	2.6	1.3	13.0	0.25
CO_2-gesteuert (geringere Luftmengen), Druckverluste Standard	130	18	82 **	6.6	1.6	2.5	0.8	11.5	0.17
Abluft-Anlage	119	29	80 **	6.7	1.6	2.3	1.4	12.0	0.17
Dezentrale Fassaden-Lüftungsgeräte	148	9	95	7.9	1.9	2.9	0.4	13.1	0.30

Tabelle 77: **Einbau von verschiedenen Lüftungssystem im Vergleich zu manuellen oder automatisierten Fensterlüftung (Referenz) am Fallbeispiel eines Gebäudes mit 3000 m² belüfteter Fläche** (energetische Werte gemäss Simulationsergebnissen oder Abschätzungen CEPE, * Kosten gemäss Abbildung 45, Fensterfläche zu EBF: 0.3, ** Kosten gem. Abbildung 46 u. Abbildung 47, 4 (m³/h)/m²)

Aus der Sicht Wirtschaftlichkeit sind die CO_2-geregelte Lüftungsanlage (welche hier mit eher konservativen Annahmen berechnet wurde) sowie die dezentralen und kombinierten Fassaden- oder Brüs-

tungsgeräte als interessante Potenziale zu bezeichnen. Die Stärke der CO_2-geregelten Lüftungsanlagen liegt in ihrer bedarfsgerechten Dimensionierungs- und Betriebsmöglichkeit und die Stärke der kombinierten dezentralen Geräte in den damit nutzbaren Verbundsvorteilen (economy of scope).

5.3.2 Gekoppelte Steigerung der Elektrizitäts- und Wärme-Effizienz bei Lüftungsanlagen im Neubau

Die Elektrizitätseffizienz von Lüftungsanlagen kann durch geringere Druckverluste, effizientere Ventilatoren und eine Reduktion der zu fördernden Luftmengen erreicht werden. Die letztgenannte Massnahme reduziert zudem den Wärmeendenergiebedarf, wobei der Effekt bei hoher Effizienz der WRG-Anlage relativ gering ist.

Die höheren Investitionskosten für Anlagen mit geringeren Druckverlusten (Monobloc und Verteilkanäle mit höherem Durchmesser) gemäss Abbildung 46 von 10% bzw. 7% (für eine Reduktion des Druckverlusts von 800 Pa auf 1200 Pa und einen um 10%-Punkte höheren Ventilator / Elektromotorwirkungsgrad) lassen sich nicht vollständig durch geringere Elektrizitätskosten amortisieren (es verbleiben geringe Mehrkosten von 0.3 CHF/m^{2}a, siehe Tabelle 78, E1). Die Durchschnittskosten der gewonnenen Elektrizitätseffizienz im Vergleich zur Referenz liegen bei etwas über 25 Rp/kWh (Differenz der Jahreskosten für Kapital, Brennstoffe und Unterhalt zur Referenz dividiert durch Elektrizitätseffizienzgewinn). Um eine Wirtschaftlichkeit zu erreichen, dürften die Mehr-Investitionskosten nur 7% bzw. 5% betragen. Dies gilt für Anwendungen mit Nutzungszeiten, wie sie für Bürogebäude o.ä. typisch sind. Bei betrieblich bedingt längeren Nutzungszeiten können sich die Mehrinvestitionskosten für eine Auslegung mit geringeren Druckverlusten durchaus amortisieren.

Das Konzipieren der Lüftungsanlage mit CO_2-Regelung und entsprechend geringeren Luftmengen ist jedoch wirtschaftlich sehr attraktiv, denn es können sowohl die Investitions- wie die Elektrizitätskosten und damit auch die gesamten Jahreskosten gesenkt werden (Tabelle 78, E2) Der Befund gilt sowohl für Anlagen mit hohem wie mit mittlerem WRG-Wirkungsgrad und sowohl für kleine wie für grosse Gebäude (siehe Abbildung 71 und Abbildung 135 im Anhang). Die Durchschnittskosten der gewonnenen Elektrizitätseffizienz (E2 im Vergleich zu Ref) sind negativ, d.h. pro nicht bezogene kWh Elektrizität fallen nicht nur keine Kosten an, sondern es wird netto sogar ein Gewinn erzielt.

	EKZ_{el}	EKZ_{Brst}	Investition	Jahreskosten CHF/m^{2}a					Spez. DK
	MJ/m^{2}a	MJ/m^{2}a	CHF/m^2	Kapital	Unterh.	Brennstoff	Strom	Total	CHF/kWh$_{el}$
Fall WRG 65%									
Ref: Standard (Druckverl. ca. 1200 Pa)	26*	55*	88	7.4	1.8	1.1	1.2	11.4	
E1: Geringere Druckverl. (ca. 800 Pa)	14***	55*	96	8.0	1.9	1.1	0.7	11.7	0.27
E2: CO_2-geregelt , Druckverl Standard	17**	36**	84	7.0	1.7	0.7	0.8	10.2	-0.32
E3: CO_2-geregelt, geringere Druckverl.	9***	36**	90	7.5	1.8	0.7	0.4	10.5	-0.04
Fall WRG 90%									
Ref: Standard (Druckverl. ca. 1200 Pa)	26*	13*	92	7.4	1.8	0.2	1.2	10.6	
E1: Geringere Druckverl. (ca. 800 Pa)	14***	13*	100	8.0	1.9	0.2	0.7	10.9	0.27
E2: CO_2-geregelt , Druckverl Standard	17**	8**	87	7.0	1.7	0.2	0.8	9.7	-0.21
E3: CO_2-geregelt, geringere Druckverl.	9***	8**	93	7.5	1.8	0.2	0.4	9.9	0.03

Tabelle 78: Effizienzmassnahmen bei Lüftungen im Neubau für zwei unterschiedliche WRG-Wirkungsgrade, Fallbeispiel Bürogebäudeneubau mit 3000 m^2 EBF (Lebensdauer 15 Jahre, Realzinssatz 3%, Brennstoffpreis 7 Rp/kWh, Elektrizitätspreis 17 Rp/kWh, *energetische Werte gemäss Simulationsrechnungen, Betriebszeit werktags von 7 bis 19 Uhr, ** 35% geringere Luftmengen, *** Umrechnung gemäss Druckverlust-Verhältnis und höherer Ventilatorwirkungsgrad: 65% statt 55%)

Dass nebst den Energiekosten auch die Investitionskosten reduziert werden können (wenn auch nur geringfügig), ist ein bemerkenswerter Befund, denn üblicherweise sind energie-effizientere Varianten in der Gebäudetechnik mit höheren Investitionskosten verbunden (die ganz oder teilweise über geringere Betriebskosten amortisiert werden können). Die CO_2-geregelte Lüftung erhält damit – als eine der wenigen Ausnahmen – selbst bei investitionsorientierten Entscheidungskriterien eine Attraktivität.

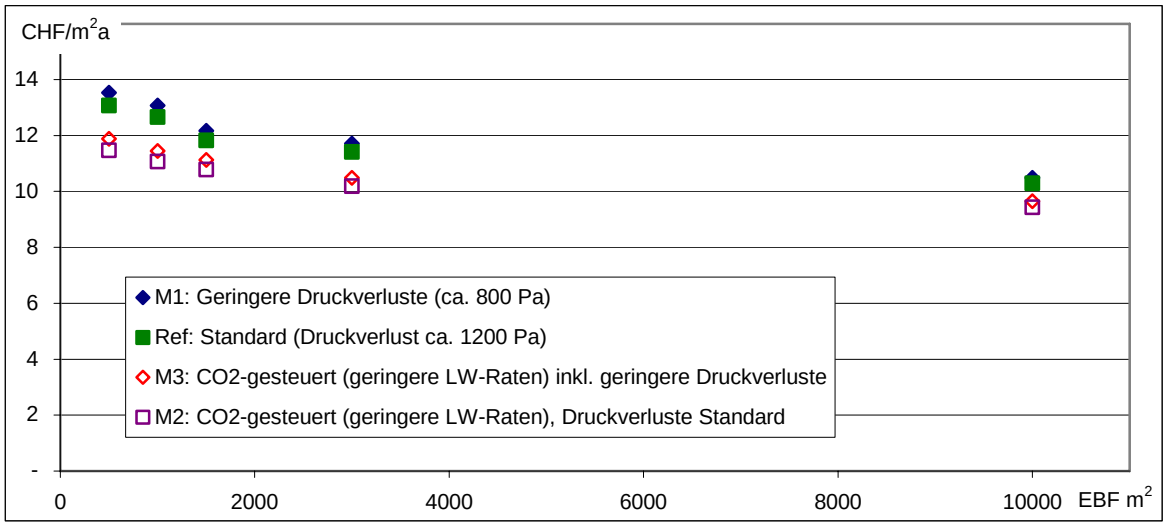


Abbildung 71 **Spezifische Jahreskosten von Lüftungsanlagen mit WRG unterschiedlicher Energie-Effizienz als Funktion der zu belüftenden Fläche** (Investitionskosten gemäss Abbildung 46, Annahmen gemäss Tabelle 78, thermischer WRG-Wirkungsgrad 65%)

5.3.3 Gekoppelte Steigerung der Elektrizitäts- und Wärme-Effizienz bei Erneuerungen von Lüftungsanlagen im Gebäudebestand

Lüftungsanlagen im Gebäudebestand sind oft durch hohe Luftmengen und Druckverluste charakterisiert. Entsprechend gross ist das Potenzial für hohe Effizienzgewinne bei der Erneuerung von solchen Anlagen. Die Erneuerung der Anlagen ermöglicht es oft, die Luftmengen dem tatsächlichen lufthygienischen Bedarf anzupassen und die Druckverluste der Luftaufbereitung und der Luftverteilung und damit den Strombedarf markant zu reduzieren. Aufgrund der geringeren Luftmengen reduziert sich auch der Wärmeenergiebedarf (selbst bei gleichbleibender Wärmerückgewinnungssituation[23]) und der Kühlenergiebedarf bei Anlagen mit Zuluftkühlung.

Der Elektrizitätsbedarf für die Luftförderung ist proportional zum zu überwindenden Druckverlust und proportional zur geförderten Luftmenge. Der Druckverlust wiederum ist mit guter Näherung proportional zur Geschwindigkeit im Quadrat und damit bei gegebenem Querschnitt zur geförderten Luftmenge im Quadrat. Bei der Reduktion der Luftmenge um einen Faktor zwei wäre – alles andere unverändert – eine Reduktion der Druckverluste um einen Faktor vier zu erwarten. Bei einer Erneuerung der Lüftungsanlage wird jedoch davon ausgegangen, dass die Komponenten gemäss der neuen Luftmengen ausgelegt werden, so dass die Annahme einer derart starken Reduktion der Druckverluste unrealistisch wäre.

Bezüglich Druckverlusten liegen den Ergebnissen in Tabelle 79 und Tabelle 102 die Annahmen gemäss Tabelle 24 zugrunde (Gebäudetyp BB3 inkl. WRG). Der Wirkungsgrad des Ventilators und der WRG wurden bei der erneuerten Anlage als unverändert angenommen[24]. Die Ergebnisse zeigen, dass eine

---

[23] Der Effekt einer Verbesserung der WRG-Anlage bei der Erneuerung der Lüftungszentrale wird in diesem Unterkapitel nicht berücksichtigt, sondern im Unterkapitel 5.3.4 behandelt

[24] Den Vergleichsrechnungen liegen auf der technischen Seite insgesamt konservative Annahmen zugrunde: es

Erneuerung der Lüftungsanlagen je nach Vergleichsfall und je nach Eingriffstiefe entweder mit markant geringeren, knapp geringeren oder ungefähr gleichen Jahreskosten zu realisieren ist. Am knappsten ist die Wirtschaftlichkeit, wenn nur mit den laufenden Energiekosten verglichen wird und die Betriebsstunden bereits im Referenzfall optimiert sind und bei der Erneuerung nicht mehr weiter angepasst werden können. In diesem Fall sind die Jahreskosten einer Erneuerung der Lüftungszentrale knapp geringer, die Kosten einer gesamten Erneuerung inkl. Erneuerung der Lüftungsverteilung jedoch etwas höher (rund 1.5 CHF/m^{2}a im Fall ohne Kühlung und 0.2 CHF/m^{2}a im Fall mit Zuluftkühlung, siehe Tabelle 102). Werden jedoch die laufenden Unterhaltskosten in die Vergleichsrechnung mit einbezogen, lassen sich mit einer Lüftungserneuerung netto Jahreskosten senken, insbesondere weil davon auszugehen ist, dass die Unterhaltskosten von alten Anlagen eher höher sind als diejenigen von erneuerten.

		Endenergie (*)		Investitionen	Jahreskosten				
		Wärme	Strom		Kapital	Unterhalt	Brennstoff	Elektrizität	Total
		MJ/m^{2}a	MJ/m^{2}a	CHF/m^2	CHF/m^{2}a	CHF/m^{2}a	CHF/m^{2}a	CHF/m^{2}a	CHF/m^{2}a
R1.1	Zweifache Luftmenge (LM), 8 (m^3/h)/m^2, 24 h/Tag, 2700 Pa, ohne [bzw. R1.2 inkl.] Unterhaltskosten	385	340			[3.1]	7.5	16.2	23.6 [26.7]
R2.1	Zweifache Luftmenge (LM), 8 (m^3/h)/m^2, 12 h/Tag, 2700 Pa, ohne [bzw. R2.2 inkl.] Unterhaltskosten	125	195			[3.1]	2.5	9.3	11.8 [14.9]
E1	LM gemäss Bedarf: 4 (m^3/h)/m^2, 12 h/Tag, neue Lüftungsanlage (alte Verteilung), 2025 Pa	60	45	68	5.7	2.1	1.2	2.2	11.1
E2	LM gemäss Bedarf: 4 (m^3/h)/m^2, 12 h/Tag, neue Lüftungsanlage, neue Verteilung, 1375 Pa	60	30	104	8.7	2.1	1.2	1.5	13.4

Tabelle 79: **Energiebedarf, Investitions- und Jahreskosten bei Lüftungserneuerungen (neuer Monobloc ohne bzw. inkl. neuer Verteilung), Fallbeispiel Bürogebäudeneubau mit 3000 m^2 EBF, ohne Zuluftkühlung** (Annahmen: Lebensdauer 15 Jahre, Realzinssatz 3%, Brennstoffpreis 7 Rp/kWh, Elektrizitätspreis 17 Rp/kWh, (*) energetische Werte gemäss Simulationsrechnungen, gerundet.

Die Grenzkosten der Elektrizitätsbedarfs-Reduktion (bei fixem Brennstoffpreis von 0.07 CHF/kWh) liegen entsprechend – mit einer Ausnahme – unter 17 Rp/kWh, in manchen Fällen deutlich (siehe Tabelle 80). Die Ausnahme betrifft den Fall R2.1 mit bereits reduzierten Betriebszeiten in der Referenz, aber ohne Berücksichtigung der laufenden Unterhaltskosten (Vergleichsbasis laufende Energiekosten). Zur Erinnerung: alle Massnahmen mit Grenzkosten unter dem geltenden Elektrizitätspreis sind als wirtschaftlich zu bezeichnen. Pro kWh lässt sich ein Gewinn in der Höhe der Differenz zwischen Grenzkosten und Elektrizitätspreis erzielen. Sind die Grenzkosten negativ, ist der „Erlös" pro reduzierte kWh sogar grösser als der Elektrizitätspreis (d.h. die Massnahme wäre selbst bei kostenloser Elektrizität wirtschaftlich).

Die Grenzkosten der Wärmeendenergie-Reduktion (bei fixem Elektrizitätspreis von 17 Rp/kWh) liegen – wiederum mit der Ausnahme R2.1 – deutlich unter dem mittelfristig zu erwartenden Brennstoffpreis. In vielen Fällen sind die Grenzkosten gar negativ, d.h. pro kWh eingesparte Wärme-Endenergie lassen sich netto Kosten reduzieren, die höher sind als der Brennstoffpreis (d.h. die entsprechenden Massnahmen wäre selbst bei kostenlosem Brennstoff wirtschaftlich).

---

wurde von einem konstanten Wirkungsgrad der Ventilatoren (55%) und der WRG (65%) ausgegangen. Wäre der WRG-Wirkungsgrad im Referenzfall geringer, lägen die gesamten Jahreskosten im Referenzfall höher (beispielsweise um 40% der Brennstoffkosten) oder wäre der Ventilatorwirkungsgrad nach der Erneuerung höher, lägen die resultierenden Jahreskosten entsprechend tiefer, was die Wirtschaftlichkeit insgesamt weiter verbessern würde.

Die Wirtschaftlichkeit von Lüftungserneuerungen, wie sie hier beschrieben sind, schneidet v.a. deshalb relativ gut ab, weil die Energiekosten (Wärme und Elektrizität) aufgrund eines geringeren Luftwechsels markant gesenkt werden. Entsprechend ist an dieser Stelle anzumerken, dass sich die Vollkosten einer Lüftungserneuerung nicht über geringere Energiekosten amortisieren lassen, falls im konkreten Einzelfall keine Reduktion der Luftmengen erreicht werden (d.h. bei konstanten Luftmengen vor und nach der Erneuerung), wie sich aus den strukturellen Kostenangaben in Tabelle 79 und in Tabelle 102 ableiten lässt. Es ist jedoch davon auszugehen, dass bei den meisten erneuerungsbedürftigen Lüftungsanlagen der Installationsperiode vor 1990 von einer Luftmengenreduktion ausgegangen werden kann.

	Grenzkosten der Elektrizitätsbedarfs-Reduktion (CHF/kWh)		Grenzkosten der Wärmeendenergie-Reduktion (CHF/kWh)	
Referenzfälle (Zweifache Luftmenge (LM), 8 (m³/h)/m², 2700 Pa)	E1	E2	E1	E2
R1.1 24 h/Tag, ohne Unterhaltskosten	0.02	0.05	-0.07	-0.04
R2.1 12 h/Tag, ohne Unterhaltskosten	0.15	0.21	0.03	0.16
R2.1 24 h/Tag, inkl Berücksichtigung von Unterhaltskosten	-0.02	0.02	-0.10	-0.08
R2.2 12 h/Tag, inkl Berücksichtigung von Unterhaltskosten	0.08	0.14	-0.13	-0.01

Tabelle 80: Spezifische Grenzkosten (CHF/kWh) bei Lüftungserneuerungen (E1: neuer Monobloc, E2: neuer Monobloc inkl. neue Verteilung), Fallbeispiel Bürogebäudeneubau mit 3000 m² EBF, ohne. Zuluftkühlung (Kosten und energetische Werte gemäss Tabelle 79).

Anzumerken ist an dieser Stelle, dass sich bei Anlagen mit Zuluftkühlung die Reduktion der Luftmengen im Sommer auf Ebene des thermischen Komforts bemerkbar machen kann. Bei Gebäuden mit hohen internen Lasten reicht eine Luftmenge von 4 (m³/h)/m² in Südräumen nicht aus, um die Komfortanforderungen einzuhalten. In diesen Fällen ist eine markante Reduktion der internen Lasten (Personen, Geräte, Beleuchtung) oder – falls dies nicht möglich ist – eine ergänzende Kühlung mit Kühlelementen erforderlich (was mit entsprechenden Zusatzkosten verbunden ist). Bei Gebäuden mit geringer Belegung durch Personen und Geräte kann der Komfort durch eine gleichzeitige Beleuchtungserneuerung sichergestellt werden.

Die im weiter obenstehenden Kapitel 5.3.2 beschriebenen Massnahmen lassen sich – mit gewissen Anpassungen – auch im Gebäudebestand ergreifen. Zum einen mag die weitergehende Reduktion der Druckverluste mittels grösserer Luftkanalquerschnitte aus baulichen Gründen in manchen Fällen eher weniger in Frage kommen. Zum anderen ermöglicht es die CO_2-Regelung, bei Lüftungserneuerungen die Luftmengen und damit die Druckverluste weiter zu reduzieren und dies bei aus baulichen Gründen gegebenen Lüftungsquerschnitten. Im Vergleich zu Standardlüftungserneuerungen können damit ähnliche Energie- und Kosteneffizienzgewinne erzielt werden, wie sie in Tabelle 78 ausgewiesen sind. Anzupassen sind allenfalls das etwas höhere Kostenniveau im Gebäudebestand (Abbildung 45 bis Abbildung 47) und das absolute Niveau der Druckverluste (siehe Tabelle 24) und entsprechend des Elektrizitätsbedarfs.

5.3.4 Einbau einer Wärmerückgewinnungsanlage im Gebäudebestand

Es ist davon auszugehen, dass ein Teil der Lüftungsanlagen im Gebäudebestand nicht mit einer Wärmerückgewinnungsanlage (WRG) ausgerüstet ist. Der Einbau einer WRG-Anlage führt in diesen Fällen zu geringeren Jahreskosten (Abbildung 72), d.h. die entsprechende Massnahme ist rentabel und es können netto Kosten eingespart werden. Die (relativ geringen) Investitionskosten lassen sich über die angenommene wirtschaftliche Lebensdauer von 15 Jahren amortisieren und nebst der Netto-Kosteneinsparung mit 3% real verzinsen, dies trotz leicht höheren Elektrizitätskosten (Tabelle 81) aufgrund des höheren Druckverlusts, der mit dem WRG-Einbau verbunden ist. Die Wirtschaftlichkeit ist in besonders ausgeprägtem Mass für den Fall mit einem Rund-um-die-Uhr-Betrieb gegeben, aber auch

im Referenzfall des werktäglichen 12-Stunden-Betriebs ist der Energieeffizienzgewinn gross genug für eine ausreichende Wirtschaftlichkeit. Dies gilt selbst für ungünstigere Annahmen wie einem höheren Realzinssatz (5%) und einem geringeren Brennstoffreis (5 Rp/kWh), vgl. Abbildung 136 im Anhang.

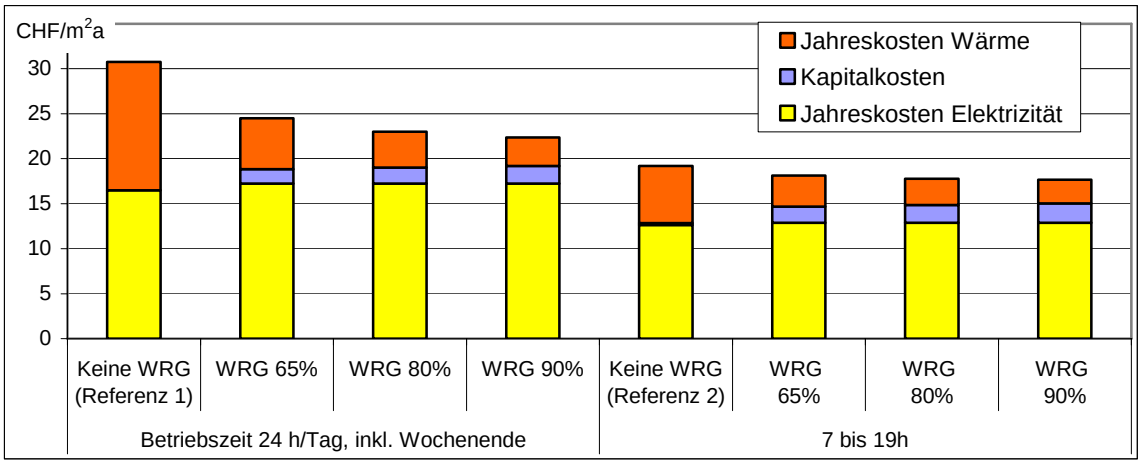


Abbildung 72 Jahreskosten nach Einbau von WRG sowie Einbau von WRG und Betriebszeit-Reduktion im Vergleich zu Lüftung ohne WRG im 24h-Betrieb (Referenz 1) und im 12h-Betrieb (Referenz 2), Fallbeispiel 1500 m^2_{EBF}, Investitionskosten gemäss Abbildung 47 (Mittelwert), 3% Realzins, Energiekosten gemäss Simulationsrechnungen (Energiebedarf für das gesamte Gebäude), Elektrizitätspreis 17 Rp/kWh, Brennstoffpreis 7 Rp/kWh, Luftmenge 4 $(m^3/h)/m^2$, energetische Wirkung der WRG gemäss Tabelle 81.

Entsprechend „dürften" die Investitionskosten bei einem Realzins von 3% auch etwa 15% bis 20% höher sein als in Tabelle 81 angenommen und die Wirtschaftlichkeit wäre dennoch gegeben (für den 12-Stunden-Betrieb; im 24-Stunden-Betrieb dürften die Investitionskosten noch deutlich höher liegen).

Beim Vergleich zwischen den beiden Referenzfällen wird aus Abbildung 72 ebenfalls deutlich, dass eine Anpassung der Betriebszeiten mit sehr hohen Kosteneinsparungen verbunden ist (gut 10 CHF/m^2a).

Die Durchschnittskosten und die Grenzkosten der eingesparten Wärme-Endenergie ergeben sich aus der Differenz der Kapitalkosten plus der Differenz der (leicht höheren) Elektrizitätskosten dividiert durch den Wärme-Endenergie-Effizienzgewinn, wobei im Fall der Durchschnittskosten je auf den Referenzfall und im Fall der Grenzkosten auf die vorangehende Effizienzstufe Bezug genommen wird. Folgende Referenzfälle werden betrachtet:

- Referenzfall 1: Betriebszeit der Lüftungsanlage beträgt 24 h/Tag (inkl. Wochenende)
- Referenzfall 2: Lüftungsanlage ist zwischen 7 Uhr und 19 Uhr in Betrieb (nur werktags)

Gegenüber dem Referenzfall des 24-Stunden-Betriebs liegen die Durchschnittskosten unter 2 Rp/kWh und gegenüber dem Referenzfall des 12-Stunden-Betriebs unter 5 Rp/kWh bzw. nahe bei 4 Rp/kWh (bei einem thermischen WRG-Wirkungsgrad von 80% oder höher), siehe Tabelle 81. Solange die Grenzkosten der Wärmeerzeugung (kurzfristig: Endenergiepreis dividiert durch den Wirkungsgrad der thermischen Wärmeerzeugung und -verteilung) unter diesen Durchschnittskosten liegen, ist der Einbau einer WRG als wirtschaftlich zu bezeichnen.

Die in diesem Kapitel dargestellten Ergebnisse gelten für das Fallbeispiel eines kleinen bis mittleren Bürogebäudes mit rund 1500 m^2 belüfteter Fläche (bei Annahme von 4 $(m^3/h)/m^2$). Aufgrund des Skaleneffekts der Investitionskosten ist die Wirtschaftlichkeit für grössere Gebäude (bzw. für grössere Anlagen z.B. aufgrund eines höheren Luftwechsels) leicht besser, für kleinere Gebäude etwas schlechter, wobei zu betonen ist, dass der Skaleneffekt relativ gering ist (siehe Abbildung 47). Bauliche Anpassungen haben im Einzelfall mutmasslich einen grösseren Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit.

Betriebszeit		24 h / Tag				7 h bis 19 h			
WRG (thermischer Wirkungsgrad)		Referenz 1 keine	65%	80%	90%	Referenz 2 keine	65%	80%	90%
Investitionskosten	CHF/m3		4.8	5.3	5.8	0.5	5.3	5.8	6.3
Investitionskosten	CHF/m^2_{EBF}		19.2	21.2	23.2	2.2	21.4	23.4	25.4
Lebensdauer	Jahre	15	15	15	15	15	15	15	15
Kapitalkosten (dr=0.03)	CHF/m^2_{EBF}a		1.6	1.8	1.9	0.2	1.8	2.0	2.1
$EKZ_{WärmeEE}$ (gesamtes Gebäude)	MJ/m^2_{EBF}a	730	290	200	160	330	180	150	140
EKZ_{El} (gesamtes Gebäude)	MJ/m^2_{EBF}a	350	365	365	365	270	275	275	275
Reduktion $EKZ_{WärmeEE}$	MJ/m^2_{EBF}a		440	530	570		150	180	190
Differenz EKZ_{El}	MJ/m^2_{EBF}a		+15	+15	+15		+5	+5	+5
Durchschnittskosten	CHF/kWh_{thEE}		0.019	0.017	0.017		0.045	0.041	0.041
Grenzkosten	CHF/kWh_{thEE}		0.019	0.007	0.014		0.045	0.022	0.045

Tabelle 81: **Durchschnittskosten (im Vergleich zu Referenz 1 bzw. Referenz 2) und Grenzkosten eines WRG-Einbaus im Vergleich zu Lüftung ohne WRG bei zwei verschiedenen Betriebszeiten**, Investitionskosten gemäss Abbildung 47 (Mittelwert), Elektrizitätspreis 17 Rp/kWh, Luftmenge 4 (m^3/h)/m^2, energetische Wirkung gemäss Simulationsrechnungen

5.3.5 Erneuerung von WRG-Anlagen in alten Lüftungsanlagen

Im Vergleich zu den laufenden Kosten lohnt sich ein Ersatz der WRG, falls der thermische Wirkungsgrad von 45% (bestehende WRG) auf 80% gesteigert werden kann (Tabelle 82), dies selbst im Vergleichsfall einer bereits im Referenzfall angepassten Luftmenge (4 (m^3/h)/m^2). Die Kapitalkosten der neuen WRG lassen sich also vollumfänglich über geringere Brennstoffkosten amortisieren (Realzins 3%, Brennstoffpreis 7 Rp/kWh). Falls der Wirkungsgrad der neuen WRG nur 65% aufweist, ist mit geringen Mehrkosten zu rechnen (0.5 CHF/m^2a), weil die Grenzkosten mit rund 10 Rp/kWh_{Brst} über den Brennstoffkosten liegen. Ein WRG-Wirkungsgrad von 65% ist im Vergleich zu 80% also als suboptimal zu bezeichnen.

		Ref1: WRG 45%, Betrieb 6-20 h, Luftmenge > 8 (m^3/h)/m^2	Ref2: WRG 45%, Betrieb 7-19 h, Luftmenge 4 (m^3/h)/m^2	WRG 65%, Betrieb 7-19 h, Luftmenge 4 (m^3/h)/m^2	WRG 80%, Luftmenge 4 (m^3/h)/m^2
EE-$EKZ_{Wärme}$ für Lufterwärmung	MJ/m^2_{EBF}a	264	119	63	20
Wärme-Endenergie-Effizienzgewinn	MJ/m^2_{EBF}a		144	200	244
Investitionskosten	CHF/(m^3/h)			4.8	5.3
Investitionskosten	CHF/m^2_{EBF}			19.2	21.2
Kapitalkosten (dr=0.03)	CHF/m^2_{EBF}a			1.6	1.8
Jahreskosten Wärme	CHF/m^2_{EBF}a	5.1	2.3	1.2	0.4
Jahreskosten total	CHF/m^2_{EBF}a	5.1	2.3	2.8	2.2
Durchschnittskosten i. Vgl. zu Ref2	CHF/kWh_{Brst}			0.10	0.06

Tabelle 82: **Investitions-, Jahres- und Durchschnittskosten eines WRG-Ersatz (thermischer Wirkungsgrad 65% und 80%) im Vergleich zu einer bestehenden WRG mit 45% thermischer Wirkungsgrad**, Fallbeispiel 1500m^2 EBF, Investitionskosten gemäss Abbildung 47 (Mittelwert), energetische Wirkung gemäss Simulationsrechnungen, Lebensdauer 15 Jahre, Brennstoffpreis 7 Rp/kWh

Sensitivität: Bei 15% höheren Investitionskosten, z.B. aufgrund von baulichen Anpassungen, erhöhen sich die Durchschnittskosten von 10 auf 12 Rp/kWh$_{tBrst}$ (WRG-Wirkungsgrad 65%) bzw. von 6 auf 7 Rp/kWh$_{tBrs}$ (Wirkungsgrad 80%).

5.3.6 Verbesserung des thermischen Wirkungsgrades bei Wärmerückgewinnungsanlagen

Die im weiter obenstehenden Unterkapitel 5.3.5 dargestellten Ergebnisse verdeutlichen auch, dass sich die Mehrkosten von WRG-Anlagen mit höherem thermischem Wirkungsgrad (Rückgewinnungszahl) von 80% bzw. 90% statt 65% durch die mit der gewonnenen Effizienz verbundenen geringeren Energiekosten amortisieren lassen. Die Durchschnittskosten gemäss Tabelle 81 sind mit zunehmendem Wirkungsgrad in der Tat fallend und die Grenzkosten liegen unter 2 Rp/kWh$_{EE}$ (Realzins 3%, 24 h-Betrieb) bzw. unter 5 Rp/kWh$_{EE}$ (Realzins 3%, 12-Stunden-Betrieb werktags) bzw. gerade bei 5 Rp/kWh$_{EE}$ (Realzins 5%, 12-Stunden-Betrieb werktags)), dies bei einem Elektrizitätspreis von 17 Rp/kWh.

Da die Mehr-Investitionskosten als Funktion des zunehmenden thermischem Wirkungsgrades (80% bzw. 90% statt 65%) im Neubaufall ungefähr ähnlich den Mehrkosten im Gebäudebestand sind, gelten die Ergebnisse auch für den Neubaufall. Ein möglichst hoher Wirkungsgrad ist bei WRG-Anlagen also zu empfehlen, und zwar sowohl im Gebäudebestand wie im Neubau.

5.4 Komfortkühlung

Im Bereich der Kühlung im Allgemeinen und im Bereich der Komfortkühlung im Speziellen existieren zahlreiche Möglichkeiten, die Energie-Effizienz markant zu steigern. Dies hängt u.a. mit dem jahres- und tageszeitlichen Bedarfsprofil der Gebäudekomfortkühlung und den meteorologischen Begebenheiten in der Schweiz zusammen, lässt sich aber auf weitere Länder der gemässigten Zonen generalisieren, namentlich für Europa nördlich des Alpengürtels. Wellig et al. (2006) beleuchtet die entsprechenden technischen und konzeptionellen Möglichkeiten auf allen Stufen und zeigt dabei die diversen und in ihrer Kumulation beträchtlichen Energie-Effizienzpotenziale auf. Diese liegen im Bereich Thermodynamik (geringer Temperaturhub, Nutzung von Verdunstungsenergie, Nutzung der thermischen Gebäudemasse), Technik (hocheffiziente Komponenten inkl. Peripherie), Regelung (vollumfängliche Nutzung der verfügbaren freien Kälte inkl. Parallelschaltungen von Kältemaschine und Free-Cooling) und Planung (adäquate Dimensionierungen, konsequente Integration aller genannten Massnahmen). Damit kann das Verhältnis der thermischen Kühlenergie zur eingesetzten Elektrizität auf bis zu 20 gesteigert werden, was im Vergleich zu einem Verhältnis von 2 oder weniger für konventionelle Kühlanlagen oder Kleinklimageräten eine beträchtliche Steigerung darstellt.

Nachfolgend werden einige der Massnahmentypen hinsichtlich einer Kosten- und Nutzenbetrachtung aufgegriffen, ohne jedoch einen Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben.

5.4.1 Effizientere Kältemaschinen

Energie-effizientere Kältemaschinen weisen – bei gegebenen Temperaturen und Rückkühlern – in der Regel höhere Investitionskosten auf. Am Beispiel einer Anlagengrösse von 600 kW$_{th}$ wird nachfolgend exemplarisch aufgezeigt, dass diese Mehrinvestitionskosten über geringere Betriebs- und Energiekosten amortisiert werden können. Obwohl die Investitionskosten der beiden betrachteten energieeffizienten Varianten rund 15% bzw. 50% höher liegen (bezogen auf die Kältemaschine, ohne Rückkühlung und Kälteverteilung und -abgabe), resultieren dank der höheren Jahresarbeitszahlen nicht höhere Jahreskosten (Tabelle 83). Eingerechnet in den Jahresarbeitszahlen ist auch der geschätzte Elektrizitätsbedarf der Hilfsaggregate wie Kältemittelpumpen und Rückkühlventilatoren. Beim Energieeffizienz-Typ 1 liegt die JAZ 15% höher als in der Referenz und beim Typ 2 um gut 35%, wobei sich dieser Typ durch ein ausgesprochen gutes Teillastverhalten auszeichnet. Weil bei diesem Typ zudem der Verdichter ölfrei ist, sind auch die jährlichen Unterhaltskosten geringer: 2.5% der Investiti-

onssumme der Kältemaschine, verglichen mit 3.5% bei der Referenz und beim Typ1 (die Unterhaltskosten der Verteilung und der Kälteabgabe wurden mit konstant 2.5%/a angenommen).

Anhand dieses exemplarischen Beispiels wird aufgrund der Struktur der Jahreskosten ebenfalls deutlich, dass zum einen die Energiekosten und zum anderen die Kapitalkosten der eigentlichen Kältemaschine nur einen geringen Teil der gesamten Jahreskosten der Gebäudekühlung darstellen. Die Rückkühlung und vor allem die Kälteverteilung und die Kälteabgabe in den Räumen schlagen mit wesentlich höheren Kostenanteilen zu Buche. Eine gute Planung und eine gute Konzeption können entsprechend wesentlich stärkere Auswirkungen auf die gesamten Jahreskosten haben als die Energieeffizienz und die Mehrinvestitionskosten der Kältemaschine.

		Referenz: KM mit Schrauben-verdichter, Trocken-expansions-verdampfer)	Typ 1: KM mit Schraubenver-dichter, überfluteter Verdampfer)	Typ 2: Quantum (ölfreier Ver-dichter, überfluteter Verdampfer)
Jahresarbeitszahl inkl. Hilfsaggregate		4.3	5.0	6.9
Kälteerzeugung (ohne Rückkühlung)	CHF/kW_{th}	175	200	257
Kälteerzeugung (inkl. Rückkühlung *)	CHF/m^2	9.0	9.7	11.3
Kälteabgabe (*)	CHF/m^2	50	50	50
Total Investition (inkl. Kälteabgabe)	CHF/m^2	59	60	61
Kapitalkosten	CHF/m^2a	4.9	5.0	5.1
Unterhalt	CHF/m^2a	1.6	1.6	1.5
Energie	CHF/m^2a	0.5	0.5	0.3
Total	CHF/m^2a	7.1	7.1	7.0

Tabelle 83: Jahreskosten von Gebäudekühlanlagen mit unterschiedlich effizienten Kältemaschinen am Beispiel einer Kälteleistung von 600 kW_{th}. Annahmen: installierte Leistung 35 W_{th}/m^2, Volllaststunden 400 h/Jahr, Lebensdauer 15 Jahre, Realzins 3% (Quelle Kälteunternehmen 1, Kosten gem. Tabelle 58, * Schätzung CEPE, Annahmen und Berechnungen CEPE)

5.4.2 Kälteerzeugung bei geringerem Temperaturhub oder alternativem Kältemittel

Wie 4.8.1 erläutert, können durch die Konzeption eines geringen Temperaturhubs zwischen Kälteabgabe und Rückkühlung die Investitionskosten der Kälteerzeugung verringert werden. Weil sich zudem die Energieeffizienz erhöht, resultieren entsprechend auch geringere Jahreskosten (und negative Grenzkosten), sofern auf Seite Kälteabgabe keine Mehrkosten aufgrund des geringeren Temperaturhubs und der damit verbundene höheren Vorlauftemperaturen ergeben. Bei den meisten Kälteabgabesystemen kann davon ausgegangen werden. Im Fallbeispiel einer Kälteanlage von 200 kWth resultieren 0.5 CHF/m^2a geringere Jahreskosten, siehe Tabelle 84.

Ob auch unter Einbezug der Systemgrenze „Kälteerzeugung, -verteilung und -abgabe" geringere Jahreskosten resultieren, hängt stark von den allfälligen Mehrkosten bei der Kälteabgabe ab. Mehrkosten können entstehen, weil aufgrund der höheren Vorlauftemperaturen grössere Wärmetauscherflächen notwendig werden. Wie aus Tabelle 84 ersichtlich ist, sind die m^2-spezifischen Investitionskosten der Kälteabgabe in den Räumen wesentlich höher als diejenigen der Kälteerzeugung. Entsprechend haben bereits relativ geringe relative Veränderungen der ersteren einen markanten Einfluss auf die gesamten jährlichen Kapitalkosten und damit auf die gesamten Jahreskosten. Sind mit geringerem Temperaturhub bzw. höherer Vorlauftemperatur bei der Kälteabgabe keine Mehrkosten verbunden, resultieren um 0.5 CHF/m^2a geringere Jahreskosten. Bei Mehrkosten von beispielsweise 15% würden jedoch Mehrkosten von etwas über 1 CHF/m^2a resultieren.

		KM 6°/12°, RK 40°/50°	KM 8°/14°, RK 40°/50°		KM 13°/19°, RK 35°/45°	
JAZ inkl. Pumpen		2.5	2.6		3.6	
Elektrizitätsbedarf	MJ_{el}/m^2a	23	22		16	
Investition Kälteerzeugung	$CHF/m^2_{Bodenfl}$	17.8	18.3		16.5	
Mehrkosten Kälteabgabe bei geringerem T.-Hub		Referenz	Ohne	Mit	Ohne	Mit
Investition Kälteabgabe (Schätzung)	CHF/m^2_{Bodenf}	100	100	105	100	116
Total Investition (inkl. Kälteabgabe)	CHF/m^2_{Bodenf}	118	118	123	116	132
Kapitalkosten	CHF/m^2	9.9	9.8	10.3	9.8	11.1
Unterhalt (2.5% der Inv.kosten)	CHF/m^2	2.9	3.0	3.1	2.9	3.3
Energie	CHF/m^2	1.1	1.0	1.0	0.7	0.7
Total	CHF/m^2	13.9	13.9	14.5	13.4	15.1

Tabelle 84: Jahreskosten von Gebäudekühlanlagen mit unterschiedlichem Temperaturhub am Beispiel einer Kälteleistung von 200 kW_{th} (Quelle Kälteunternehmen 2, Kosten gem. Tabelle 59, Annahmen und Berechnungen CEPE), KM mit Trockenrückkühler, installierte Kälteleistung 35 W_{th}/m^2, Volllaststunden 450 h/Jahr, Lebensdauer 15 Jahre, Realzins 3%

Ob mit energie-effizienteren Varianten geringere Jahreskosten resultieren, ist auch skalenabhängig. Die relativen Mehrinvestitionskosten sind als Funktion der Anlagengrösse nicht konstant und die Verhältnisse verschiedener technischer Varianten können sich je nach Anlagengrösse verändern. So sind beispielsweise Anlagen mit Ammoniak als Kältemittel bei einer Kälteleistung von 100 kW_{th} mit Mehrkosten (die zwar gering sind) verbunden, bei einer Anlagengrösse von 500 kW_{th} resultieren leicht geringere Jahreskosten als in der Referenz bzw. gleiche Jahreskosten wie bei der Anlage mit geringerem Temperaturhub (siehe Tabelle 85). Im übrigen bestätigen die Daten dieses weiteren Datenlieferanten den oben festgestellten Befund, dass die Jahreskosten von Anlagen mit geringerem Temperaturhub (Tabelle 85, Variante 1b) tiefer liegen als die Anlagen mit grossem Temperaturhub (welcher oft nicht notwendig ist).

		Kälteleistung 100 kWth			Kälteleistung 500 kWth		
		Variante 1a KM: 12°/18° RK: 40°/45°	Variante 1b KM: 15°/21° RK: 30°/36°	Variante 2 Kältemittel Ammoniak	Variante 1a KM: 12°/18° RK: 40°/45°	Variante 1b KM: 15°/21° RK: 30°/36°	Variante 2 Kältemittel Ammoniak
Jahresarbeitszahl		2.5	3.7	4.8	3.0	3.9	5.3
Elektrizitätsbedarf	MJ_{el}/m^2a	36	25	19	30	23	17
Inv. Kälteerzeugung	$CHF/m^2_{Bodenfl}$	9.3	9.1	18.6	6.2	6.0	9.1
Total (inkl. Kälteabgabe)	CHF/m^2_{Bodenf}	69	69	79	66	66	69
Kapitalkosten	CHF/m^2a	5.8	5.8	6.6	5.5	5.5	5.8
Unterhalt	CHF/m^2a	1.7	1.7	2.1	1.7	1.7	1.8
Energie	CHF/m^2a	1.7	1.2	0.9	1.4	1.1	0.8
Total	CHF/m^2a	9.2	8.7	9.5	8.6	8.3	8.3

Tabelle 85: Jahreskosten von Gebäudekühlanlagen mit unterschiedlichem Temperaturhub und unterschiedlichen Kältemitteln am Beispiel der Kälteleistungen 100 kW_{th} und 500 kWth (Quelle Kälteunternehmen 3, Kosten gemäss Tabelle 60, Annahmen und Berechnungen CEPE), installierte Kälteleistung 50 W_{th}/m^2, Volllaststunden 500 h/Jahr, Lebensdauer 15 Jahre, Realzins 3%

Hybride Rückkühler ermöglichen geringere Jahresarbeitszahlen, weil damit unter Nutzung der Wasserverdunstung der Temperaturhub zwischen Kältemaschine und Rückkühlung verringert wird (siehe auch Wellig et al., 2006). Hybride Rückkühler sind aufgrund ihrer Bauart und aufgrund der erforderlichen Wasseraufbereitung mit höheren Investitionskosten verbunden. Im Betrieb entstehen zudem Kosten für den Wasserverbrauch. Die erforderliche Wassermenge beträgt im theoretischen durch die Physik begründeten Minimum rund 1.5 Liter pro kWh rückgekühlte Wärme. In der Praxis beträgt der Bedarf oft bis zu 5 Liter/kWh oder gar mehr, je nach Regelung. Der Preis für das erforderliche Wasser beträgt je nach Tarifstruktur 1 bis 3 CHF/m^3 für die Trinkwasseraufbereitung und etwa gleich viel für die Abwassernachbereitung (obwohl bei den Rückkühlern kein Abwasser anfällt, ist dieser Teil je nach Tarifordnung trotzdem zu entrichten.

Die Wirtschaftlichkeitsrechnungen am Fallbeispiel zeigen, dass ein hybrider Rückkühler dann wirtschaftlicher ist als effiziente Anlagen mit Trockenrückkühlern, wenn die Mehrkosten über eine relativ grosse Anzahl Volllaststunden amortisiert werden können, der Wasserbezug der Anlage bedarfsgeregelt ist (z.B. während 40% der Zeit, sonst normale Trockenrückkühlung) und der Wasserpreis 3 CHF/m3 nicht wesentlich überschreitet (Tabelle 86). Im Vergleich zu immer noch vielfach üblichen konstanten und relativ hohen Rückkühltemperaturen sind hybride Rückkühler allerdings auch bei weniger Volllaststunden und allenfalls höherem Wasserpreis wirtschaftlich. Wenn möglich sollte bei hybriden Rückkühlern das besonders grosse Potenzial für FreeCooling genutzt werden, bei dem die Kältemaschine nur zu sehr seltenen Spitzenlaststunden hinzugeschaltet werden muss (was die Stromkosten entsprechend weiter senkt).

Rückkühltyp Verflüssiger-VL-Temperatur		Trocken-RK 45°,konst.	Trocken-RK 45°, gleitend	Trocken-RK 36°, gleitend	Hybrid 36°, gleitend	Trocken-RK 36°, gleitend	Hybrid 36°, gleitend
		FKW	FKW	FKW	FKW	Ammoniak	Ammoniak
VL-Temp. Kälteabgabe		Standard	Standard	Erhöht (18°)	Erhöht (18°)	Erhöht (18°)	Erhöht (18°)
Jahresarbeitszahl inkl. Pumpen		3.3 (*)	4.0	4.8	5.6	5.7 (*)	8.5
Elektrizitätsbedarf	MJ_{el}/m^2a	98	81	68	58	57	38
Total Investition	$CHF/m^2_{Bodenfl}$	12 (*)	12	11	13	13 (*)	15
Kapitalkosten	CHF/m^2a	2.4	2.4	2.3	2.6	2.7	3.1
Unterhalt	CHF/m^2a	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9
Wasser RK (3 CHF/m^3)	CHF/m^2a	-	-	-	0.4	-	0.3
Energie	CHF/m^2a	4.6	3.8	3.2	2.7	2.7	1.8
Total	CHF/m^2a	7.8	7.0	6.2	6.4	6.2	6.2
(*) Schätzung CEPE							

Tabelle 86: **Jahreskosten von Gebäudekühlanlagen mit unterschiedlichem Temperaturhub, Kältemitteln und Rückkühltypen am Beispiel einer Kälteleistungen von 600 kWth** (Quelle Kälteunternehmen 4, Kosten gem. Tabelle 61, Annahmen und Berechnungen CEPE), installierte Kälteleistung 50 W_{th}/m^2, Volllaststunden 1800 h/Jahr, Lebensdauer 15 Jahre, Realzins 3%

5.4.3 Rückkühlung mit Free-Cooling

Wie die Simulationsergebnisse zeigten, kann im Winterhalbjahr und zu Perioden mit relativ tiefen Aussentemperaturen während der Übergangszeit bereits ein Kühlbedarf bestehen. Bei diesen Bedingungen kann die dem Gebäude zu entziehende Wärme direkt via Rückkühler (oder Erdsonde) an die Umwelt abgegeben werden, ohne dass die Kältemaschine dazugeschaltet werden muss. An zahlreichen Tagen ist zudem eine Mischform der beiden Betriebsweisen möglich. Die Anzahl Stunden oder Tage kann durch adäquate Regelstrategien, welche die thermische Gebäudemasse nutzen, weiter er-

höht werden (dazu muss die Raumtemperatur innerhalb einer gewissen Bandbreite pendeln können, z.B. zwischen 23° und 26°).

Nachfolgend wird von einem thermischen Kühlbedarf von 150 MJ_{th}/m^2a ausgegangen, was als mittel bis hoch bezeichnet werden kann. Für die Standard-Anlage ohne FreeCooling wird von einer JAZ von 4 ausgegangen, bei der Anlage mit Rückkühlung mittels FreeCooling wird von einer mittleren JAZ von 6 ausgegangen (entspricht 50% FreeCooling-Betrieb und einer JAZ ausserhalb des FreeCooling-Betriebs von 3.0). Unter Verwendung der Investitionskostenkennwerte gemäss Abbildung 48 (S.163) lassen sich die Jahreskosten für die beiden Varianten bestimmen. Ab einer Anlagengrösse von 100 kW_{th} (entspricht bei typischerweise 50 W_{th}/m^2 einer gekühlten Fläche von 2000 m^2) ist die FreeCooling-Variante mit den in der Beschriftung der Abbildung 73 aufgeführten Annahmen als wirtschaftlich zu bezeichnen (die getroffenen Annahmen sind relativ konservativ: bereits relativ hohe Effizienz bei der Standardanlage, relativ moderate Steigerung de Jahresarbeitszahl beim FreeCooling-Fall). Bei kleineren Anlagen ist mit Mehrkosten von 1 bis 2 CHF/m^2a zu rechnen, bei grossen Anlagen (z.B. 500 kW_{th}) wären die Mehrinvestitionskosten auch bei einem Strompreis von 11 Rp/kWh noch amortisierbar.

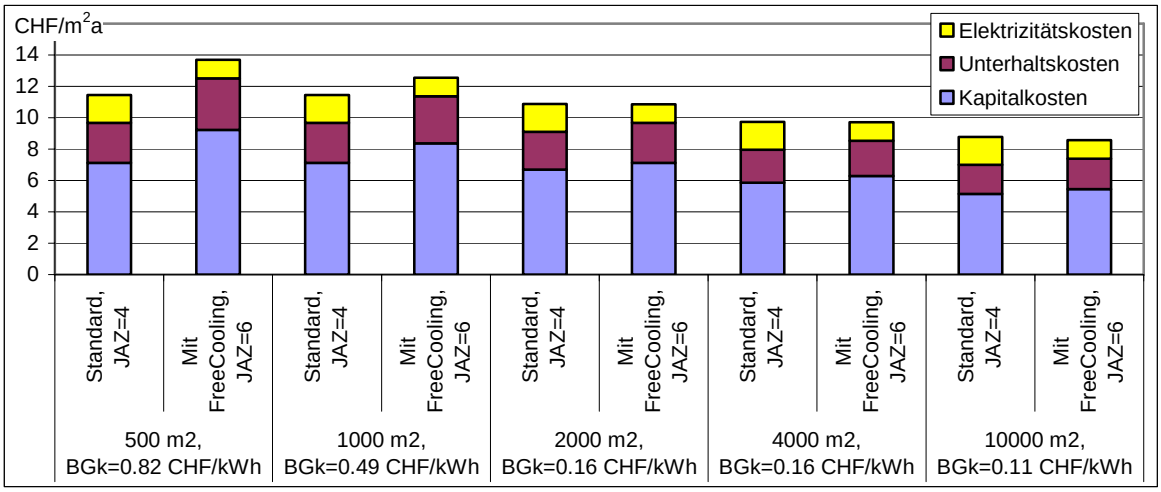


Abbildung 73 Jahreskosten (Elektrizitätspreis 17 Rp/kWh) und Grenzkosten von Kühlanlagen mit FreeCooling (25 MJ_{el}/m^2a) im Vergleich zu Standardanlagen ohne FreeCooling (38 MJ_{el}/m^2a) für verschiedene Gebäudegrössen (50 W_{th}/m^2, Realzinssatz 3%, Investitionskosten gemäss Abbildung 48: Mittelwert für Neubauten, K1 und K2, Jährliche Unterhaltskosten = 3% der Investitionskosten)

Aus weiteren Abbildungen im Anhang wird die Sensitivität der Jahres- und Grenzkosten bzgl. veränderten Annahmen zu Realzinssatz, thermischem Kühlenergiebedarf und JAZ ersichtlich. Bei einem höheren Realzinssatzes (5% statt 3%) ändert sich das Bild nicht stark; bei nur geringfügig höherem Strompreis (18 Rp/kWh statt 16 Rp/kWh) wären die selben Fälle wirtschaftlich (siehe Abbildung 137, S. 312). Bei einem geringeren thermischen Kühlenergiebedarf von 100 statt 150 MJ_{th}/m^2a verschlechtert sich hingegen die Wirtschaftlichkeit und die Brutto-Grenzkosten der mittleren Anlagengrössen steigen auf 25 Rp/kWh (Abbildung 137), d.h. der Strompreis müsste auf dieses Niveau steigen, damit die Wirtschaftlichkeit weiter gegeben ist). Wird von einer stärkeren Steigerung der Jahresarbeitszahl bei der FreeCooling-Variante ausgegangen (von 4.0 auf 8.0 statt von 4.0 auf 6.0), verbessert sich hingegen die Wirtschaftlichkeit (Abbildung 137); die Brutto-Grenzkosten und damit das erforderliche Strompreisniveau sinken auf 11 Rp/kWh für mittlere und 8 Rp/kWh für grosse Anlagen.

5.4.4 Adiabatische Kühlung der Zuluft

Statt mit einer Kältemaschine kann die Zuluft auch adiabatisch gekühlt werden. Mittels Verdunstung von Wasser im Abluft-Kanal und Wärmetauscher wird die Zuluft um ca. 6 K gekühlt. Damit kann der Elektrizitätsbedarf für die Zuluftkühlung markant verringert oder gar ganz ersetzt werden (je nach

Komfortanforderung und Gebäudekonfiguration). Bzgl. Auswirkung auf die übrigen Kosten sind zwei Fälle zu unterscheiden:

- Fall 1: Kombinierte Kühlung der Zuluft und von Kühlelementen (Kühldecke, FanCoils). In den Fällen bei ohnehin notwendiger Kältemaschine für etwaige Kühldecken oder FanCoils kann die Kältemaschine mit geringerer Leistung ausgelegt werden (im besten Fall um bis zu –20 W/m^2, nachfolgend angenommen um 7 W/m^2).
- Fall 2: Nur Zuluftkühlung: Bei Gebäuden, bei denen eine moderate Zuluftkühlung ausreichend für die Sicherstellung des thermischen Komforts ist, kann u.U. auf die Installation einer Kältemaschine verzichtet werden.

Im Fall 1 sind die Mehr-Investitionskosten einer adiabatischen Kühlung (gem. Abbildung 49) bei kleinen Gebäuden (ca. 1200 m2 gekühlte Fläche oder weniger) nicht amortisierbar. Bei mittleren bis grossen Gebäuden sind die Kosteneinsparungen aufgrund des geringeren Elektrizitätsbedarfs, v.a. aber auch aufgrund einer etwas geringeren installierten Leistung (-15%, d.h. – 7 W/m^2) deutlich grösser als die Mehrinvestitionskosten der adiabatischen Kühlung (siehe Abbildung 74).

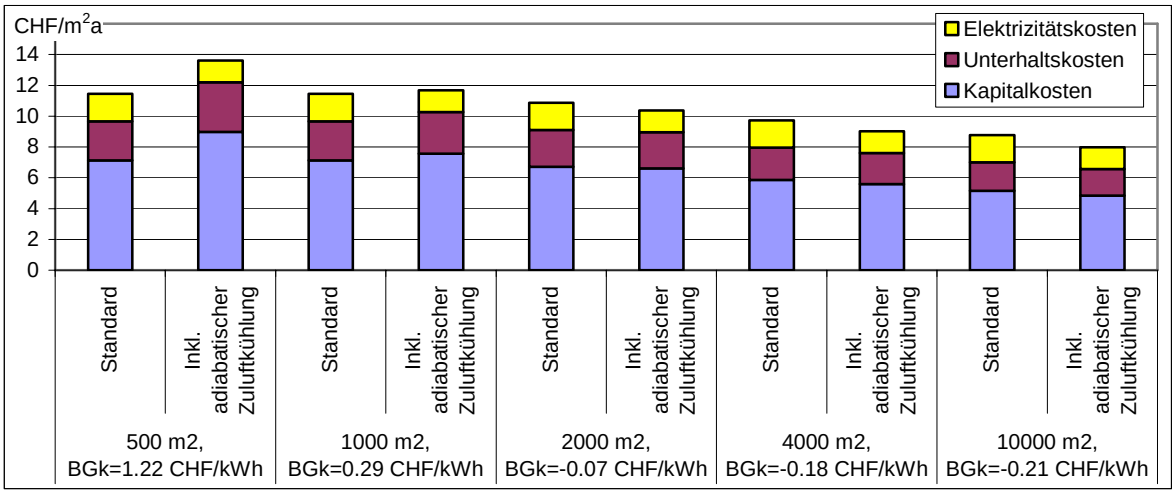


Abbildung 74 **Adiabatische Kühlung, Fall 1: Jahreskosten (Elektrizitätspreis 17 Rp/kWh) und Grenzkosten von Kühlanlagen mit adiabatischer Zuluftkühlung (30 MJ$_{el}$/m^{2}a) im Vergleich zu Standardanlagen (Zuluftkühlung mit Kältemaschine, 38 MJ$_{el}$/m^{2}a)** für verschiedene Gebäudegrössen (50 bzw. 43 W$_{th}$/m^2, Luftbedarf 4 (m^3/h)/m^2, Realzinssatz 3%, Investitionskosten gemäss Abbildung 48 (K1) bzw. Abbildung 49: Mittelwert für Neubauten, jährliche Unterhaltskosten als Anteil der Investitionskosten: 3% für Kältemaschine, 2.5% für adiabatische Kühlung)

Zu beachten ist hierbei ein starker Skaleneffekt, der vom starken Skaleneffekt der Investitionkosten der adiabatischen Kühlung ausgeht (Abbildung 49). Ab einer Gebäudegrösse von 2000 m^2 werden die Mehrkosten der adiabatischen Kühlung bereits auf Ebene der Investitionskosten durch geringere Kosten für die Kältemaschine kompensiert. Entsprechend sind die Grenzkosten der Elektrizitätseffizienz negativ. Die adiabatische Kühlung der Zuluft kann für diese Gebäude als rentabel bis hoch rentabel bezeichnet werden.

Fall 2: Noch stärker bemerkbar macht sich der Skaleneffekt, wenn nur die adiabatische Zuluftkühlung für sich betrachtet wird (Fall 2, ohne Kühlelemente wie Kühldecken oder FanCoils). Kann die Kältemaschine inkl. Rückkühler für die Kühlung der Zuluft nicht ersetzt werden, so sind die gesamten Jahreskosten der adiabatischen Kühlung mit den Energiekosten der konventionellen Kühlung zu vergleichen (Abbildung 75, gestrichelte Linie). Bei kleinen und mittleren Gebäuden die sehr viel grösser. Bei grossen bis sehr grossen Gebäuden hingegen sind die Kosten der gesamten Jahreskosten der adiabatischen Zuluftkühlung jedoch mit den Energiekosten der konventionellen Kühlung vergleichbar und die

adiabatische Kühlung wird selbst im Vergleich zu den laufenden Energiekosten der konventionellen Kühlung rentabel (bei 10'000 m² belüftete Fläche).

Kann statt einer konventionellen Zuluftkühlung eine adiabatische Zuluftkühlung installiert werden, so können bereits bei der kleinsten betrachteten Gebäudegrösse Jahreskosteneinsparungen realisiert werden. Die Kapital- und Unterhaltskosten der adiabatischen Kühlung sind bei dieser Gebäudegrösse (500 m²) mit denjenigen der konventionellen Zuluftkühlung vergleichbar (3 CHF/m²a), es können jedoch ca. 0.5 CHF/m²a an Energiekosten eingespart werden. Je grösser die zu belüftende Gebäudefläche, desto grösser wird die Nettokostenreduktion (Abbildung 75).

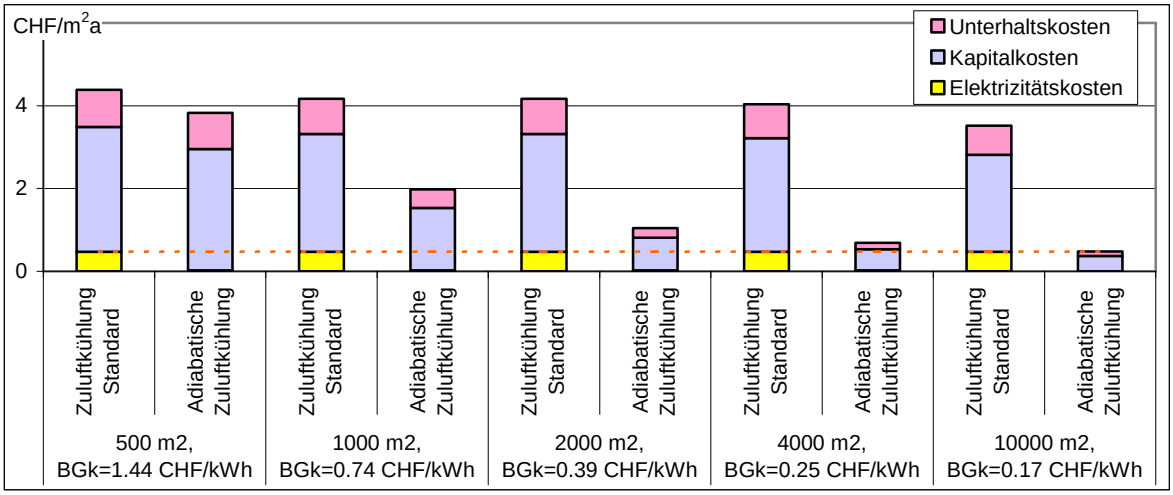


Abbildung 75 **Adiabatische Kühlung, Fall 1: Jahreskosten (Elektrizitätspreis 17 Rp/kWh) und Grenzkosten von Kühlanlagen mit adiabatischer Zuluftkühlung (< 1 MJ_{el}/m^2a) im Vergleich zu Standardanlagen (Zuluftkühlung mit Kältemaschine, 10 MJ_{el}/m^2a, 20 W_{th}/m^2) für verschiedene Gebäudegrössen (Luftbedarf 4 $(m^3/h)/m^2$, Realzinssatz 3%, Investitionskosten gemäss Abbildung 48 (K1) bzw. Abbildung 49: Mittelwert für Neubauten, jährliche Unterhaltskosten als Anteil der Investitionskosten: 3% für Kältemaschine, 2.5% für adiabatische Kühlung)**

5.4.5 Kälteabgabe

Mit beeinflusst werden die Energie-Effizienz und die Jahreskosten der Gebäudekühlung von Art und Konzeption der Kälteabgabe in den Räumen.

- Dabei wird die Energie-Effizienz insbesondere vom Temperaturniveau der Kälteabgabe beeinflusst (genauer: von der Differenz zur Rückkühltemperatur[25]). Generell sind bei thermoaktiven Bauteilen oder Kühldecken höhere Vorlauftemperaturen möglich als bei (herkömmlichen) Umluftkühlern, aber es sind auch Umluftkühler mit ähnlich hohen Vorlauftemperaturen erhältlich.
- Die Jahreskosten werden zum einen von der Energieeffizienz beeinflusst (Energiekosten), viel stärker aber vom Typ des Kälteabgabesystems und von innenarchitektonischen Gesichtspunkten. Die Wahl des Kälteabgabesystems und dessen Ausführung wird nicht zuletzt von den Komfortansprüchen bestimmt (angenehm kühl strahlende Flächen, Temperatur und Geschwindigkeit der Luft). Entsprechend ist die Bandbreite der Kosten auch innerhalb eines Kälteabgabetyps beträchtlich, wie aus Tabelle 62, S. 167 ersichtlich ist, wobei die genannten Einflussfaktoren in den meisten Fällen einen viel grösseren Effekt auf die Kosten haben als die Faktoren, welche die Vorlauftemperatur und damit die Energieeffizienz beeinflussen. Ein befragtes Unternehmen gibt z.B. für eine

[25] Der theoretische COP ergibt sich aus der Umgebungstemperatur dividiert durch die Temperaturdifferenz zwischen Kälteerzeugung und Rückkühlung, wobei die Temperatur der Kälteerzeugung einige wenige K unter der Temperatur der Kälteabgabe in den Räumen liegt. Beispiele COP (9°/40°)=10, COP (16°/40°)=13, COP (9°/35°)=12, COP (16°/35°)=16

Kühldecke mit einer Vorlauftemperatur von 18°C statt 16°C einen Preisunterschied von 50 CHF/$m^2_{Bodenfläche}$ an (250 statt 200 CHF/$m^2_{Bodenfläche}$), ein anderes hingegen macht keine entsprechende Preisdifferenzierung.

Werden die resultierenden Jahreskosten (siehe Tabelle 87) bzw. Jahreskostendifferenzen mit den potenziellen Energiekostendifferenzen aufgrund höherer Jahresarbeitszahlen verglichen (siehe z.B. Tabelle 84, Tabelle 85 oder Abbildung 74), wird klar, dass auf Seite Kälteabgabe nur relativ geringe Investitionskostenunterschiede mit höherer Energieeffizienz begründet werden können. Zu beachten ist zudem, dass bei einem Teil der Systeme auch die Wärmeabgabe im Heizfall integriert ist oder dass u.U. auf eine Kältemaschine verzichtet werden kann (z.B. bei der Nutzung von Erdsonden auch zur Kühlung, siehe z.B. Dott, Afjei et al., 2006) und entsprechend eine Gesamtkostenbetrachtung durchzuführen ist. Im letzteren Fall entfallen die entsprechenden Kapitalkosten (siehe ebenfalls Tabelle 84, Tabelle 85 oder Abbildung 74), wodurch der Spielraum auf Seite Kälte- (und Wärme-)abgabe wesentlich grösser wird.

Der Vollständigkeit halber sei darauf hingewiesen, dass geringe Temperaturdifferenzen (zwischen Vorlauf und Raumtemperatur) auch im Interesse einer hohen Wärmepumpenarbeitszahl liegen (sofern eine solche zur Wärmeerzeugung zum Einsatz kommt).

Beschrieb	Wirtschaftliche Lebensdauer Jahre	Jahreskosten (grobe Richtwerte) CHF/$m^2_{Bodenfläche}$
Umluftkühler (Kältezufuhr über Kaltwassernetz)	20	3 bis 5
Kunststoffrohre an Betondecke befestigt und verputzt	30	10 bis 25
Kunststoffrohre, die in die Betondecke eingelassen werden	40	3 ohne Akustikelemente, > 6 inkl. Akustikelemente
Abgehängte Metalldecken mit eingelegten Metallrohren evtl. kombiniert mit Zu- und Abluftfunktion.	30	10 bis 25
Eigenständige Kühldeckenelemente	30	6

Tabelle 87 Spezifische Kapitalkosten von verschiedenen Kälteabgabesystemen (raumbezogene Kosten ohne gebäudeinterne Verteilung), Investitionskosten gemäss Tabelle 62

5.4.6 Integrale Planung und Konzeption

Werden die oben beschriebenen einzelnen Energie-Effizienzmassnahmen in einer integrierten Planung kombiniert und aufeinander abgestimmt, können Synergieeffekte genutzt werden. So kann z.B. bei gleichem thermischem Kühlenergiebedarf die installierte Leistung um mehr als einen Faktor 2 reduziert werden. Im von Wellig et al. (2006) dokumentierten Fallbeispiel ergeben sich damit trotz markant höherer spezifischer Investitionskosten pro kW (1500 statt 500 CHF/kW) nur moderat höhere Investitionskosten pro EBF (55 statt 37 CHF/m^2). Aufgrund des sehr geringen Elektrizitätsbedarfs lassen sich diese gemäss Wellig et al. (2006) innerhalb von 4.5 Jahren kompensieren (ohne Verzinsung). Auch unter Berücksichtigung einer Verzinsung, welche zu einer etwas längeren Amortisationszeit, ist dies als hoch rentabel zu bezeichnen.

Vorraussetzung für solche hocheffizienten Gesamtanlagen ist nicht nur eine integrierte Planung unter Berücksichtigung der Thermodynamik, der Nutzung der „freien Kälte" und der Speichermasse des Gebäudes und des Einsatzes energie-effizienter Komponenten auf allen Ebenen (d.h. auch entsprechender Pumpen), sondern auch eine planungsgetreue Ausführung sowie eine sorgfältige Inbetriebnahme und ein kontinuierliches Betriebsmonitoring.

5.5 Beleuchtung

Bei den Kosten-Nutzenbetrachtungen von Beleuchtungsvarianten oder Massnahmen im Bereich Büro oder Schulen ist zwischen zwei Typen von Massnahmen zu unterscheiden:

- Massnahmen, welche darauf abzielen, die installierte elektrische Leistung als solche zu reduzieren
- Massnahmen, welche darauf abzielen, die Nutzung der installierten elektrischen Leistung durch Regelung zu reduzieren, d.h. die Volllaststunden zu verringern.

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des ersten Typs ist straight forward: Die Differenz der Kapital- und Wartungskosten wird der Differenz der Energiekosten gegenübergestellt, wobei sich die Energiekosten bei gegebener Jahresnutzungszeit einfach berechnen lassen.

Beim zweiten Massnahmetyp jedoch, d.h. bei Lichtregelungen, ist die **erreichbare Reduktion der Betriebs- bzw. der Volllaststunden** einer der entscheidendsten Faktoren für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit (nebst den eigentlichen Kosten der Massnahmen sowie den Annahmen zu Lebensdauer, Verzinsung und Strompreis), weshalb im nächsten Unterkapitel zunächst einleitend darauf eingegangen wird, bevor dann die eigentlichen Wirtschaftlichkeitsrechnungen folgen.

5.5.1 Wirkung von Lichtregelungen bei Beleuchtungen mit Leuchtstofflampen

Die erreichbare Reduktion der Betriebs- bzw. der Volllaststunden durch Lichtregelungen ist die Differenz zwischen dem Ausgangszustand ohne Regelung und dem Zustand inkl. Regelung . Beim letzteren sind die Betriebs- oder Volllaststunden – Akzeptanz der Massnahme vorausgesetzt – vor allem vom Raum (Raumtiefe, Verhältnis Glas- zu Bodenfläche), von der Art und dem Einsatzregime des Sonnenschutzes, von der Qualität der eingesetzten Technik sowie der Einregulierung abhängig, bei gegebener Nutzung also v.a. von technischen Parametern[26]. Dies im Gegensatz zum Ausgangszustand ohne Regelung, wo v.a. das Benutzerverhalten entscheidend ist. Der Referenzfall ist dementsprechend stark mitentscheidend für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Lichtregelungen. Es stellt sich die Frage, mit wieviel Volllaststunden im Fall mit manueller Bedienung des Lichts zu rechnen ist (bei grossen Bürogebäuden ist die manuelle Bedienung durch die Nutzenden teilweise kombiniert mit programmiertem abendlichem Abschalten, z.B. spätestens um 22 Uhr). Zum Benutzerverhalten im Bereich Bürogebäude wurden folgende Feststellungen gemacht (Quelle: www.energie.ethz.ch).

- Während 60 % der normalen Bürozeit ist die Beleuchtung eingeschaltet.
- Die Mehrzahl der Benutzer schaltet unmittelbar bei der Ankunft am Arbeitsplatz das Licht ein. (Meist schaltet erst der Reinigungsdienst am Abend wieder aus)
- Es gibt keinen Zusammenhang zwischen der Menge des Tageslichtes und der Einschaltzeit des Kunstlichtes.
- Wenn die Schaltung der Bürobeleuchtung in zwei Gruppen (Fenster, innere Zone) möglich ist, sind die Einschaltzeiten für beide Gruppen fast gleich

Hierbei handelt es sich um sehr grobe Angaben, welche mit einer beträchtlichen Unsicherheit behaftet sind. In der Tat **fehlen in der Schweiz verlässliche Daten zur Nutzung der Beleuchtung in den verschiedenen Gebäudetypen der Wirtschaftsbauten.** Dies betrifft v.a. Beleuchtungen ohne Regelung, welche manuell betätigt werden. Im Gebäudebestand ist dies noch beinahe ausschliesslich der Fall. Bei Beleuchtungen mit Regelung kann auf Simulationsergebnisse zurückgegriffen werden.

Für die verschiedenen Nutzungen und Regelungen bestehen Abschätzungen von typischen Betriebsstunden, siehe Tabelle 88 (Quelle: St. Gasser, SAFE, Rechenmodell Energybox „Lichttool", Entwurf,

[26] Ausnahme: falls der Sonnenschutz manuell bedient wird, ist auch im Fall der Lichtregelung ein starker Einfluss der Nutzenden auf die Betriebs- bzw. Volllaststunden zu verzeichnen

Stand 16.6.05), wobei bei den Fällen ohne Regelung von einer hohen Unsicherheit auszugehen ist. Bei der Präsenzsteuerung liegt eine pauschale Reduktion von 20% zugrunde. Bei der kombinierten Präsenz- und Tageslicht-Regelung beträgt die Reduktion 37% (Glas zu Bodenfläche 20%) bzw. rund 56% (Glas zu Bodenfläche 30%). Der Absolutwert der erreichbaren Reduktion gemessen als Anzahl reduzierte Volllaststunden ist bei Schulen geringer als bei der Büronutzung, dies v.a. weil die Schulen bereits in der Ausgangslage eine geringere Anzahl Betriebsstunden aufweisen. Statt 710 Stunden Reduktion wie bei der Büronutzung beträgt die mit Präsenz- und Tageslicht-Regelung erreichbare Reduktion „nur" 520 Stunden. Dies ist gut 25% weniger. Entsprechend müssten die Mehrkosten für Kapital- und Wartung/Unterhalt bei Schulen 25% tiefer sein, um die gleiche Wirtschaftlichkeit wie bei Büronutzung zu erreichen.

Nutzung	Büro			Schulen		
Lichtregelung	Ohne	Präsenz	Präsenz und Tageslicht-	Ohne	Präsenz	Präsenz und Tageslicht-
Glas zu Bodenfläche 20%	1900	1520 (-380)	1190 (-710)	1380	1100 (-280)	860 (-520)
Glas zu Bodenfläche 30%	1420 (*)	1140 (-280)	620 (-800)	1040 (*)	830 (-210)	460 (-580)

Tabelle 88 **Betriebsstunden für verschiedene Lichtregelungen und Betriebsstundenreduktion gegenüber dem Zustand ohne Regelung (in Klammer)** bei Büronutzung und Schulen, Reflexionsgrad „normal", gerundete Werte (Quelle: St. Gasser, Rechenmodell Energybox „Lichttool", Entwurf, Stand 16.6.05) (*) Anmerkung: auch bei einem Verhältnis Glas zu Bodenfläche von 30% könnte die Anzahl der jährlichen Betriebsstunden im Fall ohne Regelung 1900 h (Büro) oder rund 1400 h betragen (Schulen), je nach Benutzerverhalten

Zum Vergleich sind Abbildung 76 die Beleuchtungsvolllaststunden von geregelten Beleuchtungen am Beispiel eines grossen Südraums und eines kleinen Westraums dargestellt und zwar für zwei unterschiedliche Ein-/Ausschaltkriterien. Das Ein-/Ausschaltkriterium 500 Lux (an der Position des Arbeitsplatzes auf 0.8 m Höhe) entspricht den beleuchtungstechnischen Anforderungen. Mit dem Ein-/Ausschaltkriterium 800 Lux wurde versucht, eine manuelle Schaltung der Beleuchtung zu approximieren (es kann insbesondere davon ausgegangen werden, dass die Beleuchtung bei der manuellen Bedienung später, d.h. bei einer höheren Tageslichtbeleuchtungsstärke, ausgeschaltet wird; in der Realität muss wohl von einem hystereseähnlichem Benutzerverhalten ausgegangen werden).

Je nach Konstellation von Glasanteil, Sonnenschutzqualität und -einsatz sowie Lichttransmissionsgrad ergeben sich markant unterschiedliche Volllaststunden (zu beachten: zu verschiedenen Glasanteile sind u.U. unterschiedliche Fenster- und Sonnenschutzqualitäten kombiniert, d.h. zwischen verschiedenen Glasanteilen ist kein ceteris paribus Vergleich möglich). Interessant ist, dass die Reduktion mit einer adäquaten Lichtregelung (Ein-Ausschalten bei 500 Lux) – im Vergleich zu einer Regelung mit höherem Schwellenwert – relativ konstant ist, v.a. im grossen Südraum. Die absolute Reduktion liegt zwischen 300 und etwas über 400 Stunden pro Jahr (grosser Südraum) bzw. zwischen gut 200 und über 500 Stunden pro Jahr (kleiner Westraum). Die relative Reduktion liegt zwischen 15% und 25% (beim grossen Südraum) bzw. zwischen 20% und 30% (beim kleinen Westraum). Markant unterschiedlich ist hingegen die mit einer Beleuchtungsregelung erreichbare minimale Volllaststundenzahl. Beim grossen Südraum liegt diese bei gut 1600 h/Jahr (Grund: verstärkter Sonnenschutzeinsatz), beim kleinen Westraum bei rund 1000 h/Jahr.

Im Anhang sind die zu Abbildung 76 analogen Abbildungen zu weiteren Räumen dokumentiert (Abbildung 138 bis Abbildung 140). Beim grossen Westraum (Abbildung 138) sind die Verhältnisse ähnlich wie beim grossen Südraum, beim kleinen Südraum (Abbildung 139) liegen sie zwischen dem grossen Südraum und dem kleinen Westraum. Etwas spezieller sind die Eckräume (bei denen von Verglasungen bei beiden Orientierungen ausgegangen wird): Die Volllaststunden sind sowohl beim Ein-/Ausschaltkriterium von 800 Lux wie auch bei demjenigen von 500 Lux relativ gering. Trotzdem sind auch bei solchen Räumen Volllaststundenreduktionen von 150 bis 400 Stunden/Jahr zu erreichen.

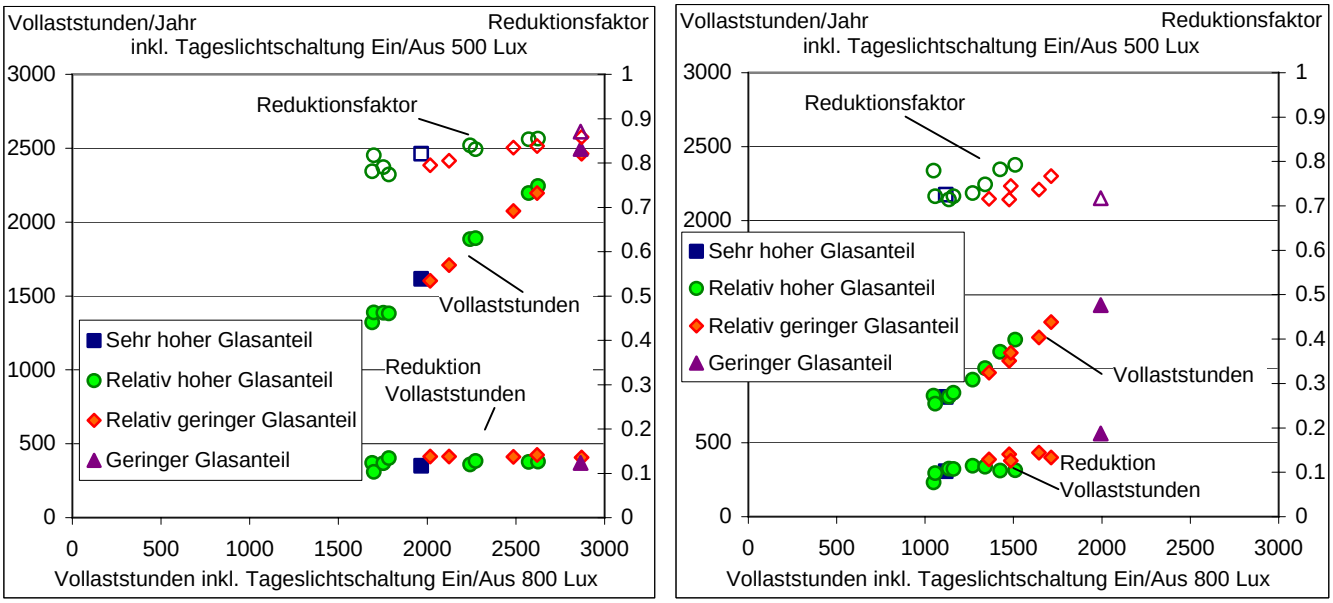


Abbildung 76 **Volllaststunden bei geregelten Beleuchtungen (Ein-Aus) für einen grossen Südraum (linke Abbildung) und einen kleinen Westraum (rechte Abbildung).** Geometrie grosser Raum: Raumtiefe 7 m, Arbeitsplatz 5m; Geometrie kleiner Raum: Raumtiefe: 4 m, Arbeitsplatz: Glasanteile (Glasfläche/Fassadenfläche): sehr hoher Glasanteil: 0.68, relativ hoher Glasanteil: 0.38, relativ geringer Glasanteil: 0.26, geringer Glasanteil: 0.18

Für neun der in Abbildung 76 dargestellten fünfzehn Fälle wurde nachfolgend an die Ein-/Ausregelung die Wirkung einer Beleuchtungsdimmung simuliert. Die Beleuchtungsstärke der Beleuchtung liegt zwischen 0 und 100 Lux Tageslichtangebot bei 100% und wird danach bis 500 Lux Tageslichtangebot kontinuierlich zurückgedimmt. Die entsprechenden Ergebnisse für einen grossen Südraum (linke Abbildung) und einen kleinen Westraum sind in Abbildung 77 dargestellt, die Ergebnisse für die übrigen Räume im Anhang (Abbildung 141 bis Abbildung 143).

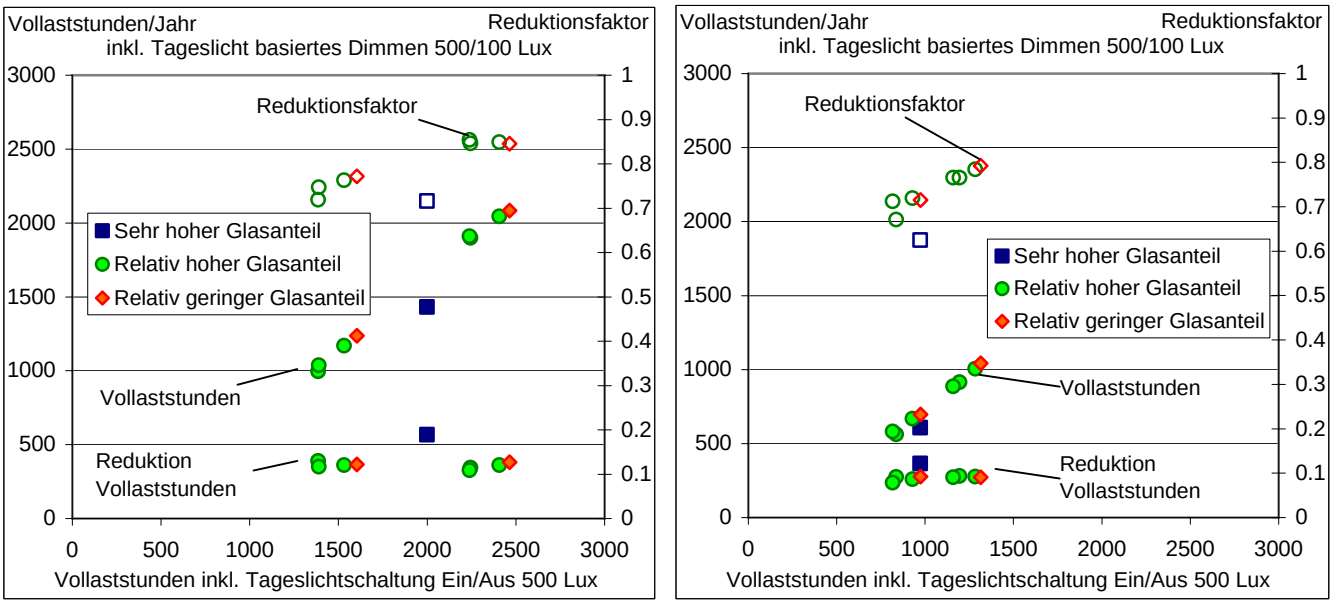


Abbildung 77 **Volllaststunden bei geregelten Beleuchtungen (Dimmen zwischen 100 und 500 Lux) für einen grossen Südraum (linke Abbildung) und einen kleinen Westraum (rechte Abbildung).** Geometrie gemäss Abbildung 76

Gegenüber einer tageslichtbasierten Ein-/Aus-Regelung lassen sich die Volllaststunden mit einer Beleuchtungsdimmung nochmals markant reduzieren. Mit Ausnahme der Eckräume kann eine Reduktion zwischen rund 250 bis rund 500 Stunden/Jahr erreicht werden (beim Fall mit sehr hohem Glasanteil sogar 600 Stunden/Jahr). Relativ ausgedrückt liegen die Reduktionen in der Regel zwischen 20% und gut 30%, in Einzelfällen auch darunter oder darüber. Die genannten Reduktionen beziehen sich auf die Beleuchtungsstärke der Beleuchtung und nicht auf den Elektrizitätsbedarf. Die erreichbare Elektrizitätsbedarfsreduktion ist geringer, da die elektrische Leistungsaufnahme v.a. im unteren Leistungsbereich nicht linear-proportional zur Beleuchtungsstärke verläuft. Die Reduktion der „elektrischen" Volllaststunden liegt schätzungsweise ein Drittel bis zur Hälfte tiefer (dies ist eine Schätzung, denn der Zusammenhang zwischen Beleuchtungsstärke und Elektrizitätsbedarf konnte in der Simulation aus technischen Gründen nicht berücksichtigt werden).

Im Vergleich zum approximierten manuellen Bedienen der Beleuchtung d.h. im Vergleich zur Ein-/Aus-Regelung bei 800 Lux werden die Volllaststunden der Beleuchtung um 30% bis 50% reduziert. Je nach Ausgangslage sind dies gut 600 bis rund 1400 Volllaststunden/Jahr. Eine weitere Reduktion kann durch den kombinierten Einsatz von Präsenzmeldern erreicht werden. In erster Näherung kann davon ausgegangen werden, dass sich die Wirkungen von Präsenzmeldern und Tageslicht basierten Regelungen überlagern. Die Wirkung von Präsenzmeldern ist umso grösser, je arbeitsplatzspezifischer diese konzipiert werden können. Tendenziell am geringsten ist sie bei Deckenbeleuchtungen in grossen Büroräumen, mittel bei Deckenbeleuchtungen in kleinen Büroräumen und am grössten bei arbeitsplatzbezogenen Stehleuchten.

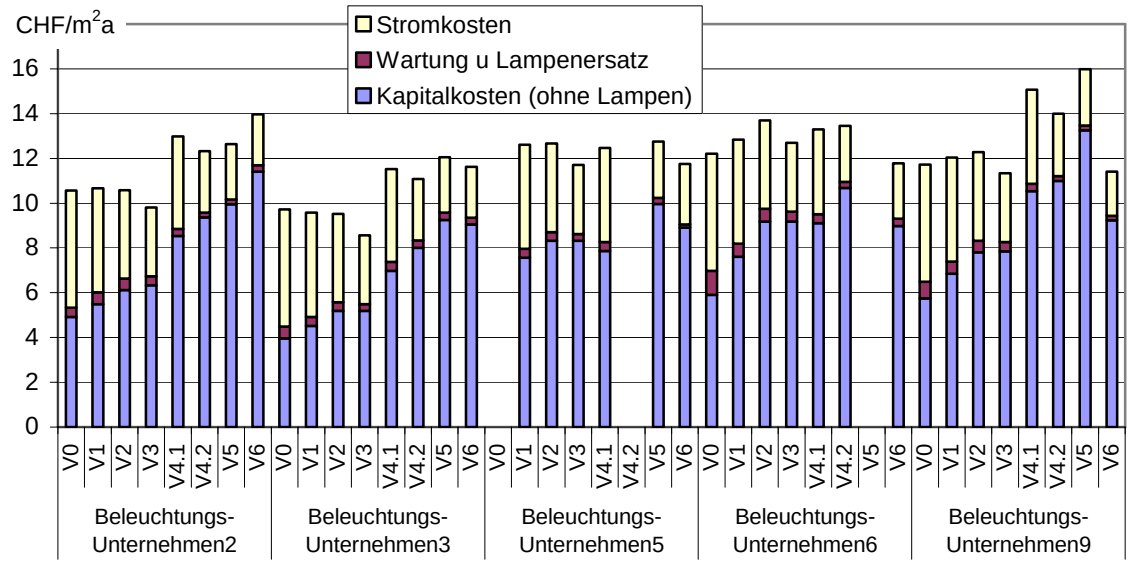
Zu bemerken ist an dieser Stelle, dass die genannten Reduktionswerte ceteris paribus Werte darstellen. Werden zusätzliche Massnahmen getroffen, kann sich die Wirkung verändern. Werden z.B. gleichzeitig Verglasungen mit geringerem Transmissionswert eingesetzt (Fensterersatz, Sonnenschutzfenster statt Wärmeschutzfenster, Dreifachverglasung statt Zweifachverglasung), kann sich die Wirkung markant reduzieren (siehe Kap. 3.4 und Kap. 6).

5.5.2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen bei Beleuchtungen mit Leuchtstofflampen

In Abbildung 78 sind die aufgrund der Unternehmensangaben () berechneten Jahreskosten mit ihrer Struktur dargestellt. Die betrachteten Massnahmen sind in der Legende der Abbildung beschrieben. Die Massnahme Lampenersatz wurde nicht näher betrachtet. Denn es ist davon auszugehen, dass bereits ein beachtlicher Teil der T12 (bzw. T38) Lampen durch T8 Lampen ersetzt wurde[MJ73], da es sich dabei um eine Massnahme mit geringer Eingriffstiefe handelt, weil keine Arbeit an der Elektrik erforderlich ist. Es können insbesondere die selben Vorschaltgeräte [MJ74]verwendet werden.

Der grössten Kostenanteil geht von den Leuchten aus, der zweitgrössten von den Stromkosten, während Wartung und Lampenersatz einen geringen Anteil ausmachen (dank der relativ kostengünstigen Lampen und der langen Lebensdauer derselben). Folgende Feststellungen können gemacht werden:

- Zur Interpretation vorweg: Die sogenannten „kostengünstigen" Leuchten (V0) der Unternehmen 2 und 3 erfüllen laut Angaben der Unternehmen die Anforderungen an die Bildschirmtauglichkeit von Büroarbeitsplätzen nicht. Diese sind also nicht in Büro- oder Schulräumen einzusetzen, können jedoch in anderen Anwendungen (z.B. Verkehrszonen) durchaus eingesetzt werden.
- Lichtreglungen verursachen keine oder nur sehr geringe Mehrkosten. Die leuchten- und montageseitigen Mehrkosten bei der Investition werden durch die geringeren Stromkosten mehr oder weniger kompensiert.
- Eine weitergehende Regelung (Präsenz- und tageslichtbasiert, entweder als Aus-Ein oder als Konstantlichtregelung) ist im Vergleich zu einer einfachen Präsenzregelung etwas kostengünstiger. Die Unterschiede sind allerdings relativ gering.
- Die Variante mit Stehleuchten weist bei einigen Unternehmen tiefere, bei anderen höhere Jahrekosten auf als die mit der vergleichbaren Funktionalität ausgestattete Deckenbeleuchtung (Präsenzmelder, tageslichtabhängige Schaltung)



Bez.	Beschreibung	Volllaststunden
V0	Kostengünstige Pendel- oder Deckenleuchte mit VVG und T8-Leuchtstofflampen	1900
V1	Wie V0, aber Leuchtstoffröhren 16 mm mit EVG statt Leuchtstoffröhren 26 mm	1900
V2	Wie V1, aber zusätzlich mit Präsenzsteuerung	1615
V3	Wie V2, aber zusätzlich mit Tageslichtsteuerung, (Ein-/Aus-Schaltung, kein Dimmen)	1260
V4.1	Wie V1, aber energie-effizientere Leuchten	1900
V4.2	Wie V4.1, aber energie-effizientere Leuchten inkl. Präsenzsteuerung, tageslicht-abhängiges Ausschalten	1260
V5	Wie V4.2, jedoch mit Konstantlichtregelung (Dimmen) statt tageslicht-abhängiges Ausschalten	1134
V6	„Minergie"-Stehleuchten plus evtl. Decken-Grundbeleuchtung im Verkehrsbereich	964

Abbildung 78 Fall 1: Spezifische Jahreskosten (CHF/m²) von Beleuchtungssystemen im Büro-Neubau, Nutzung Gruppenbüro, Volllaststunden pro Jahr gemäss Abbildungslegende, 15 Jahre Abschreibung, 3% Realzins, Strompreis 17 Rp/kWh (Quelle: Beleuchtungsunternehmen 2, 3, 5, 6 und 9, Erhebung, Berechnung und Darstellung CEPE)

In Abbildung 79 sind die Brutto-Durchschnittskosten von energie-effizienteren Beleuchtungen (inkl. Regelungen) als Funktion der Energiekennzahl Beleuchtung dargestellt. Liegen die Durchschnittskosten tiefer als der massgebende Strompreis (je nach Verteilunternehmen und Tarifstruktur 15 bis 20 Rp/kWh, teilweise auch darüber), so wären entsprechende Massnahmen wirtschaftlich. Die Ergebnisse zeigen, dass dies bei zahlreichen Massnahmen und Unternehmen der Fall ist. Die Ergebnisse zeigen aber auch, dass eine recht grosse Streuung besteht.

Bei der Interpretation der Ergebnisse sind zwei Aspekte in Erinnerung zu behalten:

- Die Grenzkosten und auch die spezifischen Durchschnittskosten reagieren sehr sensitiv auf Unsicherheiten bzgl. Investitionskosten von verschiedenen Varianten, da die Grenzkosten auf einer relativ geringen Differenz von zwei vergleichsweise markant grösseren Beträgen beruhen.
- Allfällige weitere, nicht-energetische Nutzen bzgl. Beleuchtungsqualität und Bedienungskomfort, aber auch allfällige Akzeptanzprobleme bei geregelten Beleuchtungen, sind nicht monetär bewertet. Es kann davon ausgegangen werden, dass diese Nutzen ausgehend von der Referenzvariante eher zunehmen, nicht aber abnehmen (es sei denn Akzeptanzprobleme überwiegen die übrigen Nutzen). Trotz dieser Vernachlässigung lässt sich der Beleuchtungsenergiebedarf wirtschaftlich auf rund die Hälfte reduzieren.

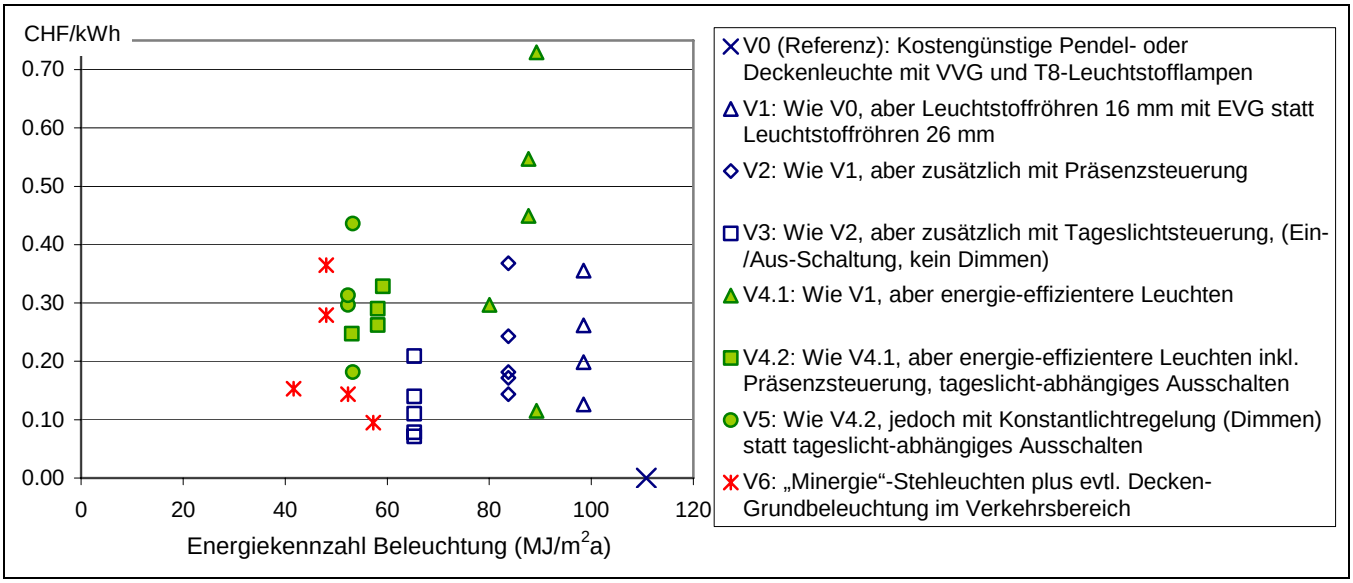
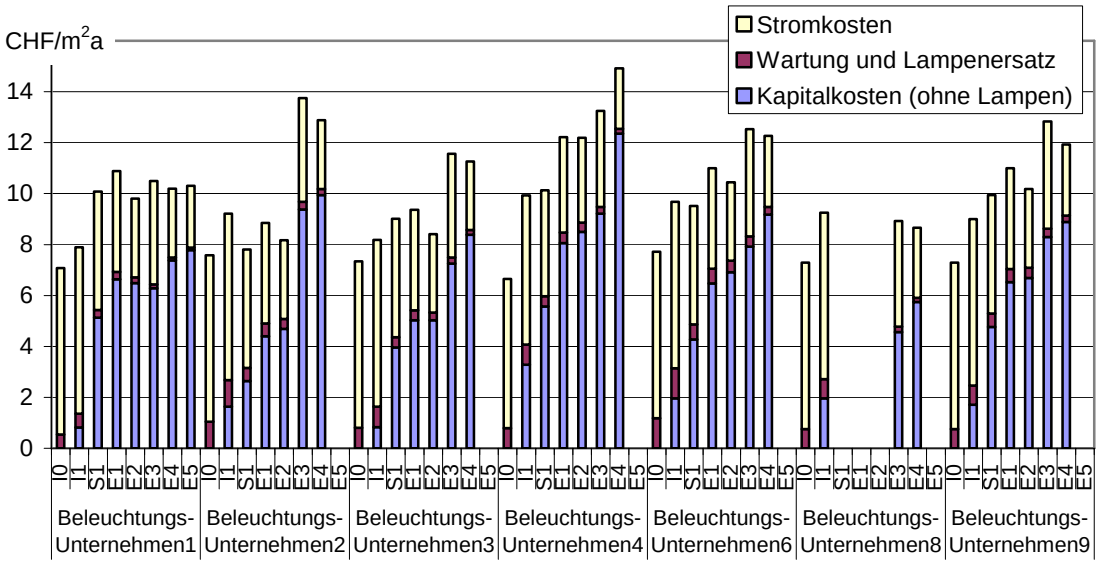


Abbildung 79 Fall 1: Brutto-Durchschnittskosten (CHF/kWh) von Beleuchtungssystemen im Büro-Neubau, Nutzung Gruppenbüro, Abschreibung und Volllaststunden pro Jahr gemäss Abbildung 78, 3% Realzins (Quelle: Beleuchtungsunternehmen 2, 3, 5, 6, Erhebung, Berechnung u. Darstellung CEPE)

Abbildung 80 zeigt die Jahreskosten von Beleuchtungen im Ist-Zustand sowie von Unterhalts-, Sofort- und Erneuerungsmassnahmen bei alten Beleuchtungen. Basis bilden die Kostenangaben der Unternehmen gemäss , die technischen Kennwerte des Erhebungsrasters im Anhang (Kap. 9.6.3, S. 303) sowie die aufgeführten Annahmen in Legende und Abbildungsbeschriftung der Abbildung 80.

- Die „Sofortmassnahme" Umrüsten/Umbau der Leuchte führt im Vergleich zum Ist-Zustand (laufende Energiekosten plus laufender Lampenwechsel) zu Netto-Mehrkosten von 1 bis 4 CHF/m^{2}a. Der gleichzeitige Einbau einer Lichtregelung verbessert die Wirtschaftlichkeit. Im Vergleich zur Instandhaltung, welche u.a. die Reinigung der Leuchten beinhaltet, sind die Nettomehrkosten relativ gering.
- Die Sofortmassnahme „Umrüsten der Leuchte mit EVG-Adaptor und Aufsteckreflektor" (in Abbildung 80 nicht dargestellt) führt zu etwa gleich hohen Jahreskosten wie der Ist-Zustand, also wie die laufenden Stromkosten. Die Massnahme ist also als wirtschaftlich zu bezeichnen. Die Jahreskosten von 6 bis 7 CHF/m2a, wenn die gleiche Anzahl Lampen eingesetzt wird. Davon fallen rund drei Viertel auf die Materialkosten (rund 60 CHF für Adapter, Reflektor, EVG). Die Arbeitskosten sind relativ gering, weil die Massnahme kein Demontieren der Leuchte und keine Ausbau der vorhandenen Vorschaltgeräte bedingt und weil die Umrüstung durch das betriebsinterne Personal vorgenommen werden kann. Falls zwei Lampen durch eine ersetzt werden kann, betragen die Jahreskosten rund 5 CHF/m^{2}a.
- **Ein Leuchtenersatz, ob ohne oder mit Lichtregelung, lässt sich nicht mit geringeren laufenden Kosten (Energie- und Lampenwechselkosten) allein begründen** (am nächsten an der Wirtschaftlichkeitsgrenze sind die sogenannten „Sanierungsleuchten" bei heruntergehängten Decken). Sind die bestehenden Leuchten aufgrund ihres Alters und ihres Zustandes ohnehin zu ersetzen oder werden sie aus ästhetischen Gründen oder aufgrund einer allgemeinen Erneuerung ersetzt, bieten neue Leuchten ein erhebliches Potenzial zur Steigerung der Energieeffizienz und v.a. der lichttechnischen Performance.
- Sind die Leuchten ohnehin zu ersetzen, sind die Nettomehrkosten von **Regelungen mehr oder weniger als kostenneutral** zu bezeichnen (bei einigen Unternehmen sind geringe Mehrkosten, bei anderen geringe Minderkosten zu verzeichnen).



Bez.	Beschreibung der Massnahme	Volllaststunden
I0	Ist-Zustand: laufende Kosten für Lampenwechsel	1900
I1	Instandhaltung: Leuchte reinigen (inkl. Lampenwechsel)	1900
S1	Sofortmassnahme: Ersatz der Leuchtstoffröhren 26 mm durch 16 mm, entweder mit EVG-Adapter und aufsteckbarem Reflektor oder mittels Umbau / Umrüsten der Leuchten	1900
E1	Wie S1, aber zusätzlich Installation einer Präsenzsteuerung	1615
E2	Wie E1, aber zusätzlich Installation einer Tageslichtsteuerung (Ein-/Aus, kein Dimmen)	1260
E3	Leuchtenersatz (ohne Lichtregelung)	1900
E4	Leuchtenersatz inkl. Tageslicht- und Präsenzsteuerung	1260
E5	Leuchtenersatz inkl. Tageslicht- und Präsenzsteuerung (inkl. Dimmen)	1134

Abbildung 80 **Fall2: Spezifische Jahreskosten (CHF/m²/a) von Beleuchtungen bei Instandhalt und Erneuerung,** Fallbeispiel Gruppenbüro, Volllaststunden pro Jahr gemäss Abbildungslegende , Abschreibung i1: 5 Jahre, S1 bis E2: 10 Jahre, E3 bis E5: 15 Jahre, 3% Realzins, Strompreis 17 Rp/kWh (Quelle: Beleuchtungsunternehmen 1, 2, 3, 4, 6, 8, 9, Erhebung, Berechnung, Darstellung CEPE)

An dieser Stelle ist zu betonen, dass die Wirtschaftlichkeit von Erneuerungsmassnahmen im Beleuchtungsbereich stark von den getroffenen Annahmen des Referenzfalls abhängt. Wird im Referenzfall für die Reinigung und die laufenden Lampenwechselkosten einige fünf bis zehn CHF pro Leuchte eingesetzt, erhöht dies die Jahreskosten des Referenzfalls um 0.5 bis 2 CHF/m²a, so dass Erneuerungsmassnahmen vergleichsweise wirtschaftlicher werden als in Abbildung 80 dargestellt. Analoges gilt für die Annahme des Unterhaltsrhythmus: werden die Leuchten im Referenzfall tatsächlich in relativ kurzen Intervallen gereinigt (zwei bis drei Jahre, wie es eigentlich aus lichttechnischen Gründen geboten ist) erhöhen sich die Jahreskosten des Referenzfalls ebenfalls. Allerdings wären dann auch bei den Erneuerungsvarianten Unterhaltsarbeiten in ähnlicher Höhe einzurechnen.

In Abbildung 81 sind die spezifischen Brutto-Durchschnittskosten von energie-effizienteren Beleuchtungserneuerungen (inkl. Regelungen) im Vergleich zur Instandhaltung als Funktion der Beleuchtungs-EKZ dargestellt. Die spezifischen Kosten streuen markant, besonders bei der Massnahme Leuchtenumbau. Zum Teil sind die spezifischen Kosten eines Leuchtenumbaus geringer als der massgebliche Strompreis (Annahme Lebensdauer 10 Jahre). Ein reiner Leuchtenersatz vermag zwar die EKZ Beleuchtung um ca. einen Drittel zu reduzieren, aber die spezifischen Kosten sind nur bei einem Unternehmen geringer als der Strompreis (ohne Bewertung der beleuchtungstechnischen Nutzenerhöhung). Unter Einbezug der Lichtregelung reduzieren sich die spezifischen Brutto-Durchschnittskosten.

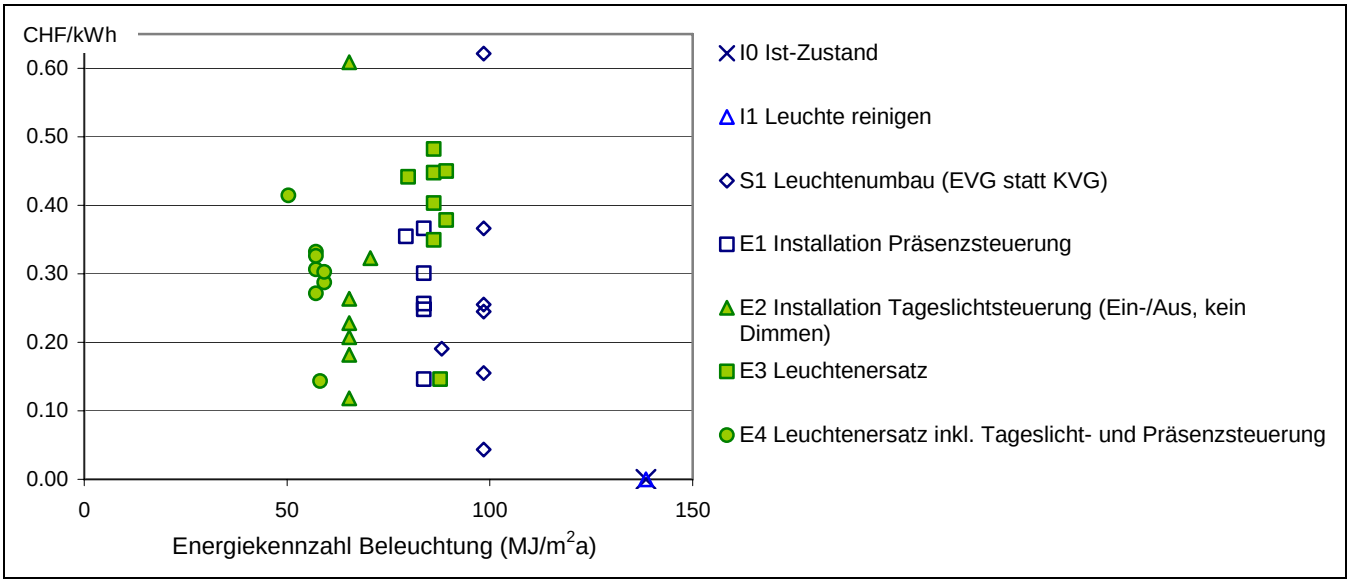


Abbildung 81 **Fall 2: Brutto-Durchschnittskosten (CHF/kWh) von Beleuchtungserneuerungen im Vergleich zur Instandhaltung**, Nutzung Gruppenbüro, Abschreibung und Volllaststunden pro Jahr gemäss Abbildung 80, 3% Realzins (Quelle: Beleuchtungsunternehmen 1, 2, 3, 4, 6, 8 und 9, Erhebung, Berechnung und Darstellung CEPE)

In Abbildung 82 sind die spezifischen Brutto-Grenzkosten von Beleuchtungsregelungen dargestellt, und zwar im Vergleich zu Beleuchtungserneuerungen (Leuchtenersatz) ohne Regelung. Aus der Abbildung ersichtlich sind die Referenz-Energiekennzahl Beleuchtung (mit E3 bezeichnet), die erreichbare Verbesserung (Länge der waagrechten Linie) sowie die spezifischen Brutto-Grenzkosten (Position der waagrechten Linie auf der y-Achse). Von der Ausnahme eines Unternehmens abgesehen liegen die spezifischen Brutto-Grenzkosten alle unter 15 Rp/kWh, d.h. die Beleuchtungsregelungen sind als wirtschaftlich zu bezeichnen. Dies gilt unter der Annahme der Volllaststunden gemäss Abbildung 80. Diese sind als durchaus realistisch zu bezeichnen. Gerade bei eher tiefen Räumen ist ohne Regelung oft die gesamte Beleuchtung in Betrieb, sobald für den hinteren Teil des Raumes Kunstlichtbedarf besteht. Bei geregelten Beleuchtungen kann im Vergleich dazu v.a. im fensternahen Bereich eine sehr markante Reduktion erzielt werden (vgl. Simulationsergebnisse von grossen und kleinen Räumen).

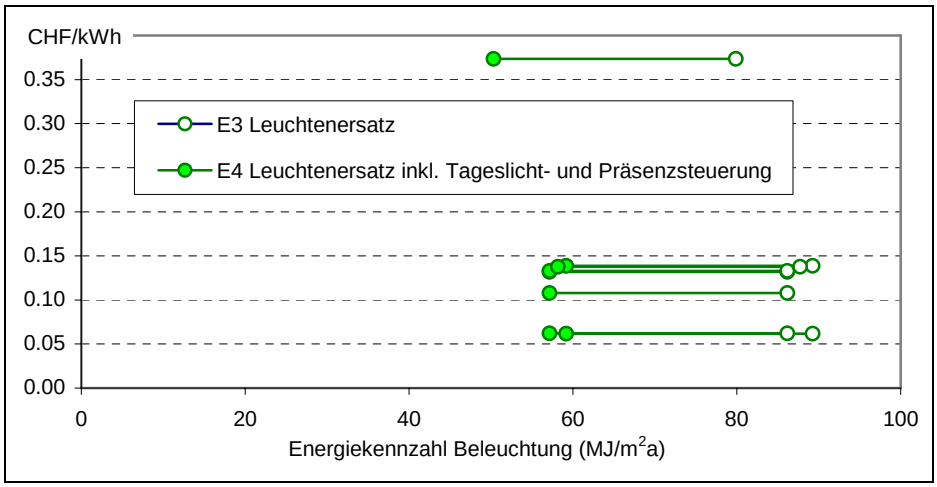
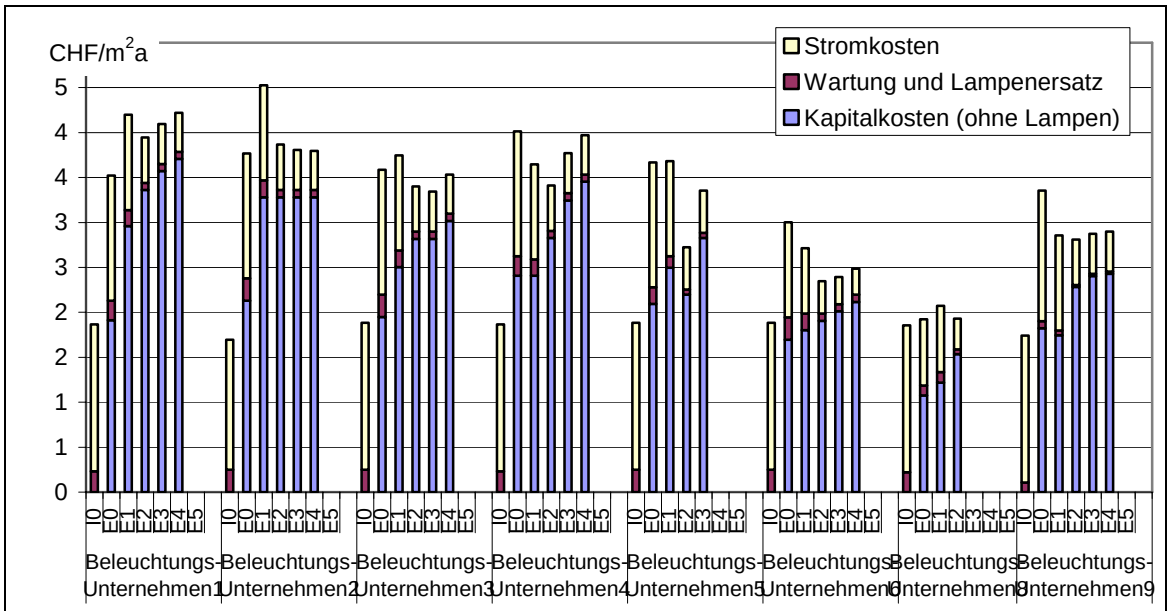


Abbildung 82 **Fall 2: Brutto-Durchschnittskosten (CHF/kWh) von Beleuchtungsregelungen im Vergleich zu Beleuchtungserneuerungen ohne Regelung** , Nutzung Gruppenbüro, Abschreibung und Volllaststunden pro Jahr gemäss Abbildung 80, 3% Realzins (Quelle: Beleuchtungsunternehmen 1, 2, 3, 4, 6, 8 und 9, Erhebung, Berechnung und Darstellung CEPE)

Falls also ein Leuchtenersatz vorgenommen wird, z.B. im Zusammenhang mit einer Innenraumerneuerung oder weil die Leuchten bzw. die kritischen Teile davon das Ende ihrer Lebensdauer erreicht haben, ist zu empfehlen, die Option „Beleuchtungsregelung" im Einzelfall vertieft zu prüfen, denn die Ergebnisse deuten auf eine gute Wirtschaftlichkeit hin.

In Abbildung 83 sind die Jahreskosten von bestehenden sowie von neuen Stehleuchten dargestellt. Das Kostenniveau ist im Vergleich zum Gruppenbüro v.a. tiefer, weil die zugrundeliegende Fläche mit 20 m^2 für zwei Leuchten relativ gross ist. Zur Interpretation: Beim Unternehmen 8 wird davon ausgegangen, dass eine Stehleuchte für ein Zweipersonenbüro ausreichend ist (bei den übrigen Unternehmen wurde von zwei Stehleuchten ausgegangen).



Bez.	Beschreibung der Massnahme	Volllaststunden
I0	Ist-Zustand	1420
E0	Neue Leuchte „Standard" (Indirektleuchte)	1420
E1	Neue Leuchte direkt/indirekt	1420
E2	Neue Leuchte direkt/indirekt inkl. Regelung	620
E3	Neue Leuchte direkt/indirekt inkl. Regelung und reduzierter Standby-Bedarf	620
E4	Neue Leuchte direkt/indirekt inkl. Regelung und automatischer Standby-Abschaltung	620
E5	Neue Leuchte (wie Erneuerung 4), zusätzlich Deckenerneuerung	1420

Abbildung 83 **Fall 3: Spezifische Jahreskosten (CHF/m^2a) von Beleuchtungen bei Instandhaltung und Erneuerung,** Fallbeispiel Zweipersonenbüro, 20 m^2, bestehende Indirektbeleuchtung mit Stehleuchten, Volllaststunden pro Jahr gemäss Abbildungslegende , 15 Jahre Abschreibung, 3% Realzins, Strompreis 17 Rp/kWh (Quelle: Beleuchtungsunternehmen 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8 und 9, Erhebung, Berechnung und Darstellung CEPE)

Folgende Sachverhalte können festgehalten werden:

- Wie bereits bei den Deckenleuchten festgestellt, lässt sich der Ersatz der Leuchten nicht mit dem Argument der geringeren Energiekosten begründen. **Wenn es hingegen gelingt, zwei bestehende Leuchten durch eine zu ersetzen, sind die Jahreskosten vergleichbar oder gar leicht geringer.**
- Die Mehrkosten der Lichtregelung führen gemäss einiger Anbieter zu geringen Netto-Mehrkosten, bei einigen zu Netto-Minderkosten.

- Nicht alle Stehleuchtenanbieter führen Stehleuchten mit reduziertem Standby-Verlust (< 1 W) bzw. automatischer Standby-Abschaltung. Bei einigen befragten Planungs- oder Installations-Unternehmen handelt es sich bei diesen Leuchten um ein Produkt eines anderen Anbieters, womit ein ceteris paribus Vergleich nicht mehr möglich ist (weil sich auch andere Eigenschaften ändern). Als Fazit kann aber festgehalten werden, dass die Kostenunterschiede zwischen Leuchten mit Standard-Standby-Verlust und solchen mit reduziertem Standby-Verlust oder automatischer Standby-Abschaltung gering sind.

In Abbildung 84 sind die spezifischen Brutto-Durchschnittskosten von Erneuerungen von bestehenden Stehleuchten-Beleuchtungen dargestellt. Die spezifischen Kosten streuen markant, sind aber zu einem grossen Teil tiefer als der massgebende Strompreis. Das bedeutet, dass sich die Mehrkosten von energieeffizienteren Stehleuchten inkl. Regelung (Präsenz basiertes Ein- und Ausschalten, tageslichtbasiertes Dimmen) durch geringere Energiekosten amortisiert werden können.

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt (Ergebnisse hier nicht gezeigt): Im Vergleich zu den laufenden Stromkosten (also im Vergleich zu No-Action) vermag ein reiner Leuchtenersatz zwar die Energiekennzahl Beleuchtung markant zu reduzieren, aber die spezifischen Kosten sind in der Regel höher als der Strompreis (ohne Bewertung der beleuchtungstechnischen Nutzenerhöhung).

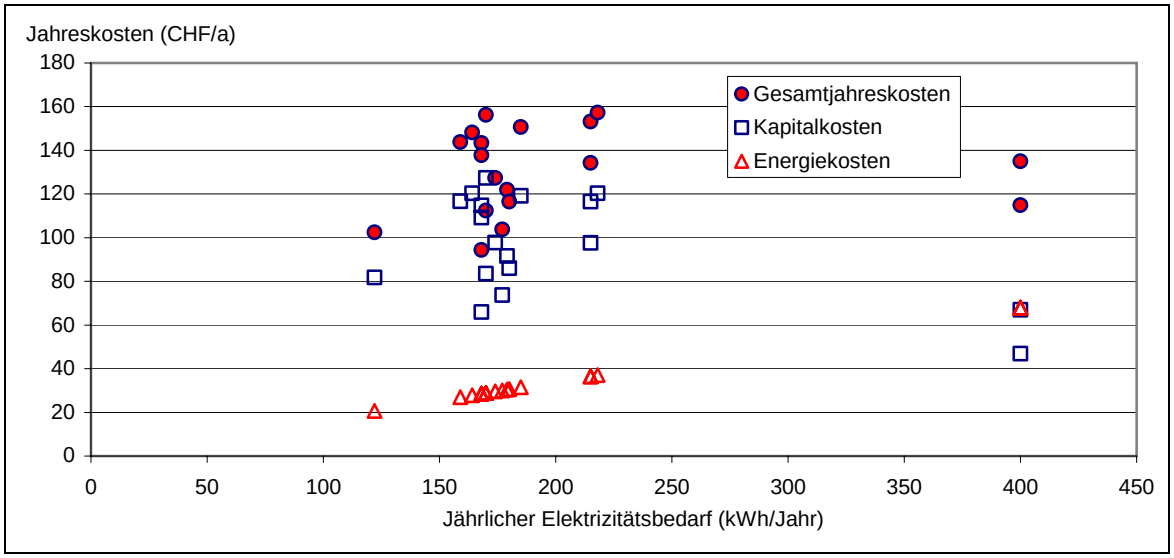


Abbildung 84 **Fall 3: Brutto-Durchschnittskosten (CHF/kWh) von Erneuerungen von Stehleuchten-Beleuchtungen**, Nutzung Zweipersonenbüro, Abschreibung und Vollaststunden pro Jahr gemäss **Abbildung 83**, 3% Realzins (Quelle: Beleuchtungsunternehmen 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8 und 9, Erhebung, Berechnung und Darstellung CEPE)

Zum Vergleich sind in Abbildung 85 die Energie-, Kapital- und Gesamtjahreskosten dargestellt. Bei einigen Anbietern sind die gesamten Jahrkosten der energie-effizienten Stehleuchten höher als die Jahreskosten der Standardstehleuchten, bei anderen Anbietern geringer. Es ist also möglich, den Energiebedarf um mehr als die Hälfte zu reduzieren, ohne Mehrkosten in Kauf nehmen zu müssen. Dies ist selbst dann der Fall, wenn weitere Nutzen der energie-effizienten Topten-Leuchten wie z.B. der zusätzliche Direktlichtanteil oder geringere Wärmelasten vernachlässigt werden.

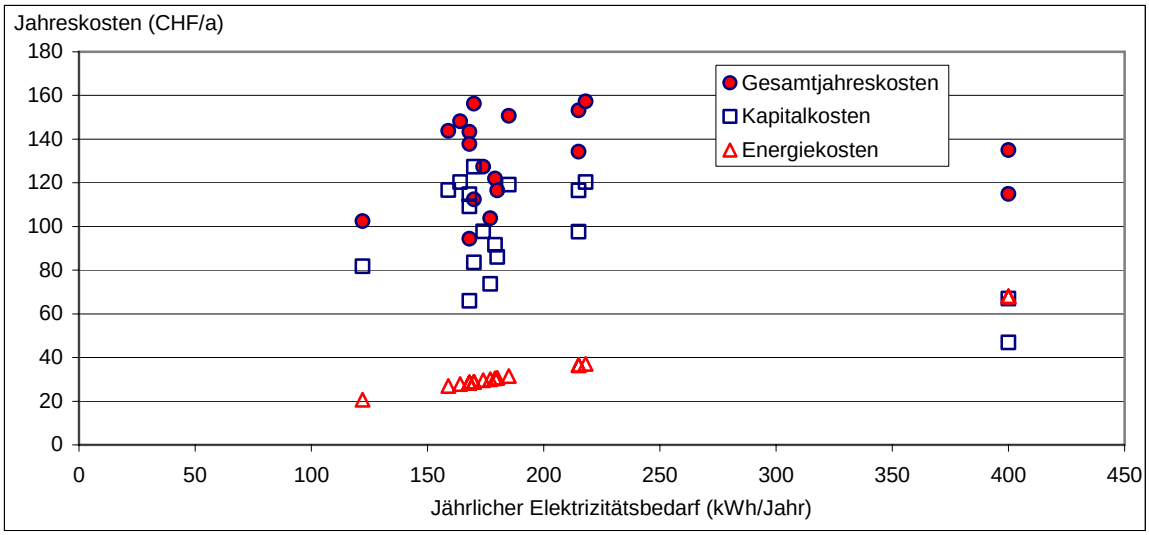


Abbildung 85 Jahreskosten (CHF/a) von Stehleuchten als Funktion des jährlichen Elektrizitätsbedarfs, Rabatt -33%, wirtschaftliche Lebensdauer 15 Jahre, 3% Realzins, Strompreis 17 Rp/kWh (Quelle: www.topten.ch, Stand 17.11.05, Darstellung CEPE unter Berücksichtigung von Abbildung 57)

In diesen Vergleichen sind nur die direkten Nutzen in Form von geringeren Energiekosten bewertet, nicht jedoch die indirekten Nutzen, welche sich aufgrund der verbesserten Beleuchtungsqualität ergeben. Diese indirekte Nutzen könnten erheblich sein und die direkten Nutzen in ihrer Bedeutung übertreffen, wie z.B. Dehoff (2005) und die darin enthaltene Literaturübersicht über den Zusammenhang zwischen Beleuchtung und Gesundheit nahe legen. Näher zu untersuchen wäre auch der Zusammenhang zwischen Beleuchtung und Produktivität.

5.5.3 Detailhandel

Im Detailhandel ist grundsätzlich von einer Mischbetrachtung zwischen Grundbeleuchtung und sogenannter Akzentbeleuchtung auszugehen.

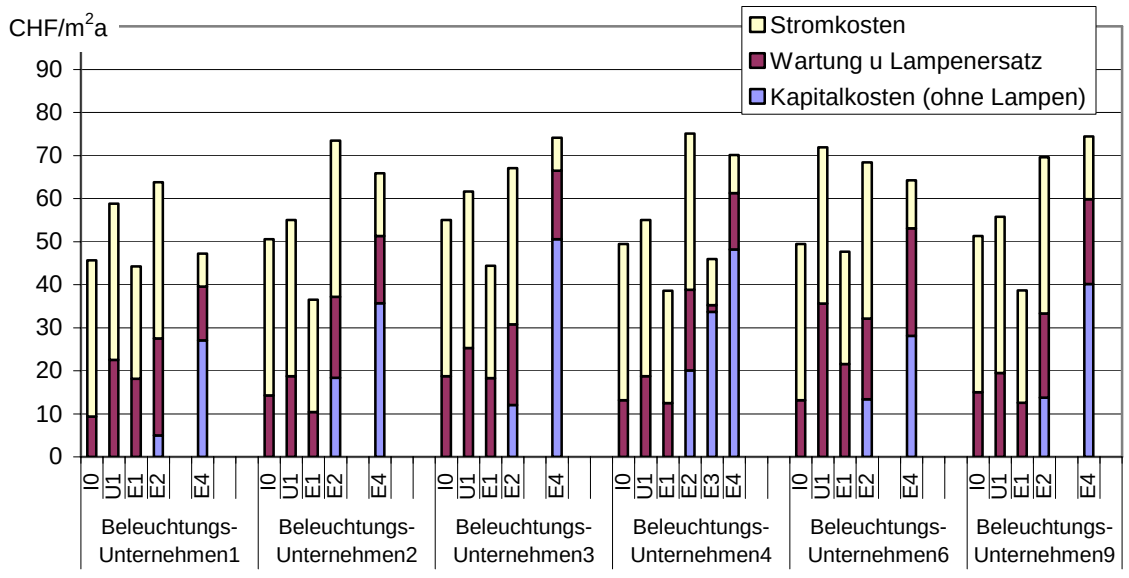
Die Grundbeleuchtung erfolgt im Detailhandel in der Regel mittels Leuchtstofflampen. Ausgehend von der Bürobeleuchtung lassen sich die Kosten-Nutzenrelationen mittels Analogieüberlegungen auf den Detailhandel übertragen, wobei gewisse relevante Unterschiede zu berücksichtigen sind: unterschiedliche geometrisch Verhältnisse, längere tägliche Volllaststunden, in der Regel keine Tageslichtnutzung. Zum einen lassen sich Mehrkosten von energie-effizienteren Lampen, Vorschaltgeräten und Leuchten aufgrund der höheren Anzahl Volllaststunden besser amortisieren als im Bürobereich. Zum anderen sind die Möglichkeiten im Bereich Lichtregelung im Vergleich zur Büronutzung weniger ausgeprägt vorhanden, jedoch nicht gänzlich inexistent: Für die Funktionen Reinigung und Regal auffüllen vor und nach den Ladenöffnungszeiten ist der Bedarf an Beleuchtungsstärke geringer als während der Verkaufszeiten. Entsprechend lässt sich mit geeigneten Betriebsoptimierungsmassnahmen der Energiebedarf reduzieren. Auf eine quantitative Umsetzung dieser Überlegungen wird an dieser Stelle verzichtet und es erfolgt nachfolgend eine Konzentration auf die Akzentbeleuchtung.

In Abbildung 86 sind die Jahreskosten von Akzentbeleuchtungen im Detailhandel dargestellt. Die gesamten Jahreskosten sind mit 40 bis über 70 CHF/m^{2}a wesentlich höher als bei Grundbeleuchtungen mittels Leuchtstofflampen, wo die Kosten zwischen 2 CHF/m^{2}a (geringe Belegung mit optimaler Anordnung) und 15 CHF/m^{2}a betragen (siehe Kap. 5.5.1). In der Ausgangslage mit konventionellen Niedervolt-Halogen-Lampen sind sehr hohe Stromkosten zu verzeichnen (40 bis 50 CHF/m^{2}a). Dazu addieren sich nicht vernachlässigbare Lampenwechselkosten von 10 bis über 20 CHF/m^{2}a, je nachdem, ob die Arbeitskosten für den Lampenwechsel mit eingerechnet werden (müssen) oder nicht. Die Niedervolt-Halogen-Lampen sind zwar relativ kostengünstig, aber die Lebensdauer ist nur in der Grössen-

ordnung von 2000 h, was bei Volllaststunden von typischerweise 3000 h/a zu mehr als einem Lampenersatz pro Jahr führt.

Folgende Feststellungen können gemacht werden:

- Werden die konventionellen Halogenlampen im Sinne einer Sofortmassnahme durch IRC-Halogenlampen ersetzt, können die Jahreskosten geringfügig (im Vergleich zu den laufenden Strom- und Materialkosten) bzw. deutlich (falls Arbeitskosten im Referenzfall miteingerechnet werden) gesenkt werden. IRC-Lampen sind zwar teurer in der Anschaffung, haben aber mit 4000 h eine doppelt so hohe Lebensdauer und einen 30% geringeren Strombedarf.
- Im Vergleich zu den beiden Referenzfällen I0 und U1 (siehe Legende in Abbildung 86) ist der Ersatz der bestehenden Halogenbeleuchtung durch Halogenmetalldampflampen-Spotleuchten mit geringen Netto-Mehrkosten verbunden. Die Leuchten und auch die Lampen sind zwar in der Anschaffung markant teurer, aber durch die geringere Anzahl, die deutlich höhere Lebensdauer (12000 h statt 2000 h) und v.a. durch den deutlich geringeren Strombedarf ergeben sich nur geringe Mehrkosten (bei einer angenommenen Lebensdauer von 7 Jahren; bei höherer Lebensdauer verbessert sich die Wirtschaftlichkeit).
- Ist die konventionelle Niedervolthalogen-Beleuchtung ohnehin zu ersetzen (z.B. im Zusammenhang mit einer Ladenerneuerung), Fall E2 gemäss Abbildung 86, wird die Variante mit Halogenmetalldampflampen-Spotleuchten wirtschaftlich interessant. Laut befragten Unternehmen werden sich diese in naher Zukunft durchsetzen, zumal in Kürze ein 20 W-Spot erhältlich sein wird (heutige Mindestleistung: 35 W).



I0	Laufender Unterhalt: Halogenspots wechseln (Anzahl: 100), nur Lampenkosten
U1	Laufender Unterhalt: Halogenspots wechseln (Anzahl: 100), inkl. Lampen- und Arbeitskosten für Wechsel
E1	Ersatz der Standard-Halogen-Lampen durch IRC Halogenlampen (Anzahl: 100)
E2	Erneuerung der Niedervolthalogenbeleuchtung (Anzahl: 100)
E3	Leuchtenersatz: Neue Leuchten (Strahler) mit PL-Leuchtmitteln (Kompaktleuchtstofflampen), Anzahl: 50-60
E4	Leuchtenersatz: Spots mit Halogenmetalldampflampen 35 W oder 20 W, Anzahl: 50-60

Abbildung 86 **Fall 4: Spezifische Jahreskosten (CHF/m²/a) von Akzent-Beleuchtungen im Detailhandel bei Instandhaltung und Erneuerung**, 3000 Volllaststunden pro Jahr, 7 Jahre Abschreibung, 3% Realzins, Strompreis 17 Rp/kWh (Quelle: Beleuchtungsunternehmen 1, 2, 3, 4 und 6, Erhebung, Berechnung und Darstellung CEPE)

5.6 Wärmeerzeugung

Die spezifischen Jahreskosten der verschiedenen Wärmeerzeugungssysteme ergeben sich aufgrund der spezifischen Kapitalkosten, der Unterhaltskosten (Kap. 4.6.2) sowie der Energiekosten. Die Kapitalkosten wurden ausgehend von den spezifischen Investitionskosten (Kap. 4.6.1) und einem Realzinssatz von 3% anhand der Annuitätenmethode berechnet, wobei von einem Leistungsbedarf von 40 W/m^2 und einem Qh von 240 MJ/m^{2}a ausgegangen wurde. Die angenommenen Jahresnutzungsgrade zur Ermittlung der Energiekosten sind in den nachfolgenden Abbildungsbeschriftungen angegeben. Bei allen Anlagetypen wurden zusätzlich Verteilverluste von 4% angenommen. Der Skaleneffekt der Energiepreise wurde vernachlässigt (in der Realität liegt das Niveau der Brennstoffpreise im oberen Leistungsbereich 1 bis 2 Rp/kWh tiefer und auch beim Strompreis sind Unterschiede zwischen verschiedenen Kundenkategorien zu verzeichnen. Weil der Effekt bei den Brennstoffen relativ gesehen eher stärker ins Gewicht fällt, stellt diese Vereinfachung eine eher konservative Beurteilung der Wärmepumpen dar.

5.6.1 Neue Gebäude

Bei kleinen und mittleren energie-effizienten Gebäuden liegen die Jahreskosten von fossilen Heizanlagen und von WP-Anlagen auf vergleichbarem Niveau (Abbildung 87). Bei grossen Gebäuden ist bei den WP-Anlagen mit Mehrkosten von 1 bis 1.5 CHF/m^{2}a zu rechnen, je nach erreichtem Jahresnutzungsgrad. Anzumerken ist, dass die WP-Jahreskosten relativ sensitiv auf den erreichten Jahresnutzungsgrad reagieren. Bereits eine Variation von 4 auf 3.5 vermag die Rangreihenfolge im unteren Leistungsbereich zu verändern und führt im oberen Leistungsbereich zu höheren Mehrkosten. Eine Änderung der Rangreihenfolge ist auch zwischen den beiden fossilen Energieträgern Oel und Erdgas möglich, je nach örtlichen Kosten des Erdgasanschlusses, der Bewertung der Raumkosten und der Preispolitik des Erdgasunternehmens bzgl. Anschlusskosten, Leistungs- und Arbeitspreis. Die Jahreskosten der kondensierenden fossilen Systeme liegen leicht unter denjenigen der konventionellen. Die Jahreskosten der bivalenten WP-Anlagen und der Holz-Anlagen liegen über dem gesamten Leistungsbereich höher als diejenigen der übrigen Anlagetypen. Holzanlagen werden im oberen Leistungsbereich gegenüber WP-Anlagen konkurrenzfähig. Insbesondere öffentliche Bauträger (Gemeinden) mit eigenem Energieholz sind potentielle Nutzer dieser Technologien, weil die Gesamtrechnung "Forstwirtschaft – Gebäudebetrieb" durch den Einsatz von Holzfeuerungen verbessert werden kann.

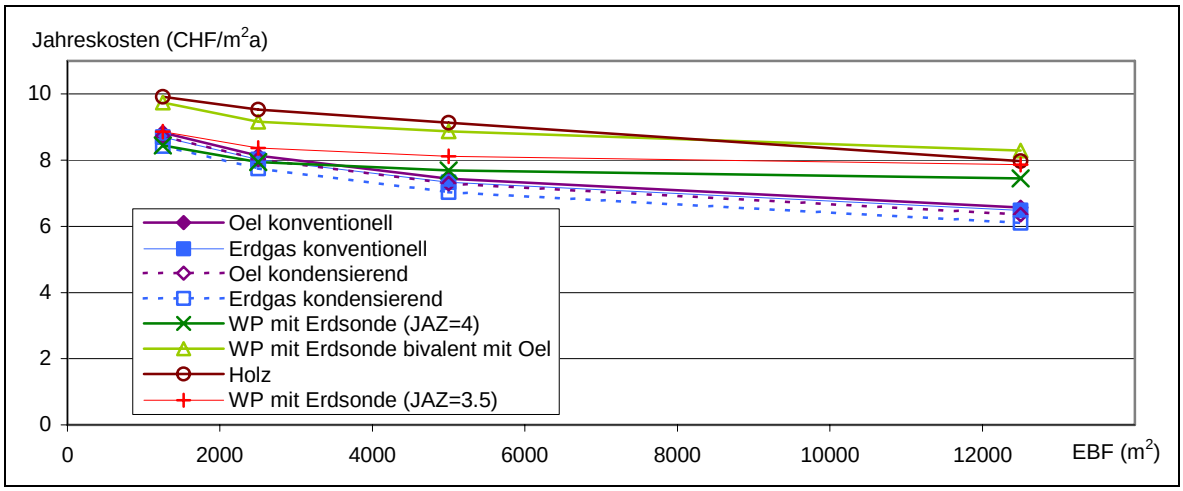


Abbildung 87 Jahreskosten von verschiedenen Wärmeerzeugungssystemen als Funktion der EBF (Realzins=3%, fossiler Energiepreis=0.07 CHF/kWh, Pelletspreis 0.055 CHF/kWh, Strompreis=0.17 CHF/kWh, JAZ WP=3.5 bzw. 4, JNG Pelletsfeuerung=0.9)

Anhand der Struktur der Jahreskosten wird deutlich, wie im unteren Leistungsbereich die höheren Kapitalkosten der Wärmepumpen durch geringere Energiekosten wettgemacht werden und wie sich die Verhältnisse vom unteren zum oberen Leistungsbereich verschieben (Abbildung 88). Aus der analogen Abbildung mit einem geringeren Preis für fossile Energieträger (5 Rp/kWh, 50 CHF/100 lit.) wird deutlich, dass die nicht-fossilen Anlagen in diesem Fall stark an Konkurrenzfähigkeit einbüssen (Abbildung 144). Die Wahl des Energieträgers hängt also stark von den Erwartungen der Entscheidungsträger bzgl. vom künftigem Energiepreis ab. Diese Erwartungen sind zum einen vom Weltmarktgeschehen geprägt, können aber auch durch energiepolitische Massnahmen beeinflusst werden (CO_2-Lenkungsabgabe).

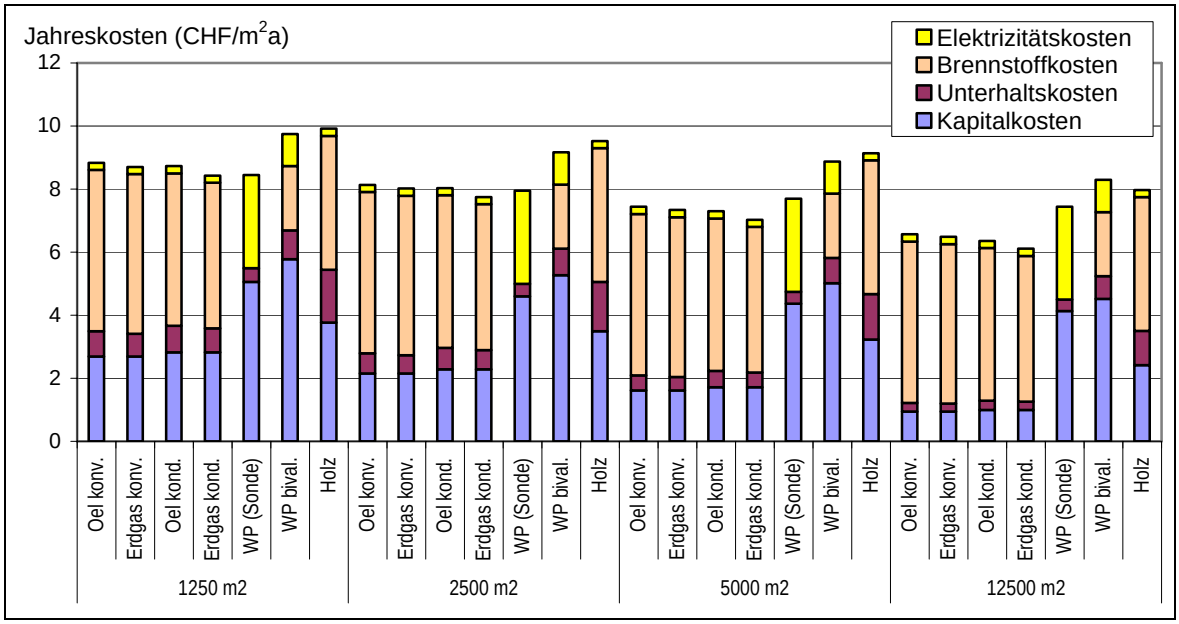


Abbildung 88 **Struktur der Jahreskosten von verschiedenen Wärmeerzeugungssystemen** (Realzins=3%, fossiler Energiepreis=0.07 CHF/kWh, Pelletpreis 0.055 CHF/kWh, Strompreis=0.17 CHF/kWh, JAZ WP=3.5 bzw. 4, JNG Pelletsfeuerung=0.9)

Eine ähnliche strukturelle Verschiebung zu Ungunsten der investitionsintensiveren Anlagetypen (Wärmepumpen und Holz) ergibt sich, wenn die Akteure aufgrund ihrer betriebswirtschaftlichen Optik von einer kürzeren Lebensdauer ausgehen und/oder mit höheren Realzinssätzen rechnen (Abbildung 144 im Anhang, mittlere Abbildung). In diesen Fällen sind Wärmepumpen auch im unteren Leistungsbereich nicht mehr konkurrenzfähig (Mehrkosten gut 1 CHF/m^{2}a).

Der Einsatz der Wärmepumpen-Technologie bei Dienstleistungsgebäuden ist technologisch und wirtschaftlich interessant, besonders wenn Wärmeerzeugung und -verteilung sowie Gebäudekühlung gekoppelt werden. In Kombination mit der entsprechenden Technologie für die Wärme-/Kälteverteilung (TABS) und für die Wärmegewinnung bzw. Rückkühlung (Erdsonden) kann mit der gleichen Maschine geheizt und gekühlt werden, wobei anzumerken ist, dass diese für einen Grossteil des Kühlbedarfs nicht benötigt wird (by pass) und die Kühlung durch die reine Zirkulation in der Erdsonde erfolgt (empirisch Erfahrung A+W, Simulationsergebnis Dott, Afjei et al., 2006). Erdsonden sind – ausser in Grundwasserschutzzonen – breit einsetzbar. Langfristig wäre bei dichter Überbauung und hoher Marktdurchdringung auf die Ergiebigkeit der Wärmequelle Erdwärme zu achten, da der Wärmenachfluss vom Erdinneren begrenzt ist (siehe z.B. Brögli 1999). Eine nachhaltige Bewirtschaftung kann durch eine kombinierte Nutzung als Wärmequelle während der Heizperiode und als Wärmesenke während des Sommers erreicht werden (Rückkühlung der Gebäudekühlung, evtl. ergänzt durch Überschusswärme von Solaranlagen).

5.6.2 Bestehende Bauten

Die Vollkosten der Wärmeerzeugung sind im Gebäudebestand grundsätzlich ähnlich wie im Neubaubereich, abgesehen von einem höheren Preisniveau (geringerer Wettbewerb) und zusätzlichen Kosten für Anpassungsarbeiten und Entsorgung von alten Anlageteilen. Entsprechend wurde im Gebäudebestand bei den Investitionskosten von einem generell 20% höheren Kostenniveau ausgegangen, dies mit Ausnahme der partiellen Erneuerung (p.E.). Die partielle Erneuerung von Wärmeerzeugungsanlagen spielt im Gebäudebestand eine nicht zu vernachlässigende Rolle, dies aufgrund der unterschiedlichen Lebensdauer der einzelnen Anlagenteile und weil der Ausfall der einzelnen Anlagenteile einer Wahrscheinlichkeitsverteilung unterliegt. Eine partielle Erneuerung umfasst typischerweise Wärmeerzeugung (hier angenommen: Kessel inkl. Brenner), Montage inkl. Transport und Sanitärarbeiten, nicht jedoch Kamin, Tank und Gasanschluss. Die Investitionskosten liegen entsprechend bei den Oelanlagen gut 50% und bei den Gasanlagen zwischen 30% und 40% (oberer bzw. unterer Leistungsbereich) tiefer. Im Gebäudebestand ist zudem bei den Wärmepumpen häufig von tieferen Jahresarbeitszahlen auszugehen, weil die bestehende Wärmeverteilung nicht in allen Fällen den Erfordernissen der Wärmepumpentechnik angepasst werden kann (tiefe Vorlauftemperaturen).

Beim nachfolgenden Vergleich (Abbildung 89) wird von Gebäuden ausgegangen, bei welchen die Gebäudehülle erneuert wurde und bei welchen die Vorlauftemperaturen auf einem moderaten Niveau liegen (Annahmen: Qh=240 MJ/m^{2}a, Wärmeleistungsbedarf 40 W/m). Im Gegensatz zum Neubaubereich liegen die Kosten der nicht-fossilen Anlagetypen über den gesamten betrachteten Leistungsbereich klar über den Oel- und Erdgasanlagen (Abbildung 89). Bei den Wärmepumpen wird dies nicht nur durch die im Vergleich zum Neubau höheren Kapitalkosten, sondern auch durch die geringeren Jahresarbeitszahlen verursacht. Der Kostenunterschied ist besonders deutlich, wenn mit den Kosten der partiellen Erneuerung der bestehenden fossilen Anlagen verglichen wird. Die nicht-amortisierbaren Substitutionskosten können also bedeutsam sein. Dies kann auch für die Umstellung von Oel auf Erdgas zutreffen, wie der Unterschied zwischen den Erdgas-Vollkosten und den Kosten der partiellen Erneuerung der (bestehenden) Oelanlage zeigt.

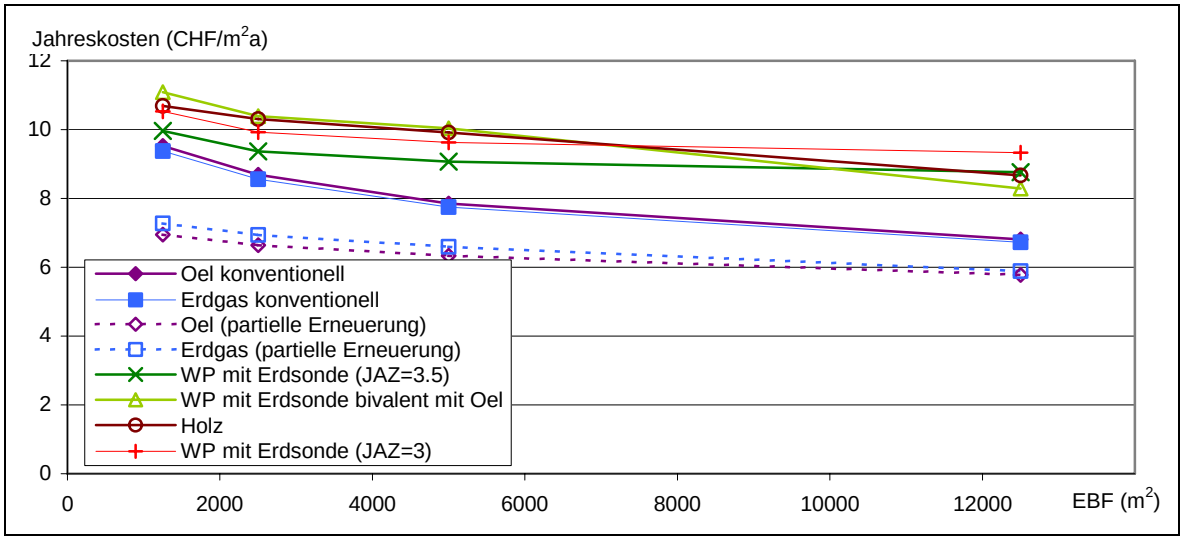


Abbildung 89 Jahreskosten von verschiedenen Wärmeerzeugungssystemen als Funktion der EBF (Realzins=3%, fossiler Energiepreis=0.07 CHF/kWh, Pelletspreis 0.055 CHF/kWh, Strompreis=0.17 CHF/kWh, JAZ WP=3 bzw. 3.5, JNG Pelletsfeuerung=0.9)

In Abbildung 144 (untere Abbildung) im Anhang ist als ergänzende Information die Struktur der Jahreskosten der verschiedenen Wärmeerzeugungssysteme dargestellt.

6 Kosten-Nutzen auf Gebäudeebene

Anhand von zwölf Fallbeispielen wird nachfolgend für eine Reihe von Energieeffizienz- und/oder Komfortmassnahmen der Verlauf von Komfortmass und Jahreskosten aufgezeigt, getrennt nach Neubau und Gebäudeerneuerung. Die Jahreskosten werden in ihrer Struktur dargestellt, wobei zwischen Kapitalkosten, Unterhalt, Brennstoff- und Elektrizitätskosten unterschieden wird. Die Annahmen zu den Kostenkennwerten und die Struktur der Kapitalkosten sind im Anhang dokumentiert. Die Umrechnung der Investitionskosten auf jährliche Kapitalkosten erfolgt mittels der Annuitätenmethode und der typischen wirtschaftlichen Lebensdauer der einzelnen Bauteile, Anlagen und Komponenten, wobei sich die wirtschaftliche Lebensdauer an der technischen Lebensdauer orientiert (jedoch etwas kürzer angenommen wurde). Die Berechnungen basieren auf einem Realzinssatz von 3%, einem Brennstoffpreis von 7 Rp/kWh und einem Elektrizitätspreis von 17 Rp/kWh. Als exemplarisches Komfortmass ist die Anzahl Stunden mit Grenzwertüberschreitung der Innenraumtemperatur dargestellt (gemäss Grenzwertverlauf in Abbildung 10, S. 97).

Berücksichtigt wurden zudem die Auswirkungen der Energie- und Komfortmassnahmen auf die Dimensionierung der Gebäudetechnikanlagen, insbesondere auf den Leistungsbedarf der Wärme- und Kälteerzeugung sowie bei der Kälteverteilung (bei Umluftkühlern). Zugrundeliegende Voraussetzung dabei ist, dass diese Auswirkungen in der Planung und Implementierung in der Praxis tatsächlich berücksichtigt, d.h. dass die Anlagen präzise und fallweise dimensioniert werden (und nicht nur mittels groben Kennwerten). Die angenommenen Kapitalkosten sind im Anhang 9.8.1, S. 317 dokumentiert.

6.1 Neubau

Bei den Gebäudetypen BN1.1a bis BN1.1c (Abbildung 90 bis Abbildung 92) handelt es sich um Gebäude mit hohem Verglasungsanteil (Fensteranteil 80%, d.h. Nettoverglasungsanteil knapp 70%) und jeweils hohen internen Lasten.

Im ersten Gebäudetyp BN1.1a (Abbildung 90) wurde dem Referenzfall eine aktive Kühlung und eine Lüftung mit Zuluftkühlung zugrunde gelegt. Die nachfolgenden Massnahmen M1 bis M4a weisen leicht höhere Kapitalkosten auf, welche jedoch durch geringere Energiekosten mehr oder weniger kompensiert werden. Die Massnahme M4b (spezielle Spiegellamelle), v.a. aber M5 (zwischen der Verglasung liegender Sonnenschutz) reduzieren zwar die Energiekosten ebenfalls, aber die Jahreskosten steigen deutlich an, weil es sich bei letzterer Massnahme um eine sehr kostenintensive Massnahme handelt (Investitionskosten bis einige hundert CHF/m^2). Die nachfolgenden Massnahmen M6 bis M10.1 sind zum Teil kostenneutral, zum Teil erhöhen sie die Jahreskosten netto leicht, dies bei sukzessiver Reduktion des Energiebedarfs (siehe auch Abbildung 13). Wird zum Ende (M10b) ein äusserer statt ein zwischenliegender Sonnenschutz angenommen, können die gesamten Jahreskosten mehr oder weniger auf das Niveau des Referenzfalls zurückgeführt werden (netto +3 CHF/m^2a), dies bei deutlich gesteigerter Energie-Effizienz (EKZ_{el} -125 MJ/m^2a, d.h. -40%, $EKZ_{Brennstoffe}$ -60 MJ/m^2a, d.h. -30%) und eingehaltenen Komfortanforderungen. Zu verdanken ist die diese Kostenneutralität auch der geringeren Kälteleistung (3 bis 4 CHF/m^2a geringere Kapitalkosten). Anzumerken ist zudem, dass vom verbleibenden Elektrizitätsbedarf von 190 MJ/m^2a mehr als die Hälfte, nämlich 116 MJ/m^2a, auf die Arbeitshilfen (Geräte) entfallen. Dies verdeutlicht die Wichtigkeit, das Augenmerk nicht nur auf die gebäudebezogene Elektrizität, sondern auch auf die übrigen Elektrizitätsanwendungen zu richten.

Ähnliche Feststellungen lassen sich für den Fall BN1.1b machen, wobei ausgehend vom selben Referenzfall eine unterschiedliche Reihenfolge der Massnahmen angenommen wurde. Der zwischenliegende Sonnenschutz verteuert die Jahreskosten zwischenzeitlich markant, aber die eigentlichen Energie-Effizienzmassnahmen lassen sich in der Lebenszyklusbetrachtung kostenneutral realisieren, und zwar bei deutlich gesteigerter Energie-Effizienz (EKZ_{el} –150 MJ/m^2a, d.h. –45%, $EKZ_{Brennstoffe}$ -100 MJ/m^2a, d.h. –40%) und eingehaltenen Komfortanforderungen (siehe Abbildung 91).

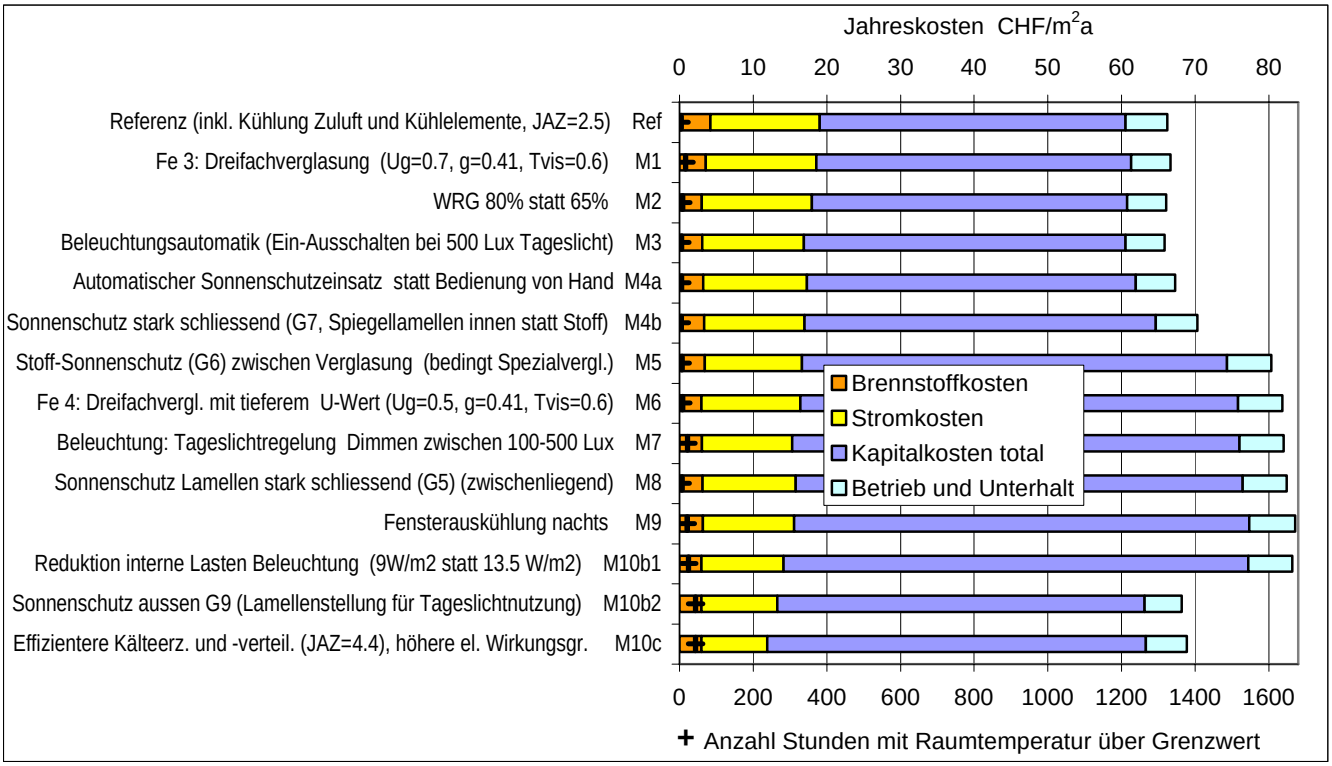


Abbildung 90 **Struktur der Jahreskosten bei Gebäudetyp BN1.1a:** Neubau eines grossen Bürohochhauses, EBF 10'000 m², hoher Fensteranteil (80%), ohne Fensteröffnung bei Überhitzung, Leichtbauweise, hohe interne Lasten, Beleuchtung: 13.5 W/m², U-Wert Aussenwand 0.29 bzw. 0.77 W/m²K (Wert ohne bzw. mit Wärmebrücken, innerer, von Hand bedienter Sonnenschutz (G8), Lüftung (Druckverluste 1200 Pa, Ventilatorwirkungsgrad 55%) mit WRG (thermischer Wirkungsgrad 65%), Fenstertyp 2 (U_g=1.1, g=0.52, T_{vis}=0.73, U_f=1.8), Beleuchtung: manuelles Ein-/Ausschalten (bei 800 Lux), Kühlung der Zuluft und Kühlelemente (Kühldecke/Umluftkühler) ohne Leistungsbeschränkung, JAZ=2.5

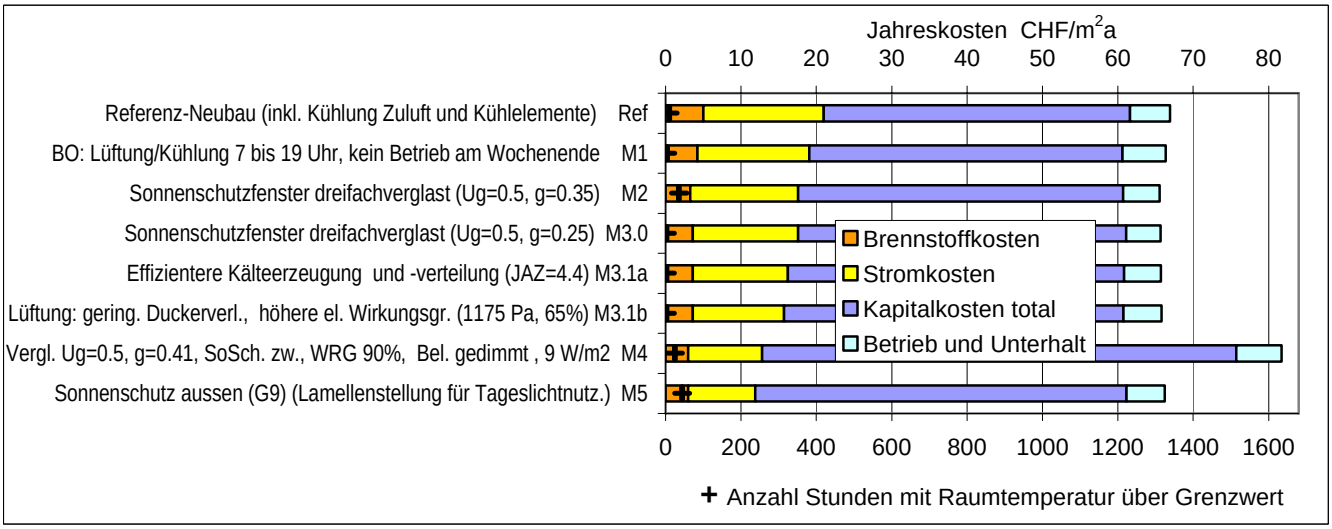


Abbildung 91 **Struktur der Jahreskosten bei Gebäudetyp BN1.1b:** Neubau eines grossen Bürogebäudes, EBF 10'000 m², hoher Fensteranteil (80%), ohne Fensteröffnung bei Überhitzung, Leichtbauweise, hohe interne Lasten, Beleuchtung: 13.5 W/m², Fassaden-U-Wert 0.77 W/m²K (inkl. WB), innerer, von Hand bedienter Sonnenschutz (G8), Lüftung mit WRG 65%, Fenstertyp 2 (U_g=1.1, g=0.52, T_{vis}=0.73, U_f=1.8), Beleuchtung: manuell (800 Lux), Zuluftkühlung und Kühlelemente)

Wird eine Fensteröffnung bei Überhitzung angenommen, sind die lassen sich die Anforderungen bzgl. Überhitzung leichter einhalten als ohne die Nutzung dieser Free Cooling Möglichkeit. Allerdings ist eine Reihe von Massnahmen notwendig, um die Anzahl der Stunden mit erhöhten Innentemperaturen auf unter 200 oder untern 100 h/Halbjahr zu senken (Gebäudetyp BN1.1c, Abbildung 92). Die Massnahmen werden mit zwei Referenzfällen verglichen, wobei der mit „Test" bezeichnete Referenzfall eher didaktischer Natur ist, denn bei diesem werden die Komfortanforderungen massiv überschritten. Der zweite Referenzfall Ref2 beinhaltet eine aktive Kühlung und eine Zuluftkühlung und es stellt sich im folgenden die Frage, ob die Komfortanforderungen auch ohne solche erreicht werden können.

Bis zur Massnahme M4b bleiben die gesamten Jahreskosten in etwa konstant bzw. steigen leicht an. Die mehr oder weniger kostenneutralen Massnahmen beinhalten die Verbesserung des WRG-Wirkungsgrads, die Verwendung eines dreifach-verglasten Fensters mit tieferem U-Wert und tieferem g-Wert sowie das einer (einfachen) Beleuchtungsregelung. Die Ursache des (geringen) Netto-Anstiegs der übrigen Massnahmen (verbesserter Sonnenschutz) ist auf die geringe bzw. beinahe fehlende Energiekostenreduktion zurückzuführen, welche keine Kompensation der höheren Investitionskosten ermöglicht. Der Nutzen eines verbesserten Sonnenschutzes ist denn auch in der Komfortverbesserung zu sehen. In der Bilanz liegen die Jahreskosten bis zur Massnahme M4b unter dem Referenzfall Ref 2, bei welchem die Komfortanforderungen eingehalten werden.

Der augenfälligste Kostensprung wird durch den zwischen der Verglasung liegenden Sonnenschutz verursacht (M5). Bauphysikalisch ist dies eine bessere Lösung als ein innenliegender Sonnenschutz, verursacht aber hohe Investitionskosten (die m^2-Kosten der Fassade erhöhen sich um einige hundert CHF). Die hohen Kosten werden entweder durch die Glasdoppelhautfassade oder spezielle Verglasungen mit integriertem Sonnenschutz verursacht. Die bauphysikalisch beste und auch kostenmässig gute Sonnenschutzvariante des äusseren Sonnenschutzes wird bei diesem Gebäudetyp nicht betrachtet, denn an diesem Gebäudetyp soll exemplarisch nur der Handlungsspielraum genutzt werden, der bei Gebäuden mit Anspruch an glatt strukturierte Fassaden gegeben ist.

Mit den Massnahmenpakten M1 bis M9 kann letztlich ein komfortmässig akzeptabler Zustand erreicht werden (darin enthalten ist die Kühlung der Zuluft; ohne eine solche ist die Komfortsituation bei einem Gebäude mit 80% Glasanteil kaum beherrschbar). Einen entscheidenden Beitrag liefert die regulierte Fensteröffnung sowohl tagsüber wie auch nachts. Anzumerken ist hierzu, dass der Nutzen der Fensteröffnung aber nur dann in dem berechneten Ausmass ausfällt, wenn die einströmende Luft nicht wärmer ist als die angenommene Aussentemperatur. Dies ist insbesondere bei einer Glas-Metallfassade und auch bei anderen Fassadentypen möglicherweise nur teilweise gegeben. Besonders kritisch ist jedoch eine Doppelhautglasfassade zu beurteilen, bei der die Fenster nur gegen den Glaszwischenraum öffnen (aus dieser Sicht ist bei M5 und den folgenden Massnahmenpaketen von einem in die Verglasung integrierten Sonnenschutz und nicht von einer Doppelhautglasfassade auszugehen)[27]). Im Vergleich zum Referenzfall Ref2 mit aktiver Kühlung ist beim Massnahmenpakte M1 bis M9 mit markanten Mehrkosten zu rechnen, v.a. aufgrund des zwischen der Verglasung liegenden Sonnenschutzes (M5). Da zudem der Energie-Effizienzgewinn dieser Massnahme eher gering ausfällt, sind Investitionen in eine hocheffiziente aktive Kühlung (z.B. mit Free Cooling Möglichkeit) und weitere Energie-Effizienzmassnahmen wohl als kosteneffizienter zu bezeichnen.

Mit M10 ist eine solche aktive Kühlung angenommen, welche eine weitere Verbesserung der Komfortsituation ermöglicht, entweder durch Umluftkühler oder durch Kühldecken. Die Massnahme M11.1, welche mit dem Ziel einer Reduktion des Kühlenergiebedarfs definiert wurden, zeitigt absolut gesehen nur einen geringen Effekt, dies v.a. weil der Kühlenergiebedarf im vorliegenden Fall aufgrund der Fensteröffnungsmöglichkeit bereits im direkten Vergleichsfall (M10) relativ gering ist. Netto resul-

[27] Bgzl. dem Unterhaltsbedarf des zwischen der Verglasung liegenden Sonnenschutzes inkl. Motor und Regelung gingen die Meinung der befragten Unternehmen auseinander. Bei einem Defekt an Sonnenschutz oder Motor ist davon auszugehen, dass das gesamte Verglasungselement zu ersetzen ist. Es wurde ein Unterhaltsbedarf von 1% der Investitionskosten pro Jahr angenommen.

tiert kein Elektrizitätseffizienzgewinn, weil der Beleuchtungsbedarf erhöht wird und die Massnahme erhöht zudem den Wärmebedarf deutlich (siehe auch Abbildung 14 zur Energienachfragestruktur). Eine Kostenreduktion wird jedoch erreicht, wenn die Energiedienste Wärme- und Kälteerzeugung (zumindest teilweise) mit der selben Anlage bedient werden (M11.2).

Im Vergleich zu M9 oder M10 lässt sich der Brennstoffbedarf durch die teilweise Substitution der fossilen Heizung mit einer Wärmepumpe weiter markant reduzieren (trotz einer „vorübergehenden" Verschlechterung von gut 30 MJ/m^{2}a wegen des Sonnenschutzfensters in M11.1 bis auf gut 160 MJ/m^{2}a) und dies bei geringeren Nettokosten (inkl. zusätzliche Stromkosten). Der energiewirtschaftliche Preis für diese Substitution ist ein geringer Anstieg des Elektrizitätsbedarfs (rund 20 MJ/m^{2}a, was gut 10% des gesamten Strombedarfs inkl. Geräte entspricht). Der Anstieg wäre allerdings höher ausgefallen ohne die Effizienzmassnahmen im Beleuchtungsbereich. Bzgl. Elektrizitätsbedarf kritisch zu beurteilen sind auch Massnahmen im Bereich des Sonnenschutzes (Verglasungen mit geringem g-Wert, Sonnenschutzeinsatz bei tieferen Schwellenwerten, stärker schliessender Sonnenschutz etc.).

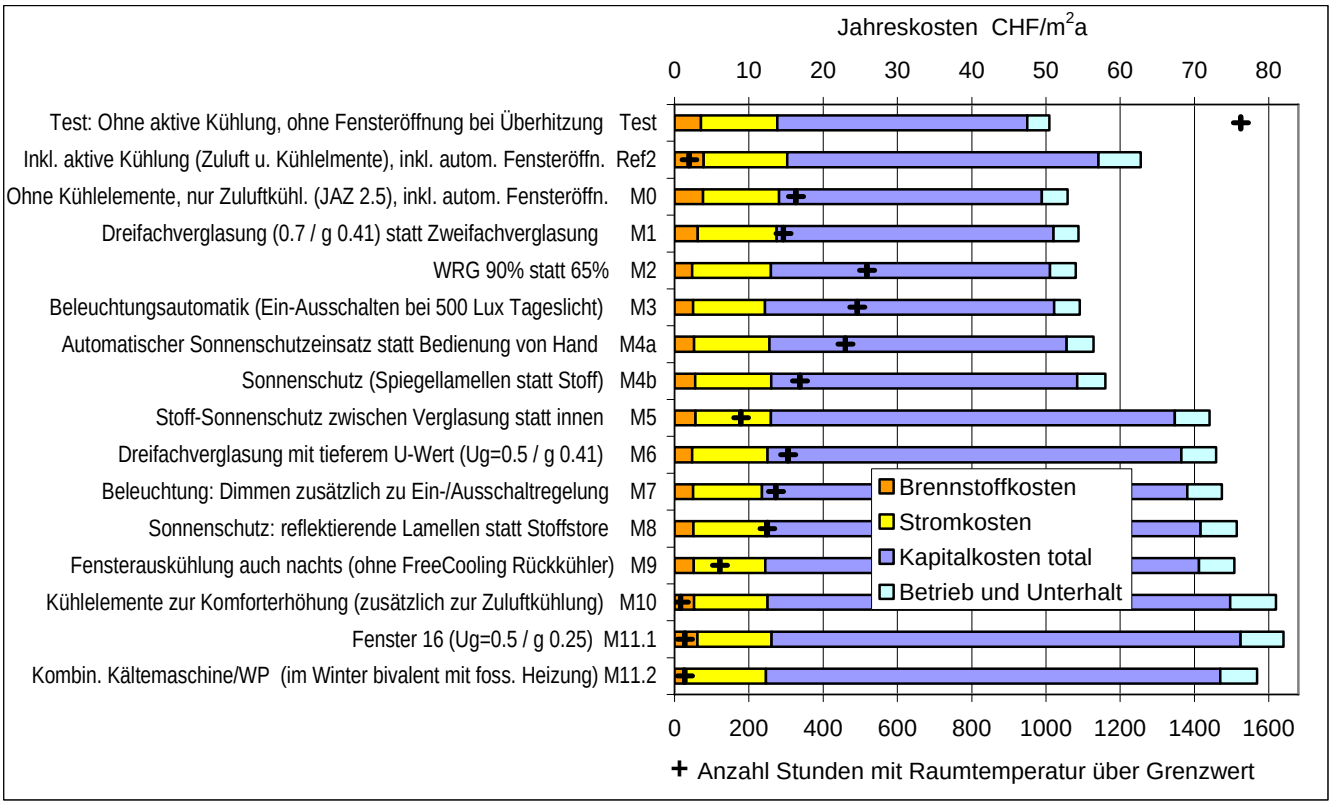


Abbildung 92 **Struktur der Jahreskosten bei Gebäudetyp BN1.1c:** Neubau eines Bürogebäudes, hoher Fensteranteil (80%), inkl. automatische Fensteröffnung bei Überhitzung (ausser Fall Test), Leichtbauweise, hohe interne Lasten, Beleuchtung: 13.5 W/m^2, U-Wert Aussenwand ohne Wärmebrücke 0.29, innerer, von Hand bedienter Sonnenschutz (G8), Lüftung mit WRG 65%, Fenstertyp 2 (U_g=1.1, g=0.52, T_{vis}=0.73, U_f=1.8), Beleuchtung: manuelles Ein-/Ausschalten (bei 800 Lux), Kühlung der Zuluft und Kühlelement (Kühldecke/Umluftkühler)

Fazit zum Fall BN1.1c: Wird davon ausgegangen, dass der Referenzfall nicht nur energetisch den gesetzlichen Anforderungen zu genügen hat, sondern auch bzgl. Komfort, so ist nicht der mit „Test" bezeichnete Fall als Referenz anzusehen, sondern entweder der Fall Ref2 (mit aktiver Kühlung) oder allenfalls auch die Fälle M5 und M9. Im Vergleich dazu lassen sich die Komfortanforderungen auch ohne Kühlelemente erfüllen und es lassen sich Energie-Effizienzgewinne realisieren, das erreichte Energieniveau ist jedoch nicht geringer als in den Fällen mit aktiver Kühlung (BN1.1a und BN1.1b).

Beim Gebäudetyp BN1.2a handelt es sich um dieselbe Ausgangslage wie beim vorangehenden BN1.1, d.h. einem Bürogebäude-Neubau mit hohem Glasanteil, hohen internen Lasten und Gebäudekühlung. Mit der Massnahme M3 wird die Wirkung der architektonischen Massnahme von geringerem Fensterflächenanteil aufgezeigt: Die Jahreskosten reduzieren sich netto um gut 10 CHF/m^{2}a (und kompensieren die Mehrkosten des zwischenliegenden Sonnenschutzes, M2), dies v.a. wegen der geringeren Kapitelkosten (die Kosten einer opaken Fassade als geringer angenommen als diejenigen einer Verglasung mit integriertem Sonnenschutz), aber auch wegen der geringeren Brennstoffkosten (der Heizenergiebedarf reduziert sich markant von gut 190 auf 140 MJ/m^{2}a). In der Summe gehen die Energiekosten nur leicht zurück (um ca. 0.5 CHF/m^{2}a), denn die geringeren Brennstoffkosten werden durch höhere Elektrizitätskosten in etwa kompensiert (die Energiekennzahl Elektrizität erhöht sich beim geringeren Glasanteil um ca. 15 MJ/m^{2}a, dies wegen des höheren Beleuchtungsbedarfs). Die folgenden vier Massnahmen (weitergehende Wärmedämmung, höherer WRG-Wirkungsgrad, verbesserte Beleuchtungsplanung) sind in etwa kostenneutral bis bei Massnahme M7 ein Kostensprung nach unten folgt: mit einem Paradigmawechsel beim Sonnenschutz (aussen statt zwischen den Gläsern angebracht), reduzieren sich die Fensterkosten und auch die Unterhaltskosten des Sonnenschutzes stark.

Die Energie-Effizienzmassnahmen M8 bis M13, die der Reduktion des Beleuchtungs- oder Kühlbedarfs dienen, sind im Wesentlichen kostenneutral (Abbildung 93). Die WP-Heizung führt zusammen mit der verbesserten Fassadenwärmedämmung zu Netto-Mehrkosten von 2 CHF/m^{2}a (in diesem Fallbeispiel wurden keine Synergie-Effekte mit der Kälteerzeugung angenommen, dies im Gegensatz zu BN1.1). Die Mehrkosten der WP wären höher, wenn sie im Referenzfall ohne die übrigen Massnahmen installiert würde, denn im Referenzfall ist der thermische Leistungsbedarf mit rund 330 kW markant höher als bei M13 mit nur noch rund 150 kW. Auch der Kälteleistungsbedarf und die entsprechenden Kapitalkosten reduzieren sich markant zwischen Ref und M13 (von 340 auf 220 kW bzw. um 3 CHF/m^{2}a).

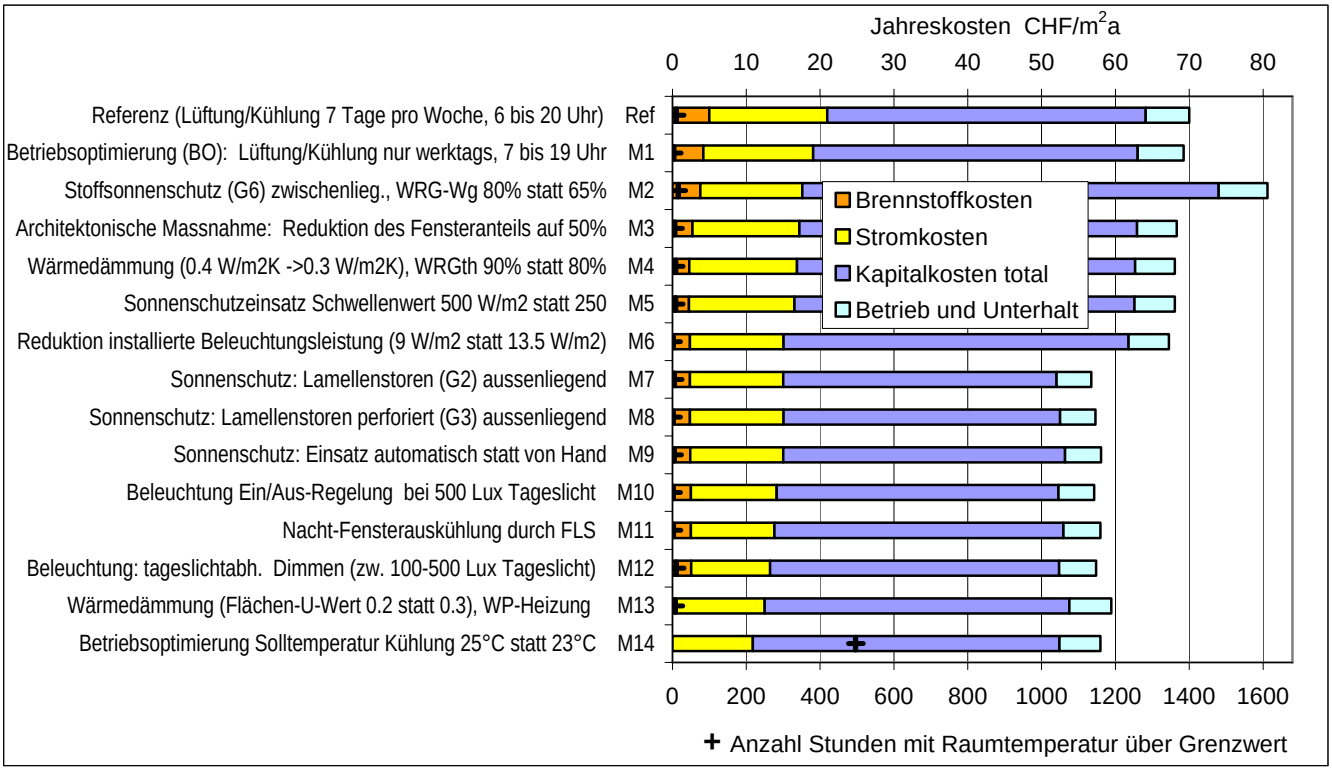


Abbildung 93 Struktur der Jahreskosten bei Gebäudetyp BN1.2a: Neubau eines mittleren Bürohochhauses, EBF 4600 m^2, hoher Fensteranteil (80%), ohne Fensteröffnung bei Überhitzung, Leichtbauweise, U-Wert Aussenwand ohne Wärmebrücke 0.29, hohe interne Lasten, Beleuchtung: 13.5 W/m^2, innerer, von Hand bedienter Sonnenschutz (G8), Lüftung mit WRG 65%, Kühlung der Zuluft und Kühlelemente (Kühldecke oder Umluftkühler), JAZ=2.5, Fenster Typ 2 (U_g=1.1, g=0.52, T_{vis}=0.73, U_f=1.8), Beleuchtung: manuelles Ein-/Ausschalten (bei 800 Lux)

Im Vergleich zur erwähnten Kosteneinsparung durch den Einsatz eines äusseren statt eines zwischenliegenden Sonnenschutzes ist der letzte Kostenanstieg nach oben, der durch den Ersatz der fossilen Heizung durch eine Sonden-WP verursacht wird, als gering zu bezeichnen.

Der Fall BN1.2 zeigt deutlich, wie die Gesamtkosten und auch der Energiebedarf durch architektonische und konzeptionelle Entscheide und durch die Materialwahl (im Fassadenbereich) stark beeinflusst werden können, sowohl im Positiven wie im Negativen. Einige dieser Massnahmen sind eigentliche WinWin-Massnahmen: durch einen äusseren Sonnenschutz reduzieren sich die Kosten der Gebäudehülle (im Vergl. zum zwischenliegenden Sonnenschutz) und es verbessert sich der Überhitzungsschutz.

Auch beim Fall BN2.1a (Abbildung 94) sind zwei Referenzfälle dargestellt, wobei der eine (Ref0) augenfällig tiefere Jahreskosten aufweist, jedoch auch die Komfortanforderungen massiv verletzt. Aus diesem Grund dient Ref0 wiederum nur der Illustration und nur Ref1 kann als Referenzneubauweise betrachtet werden. Diesem liegt eine aktive Kühlung (Zuluft und Umluftkühler) zugrunde. Je einen leichten bis mittleren Kostenanstieg verursachen die Wahl eines Fenster mit verbessertem Rahmen, der Einbau einer Lüftung (Abluftanlage), die Substitution der fossilen Heizanlage durch eine Sonden-WP sowie das Fensterlüftungssystem. Die Abluft-Anlage mit Nachströmöffnung und Abluft-WP dient sowohl der Energieeffizienz wie auch der (lufthygienischen) Komfortverbesserung. Im Vergleich zu Ref1 werden die Energiekosten insgesamt um etwa 2 CHF/m^{2}a reduziert und die Netto-Jahreskosten um ca. 5 CHF/m^{2}a erhöht, dies mit dem Nutzen einer Lüftung und einer Reduktion und Substitution des (fossilen) Brennstoffbedarfs. Stromseitig resultiert eine Netto-Erhöhung um 25 MJ/m^{2}a, u.a. weil die Substitutionseffekte in diesem Fallbeispiel keine weiteren Strom-Effizienzmassnahmen angenommen wurden, um diese zu kompensieren.

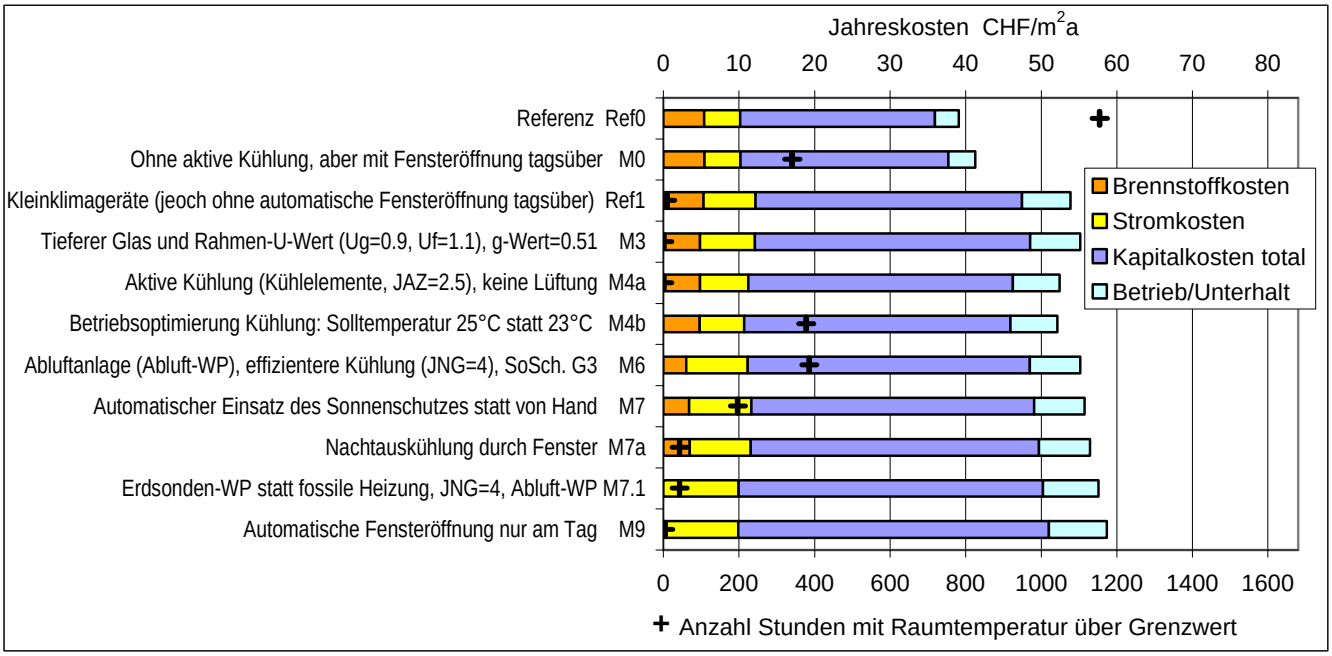


Abbildung 94 **Struktur der Jahreskosten bei Gebäudetyp BN2.1a: Bürogebäude-Neubau, relativ hoher Fensteranteil (50%), Massivbauweise, U-Wert Aussenwand 0.4 bzw. 0.54 W/m^{2}K (ohne bzw. mit Wärmebrücken), geringe interne Lasten,** aussenliegender, von Hand bedienter Sonnenschutz (G4), keine mechanische Lüftungsanlage (Fensterlüftung), keine Kühlung, Metallfassade, ohne Fensteröffnung bei Überhitzung (ausser MO und M7a und folgende), Fenster Typ 2 (U_g=1.1, g=0.52, T_{vis}=0.73, U_f=1.8), Beleuchtung: manuelles Ein-/Ausschalten (bei 800 Lux), 9 W/m^2

Im Unterschied zum obenstehenden Fallbeispiel ist bei BN 2.2a eine vollständige Brennstoff-Substitution bei gleichzeitigem Netto-Elektrizitätseffizienzgewinn möglich und dies bei gleichzeitig geringeren Jahreskosten (Abbildung 95). Dieser Unterschied im Netto-Ergebnis liegt u.a. darin begründet,

dass die Lüftungsanlage kostenmässig bereits im Referenzfall enthalten ist und dass im Fensterbereich Verbesserungen im Verglasungsbereich angenommen wurden, welche kosteneffizienter sind als Verbesserung im Rahmenbereich, wie sie obenstehend im Fall BN2.1a angenommen wurden. Auch die Effizienzmassnahmen bei der Beleuchtung sind knapp über der Wirtschaftlichkeitsgrenze, sie führen zu leicht tieferen Jahreskosten (M3 bis M4). Eine Abluftanlage mit WP führt zu leicht höheren Kosten als eine Lüftungsanlage mit WRG (zumindest dann, wenn für die Lüftungsverteilung keine Kosten für den Raumbedarf veranschlagt werden, wie dies hier der Fall ist), der Unterschied ist allerdings gering. Ingesamt lässt sich beim hier betrachteten Fall BN2.2 der Brennstoffbedarf (von 150 MJ/m^{2}a) gänzlich substituieren und die Energiekennzahl Elektrizität (trotzdem) von 300 auf 180 MJ/m^{2}a reduzieren.

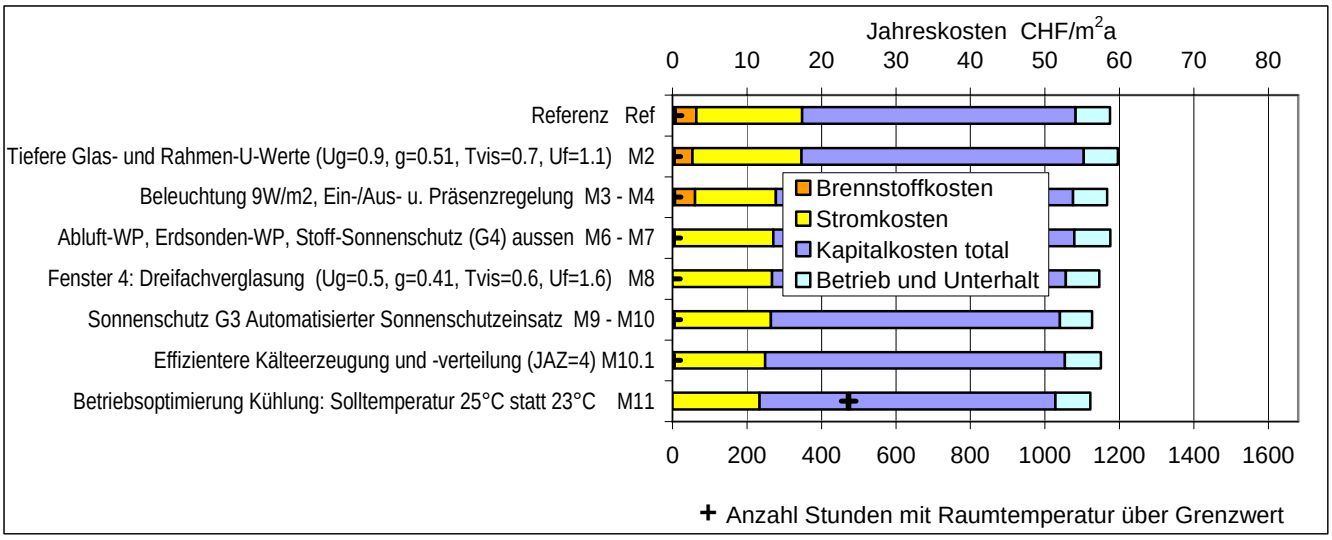


Abbildung 95 **Struktur der Jahreskosten bei Gebäudetyp BN2.2a: Bürogebäude mit relativ hohem Fensteranteil (50%) und Metallfassade, ohne Fensteröffnung bei Überhitzung, Massivbauweise, U-Wert Aussenwand 0.4 bzw. 0.54 W/m²K (ohne bzw. mit Wärmebrücken), hohe interne Lasten, aussenliegender, von Hand bedienter Sonnenschutz (G2), mechanische Lüftung mit WRG 65%, Kühlung der Zuluft und Kühlelemente (JAZ=2.5, Solltemperatur=25°C), Fenstertyp 2 (U_g=1.1, g=0.52, T_{vis}=0.73), Beleuchtung: manuelles Ein-/Ausschalten (bei 800 Lux), 13.5 W/m²**

Beim Fall BN2.3 beträgt die Energiekennzahl Wärme im Referenzfall rund 260 MJ/m^{2}a. Mit moderaten Massnahmen an der Gebäudehülle (verbesserte Wärmedämmung, Fenster mit tieferen U-Werten) lässt sich diese um 50 MJ/m^{2}a reduzieren und zwar bei konstanten Jahreskosten (M1 bis M4, Abbildung 96). Eine weitere Reduktion um etwa 70 MJ/m^{2}a wird durch den Einbau einer Lüftungsanlage mit WRG erreicht (M5), wobei hierbei die Jahreskosten ansteigen würden (die geringeren Brennstoffkosten werden durch höhere Stromkosten mehr oder weniger kompensiert[28], so dass für die Amortisation der Kapitalkosten bei weitem nicht „genügend übrig bleibt"), wenn nicht gleichzeitig auf die Kleinklimageräte verzichtet würde. Allerdings werden die Komfortanforderungen mit einer alleinigen Zuluftkühlung nicht eingehalten, weshalb bei M6 auch von einer hydraulischen Kälteverteilung und Kühlelenenten in den Räumen ausgegangen wurde, was wiederum zu einem Kostenanstieg führt. Einen Netto-Kostenanstieg verursachen auch Verbesserungen im Fensterrahmenbereich und das ein automatische Fensterlüftungssystem.

Indirekt führt auch ein höherer Schwellenwert für den Einsatz des Sonnenschutzes zu einem Kostenanstieg (M14.2) und zwar wegen des deutlich höheren Kälteleistungsbedarfs (42 kW_{th} statt 30 kW_{th}).

[28] Dies ist durch zwei Faktoren begründet: zum einen hat die WRG zwar einen Wirkungsgrad von 90%, aber die Wärmeenergiebedarfsreduktion beträgt wesentlich weniger, weil der Luftwechsel der Lüftungsanlage markant höher ist als der Luftwechsel durch die Fensterlüftung, zum anderen ist der Strompreis rund zweieinhalb mal so hoch wie der Brennstoffpreis.

Ein über das ganze Jahr höherer Schwellenwert (Sonnenschutzeinsatz erst ab 500 W/m^2 statt bereits ab 250 W/m^2) ist also nicht aus energetischen Gründen oder aus Energiekostengründen problematisch (netto verändert sich der Elektrizitätsbedarf kaum, da sich höherer Kühlenergiebedarf und geringerer Beleuchtungsbedarf in etwa kompensieren, dies bei einer tageslichtbasierten Regelung und der Heizenergiebedarf geht gar um 20 MJ/m^{2}a zurück), sondern wegen der höheren kälteseitigen Kapitalkosten. Daraus lässt sich ableiten, dass der Schwellenwert für den Sonnenschutzeinsatz jahreszeitlich variabel festzulegen ist: ein tiefer Wert während der Hochsommerperiode, welche den maximalen Kälteleistungsbedarf bestimmt, ermöglicht Kapitalkosteneinsparungen und ein höherer Wert während der übrigen Perioden reduziert den Energiebedarf für Beleuchtung und Raumwärme und – für die Gebäudenutzenden möglicherweise am wichtigsten – erhöht den Bezug zu aussen.

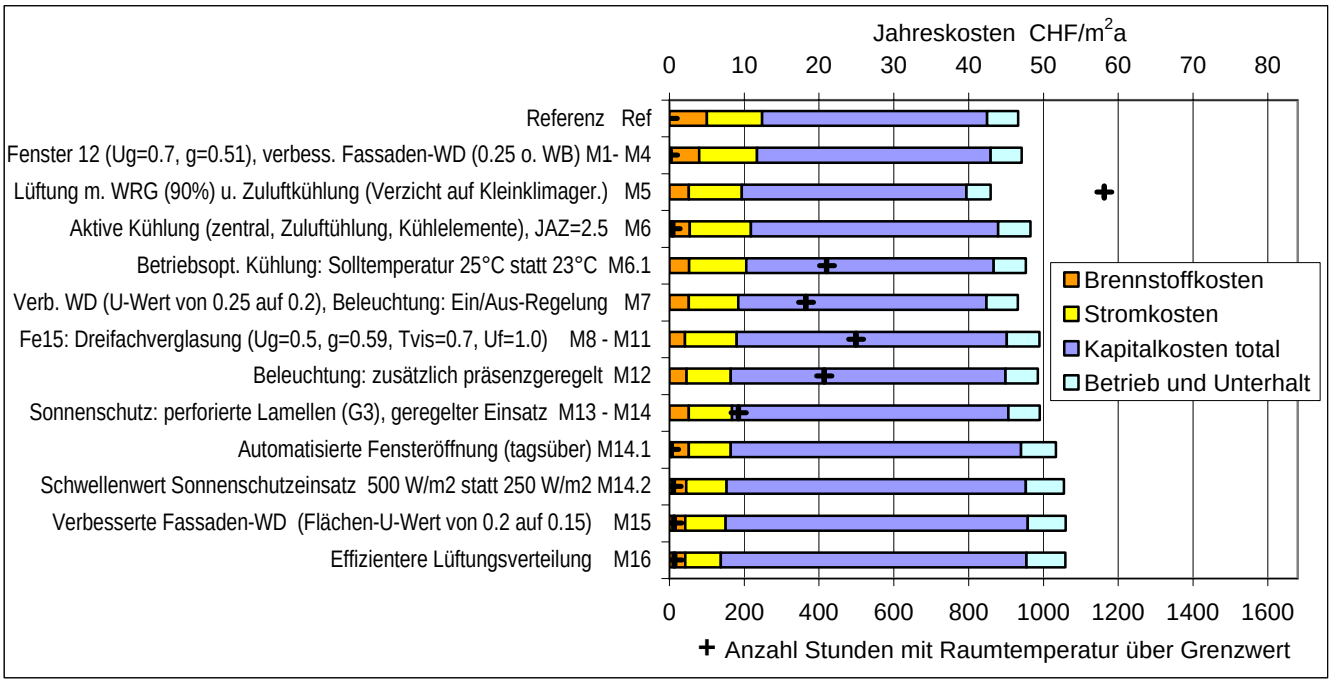


Abbildung 96 **Struktur der Jahreskosten bei Gebäudetyp BN2.3a: Bürogebäude-Neubau mit relativ geringem Fensteranteil (35%), ohne Fensterlüftung bei Überhitzung, Massivbauweise, U-Wert Aussenwand 0.4 bzw. 0.54 W/m2K (ohne bzw. mit Wärmebrücken), geringe interne Lasten,** von Hand bedienter Lamellen-Sonnenschutz aussen (G2), keine mechanische Lüftung (Fensterlüftung), Kleinklimageräte (JAZ=1.6), Fenster Typ 2 (Ug=1.1, g=0.52, Tvis=0.73, Uf=1.8), Beleuchtung: manuelles Ein-/Ausschalten (bei 800 Lux), 9 W/m2

Fazit: Mit geeigneten ausgleichenden technischen und betrieblichen Massnahmen lässt sich der Zielkonflikt zwischen Energieeffizienz und Komfort weitgehend kompensieren und es kann gleichzeitig eine hohe Brennstoff- und eine hohe Elektrizitätseffizienz sowie ein hohes Komfortniveau (siehe auch Abbildung 19, S. 110 und Abbildung 28, S. 122), dies bei vergleichsweise geringen Jahreskosten. Die Jahreskosten werden dabei weniger vom Energie-Effizienzlevel als vielmehr vom angestrebten Komfortlevel bestimmt. Die Fälle mit geringer EKZ Elektrizität weisen sogar eher geringere Jahreskosten auf als diejenigen mit mittlerer und hoher Elektrizitäts-EKZ (Abbildung 97) und zwar bei beiden unterschiedenen Komfortlevels (weniger bzw. mehr als 200 h mit im Vergleich zur Anforderung erhöhter Raumtemperatur). Bei gegebener Elektrizitäts-EKZ und bei gegebenem Komfort-Niveau ist der Verlauf der Jahreskosten als Funktion geringerer Brennstoff-EKZ als mehr oder weniger konstant zu bezeichnen, d.h. entsprechende Massnahmen sind - im Gebäudekontext – rentabel (bei 3% Realzinssatz, 7 Rp/kWh Brennstoffpreis, 17 Rp/kWh Elektrizitätspreis.).

In Abbildung 181 und Abbildung 183 im Anhang sind Jahreskosten, die Energiekennzahl Elektrizität und die Anzahl Überhitzungsstunden als Funktion der Brennstoff-EKZ in der Übersicht dargestellt.

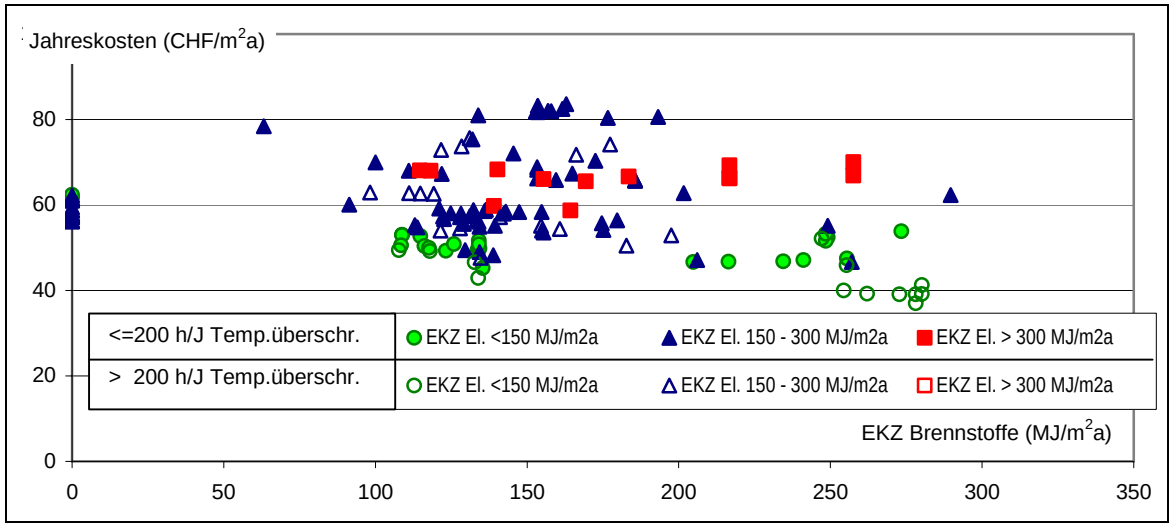


Abbildung 97 Jahreskosten als Funktion der EKZ Brennstoffe für verschiedene EKZ Elektrizität und Komfortlevels (gemessen als Anzahl Stunden mit erhöhten Temperaturen in Südräumen)

6.2 Erneuerung des Gebäudebestandes

Als Vergleichsbasis der Erneuerungsmassnahmen und -pakete wird unterschieden zwischen:

- Ist-Zustand und seine laufenden Energie- und allenfalls Unterhaltskosten

- Gebäude- und Gebäudetechnikerneuerungen im Erneuerungszyklus. Hierbei dient nach Bauteil- , Gebäudetechnik und Anlagetyp ein gleich bleibender energetischer Zustand und/oder eine Erneuerung mit energetischer Verbesserungen als Vergleichsbasis, was im folgenden fallweise gekennzeichnet wird.

In Abbildung 182 und Abbildung 184 im Anhang sind Jahreskosten, die Energiekennzahl Elektrizität und die Anzahl Überhitzungsstunden als Funktion der Brennstoff-EKZ in der Übersicht dargestellt.

Als erstes Fallbeispiel im Gebäudebestand wird die Erneuerung eines Bürogebäudes der jüngsten Bauperiode betrachtet (Baujahr nach Mitte der 1970er-Jahre, BB4). In der ersten Variante BB41 wird davon ausgegangen, dass sich die (Metall-)Fassade noch in gutem bautechnischem Zustand befindet und noch nicht erneuerungsbedürftig ist. Der Referenzfall und die Energieeffizienz- und Erneuerungsmassnahmen konzentrieren sich deshalb auf die übrige Gebäudehülle (Fenster, Sonnenschutz) sowie auf die Gebäudetechnik.

Bezüglich der Gebäudehülle wird im Ist-Zustand davon ausgegangen, dass bei den vorhandenen Metallfenstern Unterhaltsarbeiten notwendig werden. Der Unterhalt von Metallfenstern ist allerdings meistens nur mit geringen Kosten verbunden, da es sich um langlebige und dauerhafte Produkte handelt (20 CHF/m^2). Andererseits weisen Metallfenster aus dieser Periode häufig eine energetisch unbefriedigende Qualität auf, so dass ein Ersatz zu prüfen ist. Bezüglich Gebäudetechnik wird im Referenzfall „Ref“ von einer Erneuerung der Lüftungs- und Kühlanlagen ausgegangen, wobei jedoch keine konzeptionellen Änderungen und energetischen Verbesserungen angenommen werden. Insbesondere wurden die selben Lufterneuerungsraten und die selben Jahresarbeitszahlen angenommen. Entsprechend unterscheiden sich der Ist-Zustand und der Referenzfall Ref v.a. in den Kapitalkosten (vgl. Abbildung 98), wobei dieser Unterschied mit 16 CHF/m^{2}a als markant zu bezeichnen ist.

Ein Ersatz von Metallfenstern in einer Metallfassade wird mit über 800 CHF/$m^2_{Fenster}$ veranschlagt (inkl. Gerüst, Demontage/Entsorgung, Montage und allen Nebenarbeiten, vgl. Abbildung 36, S.146). Selbst wenn die tatsächlichen Mehrkosten mit nur 650 CHF/m^2 eingerechnet werden, führt dies zu Nettojahreskosten von rund 8 CHF/m^2_{EBF}a, siehe Abbildung 98, M1. Ein Fensterersatz aus rein energetischen Gründen ist also im Vergleich zu den Unterhaltsarbeiten in diesem Beispiel nicht wirtschaftlich (im Gegensatz zu Holzfenstern, wo der Unterhalt wesentlich kostspieliger sein kann und der Ersatz wesentlich kostengünstiger, da die Einbausituationen häufig einfacher sind, siehe z.B. Fall BB1 weiter unten).

Die Lüftungsanlage umfasst bei diesem Gebäudetyp einen beachtlichen Anteil des Energiebedarfs und zwar sowohl beim Heizenergiebedarf (260 von 640 MJ/m^2a, d.h. 40%) wie beim Elektrizitätsbedarf (160 von 410 MJ/m^2a, d.h. 40%, bzw. 50%, wenn der Bedarf für die Zuluftkühlung mit dazu gezählt wird), dies aufgrund der hohen Luftwechselraten und Druckverluste sowie der geringen Wirkungsgrade und den nicht abgestimmten Betriebweisen. Entsprechend wichtig sind Massnahmen in diesem Bereich. Mit Betriebsoptimierungsmassnahmen (BO) lässt sich bei Gebäuden dieser Bauperiode der Energiebedarf häufig mit einer Nettokostenreduktion verbinden, d.h. die Kosten der BO-Massnahmen werden durch geringere Energiekosten mehr als kompensiert (M2 im Vergleich zu M1). Wird bei der Erneuerung der WRG-Anlage ein höherer Wirkungsgrad gewählt, führt dies ebenfalls nicht zu Mehrkosten, falls eine hocheffiziente Anlage (80% bis 90% thermischer Wirkungsgrad) eingesetzt wird (eine Ersatz mit einer Anlage mit 65% Wirkungsgrad wäre sowohl energetisch wie kostenmässig suboptimal wie der Vergleich zwischen M3 und M4 zeigt). Diese Aussagen gelten, falls die neue WRG-Anlage gleich dimensioniert wird wie die alte. Wird im Rahmen der Erneuerung jedoch auch der Luftwechsel an den lufthygienischen Bedarf angepasst (d.h. markant verringert), kann eine Anlage mit geringerer Kapazität verwendet werden, was zu weiteren markanten Kapitelkosteneinsparungen führt (M7), selbst wenn gewisse Anpassungsarbeiten miteingerechnet werden (30% der WRG-Kosten).

Die markante Reduktion der Luftwechselrate hat jedoch zur Folge, dass ein deutliches Überhitzungsproblem entsteht (die Zuluft wird sowohl im Referenzfall wie nach der Lüftungserneuerung gekühlt, denn die Kälteleistung ist bei den an der lufthygienischen Bedarf angepassten Luftwechselrate von 4 (m^3/h)/m^2 zu gering (M7)). Diese Verschlechterung kann durch eine Beleuchtungserneuerung und ein automatisiertes Fensterlüftungssystem (M7.1) oder Vorrichtungen mit ähnlicher Funktion, z.B. geregelte Nachströmöffnungen, teilweise kompensiert werden (M5). Falls dies im Einzelfall nicht möglich ist, kann zur kompletten Kompensation der Komfortverschlechterung ein besserer Sonnenschutz inkl. geregeltem Einsatz und eine hydraulische Kälteverteilung mit Umluftkühlern oder Kühldecken eingebaut werden (zusätzlich zur bereits vorhandenen Zuluftkühlung). Damit ergeben sich Mehrkosten im Vergleich zu M7, die Jahreskosten sind netto jedoch trotzdem geringer als im Vergleich vor der Anpassung der Luftwechselraten (M9 im Vergleich zu M6 oder zu mit M1). Die weiteren Energie-Effizienzmassnahmen wie die effizientere Kälteerzeugung und -verteilung oder die Kühlenergiebedarfsreduktion (M9.1 bis M10), die Verwendung von Fenstern mit tieferen U-Werten (M12 und M13), führen ausgehend von M9 zu einem leichten Nettokostenanstieg.

Interaktion der Kosten und Paketbildung: Bei diesen Berechnungen wurde berücksichtigt, dass die Massnahmen an der Gebäudehülle und bei der Gebäudetechnik einen geringeren Leistungsbedarf nach sich ziehen und dass deshalb bei der Erneuerung der entsprechenden Erzeugungsanlagen (Wärme- und Kälteerzeugung) Kosteneinsparungen möglich werden, wenn die entsprechenden Massnahmen als Paket durchgeführt oder wenn die erzeugenden Anlagen zeitlich nach den bedarfsmindernden Massnahmen durchgeführt werden. Der Heizleistungsbedarf nimmt beispielsweise von gut 1000 kW auf gut 300 kW ab, also um rund 70% (Überdimensionierungen bei der alten Anlage sind hierbei nicht eingerechnet). Wird die Heizung nach oder gleichzeitig mit den hier betrachteten Massnahmen ergriffen, kann eine Investitionskostenreduktion von über 20 CHF/m^2_{EBF} (ca. 50% der Anlagekosten) bzw. eine Reduktion der Kapital- und Unterhaltskosten 2.5 CHF/m^2a realisiert werden. Werden die Massnahmen nicht als Paket durchgeführt, sind diese Beträge über die verschiedenen Massnahmenschritte verteilt zu addieren, so dass die Kosten der letzten Massnahme entsprechend um diese Beträge höher liegen. Auch der gesamte Kälteleistungsbedarf nimmt markant ab (dies trotz der zusätzlichen Installation von Kühldecken), nämlich von 660 $kW_{Kälte}$ auf 270 $kW_{Kälte}$, was einer Reduktion

von 60% entspricht. Damit verbunden ist eine Investitionskostenreduktion von rund 50 CHF/m^2_{EBF} und eine Reduktion der Kapital- und Unterhaltskosten von gut 5 CHF/m^2a. Hat die neue Anlage einen höheren Auslegungs-COP, lässt sich die elektrische Leistung relativ gesehen noch weiter reduzieren.

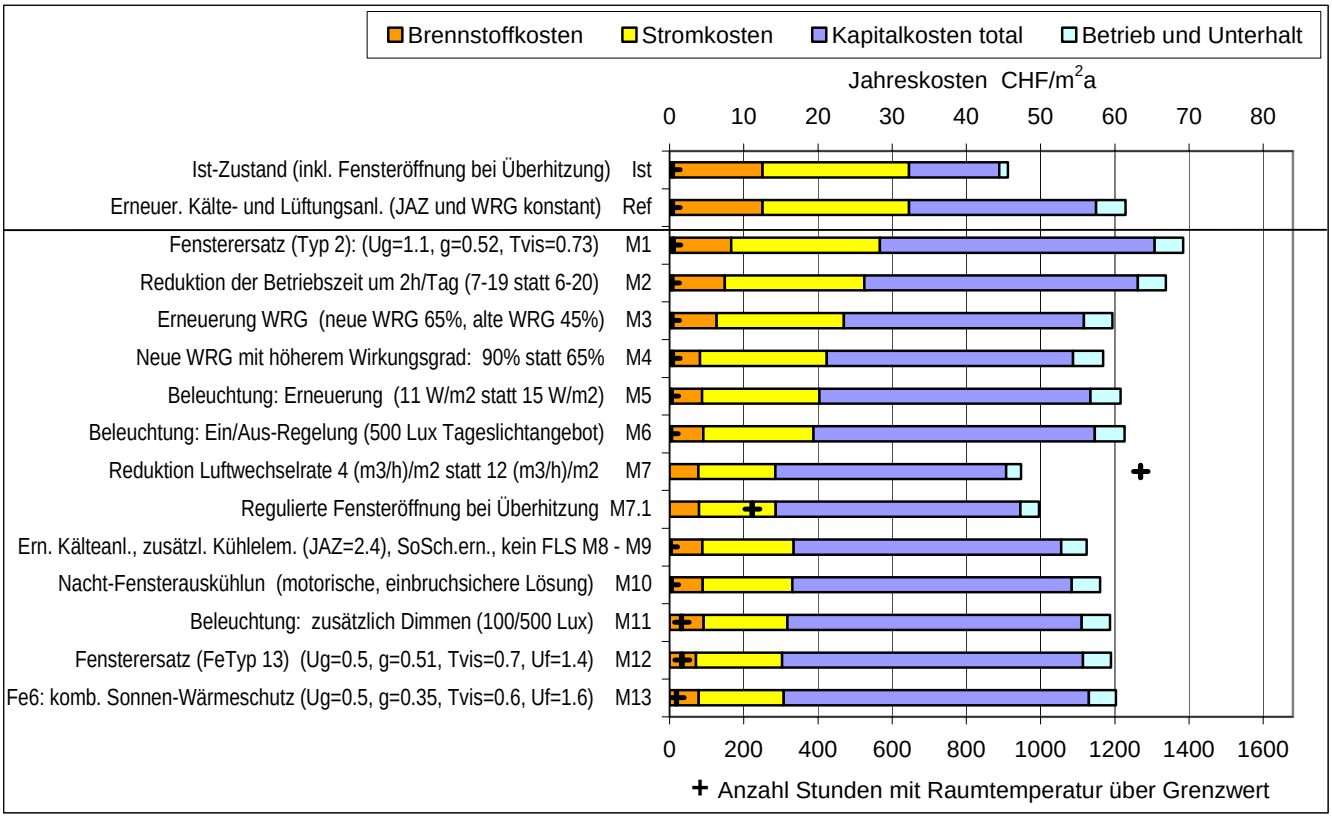


Abbildung 98 **Struktur der Jahreskosten bei Gebäudetyp BB4.1a: Bestehendes Bürogebäude der Bauperiode ab 1976, 8600 m², rel. hoher Fensteranteil (50%), ohne Fensteröffnung bei Überhitzung (ausser M7.1 und M10 folgende), Leichtbauweise, U-Wert Aussenwand 1.3 W/m²K (ohne WB), hohe interne Lasten**, Deckenleuchten (abgehängte Decke), Beleuchtung: 15W/m², mechanische Lüftung (hoher Luftwechsel: 12 m³/h/m²) mit WRG (45%), Kühlung der Zuluft, von Hand bedienter Lamellen-Sonnenschutz aussen (S2), Metallfassade, Fenster Typ 1 (U_g=2.2, g=0.7, T_{vis}=0.8, U_f=1.8)

Fazit zum Fallbeispiel BB4.1 (Abbildung 98): Insgesamt wird mit dem Massnahmenbündel ein hoher Energieeffizienzgewinn erzielt, nämlich eine Heizenergiebedarfsreduktion um 440 MJ/m^2a (-70 %) und gleichzeitig eine Elektrizitätsbedarfsreduktion von 180 MJ/m^2a (-42 %). Insgesamt ist im Vergleich zum Ist-Zustand mit Netto-Jahreskosten von gut 15 CHF/m^2a zu rechnen, wobei diese Kosten im Wesentlichen der Lüftungserneuerung, dem Fensterersatz und der zusätzlichen Kühlung zuzuordnen sind. Diese Kosten schaffen allerdings auch entsprechende Neuwerte, denn der entsprechende Anlagezustand wird von „alt" auf „neu" gebracht. Bei der letztgenannten Massnahme handelt es sich um eigentliche Komfortmassnahmen und auch beim Fensterersatz kann von einer Komfortverbesserung ausgegangen werden, insbesondere bei fensternahen Arbeitsplätzen. Im Vergleich zum Referenzfall ist netto eine leichte Reduktion der Jahreskosten von rund 2 CHF/m^2a zu verzeichnen.

Beim **Fallbeispiel BB4.2** wird angenommen, dass im Referenzfall „Ref" die bestehenden Kälte- und (fossile) Wärmeerzeugungsanlagen zu erneuern sind. Die entsprechenden Investitionskosten schlagen mit 160 CHF/m^2 und die Kapitalkosten mit rund 10 CHF/m^2a zu Buche (Abbildung 99), wobei jedoch nicht von einer energetischen Verbesserung ausgegangen wird (JAZ=2.0). Aufgrund des nach wie vor hohen Luftwechsels bestehen aufgrund der Zuluftkühlung keine Überhitzungsprobleme. Dem Referenzfall wurden zudem Instandsetzungskosten im Bereich Fenster und Sonnenschutz von rund 130 CHF/$m^2_{Bauteil}$ zugrunde gelegt.

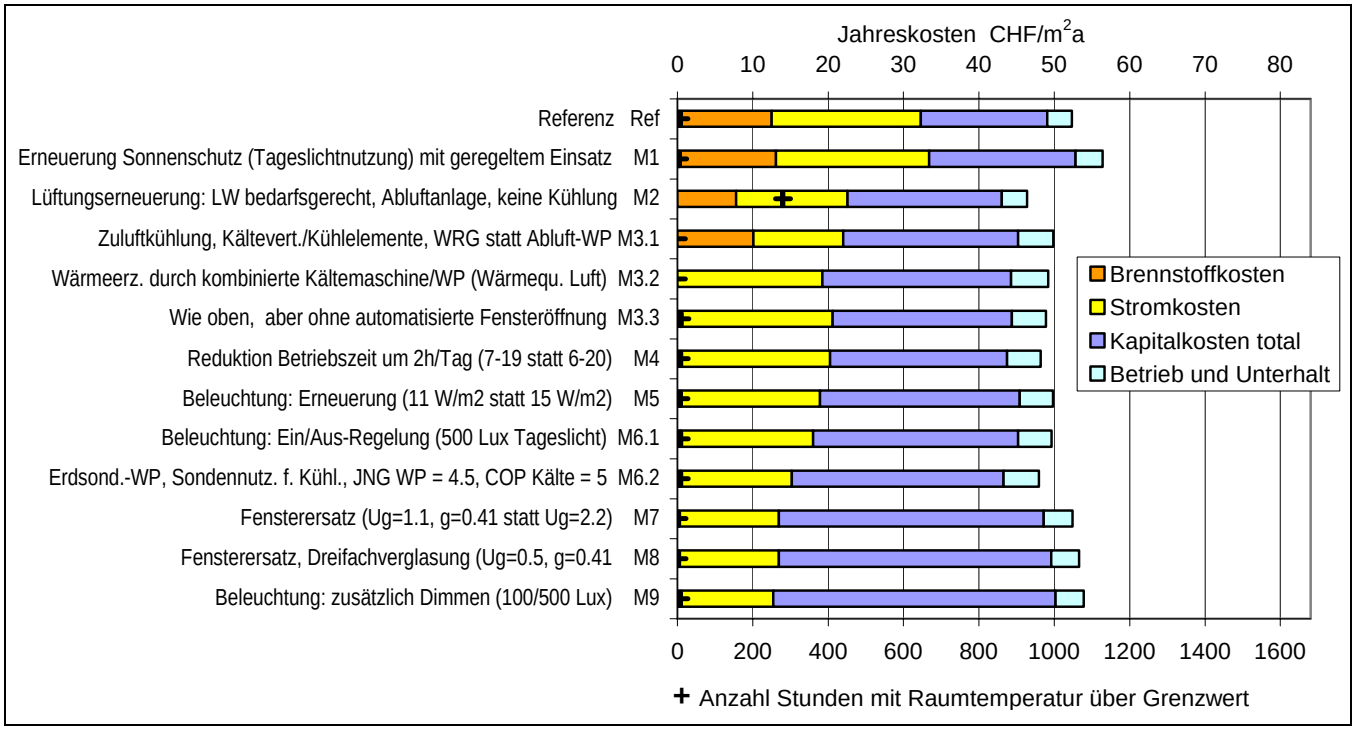


Abbildung 99 **Struktur der Jahreskosten bei Gebäudetyp BB4.2a: Bürogebäude der Bauperiode 1976-2000, 8600 m², relativ hoher Fensteranteil (50%), ohne Fensteröffnung / Brüstungsgerät bei Überhitzung (ausser M2 bis M3.2) Leichtbauweise, U-Wert Aussenwand ohne WB 1.3 W/m²K, hohe interne Lasten,** Deckenleuchten (abgehängte Decke), Beleuchtung: 15W/m², mechanische Lüftung (hoher Luftwechsel) mit WRG (45%), Kühlung der Zuluft, von Hand bedienter Lamellen-Sonnenschutz aussen (S2), Metallfassade, Fenstertyp 1 (U_g=2.2, g=0.7, T_{vis}=0.8, U_f=1.8)

Die Massnahme M2 umfasst die Erneuerung der (ineffizienten) Lüftungsanlage, wobei diese durch eine Abluft-Anlage ersetzt wird. Dadurch können die alten Zuluftkanäle abgebrochen werden und der entsprechende Raum kann teilweise für grössere Abluftkanäle genutzt werden. Ergänzend wird der Einbau von Nachströmöffnungen in der Fassade notwendig. Bei Massnahme M2 wird zudem – der Illustration halber – auf eine Kühlung verzichtet[29]. Als Folge davon kann ein markanter Rückgang auch bei den Kapitalkosten verzeichnet werden. Es ist jedoch auch eine Komfortverschlechterung in Kauf zu nehmen. Zum Vergleich wird in M3.1 die Luftverteilung komplett erneuert sowie eine „klassische" Lüftung mit WRG verwendet. Zudem wird die Zuluft gekühlt und es wird eine hydraulische Kälteverteilung installiert, was zu Netto-Mehrkosten von rund 3 CHF/m²a führt (was als Preis für die Komfortverbesserung angesehen werden kann).

Wird die Kälteerzeugung mit der Wärmeerzeugung kombiniert (nur eine Anlage als Kältemaschine und Wärmepumpe) kann der Brennstoffbedarf komplett ersetzt werden und dies zu unmerklich höheren Jahreskosten (M3.2). Mit guter Planung und Konzeption (z.B. Free Cooling über Erdsonden) und entsprechend höheren JAZ Netto können sogar netto Minderkosten erzielt werden (M6.2). Die komplette Beleuchtungserneuerung (M5) führt, im Vergleich zum laufenden Unterhalt, zu Netto-Mehrkosten von rund 2 CHF/m²a (der Mehrwert der neuen Beleuchtung als solche ist nicht bewertet). Die Mehrkosten der Beleuchtungsregulierung können hingegen durch die erzielten Strominderkosten mehr oder weniger kompensiert werden (M6). Deutlichere Mehrkosten als bei der Beleuchtungserneuerung sind beim Fensterersatz zu verzeichnen, denn im vorliegenden Fall wird angenommen, dass der Fensterersatz bei Metallfenstern im Fall einer Metallfassade relativ kostspielig ist (650 CHF/m² inkl. Anpassungsarbeiten und Entsorgung, siehe M7).

[29] Das Kombi-Brüstungsgerät mit WRG inkl. integrierte Zuluft- und Umluftkühlung wird bei BB2 behandelt.

Beim Gebäudetyp BB3.1a wird im Referenzfall von einer Instandsetzung der Fenster (80 CHF/m^2), der Fassade (35 CHF/m^2) und der Beleuchtung (25 CHF/m^2) ausgegangen, jeweils ohne energetische Verbesserung. Der Ist-Zustand ist zudem durch eine alte Lüftungsanlage ohne WRG mit hohen Druckverlusten und hohem Luftwechsel (doppelt so hoch wie lufthygienisch erforderlich, d.h. 8 (m^3/h)/m^2) gekennzeichnet.

Eine markante Energie- und Kostenreduktion kann entsprechend im Bereich Lüftungsanlagen erzielt werden (Abbildung 100, M1-M4). Obwohl die hier dargestellte Ausgangslage (hohe Luftwechselrate, hohe Druckverluste, keine WRG, 24-Stunden-Betrieb) in dieser Prägnanz nicht mehr (häufig) anzutreffen ist, zeigt der Fall doch exemplarisch auf, wie effektiv BO- und Erneuerungs-Massnahmen im Lüftungsbereich sein können. Eine Reduktion der Luftwechselraten und/oder der Betriebszeiten der Lüftung wirkt auf zwei Ebenen: zum einen wird die elektrischen Energie für die Luftförderung reduziert und zum anderen der Bedarf für die Erwärmung bzw. für die Kühlung der Aussenluft. Der Fall zeigt aber auch, dass die Reduktion der Luftwechselraten, der Einbau einer WRG und die Erhöhung der Zulufttemperatur zu Überhitzungsproblemen führen kann (M5). Dies kann jedoch durch weitere Massnahmen kompensiert werden, in diesem Fall durch Beleuchtungsmassnahmen, welche an der Wirtschaftlichkeitsgrenze befinden (M6 bis M8) und gleichzeitig die Komfortsituation stark zu verbessern vermögen (von beinahe 400 h/Jahr mit Temperatur-Grenzwertüberschreitung auf unter 50 h/Jahr).

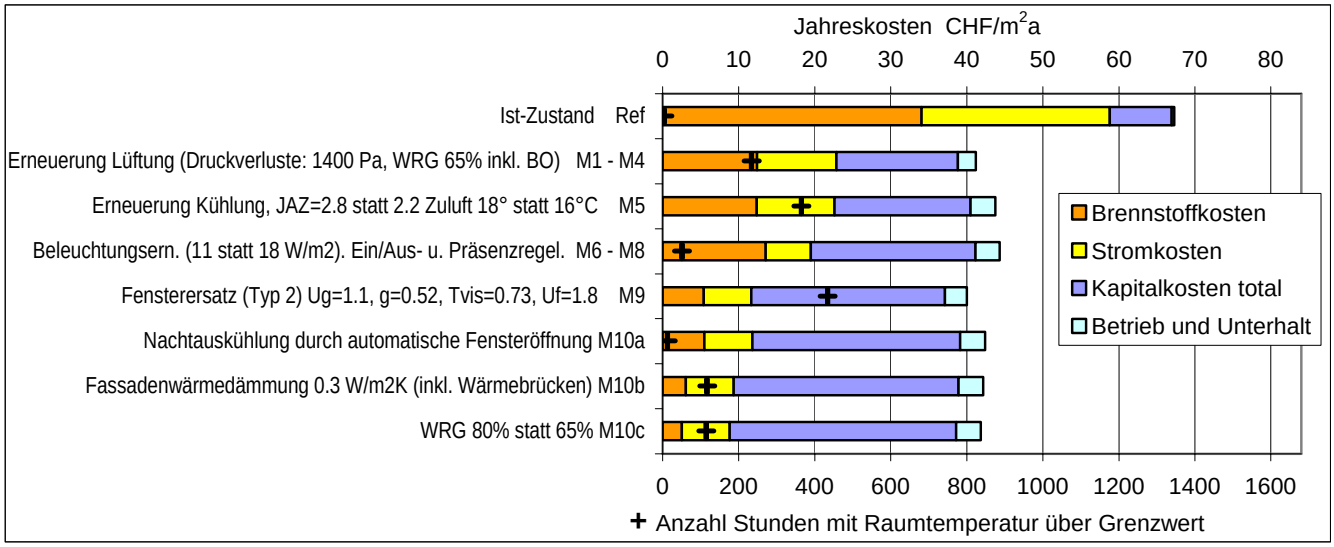


Abbildung 100 Struktur der Jahreskosten bei Gebäudetyp BB3.1a: Bestehendes Bürogebäude der Bauperiode 1960-1975, 2900 m^2, eher tiefer Fensteranteil (35%), ohne Fensteröffnung / Brüstungsgerät bei Überhitzung, Massivbauweise, U-Wert Aussenwand 1.1 W/m^{2}K (Werte ohne Wärmebrücken), geringe interne Lasten, Beleuchtung: 18 W/m^2, Deckenanbauleuchten, alte mechanische Lüftung ohne WRG mit hohen Druckverlusten (2300 Pa), Kühlung der Zuluft, Luftwechsel doppelt so hoch wie lufthygienisch erforderlich, 24h/Tag, von Hand bedienter Lamellen-Sonnenschutz aussen (G1), Mauerwerk, Fenster Typ 0 (U_g=3.0, g=0.75, T_{vis}=0.82, U_f=2.2)

Der Fensterersatz ist – im Vergleich zur hier angenommenen Instandhaltung mit Kosten von 80 CHF/m^2 – als wirtschaftlich zu bezeichnen (M9). Die Mehrkosten eines Fensters mit speziell hohem g-Wert (höher im Vergleich zum Standardwert, der bei gegebenem U-Wert üblich ist) lassen sich knapp nicht amortisieren (M12). Die Fensternachtauskühlung führt im vorliegenden Beispiel zwar zu einer Komfortverbesserung, aber auch zu einer Erhöhung des Brennstoffbedarfs und des Elektrizitätsbedarfs, so dass gezwungenerweise Netto-Mehrkosten verbleiben, den zu den Investitionskosten addieren sich die Energiemehrkosten (2-3 CHF/m^{2}a). Die abschliessende Fassadenwärmedämmung kann zu konstanten Jahreskosten realisiert werden, denn Wärmedämmungen sind bei einfachen Mauerwerks- oder Betonfassaden im Vergleich zur angenommenen Instandsetzung wirtschaftlich. Dies gilt

bei einem Energiepreis von 5 bis 6 Rp/kWh für heute übliche Dämmstärken (12 cm, U = 0.25-0.3) zu einem gewissen Mass auch darüber hinaus (hier wurden 7 Rp/kWh angenommen).

Das Fallbeispiel BB3 zeigt zwei Phänomene deutlich auf: im Gebäudebestand können der Wärme- und der Stromenergiebedarf parallel zu einer Reduktion der gesamten Jahreskosten massiv reduziert werden. Die Komfortsituation verschlechtert sich bei einigen Massnahmen, was aber durch kompensatorische und mehr oder weniger kostenneutrale Massnahmen kompensiert werden kann.

Im Gegensatz zum vorangehenden Gebäudetyp wird beim nachfolgenden Gebäudetyp BB3.2a von einem einfachen Bürogebäude ohne Lüftung und Kühlung ausgegangen. Trotz geringer interner Lasten ist der Referenzfall durch eine beträchtliche Anzahl Stunden mit Überhitzung gekennzeichnet (vgl. Abbildung 101). Im Referenzfall wird zum einen von einer Heizanlagenerneuerung und zum anderen von einer Beleuchtungserneuerung ausgegangen, und zwar von einer solchen ohne energetische Verbesserung. Diese Annahme ist nicht unplausibel, wie Erfahrungen der Stadt Zürich zeigten. Bei einem Teil der ausgewerteten Beleuchtungserneuerungen im Schulgebäudebereich war die installierte Beleuchtungsleistung nach der Erneuerung sogar höher als in der Ausgangslage.

Mittels Beleuchtungserneuerung können der Elektrizitätsbedarf und die damit verbundenen internen Wärmelasten deutlich reduziert werden, was mit einer spürbaren Komfortverbesserung verbunden ist (Paket M6-M8) und zu geringeren Jahreskosten von rund 3 CHF/m^{2}a führt (bei veranschlagten Mehr-Investitionskosten von 45 CHF/m^2; im Vergleich zu laufenden Energiekosten oder von Instandsetzungsmassnahmen mit geringer Eingriffstiefe und geringen Kosten würden geringe Nettomehrkosten von <1-2 CHF/m^{2}a resultieren). Ein Fensterersatz reduziert zwar den Brennstoffbedarf, den Wärmeleistungsbedarf und netto die Jahreskosten (u.a. wegen geringerer Kapitalkosten bei der Heizungserneuerung in der Höhe von 2 CHF/m^{2}a), macht die erwähnte Komfortverbesserung jedoch wieder zunichte (M9), es sei denn, der Fensterersatz wird durch ein geregeltes Fensterlüftungssystem (M10) und eine Sonnenschutzerneuerung (M11) ergänzt. Weitergehende Gebäudehüllenwärmeschutzmassnahmen reduzieren zwar den Brennstoffbedarf weiter (zu relativ geringen Mehrkosten), erhöhen aber wiederum die Überhitzung (M12 bis M15). Um dies zu kompensieren, wären weitere Massnahmen notwendig, z.B. geregelte Fensterlüftung o.ä. auch tagsüber.

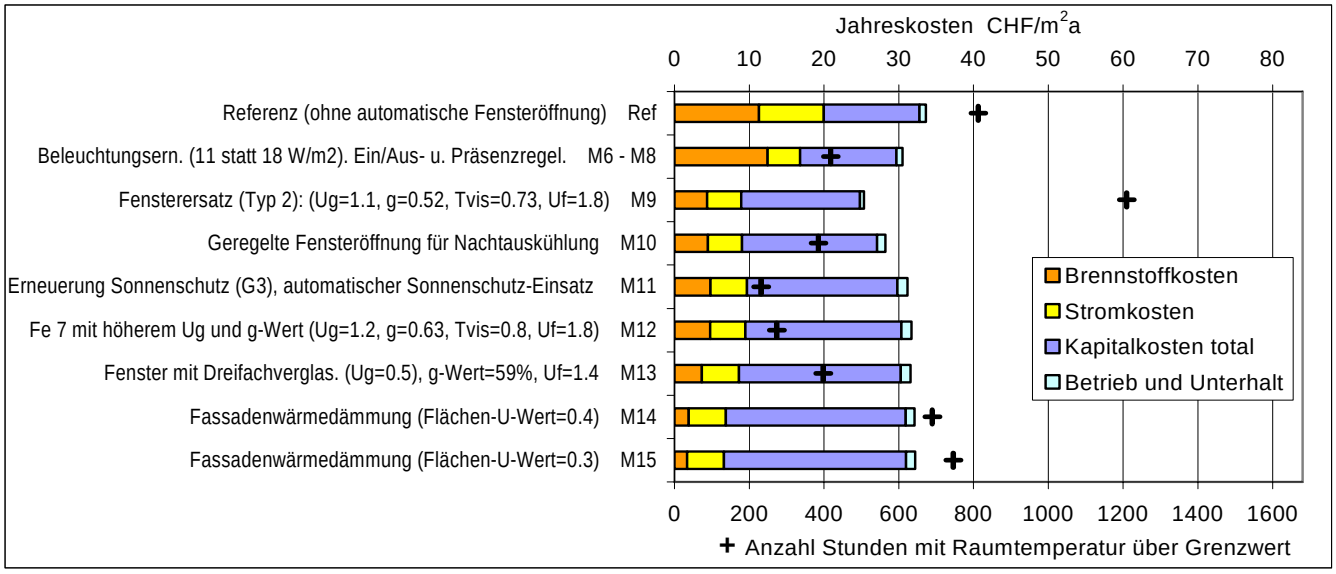


Abbildung 101 Struktur der Jahreskosten bei Gebäudetyp BB3.2a: Bürogebäude der Bauperiode 1947-1975, 2900 m^2, eher tiefer Fensteranteil (35%), alte Fenster (hohe Lüftungsverluste durch Undichtigkeit), ohne Fensteröffnung bei Überhitzung, Massivbauweise, U-Wert Aussenwand 1.1 W/m^{2}K (Wert ohne Wärmebrücken), geringe interne Lasten durch Geräte und Personen, Beleuchtung: 18 W/m^2, Deckenanbauleuchten, ohne mechanische Lüftung, von Hand bedienter Lamellen-Sonnenschutz aussen (G1), Fenster Typ 0 (U_g=3.0, g=0.75, T_{vis}=0.82, U_f=2.2)

Bei dem nachfolgend betrachteten Fallbeispiel BB2 (bestehendes Bürogebäude mit geringen internen Lasten und geringem Glasanteil) ist der Kühlenergiebedarf trotz der Verwendung von Kleinklimageräten relativ gering (22 MJ/m2a). Entsprechend ist auch die theoretisch erzielbare Energiekostenreduktion bei Überhitzungsschutzmassnahmen gering und als Folge führen die entsprechenden Massnahmen zu Netto-Mehrkosten (Abbildung 102).

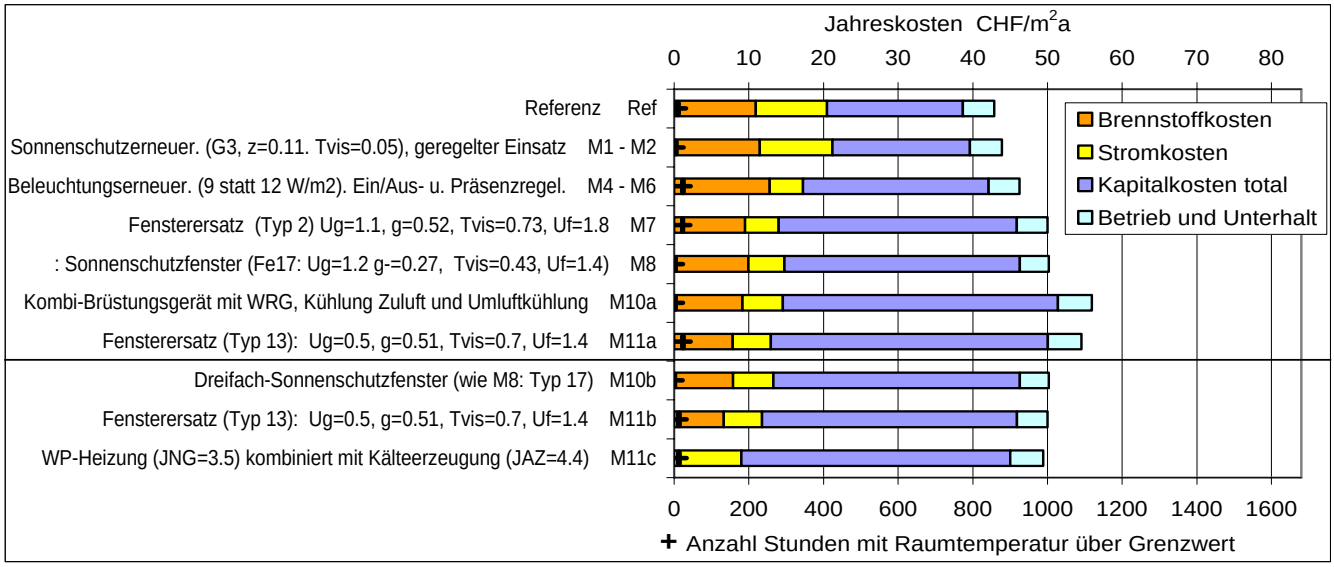


Abbildung 102 **Struktur der Jahreskosten bei Gebäudetyp BB2a: Bestehendes Bürogebäude der Bauperiode 1947-1975, 1150 m², eher geringer Fensteranteil (35%), ohne Fensteröffnung / Brüstungsgerät bei Überhitzung, Leichtbau, U-Wert Aussenwand 1.5 W/m²K (Werte ohne Wärmebrücken): Fassade energetisch zwar suboptimal, aber sonst noch funktional), geringe interne Lasten, Beleuchtung (15 W/m²), Sonnenschutz aussen (Flachlamelle, G1), Kleinklimageräte, Solltemperatur 23°C, Fenster Typ 1 (U_g=2.2, g=0.7, T_{vis}=0.8, U_f=1.8)**

Ist die Beleuchtung nicht ohnehin zu erneuern (dies wurde hier angenommen), ist ein Ersatz der Deckenbeleuchtung durch Stehleuchten nicht wirtschaftlich. Der Energieeffizienzgewinn der Elektrizitätsbedarfsreduktion ist jedoch durchaus beachtenswert. Der Fensterersatz (M7) führt zwar zu einer Heizwärmebedarfsreduktion, ist in diesem Beispiel aber nicht wirtschaftlich (bei 80 CHF/m² Instandhaltungskosten im Referenzfall, jedoch 600 CHF/m² Fensterersatzkosten), dies im Gegensatz zum vorangehenden Fall BB3.1a, M9 (Abbildung 100). Das darauf folgende Sonnenschutzfenster mit besserem Rahmen-U-Wert erhöht sowohl Wärmebedarf (wegen geringeren Solarenergiegewinnen) wie Strombedarf (wegen höherem Beleuchtungsbedarf).

Das Fallbeispiel BB1 kommt bzgl. Architektur und Konstruktionsart einem Wohngebäude relativ nah. Allerdings sind hierbei hohe interne Lasten durch Geräte und Personen sowie durch die Beleuchtung angenommen. Dies führt dazu, dass im Referenzfall trotz einem relativ geringen Fensterflächenanteil eine massives Überhitzungsproblem zu verzeichnen ist; selbst bei automatischer Fensteröffnung bei Überhitzung wird der Grenzwert für die Raumtemperatur noch während 600 h/Jahr überschritten. Beim Referenzfall wird im folgenden zwischen relativ undichten (BB1.1) und relativ dichten Fenstern (BB1.2 und BB1.3 im Anhang, BB1.4) unterschieden. Die Fallbeispiele BB1.1 bis BB1.3 enthalten die automatisierte Fensteröffnung bei Überhitzung.,

Im Referenzfall wird in den Fällen BB1.1 bis BB1.4 von einer Fassadeninstandsetzung mit Kosten von 35 CHF/m², von einer Fensterinstandsetzung mit Kosten von 100 CHF/m² und von einer energetisch nicht wirksamen Beleuchtungsinstandsetzung mit Kosten von 80 CHF/m² ausgegangen.

Sowohl eine Standard-Fassadenwärmedämmung (0.35 W/m²K) wie auch die weitergehende WD (Reduktion um weitere 0.1 W/m²K) reduzieren die Jahreskosten geringfügig (vgl. Abbildung 103, M1 bis

M3a). Der Fensterersatz mit einem Wärmeschutzglas (Ug=1.2 W/m²K) und relativ hohem g-Wert (63%) führt bei der Ausgangslage der undichten Fenster zu einem Nettokostenanstieg (vgl. M4 mit M3a). Der Wärmebedarf wird durch diese Massnahmen markant reduziert, dies zum Preis einer weiteren Verschärfung des Überhitzungsproblems. Dies kann durch die Beleuchtungserneuerung (über-) kompensiert werden und zwar verbunden mit einer Kostenreduktion von 3-4 CHF/m²a (M5-M8).

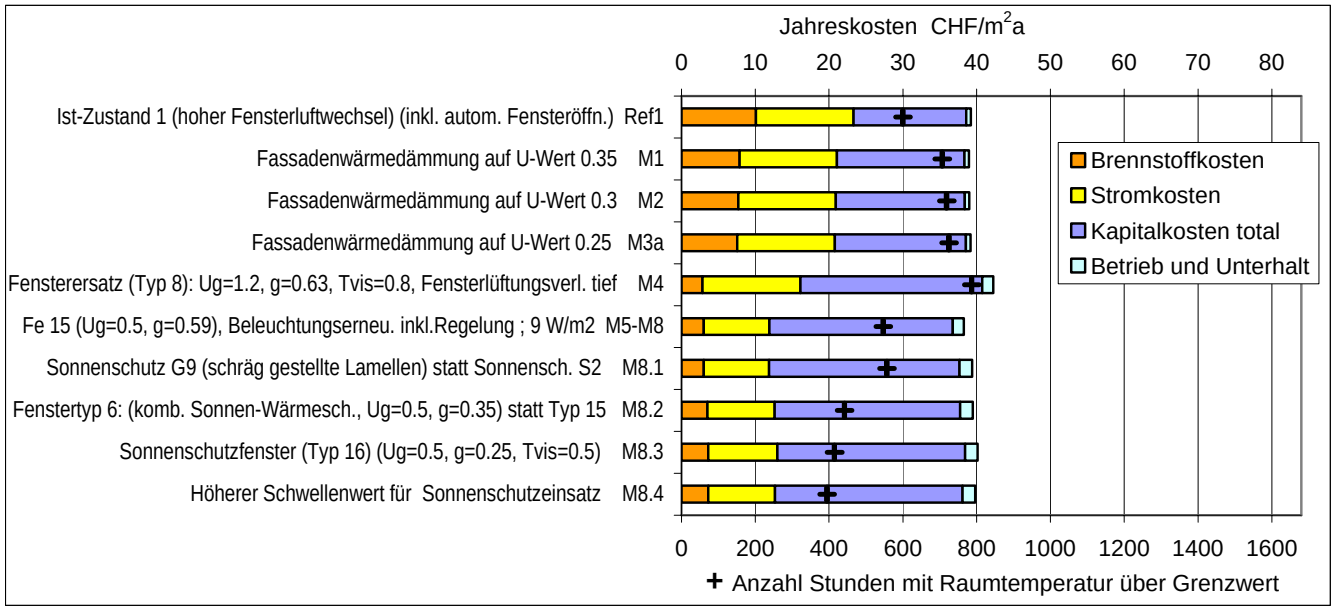


Abbildung 103 **Struktur der Jahreskosten bei Gebäudetyp BB1.1: Bestehendes Bürogebäude der Bauperiode vor 1947, 860 m², hohe interne Lasten, geringer Fensteranteil (25%), Massivbau, U-Wert Aussenwand 1.1 W/m²K** (Wert ohne Wärmebrücken), Beleuchtung: 18 W/m², Lochfenster Typ 0 (U_g=3.0, g=0.75, T_{vis}=0.82, U_f=2.2), Lüftungsverluste durch bestehende Fenster hoch, Fensteröffnung bei Überhitzung, Sonnenschutz: alter Rollladen aussen (S2); keine Kühlung.

Elektrizitätsseitig führen Massnahmen an der Beleuchtung zu einer Reduktion der Energiekennzahl Elektrizität um rund 90 MJ/m²a (von 280 auf 190 MJ/m²a). Im Vergleich zu Unterhalts- und Instandhaltungskosten von 20 CHF/m² führen die Investitionskosten der Beleuchtungserneuerung von 100 CHF/m² zu geringen Netto-Mehrkosten von 0.5 CHF/m²a. Auf der Nutzenseite ermöglicht die Beleuchtungserneuerung jedoch eine spürbare Verbesserung der Komfortsituation; die Anzahl der unkomfortablen Stunden reduziert sich in etwa um einen Drittel. Eine weitere substanzielle Reduktion des gesamten Elektrizitätsbedarfs könnte über Massnahmen bei den übrigen internen Lasten (Geräte, Computer, Bildschirme, Printer etc.) erreicht werden, denn diese schlagen mit immerhin 120 MJ/m²a zu Buche und entsprechend wirken sich relative Verbesserungen absolut gesehen stark aus.

Fazit zu BB1.1: Zu konstanten Jahreskosten kann brennstoffseitig ein Energieeffizienzgewinn von 330 MJ/m²a (-64%) und elektrizitätsseitig ein solcher von 90 MJ/m²a (-32%) und eine spürbare Komfortverbesserung erreicht werden, wobei anzufügen ist, dass die betrachteten Massnahmen nicht ausreichend sind und weitere Massnahmen für die Einhaltung der Anforderungen durchzuführen wären.

Auch im Fall BB1.4 lassen sich Fassadenwärmedämmung, Fensterersatz und Beleuchtungserneuerung im Vergleich zu den angenommenen Instandsetzungskosten mit konstanten bzw. sogar leicht geringeren Jahreskosten realisieren (Abbildung 104, bis und mit M8.3). Allerdings ist trotz der Verwendung von sonnenschutzverglasten Fenstern (g=0.25) und Sonnenschutz mit verbesserter Tageslichtnutzung die Überhitzungssituation als ungenügend zu beurteilen (wie im Ist-Zustand, nachdem sie zwischendurch sogar noch schlechter ist, siehe M3b bis M8). Wird eine (optimale) Fensteröffnung bei Überhitzung angenommen, kann das Komfortniveau auf ein mehr oder weniger akzeptierbares Niveau ver-

bessert werden (M8.4, rund 200 h/Jahr) und bei geregelter Fensteröffnung auch während der Nacht können die Komfortanforderungen vollständig erfüllt werden (zu Netto-Kosten von 1 bis 2 CHF/m²a).

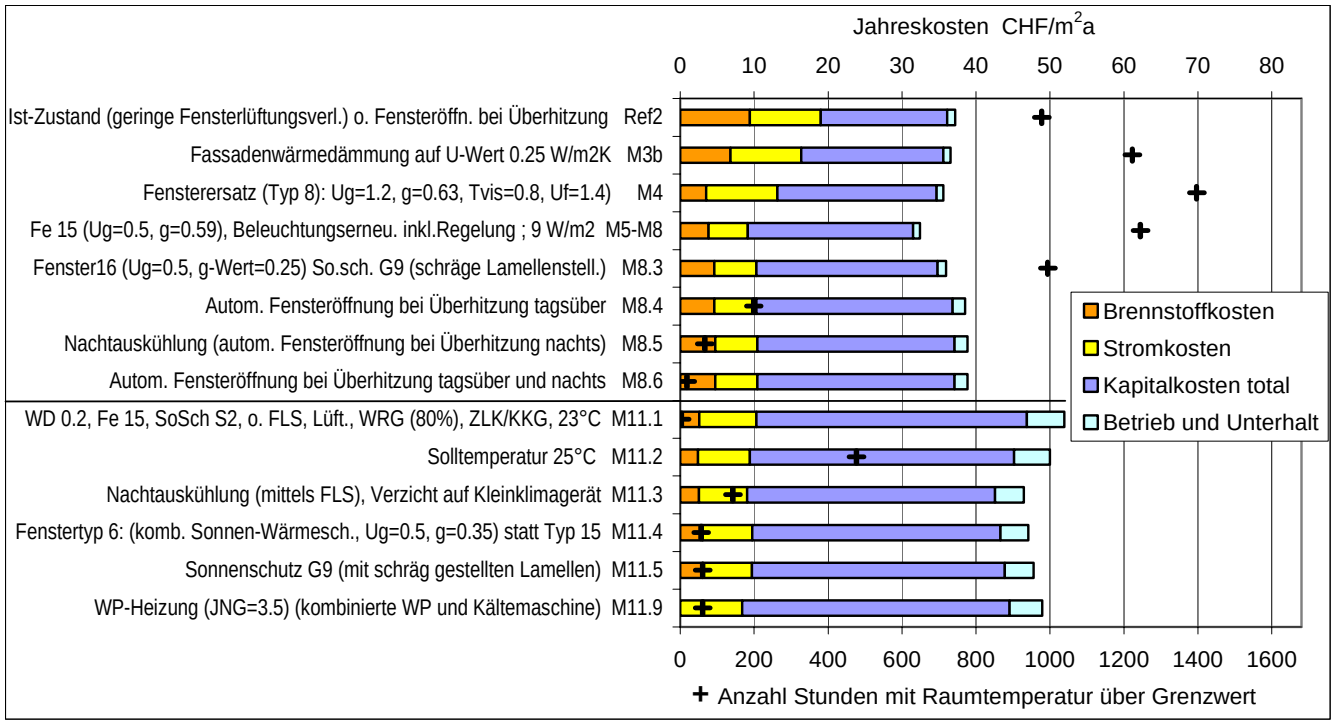


Abbildung 104 **Struktur der Jahreskosten bei Gebäudetyp BB1.4: Bestehendes Bürogebäude der Bauperiode vor 1947, 860 m², geringer Fensteranteil (25%), Massivbau, U-Wert Aussenwand 1.1 W/m²K** (Wert ohne Wärmebrücken), geringe interne Lasten, Beleuchtung: 18 W/m², Lochfenster Typ 0 (U_g=3.0, g=0.75, T_{vis}=0.82, U_f=2.2), Lüftungsverluste durch Fenster tief, keine Fensteröffnung bei Überhitzung, Sonnenschutz: alter Rollladen aussen (S2), „manueller" Einsatz; keine Kühlung; Fassade: verputztes Mauerwerk (U=1.1) energetisch zwar suboptimal, aber sonst noch funktional

Ist dies im konkreten Einzelfall nicht möglich oder wenn aus Komfortgründen Kleinklimageräte und eine Lüftung mit WRG eingebaut werden, ist mit wesentlich höheren Mehrkosten zu rechnen, wie die Alternativvariante M11.1 (diese Variante mit Lüftung und Kühlung kann auch als neuer Referenzfall betrachtet werden), nämlich mit 13 CHF/m²a im Vergleich zu M8.6. Wird bei der Kühlung eine weniger tiefe Solltemperatur gewählt (25°C statt 23°C), können davon ausgehend netto Jahreskosten eingespart werden und zwar sowohl wegen des geringeren Elektrizitätsbedarf als auch wegen des geringeren Leistungsbedarfs (insgesamt ca. 2 CHF/m²a)[30]. Mittels Fenster-Nachtauskühlung (und Zuluftkühlung) können die Komfortanforderungen auch ohne Kleinklimageräte (oder andere Kühlelemente) eingehalten werden (M11.3), was eine weitere Kostenreduktion ermöglicht.

Fazit: zur Gebäudeerneuerung: die Energie-Effizienzmassnahmen im eigentlichen Sinn sind mehr oder weniger kostenneutral oder mit nur geringen Netto-Mehrkosten zu realisieren. Der thermische Komfort verbessert sich dabei markant während der kalten, nicht sonnigen Jahreszeit, verschlechtert sich jedoch deutlich während sonniger Perioden im Sommer auch während der Übergangszeit aufgrund von zunehmender Überhitzung (Wärmedämmungen, Fenster). Umgekehrt lässt sich der thermische Komfort mit der Reduktion der internen Lasten, insbesondere durch Beleuchtungserneuerungen, stark verbessern. Lufthygienische oder eigentliche thermische Komfortmassnahmen in engeren Sinn (automatisierte Fensteröffnung, Kühlanlage) oder kombinierte Energie- und Komfortmassnahmen (Lüftungen mit WRG mit Zuluftkühlung) führen zu wesentlich markanteren Kostenerhöhungen.

[30] Bei der dargestellten Anzahl Stunden handelt es sich betragsmässig um nur geringe Überschreitungen (<1°C)

6.3 Fazit

Die wichtigsten Fazits und die daraus ableitbaren Grundsätze sind in den folgende Tabellen aufgeführt.

Planungs- und Investitionsregel
- Wärmedämmungen und Wärmeschutzfenster sind zentrale Elemente für energie-effiziente Gebäude. Die entsprechenden Massnahmen sind entweder rentabel oder mit nur geringen Mehrkosten verbunden (bei Dämmstärken bis ca. 20 cm bzw. U-Werten ≤0.2 W/m^{2}K).
- Solargewinnfenster (Wärmeschutzfenster mit höherem g-Wert im Vergleich zum marktüblichen Standard beim jeweiligem Glas-U-Wert) sind im Bürobereich nicht ratsam, denn sie erhöhen den sommerlichen Diskomfort oder erhöhten den Kühlenergiebedarf, reduzieren den Heizwärmebedarf jedoch nur geringfügig.
- Sonnenschutzfenster (mit ausgesprochen tiefem g-Wert) verbessern zwar den sommerlichen Komfort, erhöhen jedoch den Wärmebedarf (bei gleichem Sonnenschutzeinsatzregime). Bei Gebäuden ohne Kühlung, geringem Kühlbedarf oder mit sehr effizienter Kühlung erhöht sich auch der Netto-Strombedarf (Zunahme Beleuchtungsbedarf wegen geringerer Lichttransmission ist grösser als Reduktion Kühlelektrizität). Bei Gebäuden mit ineffizienter Kühlung (JAZ<2) reduziert sich der Netto-Strombedarf.
- Energie-effiziente Beleuchtungen und Beleuchtungsregelungen sind zentrale Elemente für energie-effiziente und thermisch komfortable Gebäude. Die entsprechenden Massnahmen sind entweder rentabel oder mit nur geringen Mehrkosten verbunden.
- Je höher die (nicht weiter verminderbaren) internen Wärmelasten, desto notwendiger wird der Einsatz einer aktiven Kühlung, um in warmen und heissen Perioden das erforderliche Komfort-Niveau halten zu können. Aktive Kühlung ist im Vergleich zu keiner aktiven Kühlung mit Mehrkosten verbunden.
- Die aktive Kühlung sollte möglichst effizient ausgelegt werden. Zentral ist diesbezüglich ein geringer Temperaturhub zwischen Kühlwasser und Rückkühlung, d.h. eine dynamische Arbeitsweise von Kälteanlage und -verteilung (siehe Wellig et al 2006). Zu nutzen sind die Potenziale der „freien Kälte" (Aussenluft, Verdunstung, Erdsonden)
- Bei stark schliessendem Sonnenschutz besteht auch bei gekühlten Gebäuden die Gefahr, dass ein Netto-Strommehrbedarf entsteht, weil der geringere Kühlenergiebedarf (aufgrund der geringeren externen Lasten) durch den induzierten Mehrbedarf für Beleuchtung übertroffen wird, zumal die Abwärme in warmen Perioden über Klimatisierung abgeführt werden müsste.
- Der Einbau einer Lüftungsanlage aus rein energetischen Gründen ist kritisch zu beurteilen. Dank der Wärmerückgewinnung (oder der Abluft-WP) kann zwar beim Heizwärmebedarf ein Effizienzgewinn erzielt werden, aber selbst bei Auslegung auf das lufthygienische Minimum ist der Luftwechsel meistens höher als bei der Fensterlüftung, was den Effizienzgewinn reduziert. Zudem erreichen nur Anlagen, die bzgl. Elektrizitätsbedarf sehr gut ausgelegt werden, ein befriedigendes Brennstoffsubstitutionsverhältnis. In jedem Fall entstehen relativ hohe Grenzkosten, wenn die Lüftungsanlage aus rein energetischen Gründen installiert wird.
- Bei vorhandenen oder aus lufthygienischer Sicht erforderlichen Lüftungsanlagen (z.B. auch an lärmbelasteten Lagen) ist auf möglichst tiefe Druckverluste (ein direktes Mass für den Elektrizitätsbedarf für die Luftförderung) und hocheffiziente Ventilatoren zu achten, damit das Substitutions-Verhältnis Strom zu Wärme möglichst günstig ausfällt. Eine Möglichkeit für ersteres bietet das Konzept Abluft-WP und Nachströmöffnung/Brüstungsgerät.
- Eine automatisierte Fensteröffnung oder Brüstungsgeräte mit Nachströmöffnungen ermöglichen deutliche Komfortverbesserungen. Denn abgesehen von wenigen Spitzentagen ist die Aussenluft während eines Grossteils der Tage mit Kühlbedarf kühler als die Raumtemperatur (bei hohem Glasanteil besteht an einzelnen Tagen bereits im Januar ein Kühlbedarf und auch bei mittlerem oder geringem Glasanteil beschränkt sich die Kühlsaison nicht auf die eigentlichen Sommermonate). Die Massnahme ist mit Jahreskosten von ca. 10 CHF/m^{2}a verbunden.
- WRG-Anlagen mit hohem Wirkungsgrad (über 85%) bedingen zwar (geringfügig) höhere Investitionskosten, welche sich jedoch über geringere Brennstoffkosten amortisieren lassen.
- WP sind bei guter Gebäudehülle und Niedertemp.-Wärmeverteilung eine gute technische Lösung, um Brennstoffe zu substituieren. Im unteren Leistungsbereich sind die Jahreskosten geringer als bei fossilen Heizanlagen

Tabelle 89 Planungs- und Investitionsregeln, gültig für Neubau und Gebäudebestand

Fallunterscheidung	Planungs- und Investitionsregel
Allgemein	- Eine dichte Personenbelegung und eine damit verbundene hohe Gerätedichte führen zu hohen internen Lasten. Ohne aktive Kühlung (Kühldecken, Umluftkühler, TABS oder Zuluftkühlung) lassen sich die Anforderungen bzgl. Überhitzungsschutz (weniger als 100 h/Jahr erhöhte Temperaturen) in Südräumen nicht vollständig einhalten, selbst bei Gebäuden mit geringen Glasanteilen und selbst bei energie-effizienter Beleuchtung. - Mit sehr effizienter Beleuchtung, sehr gutem Sonnenschutz, automatischer Fensteröffnung bzw. Brüstungsgeräte (inkl. Nachtauskühlung) und Dreifachverglasung lässt sich auch bei hohen Glasanteilen und hoher Belegungsdichte mit einer reinen Zuluftkühlung ein einigermassen komfortabler Zustand zu erreichen. - Bei geringen internen Lasten (Personen, Geräte, Beleuchtung) kann eine passive Kühlung über Fenster und/oder Nachströmöffnungen ausreichen (geregelt, inkl. Nachtauskühlung). - Architektur: Tiefe Räume führen zu einem erhöhten Bedarf an Kunstlicht. Zu empfehlen ist ein Verhältnis Fenster- zu Bodenfläche zwischen 20% und 30%. Bei Werten über 30% kann der Kunstlichtbedarf kaum mehr verringert werden, bei Werten unter 20% ist mit einer raschen Zunahme zu rechnen (Bsp. 15% statt 20%: knapp 1600 Volllaststunden statt 1100 Volllaststunden bei 10 Stunden Nutzung pro Tag), siehe auch (SIA 2003). Zu hohe Glasanteile führen zudem tendenziell zu stark variierenden thermischen Lasten, was entweder zu Komfortzuständen ausserhalb der Anforderungen oder zu hohen Investitionskosten bei der Kühlanlage führt. Verglaste Flächen sind zudem vielfach teurer als (einfache) opake Fassaden. - Wärmeschutz an der Gebäudehülle: Der Wärmeschutz an der Gebäudehülle ist auch bei Gebäuden mit hohen internen Lasten ein wichtiges Element der Energieeffizienz. Bei relativ hohen Glasanteilen, wie sie im Neubau üblich sind, kommt v.a. den effizienten Verglasungen und Fenstern eine hohe Bedeutung zu (das Verbesserungspotenzial beträgt mehr als 50% bzw. mehr als 0.5 W/m^2K (zum Vergleich: Wärmedämmungen über dem gesetzlichen Minimum nur 0.1 bis 0.2 W/m^2K). Geringe Glas- und Fenster-U-Werte sind auch aus Komfortgründen anzustreben. Hohe Dämmstärken (>20cm) bei der Fassade weisen nur noch ein geringes Verbesserungspotenzial auf (<0.1 W/m^2K) und führen zu konstruktiven und wärmebrückentechnischen Herausforderungen und weisen oft nur geringe Grenznutzen aus. - Sonnen- und Blendschutz an der Gebäudehülle: Sonnen- und Blendschutz sind wenn möglich zu trennen (Sonnenschutz aussen, von oben, Blendschutz innen, von unten). Dies ermöglicht einen gezielten Einsatz. Als second best Lösung ist ein Sonnenschutz mit hoher Tageslichtnutzung (Selektivität) zu wählen. Die Sonnenschutzregelung ist so zu setzen, dass der Sonnenschutz während der Heizperiode möglichst zurückhaltend eingesetzt wird. - Lüftungsanlagen: bedarfsgerecht auslegen sowie regeln (CO_2-Konzentration), geringe Druckverluste (<500 Pa), d.h. geringe Luftgeschwindigkeiten, hohe Ventilatoren/Motoren- Effizienz - Gebäudetechnik: die Kombination TABS (im oder am Bauteil), Brüstungsgeräte, Abluft-WP, Kaltwasserverteilung und Erdsonden-WP hat sich in mancher Hinsicht als vorteilhaft erwiesen (geregelte Lufterneuerung, hoher Komfort, kein Brennstoffbedarf, relativ geringer Strombedarf für Luftförderung, Abwärmenutzung, freie Kühlung über Aussenluft und Erdsonde). - Eine hohe Ausführungsqualität und eine sorgfältige Inbetriebsetzung sind zentral für die Energieeffizienz und der entsprechende Aufwand ist in der Regel rentabel
Gebäudekühlung	- Gebäudekühlung als Gesamtkonzept planen und umsetzen (geringe dynamische Temperaturunterschiede, Nutzung der freien Kälte und der Speichermasse, Trennen von Lüften u. Kühlen).
Ohne mechanische Lüftungsanlage	- Geregelte Fensterlüftung oder Brüstungselemente für Lufthygiene und Überhitzungsschutz, evtl. Kühlelemente wie Kühldecken, TABS, Umluftkühler (mit Feuchteüberwachung)

Tabelle 90 Planungs- und Investitionsregeln gültig für den Neubau (können je nach Eingriffstiefe auch bei Gebäudeerneuerungen zur Anwendung kommen)

Fallunterscheidung	Planungs- und Investitionsregel
Allgemein	- Das Anbringen von Wärmedämmungen an Dach, Fassade, Kellerdecke etc. ist in der Regel rentabel (insbesondere im Vergleich zu reinen nicht-energetischen Instandsetzungsmassnahmen) oder mit nur geringen Mehrkosten verbunden (weniger als 1 bis 2 CHF/m2a bis zu U-Werten von 0.2 W/m2K bzw. Dämmstärken von 20 cm. Eine Ausnahme bilden komplexe Fassadenaufbauten und teure Fassadenbekleidungen, welche noch funktionstüchtig sind. - Bei hohen internen Lasten und Gebäuden ohne aktive Kühlung verschärfen Wärmedämmungen den sommerlichen Diskomfort, v.a. bei bereits kritischen Situationen - Beleuchtungserneuerungen sind insbesondere dann rentabel, wenn bei der Vergleichsbasis „Instandsetzungen" auch die Arbeitskosten mit eingerechnet werden.
Ohne Lüftung	- Einbau einer Lüftung oder Abluft-Anlage mit Abluft-WP: siehe oben - Einbau aktiven Kühlung: Grundsätzlich ist der Einbau einer reinen Kühlung (ohne mechanische Lüftung) möglich, zu empfehlen ist jedoch wegen der Gefahr von Kondensat die Ergänzung mit einer mechanischen Lüftungsanlage. Die Kälteverteilung über ein Kaltwassernetz bietet gewisse Vorteile auch wenn die Jahreskosten in etwa vergleichbar sind. Die Jahreskosten einer zentralen Kühlung inkl. Verteilung sind vergleichbar mit den Jahrekosten von Kleinklimageräte
Vorhandene Lüftung	- Betriebsoptimierungsmassnahmen (BO): in vielen Fällen lassen sich sowohl die Betriebszeiten wie die Luftvolumenströme deutlich reduzieren, ohne dass bzgl. Luftqualität nennenswerte Einbussen in Kauf genommen werden müssen. Dadurch reduzieren sich Strom- und Wärmebedarf gleichzeitig. BO-Massnahmen sind in der Regel hoch rentabel. - Einbau WRG: ist bei einer bestehenden Lüftungsanlage noch keine WRG vorhanden, ist ein Einbau dringend zu prüfen, spätestens bei der nächsten Erneuerung des Monoblocs. Der Einbau von Wärmerückgewinnungsanlagen ist in der Regel rentabel (sofern es die Raumverhältnisse zulassen). - Erneuerung Lüftungsanlage: mit der Erneuerung von Lüftungsanlagen (Luftaufbereitung, insbesondere aber auch Luftverteilung) lassen sich hohe Effizienzgewinne realisieren, wenn die Luftvolumenströme neu ausgelegt werden (bedarfsgerecht).
Vorhandene Lüftung mit Kühlung	- Betriebsoptimierungsmassnahmen: Reduktion des Wärmebedarfs und deutlich Reduktion des Strombedarfs (Luftförderung und Kühlung) durch Anpassen der Betriebszeiten und der Luftvolumenströme. Unter Umständen sind kompensatorische Massnahmen notwendig, um eine Komfortverschlechterung zu verhindern (z.B. Beleuchtungserneuerung). - Einbau WRG: siehe auch Lüftung ohne Kühlung. - Erneuerung Lüftungsanlage: das Trennen der Funktionen Lüften und Kühlen ermöglicht es, die Luftvolumenströme markant zu reduzieren. Falls weiterhin aktive Kühlung erforderlich ist, ist mit geringen Mehrkosten zu rechnen.

Tabelle 91 Planungs- und Investitionsregeln, gültig für den Gebäudebestand

Hinzuweisen ist an dieser Stelle auch auf die weiteren Auswertungen und Analysen, welche direkt im Kapitel Zusammenfassung (S. 23 ff.) dokumentiert sind.

7 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Das Ziel des Projektes, die Grenzkosten energieeffizienter Massnahmen für Wirtschaftsgebäude zu ermitteln, hat folgende Gegebenheiten zu beachten:

- Diejenigen Massnahmen, welche auf einen verbesserten Wärme- oder Sonnenschutz der Gebäudehülle abzielen, sind vom Wesen her multifunktional, weil sie Eigenschaften des Gebäudes verändern (z.B. natürlich einfallendes Licht, veränderte Möglichkeiten der Nachtauskühlung im Sommer); diese können mit der optimalen Nutzung des Gebäudes im Konflikt stehen (z.B. Verminderung des Komfortniveaus zu bestimmten Jahreszeiten, unzureichende Beleuchtung). Ebenfalls multifunktional sind Massnahmen, Anforderungen und Auswirkungen im Bereich Beleuchtung (verschiedene Dimensionen der Beleuchtungsqualität, Wärmeabgabe, Kühlbedarf). Diese "Koppeleffekte" führen prinzipiell zu Abwägungen zwischen verschiedenen Zielen und dem Bewertungsproblem der monetären Zuordnung von Kosten und Nutzen, wie man sie bei der Wärme-Kraft-Kopplung auch kennt.
- Methodisch ist es prinzipiell nicht möglich, Grenzkosten für diejenigen Massnahmen zu bestimmen, welche simultan auf den Energiebedarf wie auf das Komfortniveau wirken, wenn man die monetäre Bewertung der Komfortveränderung, die begleitenden Kosten oder Nutzen nicht mit behandelt. Methodisch wird es auch schwierig, Grenzkosten relativ zu einer Referenzvariante für Gebäudeerneuerung festzulegen, wenn bestimmte Vorschriften für die energietechnische Erneuerung bestehen (z.B. für Lüftung mit Wärmrückgewinnung) oder die Ansprüche an das Komfortniveau verändert werden (z.B. bessere Luftqualität).

Aufgrund dieser Ausgangssituation werden die Schlussfolgerungen in einen inhaltlichen und einen methodischen Teil gegliedert (vgl. Abschnitt 7.1 und 7.2), bevor die Autoren einige Empfehlungen daraus ableiten (vgl. Abschnitt 7.3).

7.1 Inhaltliche Schlussfolgerungen

Im Gegensatz zu den Wohngebäuden haben Wärmschutzmassnahmen bei Wirtschaftsgebäuden ein wesentlich komplexeres Kausalgeflecht nicht nur auf der bauphysikalischen und energietechnischen Seite, sondern auch auf der sozio-ökonomischen Seite:

- Die Möglichkeiten des Verlassens überhitzter Räume und der (insbesondere nächtlichen) Fensteröffnung (wie in Wohngebäuden) sind in Krankenhäusern, Altersheimen, Schulen, Bürogebäuden, Gebäuden des Detailhandels (für die Angestellten) oder Produktionshallen eingeschränkt.
- Hinzu kommen häufig höhere interne Lasten durch Büro- oder Fertigungsmaschinen, dichte Belegung, Publikumsverkehr und intensive Beleuchtung, die im Sommerhalbjahr zu hohen Innenraumtemperaturen führen können.
- In Büro-, Schul-, Sitzungs- und Versammlungsräumen sind auch Maximalgrenzwerte für CO_2 einzuhalten, um Lernfähigkeiten und Produktivitäten der Gebäudenutzer nicht zu schmälern.

Zum Zielkonflikt von Energieeffizienz und Komfort in Wirtschaftsgebäuden

Bei den Wirtschaftsgebäuden ist eine grosse Vielfalt an Energiedienstleistungen festzustellen: thermischer Komfort im Winter und im Sommer, Lufterneuerung, Beleuchtung. Ebenso vielfältig sind die Einflussfaktoren, welche den Energiebedarf determinieren, um diese Dienstleistungen bereitzustellen. Zwischen den verschiedenen Energiedienstleistungen und Einflussfaktoren, bestehen zahlreiche Interaktionseffekte. Aufgrund dieser Interaktionseffekte kann es bei Energie-Effizienzmassnahmen zu Zielkonflikten kommen, besonders zwischen wärme- und elektrizitätsbasierten Energiedienstleistungen

und zwischen Energiebedarfsreduktion und thermischem Diskomfort (Überhitzung). Trotz der Fülle einzelner zu beachtender Aspekte lässt sich zunächst zusammenfassend folgendes festgehalten:

- Für *Neubauten von Wirtschaftsgebäuden* können Komfortniveau und der Brennstoffbedarf durch geeignete Massnahmen erheblich verbessert bzw. vermindert werden. Ähnliches gilt – bei gegebenem Komfortniveau – für den gebäudebezogenen Elektrizitätsbedarf. Bei zusätzlichen Energiedienstleistungen im Vergleich zum Referenzfall (z.B. Lüftung, Kühlung) oder Substitutionsmassnahmen (WRG, WP) werden die angesprochenen Elektrizitätseffizienzpotenziale bis zu einem gewissen Mass kompensiert. Es ist zudem anspruchsvoll, mit gebäudebezogenen Massnahmen allein den Strombedarf als Ganzes markant zu reduzieren. Dazu wäre auch der Elektrizitätsbedarf der Arbeitshilfen (Geräte), der oft einen hohen Anteil am Elektrizitätsbedarf ausmacht, zu reduzieren. Insgesamt haben Architekt und Fachingenieur (Beleuchtungs-, Elektro- und HLK-Planer) mehr Gestaltungsspielraum beim Neubau als bei der Renovierung, eine optimale Lösung zu generieren. Der Optimierungsprozess kann mit geeigneten Simulationsmodellen und einfach handhabbaren, integrierten Softwaretools (z.B. SIA 380/4, Lichtkonfigurator, und SIA 380/4-Tool Klimatisierung) unterstützt werden, um beim Neubau sachgerechte Entscheidungen treffen zu können.
- Für die *Erneuerung von Wirtschaftsgebäuden* zeigt sich infolge der unterschiedlichen Merkmale des Gebäudebestandes eine grössere Variation der möglichen oder erforderlichen Massnahmen relativ zum Neubau. Die Grundprinzipien sind aus energetischer Sicht jedoch im Gebäudebestand dieselben wie beim Neubau. Im ersten Schritt gilt es, durch geeignete Massnahmen den Energiebedarf zu senken und im zweiten, den verbleibenden Bedarf möglichst effizient zu decken. Die damit erschliessbaren Energie-Effizienzpotenziale sind im Vergleich zum Neubau beträchtlich, sowohl was die Heizenergie als auch was die elektrische Energie betrifft. Es gilt, positive Interaktionseffekte möglichst zu nutzen (Beleuchtungs- und Lüftungserneuerungen, welche sowohl Wärmeenergiebedarf, Strombedarf sowie unkomfortable Situationen reduzieren) und gegenläufige Interaktionseffekte möglichst zu vermeiden (Verglasungen mit hohen g-Werten bei Gebäuden mit hohen internen Lasten, automatischer Sonnenschutz ausserhalb der kritischen Perioden). Sind adverse Effekte nicht zu vermeiden (z.B. Komfortverschlechterung bei Wärmedämmungen und Fensterersatz bei hohen internen Lasten), so ist in den meisten Fällen nicht auf die Massnahme an und für sich zu verzichten, sondern es sind kompensatorische Massnahmen zu treffen (denn der Primäreffekt der Massnahmen ist meistens von grösserer Bedeutung). Dies bedeutet insgesamt hohe Anforderungen an Architekten und Fachingenieure bei Gebäudeerneuerungen, die neben der Komplexität des Zielkonfliktes zwischen Energieeffizienz und Komfortniveau noch Denkmalschutz-Aspekte, geringe Raumverhältnisse, Schnittstellen, unterschiedliche Lebenszyklen, begrenzte Investitionsbudgets etc. mit zu berücksichtigen haben.

Grob vereinfacht drückt sich der Zielkonflikt zwischen Energieeffizienz und Komforterhalt oder -erhöhung in folgender Regel aus: Eine Verminderung des Brennstoffbedarfs ist bei einigen Massnahmen mit einer Zunahme des Elektrizitätsbedarfs von einem Viertel bis zur Hälfte verbunden. Umgekehrt können Effizienzmassnahmen bei Elektrizitätsanwendungen den Heizwärmebedarf wegen nicht mehr freigesetzter Wärme in der Heizperiode um einen etwa halb bis ein Viertel so hohen Betrag erhöhen. Die Reduktion einer kWh Elektrizität muss als mit einem Brennstoffeinsatz von 0.25 bis 0.5 kWh erkauft werden. Dies ist sehr viel weniger als bei der Stromerzeugung in Kraftwerken, wobei pro kWh 1.7 (bei sehr guten GuD-Kraftwerken) bis 3 kWh Brennstoffe notwendig sind, d.h. solche Massnahmen sind einer thermischen Stromerzeugung klar vorzuziehen. Das Substitutions-Verhältnis Strom zu Wärme, sozusagen die "exchange rate", beträgt zwischen 0 und 0.25 bei Gebäudehüllen-Wärmeschutzmassnahmen (wobei bei Sonnenschutzverglasungen auch bei Energieformen erhöht werden können), 0.25 und 0.75 bei raumbezogenen Stromeffizienzmassnahmen und zwischen 2 bis 4 bei gebäudetechnischen Wärmeeffizienzmassnahmen. Der Faktor 4 gilt auch für den Einsatz von gut konzipierten Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung und von Wärmepumpen anstelle von brennstoffbefeuerten Heizanlagen; denn der Jahresnutzungsgrad von Wärmepumpen beträgt im Neubau üblicherweise rund 4 (insbesondere bei Erdsonden oder Abluft-WP). Ein WP-Einsatz anstelle einer Heizung ist dann ratsam, solange der Wirkungsgrad der Stromerzeugung abzüglich Übertragungsverluste grösser ist als der entsprechende Kehrwert des WP-Jahresnutzungsgrades, d.h. grösser als 0.4 (bei einem JNG von 2.5) bzw. 0.25 (bei einem JNG von 4).

Zwischen Brennstoff- und Elektrizitätseffizienzmassnahmen bestehen jedoch auch Synergieeffekte, insbesondere im Bereich Lüftungs- und Kühlanlagen, und zwar sowohl bei investiven Massnahmen (Planung, Erneuerung) als auch bei betrieblichen Massnahmen (Betriebsoptimierung).

Einige der gebäudehüllen-orientierten winterlichen oder sommerlichen Wärme- oder Sonnenschutzmassnahmen (Energie-Effizienzmassnahmen, welche das Ziel haben, den Wärmebedarf oder den potenziellen Kühlenergiebedarf zu reduzieren), haben als unerwünschten Nebeneffekt vielfach zur Folge, dass sich entweder die Komfortsituation verschlechtert oder der Elektrizitätsbedarf erhöht (oder beides), wobei die Interaktionseffekte nicht immer gleich ausgeprägt sind. Dies ist insbesondere bei Gebäuden mit hohen internen Lasten und bei unzureichender Nachtauskühlung (sei es über Fenster oder Lüftungen) der Fall. Zu solchen Massnahmen gehören Fassadenwärmedämmungen bei zuvor ungedämmten Gebäuden, Fensterersatz (sofern nicht auch der g-Wert reduziert wird), vermehrter Einsatz des Sonnenschutzes oder Sonnenschutz mit geringer Lichttransmission.

Mit geeigneten ausgleichenden technischen und betrieblichen Massnahmen lässt sich dieser Zielkonflikt weitgehend kompensieren und es kann gleichzeitig eine hohe Brennstoff- und eine hohe Elektrizitätseffizienz sowie ein hohes Komfortniveau erreicht werden (siehe Abbildung 19, S. 110 und Abbildung 28, S. 122). Die Jahreskosten werden dabei weniger vom Energie-Effizienzlevel als vielmehr vom angestrebten Komfortlevel bestimmt (Abbildung 97, S. 243). Als Massnahmen zu nennen insbesondere die folgenden, welche – wenn möglich – als Bündel zu ergreifen sind, damit sie eine effektive Wirkung entfalten können:

- Die Reduktion der internen Wärmelasten durch Geräte und Arbeitshilfen (z.B. durch schnelles Einschalten von Schlafzuständen).
- Der Einsatz von energie-effizienten Beleuchtungen (geringe installierte Leistung, präsenz- und tageslichtabhängig geregelt).
- Selektive Fenster und Sonnenschutzprodukte (hohe Lichttransmission, geringer g-Wert).
- Möglichkeit zur Fensteröffnung, automatisierte Fensteröffnung oder Brüstungsgeräte mit Nachströmöffnung.
- Nachtauskühlung. Hier genügt unter Umständen bereits die Nachtauskühlung über offene Fenster (geregelt, um Wetter- und Einbruchschutz sicherzustellen), sofern sie in Kombination mit den übrigen genannten Massnahmen angewendet wird.
- Intelligente, flexible und übergreifende Regelkonzepte, welche nicht auf statische Schwellenwerte reagieren, sondern die Dynamik der Gebäudephysik und der Meteorologie mit einbeziehen. Insbesondere bei Sonnenschutz und Beleuchtung und letztlich Kühlung besteht ein hoher Abstimmungsbedarf.

Wegen des angesprochenen Zielkonfliktes von Energieeffizienz und Komfort und wegen der Synergieeffekte gibt es für die jeweiligen Gebäudetypen und für den Fall von Neubau und Erneuerung jeweils kosten- und energieeffiziente Bündel von Massnahmen, die wegen der Einhaltung der Komfortanforderungen eindeutig gegenüber anderen Massnahmenkombinationen vorzuziehen sind (vgl. Tabelle 92)

Energie-effiziente Lösungen im Neubau oder energetische Erneuerungen von Anlagen und Gebäudehülle im Gebäudebestand sind bei adäquaten methodischem Ansatz entweder rentabel oder mit geringen Mehrkosten verbunden (0 bis wenige CHF/m^{2}a). Weit grössere Auswirkungen auf die (brutto) Jahreskosten haben Komfort-Anforderungen oder Zusatznutzen erzeugende Installationen (aktive Kühlung, Lüftung) oder grundsätzliche architektonische Entscheide (Fassadentyp, Platzierung des Sonnenschutzes, innenarchitektonisches Design). Diese betragen 10 bis einige 10 CHF/m^{2}a. Zum Vergleich: die jährlichen Vollkosten der energierelevanten Bauteile und Anlagen betragen bei Wirtschaftsgebäuden 50 bis 100 CHF/m^2, die Gebäudenebenkosten 300 bis 400 CHF/m^2 und die Personalkosten etwa 5000 bis 10000 CHF/m^2. Wenn die Produktivität der Beschäftigten nur um wenige Promille durch überhitzte oder unterkühlte Räume leidet, wird sich jede Wärmeschutzmassnahme oder energietechnische Massnahme am Erhalt der Produktivität orientieren müssen.

Bereich	Wichtige Planungs- und Investitionsregel (Auswahl)
Neubau und Gebäudebestand	- Wärmedämmungen sind ein zentrales Element für energie-effiziente Gebäude. Die entsprechenden Massnahmen sind meist rentabel (insbesondere im Vergleich zu nicht-energetischen Instandsetzungen) oder mit nur geringen Mehrkosten bei Annahme heutiger Energiepreise verbunden (weniger als 1 bis 2 CHF/m^{2}a bis zu U-Werten von 0.2 W/m^{2}K bzw. Dämmstärken von 20 cm). - Wärmeschutzfenster mit höherem g-Wert (im Vergleich zum Standard bei jeweiligem Glas-U-Wert) mit dem Ziel, die solaren Gewinne während der Heizperiode zu erhöhen, sind im Bürobereich nicht ratsam, denn sie verschlechtern den thermischen Komfort im Sommer. - Sonnenschutzfenster (mit tiefem g-Wert) verbessern zwar den sommerlichen Komfort, erhöhen jedoch netto den Wärmebedarf (bei gleichem Sonnenschutzeinsatzregime) *und* den Strombedarf, auch bei gekühlten Gebäuden (mehr Beleuchtung bei geregelter Beleuchtung). Vorzuziehen ist also ein variabler, auf Tageslichtnutzung optimierter Sonnenschutz. - Energie-effiziente Beleuchtungen und Beleuchtungsregelungen sind ein zentrales Element für energie-effiziente und thermisch komfortable Gebäude. Die entsprechenden Massnahmen sind meist rentabel oder mit nur geringen Mehrkosten von typischerweise 0 bis 2 CHF/m^{2}a verbunden (insbesondere bei Einbezug der Wartungskosten). - Je höher die (nicht mehr verminderbaren) internen Wärmelasten, desto notwendiger wird der Einsatz einer aktiven Kühlung, um insbesondere ausserhalb der Heizperiode das erforderliche Komfort-Niveau halten zu können. Aktive Kühlung ist im Vergleich zu nicht-aktiver Kühlung mit Mehrkosten von typischerweise 10 CHF/m^{2}a verbunden. Die aktive Kühlung sollte möglichst effizient ausgelegt werden (z.B. geringer Temperaturhub zwischen Kühlwasser und Rückkühlung), was rentabel oder zu geringen Mehrkosten realisiert werden kann (0 bis 2 CHF/m^{2}a). - Der Einbau einer Lüftungsanlage macht aus Gründen der Energieeffizienz allein keinen ökonomischen Sinn (deutlich über den Wärmegestehungskosten liegende Grenzkosten), sondern nur aus Komfortgründen bei hohem Wärmeschutz. Durch die Wärmerückgewinnung (auch mittels einer Abluft-Wärmepumpe) kann zwar der spezifische Heizwärmebedarf vermindert werden, aber selbst beim lufthygienischen Minimum ist der Luftwechsel meistens höher als bei Fensterlüftung. Typische Kosten: 10 CHF/m^{2}a - Bei vorhandenen oder aus lufthygienischer Sicht erforderlichen Lüftungsanlagen ist auf möglichst tiefe Druckverluste (ein Mass für den Elektrizitätsbedarf für die Luftförderung) und hocheffiziente Ventilatoren und Elektromotoren zu achten. Wärmerückgewinnungs-Anlagen mit hohem Wirkungsgrad (über 85%) sind rentabel. - Eine automatisierte Fensteröffnung oder Brüstungsgeräte mit Nachströmöffnungen ermöglichen deutliche Komfortverbesserungen (ohne den Einsatz von Lüftungs- oder Klimaanlagen). Denn abgesehen von wenigen Spitzentagen im Jahr ist die Aussenluft kühler als die Raumtemperatur (Jahreskosten der Massnahme bis rund 8 CHF/m^{2}a). - Wärmepumpen sind energetisch und technisch sinnvolle Lösungen, um Brennstoffe zu Heizzwecken zu substituieren; leicht höhere Investitionskosten können in den meisten Fällen durch günstigere Energie- und Betriebskosten amortisiert werden.
Gebäudebestand	- Bei hohen internen Lasten von Gebäuden ohne aktive Kühlung verschärft Wärmeschutz die sommerliche Überhitzung, v.a. bei bereits vor der Massnahme beobachteten kritischen Situationen sommerlicher Überhitzung.
Neubau	- Eine dichte Personenbelegung und eine damit verbundene hohe Gerätedichte führen zu hohen internen Wärmelasten. Ohne aktive Kühlung (Kühldecken, Umluftkühler, TABS oder Zuluftkühlung) lassen sich die Anforderungen an den sommerlichen Komfort kaum einhalten, selbst bei Gebäuden mit geringen Glasanteilen, energie-effizienter Beleuchtung und sehr gutem Sonnenschutz.

Tabelle 92 Planungs- und Investitionsregeln zur Minimierung des Konflikts Komfort und Energieeffizienz in Wirtschaftsgebäuden (Quelle CEPE et al.)

Zur Kostenstruktur und den Kosten- und Nutzenbetrachtungen von Energieeffizienzmassnahmen

Heizkosten von Wirtschaftsgebäuden sind – im Vergleich zu den Stromkosten, v.a. aber im Vergleich zu den Kapitalkosten von Wirtschaftsgebäuden – sehr gering. Entsprechend relativ gering ist auch das Heizkosteneinsparpotential (gemessen an übrigen Kostenanteilen); als Folge wird ihnen auch wenig Aufmerksamkeit geschenkt. Die markanten Festlegungen bzw. Veränderungen bei den gesamten Jahreskosten werden durch grundsätzliche Entscheide bei Neubau oder Gebäudesanierung gefällt: Verglasungsanteil, Fassadentyp, Kühlung ja oder nein, Lüftung ja oder nein. Diese Entscheide haben erhebliche Auswirkungen auf den Strom- und Wärmebedarf und deren Kosten in Höhe von einigen wenigen 10 CHF/m^{2}a (bzw. von 50 bis gut 80 CHF/m^{2}a, wenn auch die energie-bezogenen Kapital- und Betriebskosten miteinbezogen werden), welche aber bzgl. der Jahresgesamtbetriebskosten des Gebäudes (zwischen 250 und 400 CHF/m^{2}a) nicht entscheidend sind. Die energietechnische Qualität, mit der diese Entscheide umgesetzt werden, hat zwar geringe Auswirkungen auf die Gesamtkosten, aber deutlich auf die Kostenstruktur: meistens kann ein Mehrbedarf an Kapitalkosten für energieeffiziente Lösungen durch geringere Energiekosten mehr als kompensiert werden.

Das Fallbeispiel eines neuen mittleren Bürohochhaus mit 80% Fensteranteil, Leichtbau und hohen internen Lasten zeigt exemplarisch, wie die Gesamtkosten und auch der Energiebedarf durch architektonische Entscheide stark beeinflusst werden können, sowohl im Positiven wie im Negativen. Einige dieser Massnahmen sind eigentliche WinWin-Massnahmen: so reduzieren sich beispielsweise durch einen äusseren Sonnenschutz die Kosten der Gebäudehülle (im Vergleich zum zwischenliegenden Sonnenschutz) und gleichzeitig verbessert sich der sommerliche Wärmeschutz.

Die Wirtschaftlichkeit von gebäude- und anlagenbezogenen Massnahmen hängt nicht nur von den Kosten der Massnahmen, sondern erheblich auch von der *Ausgangslage und der Vergleichsbasis* ab, wobei die drei letztgenannten Spiegelpunkte auf den *Gebäudebestand* zutreffen:

- *Zeitpunkt des Kostenvergleichs:* Die Kosten-Nutzenanalysen haben gezeigt, dass die Wirtschaftlichkeitsrechnungen relativ sensitiv auf die Präzision der Kostendaten reagieren, denn in diese fliessen Differenzkosten ein (aus arithmetischen Gründen wirken sich geringe Veränderungen mit einer starken Hebelwirkung aus). In einer frühen Planungsphase liegen oft nur grobe Kostenschätzungen, welche mit einer Sicherheitsmarge behaftet sind, die zudem für energie-effiziente Varianten oft grösser ist als für Standardvarianten. Werden Variantenentscheide in einer frühen Planungsphase aufgrund von Wirtschaftlichkeitsrechnungen mit solchen groben Kostenschätzwerten, kommen die investitionslastigeren energie-effizienten Varianten oft nicht zum Zug, obwohl sie bei einer näheren Betrachtung durchaus wirtschaftlich wären (siehe Kap. 5, insbesondere 5.1 und 5.2, S. 195 ff., und Jakob, Jochem, 2002). Die Problematik wird durch die kürzliche Verschärfung der Haftung von Ingenieuren und Architekten für Kostenschätzungen und –voranschläge (vgl. Hess-Odoni, 2006), welche wohl zu konservativeren Kostenschätzungen führen wird, noch verschärft.
- *Vergleichsbasis laufende Kosten-(ein unsachgemässer Vergleich)*: im Vergleich zu laufenden Energiekosten und (geringen) Unterhaltskosten im Bereich des „courant normal" sind Energieeffizienzmassnahmen scheinbar oft mit Netto-Mehrkosten verbunden. Dies liegt u.a. daran, dass die mit solchen Massnahmen verbundene Schaffung von Neuwerten (die Anlagen oder Gebäudeteile werden verjüngt, der Komfort wird erhöht) finanzmethodisch anspruchsvoll ist und in der Praxis kaum adäquat bewertet wird. Diese mangelhafte ökonomische Bewertung von Energieeffizienzinvestitionen mag mit zur Erklärung beitragen, weshalb keine beschleunigte Erneuerung des Gebäude- und Anlagenbestandes festzustellen ist. Bei der Beleuchtung beispielsweise hängt die Wirtschaftlichkeit von Erneuerungen (Leuchten-, Vorschaltgerät- und Lampenersatz) und Lichtmanagementmassnahmen (präsenz- und tageslichtbasierte Regelung) erheblich von den angenommenen Kosten des Unterhalts ab. Werden die Arbeitskosten des Lampenersatzes und der notwendigen Reinigung vernachlässigt und werden nur die Energie- und Materialkosten als Vergleichsbasis verwendet, ist die Wirtschaftlichkeit einer Beleuchtungserneuung meistens nicht ge-

geben. Werden diese Aspekte jedoch berücksichtigt und die entsprechenden Arbeitkosten miteinbezogen, ist eine Beleuchtungserneuerung meist rentabel.

- *Vergleichsbasis Instandsetzung:* Im Vergleich zu Instandsetzungsmassnahmen sind weitergehende Erneuerungsmassnahmen oder Energie-Effizienzmassnahmen in vielen Fällen wirtschaftlich oder nahe an der Wirtschaftlichkeitsgrenze (bei heutigen Energiepreisen: Brennstoffe 7 Rp/kWh, Elektrizität 17 Rp/kWh). Voraussetzung dafür ist allerdings die Annahme, dass die wirtschaftliche Lebensdauer einer Investition derjenigen der technischen Lebensdauer gleicht. Die vielfach verwendete und häufig relativ kurze geforderte Payback-Zeit ist ein Risikomass für den Rückfluss des eingesetzten Kapitals und sagt nichts zur Rentabilität aus. Beisiele für rentable Investitionen sind Dach- oder Fassadenwärmedämmungen, Betriebsoptimierungsmassnahmen, kombinierte Kälte- und Wärmerzeugung etc.
- *Vergleichsbasis (energetische Standard-) Erneuerung:* Zum Zeitpunkt von ohnehin durchgeführten Erneuerungsmassnahmen (die für sich genommen häufig mit einem Effizienzgewinn verbunden sind) besteht grundsätzlich die Möglichkeit, energetisch effizientere Investitionen zu verfolgen. Beispiele dafür sind weitergehende Dämmstärken, höhere Wirkungsgrade energietechnischer Anlagen, geregelter Beleuchtungseinsatz. Bei sehr weitgehenden Massnahmen liegen deren Grenzkosten jedoch teilweise über dem Energiepreis. Ihre Durchschnittskosten hingegen liegen (im Vergleich zur Standarderneuerung oder zur Instandsetzung) auch bei hohen Grenzkosten des marginalen (d.h. letzten) Massnahmeschritts häufig trotzdem unter den Energiekosten, d.h. die Massnahmen sind als Paket rentabel.

Folgerungen für energiewirtschaftliche Analysen: Sind Anlagen oder Gebäudeteile aus Gründen der Lebensdauer ohnehin Instand zu setzen oder zu erneuern, wird damit oft ein markanter Energieeffizienzgewinn erreicht, dies aufgrund des technischen Fortschritts, der seit dem Zeitpunkt des Neubaus oder der letzten Erneuerung erzielt wurde. Beispiele dafür sind Fenster, Wärmerückgewinnungs-, Lüftungs-, Kälteerzeugungsanlagen und Beleuchtungen. Dieser „autonome" technische Fortschritt wird in energiewirtschaftlichen Modellen mitberücksichtigt – meist ohne zusätzliche Kosten dafür anzusetzen. Die Differenz zwischen Instandsetzung und normaler Re-Investition auf den neuen technischen Stand kennzeichnet gerade die unausgeschöpften rentablen Effizienzpotentiale (die low hanging fruits), die eine Energieeffizienzpolitik in jedem Fall zu verfolgen hat.

Wegen der Fülle der unterschiedlichen Merkmale und Anforderungen der Wirtschaftsgebäude ist die Ermittlung der Grenzkosten für energiewirtschaftliche Analysezwecke komplex und macht Vereinfachungen notwendig. Die hier vorgenommene Klassifizierung in zwölf Gebäudetypen ist ein erster grosser Schritt, den unterschiedlichen Gegebenheiten angemessener als bisher Rechnung zu tragen.

Zu Marktstrukturen und zum aktuellen Stand der Energie- und Kostenplanung

Die Kostenerhebungen zeigten, dass insbesondere der Bereich Heizung, Lüftung, Klima von relativ vielen Schnittstellen gekennzeichnet ist (z.B. einzelne Aggregate und Gewerke wie Kältemaschine, Rückkühlung und Kälteverteilung, meist von verschiedenen spezialisierten Unternehmen angeboten und dimensioniert). Es fiel auf, dass technische und Kosten-Planungen wegen der Schnittstellen häufig wiederholt werden müssen und die meisten Planer nur ihre jeweilige System-Komponente optimieren (falls überhaupt). Dies erschwert oder verunmöglicht eine effektive, effiziente, routinemässige und übergreifende Optimierung und Standardisierung in der Alltagspraxis bei Wirtschaftsbauten, insbesondere bei Erneuerungen. Zudem werden den Ingenieur- und Planungsbüros häufig nur knappe Budgets zugestanden, welche für eine angemessene Optimierung der Lebenszykluskosten unzureichend sind.

Die Befragungen und Erhebungen haben auch gezeigt, dass Technik orientierte Fachleute oft wenig Kenntnisse bzgl. Kostenkennwerte und bzgl. Kosten-Nutzen-Relationen haben. Kosten orientierte Fachleute haben umgekehrt wenig Kenntnisse über technische Kennwerte und deren technischer Effizienzpotenziale.

7.2 Methodische Anmerkungen

Die Ergebnisse des vorliegenden Projekts können zum einen für die Nutzung in Energiesystem-Modellen (z.B. für die Schweiz) in Form von geeigneten Massnahmenbündeln auf sektoraler Ebene verwenden werden und zum anderen könnten sie als gebäudetypisierte Ergebnisse Eingang in weitere elektronische Planungsinstrumente von Fachingenieuren und Architekten finden. Die Analysen zeigten aber auch sehr deutlich einige methodische Grenzen auf, die es zu beachten gilt.

Grenzen des Grenzkostenansatzes

Der Grenzkostenansatz unterstellt prinzipiell eine binäre Kosten-Nutzenrelation, d.h. andere Nutzen oder Kosten sind als konstant unterstellt. Am Beispiel der Wirtschaftsgebäude zeigt sich aber, dass der Grenzkostenansatz wegen des deutlichen Einflusses von Wärmeschutzmassnahmen auf den Komfort in den Gebäuden an seine Grenzen stösst, weil sich in aller Regel der Komfort verbessert oder verschlechtert. Es ist daher für energiewirtschaftliche Analysen erforderlich, Aussagen zu Grenzkosten nur bei einem konstanten Komfortniveau oder anderen konstanten kostenbeeinflussenden Zielgrössen eines Gebäudetyps (z.B. Repräsentativität eines Gebäudes, Höhe der internen Lasten) zu machen.

Ohne *monetäre Bewertung der Komfortaspekte bei Wirtschaftsgebäuden* verbleiben im Wesentlichen zwei Lösungsansätze, um angemessene quantitative Wirtschaftlichkeitsrechnungen realisieren zu können: 1. Der Vergleich zwischen unterschiedlich effizienten Lösungen bei jeweils konstantem Komfortniveau, eine sehr typisierende, prozess-orientierte Methode. 2. Die statistische Auswertung der Ergebnisse von Investitionen und Mietunterschieden durch multiple Regression und Ableitung der Grenzkosten anhand der Schätzgleichungen, eine Methode, die wegen mangelnder Daten bisher scheiterte.

Da der *Grenzkostenansatz auf Differenzbetrachtungen* beruht (sowohl bzgl. Kosten wie auch energetische Wirkung), ist eine hohe Präzision bei der Bestimmung der Kosten und der energetischen Nutzen erforderlich. Diese ist häufig nicht gegeben, schon wegen der vereinfachenden Typisierung der Gebäude und Investitionsfälle. Die Grenzkosten variieren sehr sensitiv auf Ungenauigkeiten bzgl. der Kosten und des verbleibenden Energiebedarfs der zu vergleichenden Varianten. Wegen dieser Ungenauigkeiten kann es zu sehr hohen Grenzkosten kommen, obwohl die Jahreskosten der betrachteten Varianten wenig voneinander abweichen. Der Grenzkostenansatz hat zudem den Nachteil, dass das Kostenniveau nicht berücksichtigt wird; deshalb liegt es für energiewirtschaftliche Analysen nahe, den Vergleich von Jahreskosten für typisierte Erneuerungs- bzw. Neubaufälle zur ökonomischen Bewertung heranzuziehen, wie dies ja auch für Investitionen im Umwandlungssektor üblich ist.

Ein weiterer Nachteil des Grenzkostenansatzes ist die übliche Zuteilung der Kosten auf die Bereiche Brennstoffe und Elektrizität bei Massnahmen, welche beide Energieträgertypen (meist gegenläufig) verändern. Solange es sich bei dem einen Energieträger nur um „Hilfsenergie" handelt (z.B. Pumpenantrieb), kann dieser Bedarf als Teil der Betriebskosten parametrisiert werden. Andernfalls muss man diese Trennung aufgeben, was in den bisherigen energiewirtschaftlichen bottom-up und top-down Modellen nicht gemacht wurde.

Die Darstellung der Ergebnisse auf Jahreskostenebene erleichtert auch die Integration von begleitenden Nutzen.

Grenzen der Modellierung von Energiebedarf und Komfort - Tools für Planer

Bei der Interpretation der Simulationsergebnisse für die Berechnungen der einzelnen Gebäudetypen sind die angenommenen Randbedingungen und die Grenzen der Simulationen mit zu berücksichti-

gen. Grenzen bei der Simulation betreffen insbesondere das Verhalten der Nutzenden und hierbei v.a. im Bereich der Beleuchtung, des Sonnenschutzeinsatzes und der Fensteröffnung. Der Interaktionseffekt von Verglasungs- und Sonnenschutzmassnahmen auf den Beleuchtungsbedarf wird im Fall des manuellen Einsatzes von Beleuchtung und/oder Sonnenschutz vom Modell möglicherweise überschätzt, weil davon ausgegangen wurde, dass das Licht jeweils ausgeschaltet wird, sobald wieder genügend Tageslicht auf der Arbeitsfläche vorhanden wäre. Damit würde der Nutzen der entsprechenden Massnahmen bzgl. Reduktion des Kühlenergiebedarfs unterschätzt (d.h. die entsprechenden Grenzkosten überschätzt).

Dynamische Gebäudesimulationsmodelle, welche zudem Aussagen zum Komfort beinhalten, sind in ihrer Handhabung relativ komplex und aufwändig, sowohl bzgl. des Daten- wie auch bzgl. des Zeitbedarfs. Dies erschwert die Verwendung dieser Modelle im frühen Konzeptions- und Planungsprozess. Gefragt sind deshalb als Ergänzung einfache, parametrisierte Modelle, welche diese Nachteile nicht aufweisen, damit angenäherte, aber dennoch verlässliche Planungsgrundlagen liefern (vgl. Gasser, 2006 und Ménard, Seidinger et al., 2006).

7.3 Empfehlungen an Wirtschaft, Intermediäre, Politik und Verwaltung

Eine vertiefte Hemmnis- und Politikanalyse war nicht zentraler Gegenstand der vorliegenden Untersuchung. Dennoch waren die Arbeiten indirekt eine Auseinandersetzung mit dem Innovationsgeschehen im Bereich der Wirtschaftsgebäude, und so lassen sich aus den empirischen Arbeiten, den vielen Kontakten mit Unternehmen und Branchenvertretern und aus den Ergebnissen der Berechnungen einige Hinweise zu Hemmnissen und zu Instrumenten zu deren Überwindung ableiten. Diese Hinweise seien akteursspezifisch im Folgenden zusammengestellt. *Da nebst sind weitere Hemmnisse* zu verzeichnen*,* die es abzubauen gilt. Viele davon sind nicht spezifisch für Wirtschaftsgebäude, sondern gelten auch für Wohngebäude (vgl. Analysen und Empfehlungen des EWG-BFE-Projektes „Aktivierung der Erneuerungspotenziale im Wohngebäudebestand").

Wirtschaft, insbesondere Immobilienwirtschaft und Planer

Information und Marketing

Aufgrund der meist langen Instandhaltungs- und Erneuerungszyklen fehlt bei Erneuerungsentscheiden oft eine ausreichende Informationsbasis auf Seite der Besteller. Deshalb fallen häufig hohe Such- und Informationskosten an, was besonders für Erneuerungen mit geringem Investitionsvolumen zur Resignation der Energieverantwortlichen führen kann. Zudem durchlaufen Erneuerungsentscheide oft mehrstufige Prozesse zwischen verschiedenen Akteurstypen und Zuständigkeitsbereichen (Techniker, Betriebswirtschafter, Gebäudebesitzer, -verwalter etc.), und zwar sowohl auf Seite der Bestellenden wie auch auf Seite der Beauftragten, was energie-effizienten Lösungen wegen unvollständiger Kenntnisse der an der Entscheidung Beteiligten oft im Wege steht. Insofern gilt es, die Informationsasymmetrie abzubauen und die Transparenz im Neubau- und Erneuerungsmarkt der Gebäude und Anlagen zu erhöhen.

- Die *Initialberatung und Umsetzungsberatung für Immobilienbesitzer* ist zu fördern, finanziell und als Image des best management practice. Aus dem Programm Energie2000 liegen umfangreiche Erfahrungen zu Vorgehens- und Energieberatung für Immobilienbewirtschafter vor, welche in nützlicher Frist aktiviert und aktualisiert werden könnten.
- Zu speziellen Technologien sind *gezielte Mess- und Informationskampagnen seitens der Technologiehersteller, Planer und Technologienutzer* durchzuführen (wie dies z.B. bei der Druckluft zurzeit der Fall ist), insbesondere zu hocheffizienter Beleuchtung, hocheffizienten Elektromotoren,

Lüftern, Kältemaschinen und Pumpen sowie Betriebsoptimierungs-Massnahmen und Gebäudemanagement.

- Als Ergänzung/Alternative zu *klassischen Aus- und beruflichen Weiterbildungsangeboten* sollte man örtliche, lernende Netzwerke (ModellSchweiz) für Immobiliengesellschaften und Gebäudebesitzer ausbauen (Initialberatung, Erfahrungsaustausch zwischen teilnehmenden Unternehmen, Bereitstellen von neuestem Wissen und rechnergestützten Instrumenten, Gruppeneffizienzziel); für solche Netzwerke ist eine Anschubfinanzierung sehr empfehlenswert, weil dieses Instrument durch das gegenseitige Vertrauen der Energieverantwortlichen und den um einen Faktor 10 höheren Multiplikatoreffekt (im Vergl. zu Initialberatung) eine sehr hohe Programmeffizienz erreicht.

Markttransparenz: Der *Gebäudepass*, der z.Zt. aufgrund der EU-Richtlinie in den Mitgliedsstaaten umgesetzt wird, sollte auch für die Schweiz und ihre Wirtschaftsbauen eine baldige Umsetzung erfahren. Hier geht es um eine verbesserte Markttransparenz bei Vermietung und Verkauf. Die Markttransparenz ist jedoch auch bei der Planung und Ausschreibung im Bau- und Erneuerungsmarkt zu erhöhen, hierbei geht es insbesondere vom weit verbreiteten Denkansatz der Investitionskostenminimierung wegzukommen und das *Lebenszykluskosten-Konzept als Methode der wirtschaftlichen Bewertung* zu etablieren. Diese Verbesserungsmassnahmen zur Erhöhung der Markttransparenz müssten von der Immobilienwirtschaft vorbereitet und dann über die den Bund und vor allem über die Kantone bzw. die SIA-Normengebung und -anwendung umgesetzt werden.

Marketing: Auch die Energieeffizienz-Anbieter müssen lernen, dass sie Erlebniswerte, gesundere Lebensformen, Komfort und soziales Prestige mit ihren technischen Lösungen ermöglichen. Damit einhergehen müssen auch die Botschaften des ökonomischen Nutzens der Co-Benefits (z.B. auch mehr Komfort, verbesserte Ergonomie bei Beleuchtungen, bessere Arbeits- und Kapitalproduktivität, Schallschutz, Einbruchschutz, geringere Lehrstände, bessere Bonität). Die wichtigsten Erkenntnisse der vorliegenden Untersuchung könnten aufgegriffen werden und zum Zweck der Informationen und des Marketings in übersichtlichen und einfach verständlichen Publikationen verbreitet werden, ähnlich wie bei den Wohngebäuden, siehe BFE (2003).

Intermediäre, insbesondere Normengebung, Aus- und berufliche Fortbildung

Die Rolle der Intermediäre wird zuweilen unterschätzt, insbesondere dann, wenn Normengebung oder Standardisierung die Transaktionskosten reduzieren oder die Ausbildung bzw. die berufliche Fortbildung das Hemmnis erheblicher Kenntnismängel beseitigen.

Normierungen, Standardisierungen und Benchmarks

Der Neubau und die Erneuerung von Wirtschaftsbauten ist von einer hohen Komplexität und von vielen Freiheitsgraden der Gestaltung (und Fehlplanungsmöglichkeiten) geprägt. Bei Kosten und technischen Kennwerten besteht eine grosse Variabilität. Damit sich energie-effiziente Lösungen durchsetzen, benötigen die Akteure bei Investitionsentscheiden und bei der Planung Orientierungs- und Entscheidungshilfen, zumal sie häufig nur einen Teilaspekt jeweils bearbeiten. Energietechnische Normen wie SIA 380/4, SIA 380/1 oder SIA 382/1 bieten solche Entscheidungshilfen im technischen Bereich, besonders weil sie zwischen Standardlösungen und zielorientierten Effizienzlösungen unterscheiden. Normen und Benchmarks sollten sowohl auf der Systemebene ansetzen (gesamter jährlicher Energiebedarf) wie auch auf der Ebene der Einzelkomponenten (letzteres, um den gegebenen Marktstrukturen mit hoher Arbeitsteilung und Spezialisierung und klein strukturierten Unternehmen Rechnung zu tragen). Normen und Empfehlungen dienen letztlich als Grundlage für Informationsverbreitung, Vorschriften und Privatrecht.

- Informationsverbreitung: Normen (z.B. zum Wärmeschutz, zur Kühlenergiebedarfsermittlung, zur Dimensionierung von Anlagen) und Empfehlungen (z.B. in Form von Grenz- und Zielwerten) dienen den Fachleuten in der Praxis als Orientierungshilfe und als Planungsgrundlage; diese müssen nicht gesetzgeberisch verankert sein. Dies gilt besonders dann, wenn die Normen und Bench-

marks in relativ einfach handhabbare Planungshilfen und Tools umgesetzt sind. Denn Planungs-Normen und Benchmarks dienen häufig als bessere Informationskanäle als zusammenfassende Fach-Artikel oder Forschungsberichte. Zu prüfen ist, inwiefern solche Tools durch Wirtschaftlichkeitsmodule mit integrierten Kostenkennwerten zu ergänzen sind.

- Vorschriften: die gesamtschweizerisch und zunehmend europäisch koordinierten Normen bieten Grundlagen, auf welche sich Planer, Gesetzgeber und Vollzugsbehörden beziehen können.
- Privatrecht: Auf Berechnungsnormen und darin integrierte Grenz- und Zielwerte kann in privatrechtlichen Bauleistungsverträgen Bezug genommen werden. Dies baut Informationsasymmetrien ab und erleichtert die Verständigung zwischen den involvierten Akteuren, womit damit die wirtschaftliche Effizienz erhöht wird. Auf Normen Bezug nehmende privatrechtliche Verträge erleichtern es Bauträgerschaften zudem, ihre Ansprüche und Anforderungen gegenüber den Bauleistungsanbietern einzufordern.

Auf Seiten der Bewertung zur Wirtschaftlichkeit von Investitionsoptionen ist zwischen methodischen und inhaltlichen Normen und Standards zu unterscheiden. Die Norm SIA 480 zur Methode der Wirtschaftlichkeitsrechnung stellt bzgl. ersterem eine gute Grundlage dar. Auf der inhaltlichen Seite, also bzgl. Kostenkennwerten und Benchmarks für ökonomische best practice besteht jedoch Handlungsbedarf. In Teilbereichen bieten hierzu die website Bestellerkompetenz und die Kostenplanungsinstrumente des CRB eine gute Hilfestellung. Wichtige Teilbereiche wie z.B. Beleuchtungen fehlen allerdings, ebenso Kostenkennwerte von weitergehenden Energieeffizienzprodukten oder -lösungen (u.a. weil sie seltener angewendet werden). Aufgrund dieser Beobachtungen empfehlen die Autoren folgendes:

- Das weitgehend privatrechtlich organisierte Normenwesen und die Erarbeitung von Planungswerkzeugen sollte deshalb von staatlicher Seite mindestens wie bisher gestützt werden. Insbesondere das Erarbeiten und à-jour Halten von Kostenkennwerten ist relativ aufwändig. Wenn möglich sollten Anreize geschaffen werden, damit die Nutzenden ihre Erfahrungen und ihre internen Kostenkennwerte wieder zurückspeisen.
- Die Entwicklung integrierter Benchmarks und integrierende Planungswerkzeuge, auf welche sowohl Architekten, technisch orientierte Planer und Kostenplaner gemeinsam zugreifen können, ist zu unterstützen (z.B. SIA 380/1 und SIA 380/4, welche mit Kostenkennwerten hinterlegt sind oder CRB-Tools, welche mit Energiebedarfstools verknüpft sind).

Technische Standards für intelligente dynamisierte Steuerungen und Regelung. Die Energieflüsse in Wirtschaftsbauten sind einer hohen Dynamik und Interaktion unterworfen. Der heutige Stand der Mess-, Sensor- und Regeltechnik könnte der Dynamik und den Interaktionseffekten durchaus Rechnung tragen, wird aber derzeit nicht oder nur sehr beschränkt angewendet. Die gebäudetechnische Regelung basiert häufig auf momentanen Schwellenwerten und nimmt selten auf übrige Gebäudetechnikbereiche und/oder auf die Trägheit des Gebäudes Bezug. Es fehlt Regelsoftware, welche die Dynamik der Gebäudephysik und vorausschauende Parameter wie die Wetterprognosen (Temperatur-, Bewölkungs- und Windprognosen) und die absehbare Gebäudenutzung (z.B. bei Gebäuden mit Publikumsverkehr) mit einbeziehen. Diesem Mangel könnte durch Regelkonzepte abgeholfen werden, welche vernetzt sind, antizipierend agieren und nicht gegen, sondern mit der Bauphysik arbeiten.

Berufliche Aus- und Weiterbildung

Im Laufe der Erhebungen der Kostendaten und der energietechnischen Kennwerte und im Kontakt mit Verbänden und Fachorganisationen war zu beobachten, dass Technik orientierte Fachpersonen oft wenig Kenntnis bzgl. Kostenkennwerten haben und umgekehrt Kosten orientierte Fachleute wenig Kenntnisse über technische Zusammenhänge haben. Zudem besteht ein Defizit an Arbeitsunterlagen und rechnergestützten Tools, welche die wesentlichen Kosten-Nutzen-Relationen ermitteln und Optimierungsansätze häufig erst ermöglichen. Um diese Defizite zu vermindern, wird die Lancierung einer intensiven und koordinierten Aus- und beruflichen Weiterbildungsoffensive empfohlen. Diese ist ansprechgruppenspezifisch auszugestalten und sollte zum Ziel haben, die Kompetenz der Angebots und

der Nachfrageseite von Bauleistungen zu stärken. Sie sind also simultan bei den verschiedenen Akteursgruppen anzusetzen:

- *Aus- und Weiterbildungsangebote*: diese sollten sowohl mehrjährige intensive Ausbildungen zum Gebäudefachingenieur (z.B. bei den Fachhochschulen) wie auch „niederschwellige", d.h. mit geringem Aufwand zu absolvierende Weiterbildungskurse umfassen.
- Bereitstellen von *spezifischen Fachpublikationen*. Das Programm RAVEL (Rationelle Anwendung von Elektrizität) der frühen 1990er Jahre kann hierbei als Vorbild und Vorlage dienen. Nebst fachlich-technischen Inhalten sollten wirtschaftliche Aspekte (Kostenkennwerte, Lebenszykluskosten- und Kosten-Nutzenbetrachtungen) einen wichtigen Stellenwert einnehmen. Ebenfalls als Vorbild zu erwähnen sind die internen Arbeits- und Planungsunterlagen „Best Practice" der Migros.
- Ergänzend zu den erwähnten Fachpublikationen sind *Arbeitsinstrumente und rechnergestützte Tools* zu entwickeln. Diese sollten einfach handhabbar sein und die Themen Kosten, Energie und Komfort abdecken. Um den Interaktionseffekten und den bauphysikalischen Gegebenheiten Rechnung zu tragen, sind sie mit parametrisierten Ergebnissen von Simulationsrechnungen zu hinterlegen. Nebst der „vorwärts" gerichteten Berechnungsweise (Inputs an technischen und wirtschaftlichen Kennwerten führen zu Kosten und Nutzenergebnissen) sollte auch die umgekehrte Fragestellung möglich sein (Benchmark-Berechnungen): wieviel mehr darf energie-effizientere Lösung kosten, damit die Mehrinvestitionen durch geringere Energiekosten rentabel sind?).
- Als Ergänzung zum klassischen Aus- und Weiterbildungsangebot und zum Beratungswesen sind örtliche, lernende Netzwerke auszubauen, wie dies im Energiemodell Schweiz als geeignetes Instrument bereits praktiziert wird.

Wenngleich in allen empfohlenen Aktivitäten die Selbstorganisationen der Wirtschaft und einzelne Unternehmungen die Initiative und die Hauptverantwortung übernehmen sollten, so mag eine öffentliche finanzielle und ideelle Unterstützung seitens des Bundes, der Kantone oder grösserer Gemeinden sehr förderlich sein, weil die diese Aktivitäten ein öffentliches Gut darstellen oder gesamtgesellschaftliche Vorteile mit sich bringen (Beschäftigung, verbesserte Exportpotentiale, ökonomische Effizienz).

Politik und Verwaltung

Im folgenden sind nur diejenigen Massnahmen aus Politik und Verwaltung erwähnt, die sich unmittelbar aus den Ergebnissen der vorliegenden Analyse ableiten lassen, nicht aber weitere auch als wichtig einzuschätzende Massnahmen wie z.B. die Internalisierung externer Kosten durch Energie-Abgaben oder Emissionszertifikate.

Vorschriften und Vollzug

Technische und bauliche Vorschriften haben sich im Gebäudebereich, insbesondere beim Neubau, als effizientes und effektives Instrument erwiesen. Indirekt entfalten Vorschriften im Neubaubereich auch eine nicht zu vernachlässigende Wirkung im Gebäudebestand, indem der induzierte technische Fortschritt auch bei Gebäude- und Anlagenerneuerungen zum Tragen kommt.

Aus umweltpolitischer Sicht sind Energiebedarf und Art des Energieträgers (nicht die Leistung) die entscheidende Grösse; denn Umweltauswirkungen beobachtet man meist proportional zum Energiebedarf. Aus dieser Sicht sind Systemlösungen (gemäss Terminologie SIA) vorzuziehen. Aus energiewirtschaftlicher Sicht ist bei der Elektrizität jedoch auch die nachgefragte Leistung von Bedeutung, besonders bei Nachfrageprofilen mit ausgeprägtem Spitzenlastcharakter, wie es bei der Gebäudekühlung der Fall ist. In vollzugstechnischer Hinsicht sind zudem spezifische Kennwerte (z.B. die installierende spezifische Leistung) einfacher zu handhaben. Entsprechend ist eine *duale Vorgehensweise* zu empfehlen, wie sie z.B. der Kanton ZH bereits anwendet und wie es wahrscheinlich in der neuen SIA 382 der Fall sein wird. Ein solches flexibles Bewilligungsverfahren kann mit Anreizen für energieeffiziente Anlagen ausgestaltet werden: unterschreitet der Bedarf einen gewissen Schwellenwert,

kann eine Anlage ohne weitere Auflagen installiert werden. Wird der Schwellenwert überschritten, wird ein Bedarfsnachweis und eine Bewilligungspflicht notwendig, wobei bedarfsbegrenzende Massnahmen für Wirtschaftsbauten (z.B. geregelter Sonnenschutz und geregelte Beleuchtung) und die Verwendung von effizienten Anlagen (Mindestanforderung an COP oder JAZ) nachzuweisen wären.

Um zu erreichen, dass bestehende Gebäude und Anlagen Im Re-Investitionszyklus sachgemäss erneuert werden, könnte als subsidiäres Instrument eine Erneuerungspflicht in Erwägung gezogen werden, deren genaue Modalitäten jeweils zu spezifizieren sind (Kriterien, Fristen). Erfahrungen zu einzelnen Anlagen (z.B. Kesseln) liegen mit positiven Ergebnissen vor. Gebäudeseitig könnten Grossbezüger (aus Vollzugsaufwandsgründen) erfasst werden, deren spezifischer Energiebedarf markant über dem Durchschnitt liegt. Innerhalb einer gewissen Frist hätten die Unternehmen bzw. Gebäudebesitzer nachzuweisen, dass der Energiebedarf bis zum Zeitpunkt t oder als Mittelwert über einen gewissen Zeitraum auf ein vorgegebenes Niveau reduziert wird. Beispiele für solche Vorgehensweisen werden in ähnlicher Form von den Kantonen ZH (Grossverbraucher-Modell) und GE (VHKA-Pflicht bei hohem spezifischem Bedarf bzw. VHKA–Befreiung bei zugesicherter Sanierung) bereits umgesetzt. In der Stadt Zürich wird das Grossverbraucher-Modell zudem mit finanziellen Anreizen seitens des EWZ verknüpft (10% Preisnachlass bei Erreichen des Effizienzziels).

Gesetzgebungen und Verordnungen sind - wenn immer möglich - schweizweit zu koordinieren. Die Mustervorschriften der Kantone mit ihrem modulbasiertem Aufbau sind ein diesbezüglich taugliches Instrument. Damit kann den unterschiedlichen Voraussetzungen in den verschiedenen Kantonen bzgl. Vollzugskapazitäten und Zusammensetzung des Gebäudepark Rechnung getragen werden.

Forschung und Entwicklung

Aufgabe von Forschung und Entwicklung sollte es sein, die Zusammenhänge zwischen Wärmeschutz, internen Lasten, Gebäudetechnik und kostengünstigen Lösungen, die in dieser Arbeit mit aufwändigen Simulationsrechnungen erstellt wurden, in einfache, schnelle Planungs-Tools umzugiessen.

Die bisherigen energiewirtschaftlichen Modelle zur Projektion des zukünftigen Energiebedarfs beachten zu wenig explizit den Komfortaspekt, gegeben die steigenden internen Wärmelasten und externen Lasten durch höhere Belegungsdichte, Büroautomation und höhere Verglasungsanteile, die tendenziell steigenden Aussentemperaturen (Klimawandel) und die zunehmenden Komfortansprüche von Gebäudenutzern und gewünschte Produktivitätsfortschritte privater und öffentlicher Arbeitgeber.

Von den Gebäudetechnikbranchen näher zu untersuchen und weiter zu entwickeln sind insbesondere funktionsübergreifende Regelkonzepte (Tageslichtnutzung, Blend-, Wärme- und Überhitzungsschutz integrierend, u.U. dezentral agierend) und ebensolche Fassadenkonzepte. Zu nennen sind insbesondere variable und stärker selektive Flächen, welche blendfreie und natürlich ausgeleuchtete Arbeitsplätze mit uneingeschränktem Blickkontakt nach außen ermöglichen (z.B. mittels Kombination von Tageslichtlenkungselemente mit elektrochrome Verglasungen, vgl. z.B. Häusler und Berg, 2002) und die genannten Schutzfunktionen trotzdem wahrnehmen, um damit eine hohe thermische Behaglichkeit bei gleichzeitig hoher Energieeffizienz zu ermöglichen.

Näher zu untersuchen sind auch die Zusammenhänge zwischen thermischem (Dis-)Komfort und Beleuchtungsqualität auf Gesundheit und Produktivität der Gebäudenutzenden, um in einem zweiten Schritt Beeinträchtigungen und Verbesserungen ökonomisch zu quantifizieren.

8 Literatur

Aebischer, B. et al. (1996); „Perspektiven der Energienachfrage des tertiären Sektors für Szenarien I bis III 1990-2030“, Forschungsgruppe Energieanalysen ETH Zürich mit Beiträgen von Amstein + Walthert, i.A. BFE, Bern.

Aebischer, B. und Spreng, D. (1999): „Veränderung 1990-1998 des Energieverbrauchs in der Verbrauchergruppe Gewerbe, Landwirtschaft, Dienstleistungen (GLD): Analyse ex-post, ETH Zürich, i.A. BFE, Bern.

Aebischer, B., Schwarz, J., ETH Zürich, 1998. Perspektiven der Energienachfrage des tertiären Sektors für Szenarien I bis III – Dokumentation zur Studie. Zürich.

Altenburger, A., Leibundgut, H. et al. (2006): „Lüftungseffizienz und Physiologie“, Reihe z.B., Nr. 34, Amstein+Walthert (Hrsg.), Zürich

Bally, B., Busin, U. (2001). "Kostenvergleich Holzfeuerung-Oelfeuerung – Entwicklung eines Expertensystems zum Vergleich von Wärmegestehungskosten von Holzfeuerungen mit Oelfeuerungen. Ambio i.A. Eidg. Forstdirektion, Zürich.

Basler und Hofmann (1992): „Energiesparpotenziale und Energiesparkosten im Raumwärme und Warmwasserbereich – Teil 1: Fossil beheizte Wohn- und Dienstleistungsbauten“, i.A. BFE, Bern.

Baumgartner, Th. (2003): „Effiziente Klimaanlagen -Praxis- Erfahrungen“ Unterlagen zum Vortrag gehalten am EnergiePraxis-Seminar Herbst 2003, www.energie.zh.ch.

BFE (2003): "Wärmeschutz bei Wohnbauten - Kosten und Nutzen", Bundesamt für Energie (Hrsg.), Bern, 2003.

BFE (2002): „Kombinierte Kälte- und Wärmeerzeugung“, Energieinnovation Nr. 3 (Reedition), energieschweiz (Hrsg.), Bern

Bradke, H., Rouvel, H., u.a. (2003): Datenbank des Modell IKARUS. Bereich Industrie und Kleinverbrauch. Fachinformationszentrum Energie, Forschungszentrum Karlsruhe.

Brögli, M. (1999): „Energiepotenzialabschätzung für Geothermie in der Schweiz“, Semesterarbeit in Energietechnik, ETH/PSI, Zürich/Villigen.

Brunner, C.U. et al. (2002): „Gebäude mit hohem Glasanteil – Behaglichkeit und Energieeffizienz“, SIA D0176, Zürich.

Brunner, C.U., Steinmann, U., Jakob, M. (2006): „Adaptation of Commercial Buildings to Hotter Summer Climate in Europe“, Proceedings of the Conference Improving Energy Efficiency in Commercial Buildings (IEECB'06), 26 - 27 April 2006, Frankfurt.

CELMA (Hrsg.) (undatiert): „Leitfaden für die Anwendung der Richtlinie 2000/55/EG über Energieeffizienzanforderungen an Vorschaltgeräte für Leuchtstofflampen", Brüssel.

Dehoff, P. (2005): „Zum Stand der Innenraumbeleuchtung - Ein Überblick unter besonderer Beachtung der Beleuchtung von Bildschirmarbeitsplätzen“, zu beziehen bei ERGONOMIC Institut für Arbeits- und Sozialforschung (www.cyberlux.de), Berlin

Dierks, G. (2003): „Abgerechnet wird zum Schluss - Hybride Trockenkühlung: ein modernes und wirtschaftliches Rückkühlverfahren“, Process 5 –2003, 48 – 50, Karlsruhe.

Dierks, G. (): Rückkühlsysteme im Kältekreislauf - Technisch-wirtschaftliche Bewertung verschiedener Varianten“, Kälte Klima Aktuell (KKA), 8 – 19, Beneke.

Dorer, V., Pfeiffer, A. et al (2002). „Energieeffiziente und bedarfsgerechte Abluftsysteme mit Abwärmenutzung (ENABL)“, EMPA, Zürcher Hochschule Winterthur, Gröbly Fischer Architekten i.A. Bundesamt für Energie, Bern.

Dott, R., Afjei, Th. et al. (2006): „Heizen & Kühlen mit erdgekoppelten Wärmepumpen“, 14. Schweizerisches Status-Seminar 2006 – Energie und Umweltforschung im Bauwesen, brenet/EMPA, Luzern/Dübendorf.

Eicher, H., Ott, W., Rigassi, R. (2003) Technologie-Monitoring, Eicher+Pauli, econcept i.A. des Forschungsprogramms EWG des Bundesamts für Energie (BFE), Bern.

Eicher und Pauli (2004) Website „www.bestellerkompetenz.ch" Stand gem. Impressum: 25.02.2004.

EnFK/energieschweiz (2006): „Arbeiten und Wohnen im Sommer – alles rund ums Kühlen" zu beziehen unter www.e-kantone.ch oder bei Bundesamt für Bauten und Logistik, Bestell-Nr.: 805.110.d.

EQUA Simulation AB (2002): „IDA Indoor Climate and Energy 3.0", EQUA Simulation Technology Group, Sundbyberg, Sweden

Frank, Th. (2005): „Climate change impacts on building heating and cooling energy demand in Switzerland", Energy and buildings, 37, 11, 1175-1185.

FWS (2006) „Downloads – Statistiken". Website der Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz (FWS), Stand gemäss Impressum 10.5.06.

Ganter, U., Hirschberg, S., Jakob, M. (1999). "Methoden und Analysen - Grundlagen sowie ökologische und ökonomische Vergleiche von zukünftigen Energieversorgungsvarianten der Schweiz", Schlussentwurf, Beitrag zum VSE-Projekt "Dezentral - Möglichkeiten, Grenzen und Auswirkungen einer verstärkt dezentralen Stromproduktion aus nicht erneuerbaren Energieträgern", Arbeitsmaterial, PSI, Villigen.

Gasser, S. (2006): „Neues Berechnungsmodell für die Beleuchtung in der SIA-Norm 380/4", 14. Schweizerisches Status-Seminar 2006 – Energie und Umweltforschung im Bauwesen, bre-net/EMPA, Luzern/Dübendorf.

Gasser, S. (2005): „Neue Technologien: Halogen-Metalldampflampen" Vortragsunterlagen Energie-Apero Luzern.

Gasser, S., Simon, M. (2005): „Beleuchtungsplanung in Gebäuden der Stadt Zürich nach SIA 380/4-Minergie – Jahresbericht 2004", Amt für Hochbauten der Stadt Zürich, Zürich

Gasser, S. (2005): „Beleuchtung im Wandel" Unterlagen zum Vortrag gehalten am EnergiePraxis-Seminar Frühling 2005, www.energie.zh.ch.

Gasser, S. (2003). Anwendungsinstrument zu SIA 380/4 Elektrische Energie im Hochbau: Teil Beleuchtung Minergie-Nachweis für Beleuchtung Handbuch zur Excel-Anwendung etool_licht.xlt, Version 3.0, 1.6. 2003, eTeam GmbH i.A. EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie (BFE), Konferenz der Kantonalen Energiedirektoren, SIA, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten- Verein, Verein Minergie (AMI), Amt für Hochbauten der Stadt Zürich. www-380.ch, www.energycodes.ch.

Hancock, P.A., and Ionnnis Vasmatzidis (1998): „Human occupational and performance limits under stress: the thermal environment as a prototypical example", ERGONOMICS, 1998, VOL. 41, NO. 8, 1169 – 1191.

Häusler, T., Berger, U (2002): "Determination of thermal comfort and amount of daylight", 10th International Conference "AIR CONDITIONING, AIR PROTECTION & DISTRICT HEATING", Szklarska Poreba, Juni.

Hess-Odoni, U. (2006): „Kostenprognosen – Verschärfung der Haftung der Planer", tec21 35/2006

Hoffmann, C., Voss, K. (2005): Zur Ermittlung des Energiebedarfs für Kunstlicht in Bürogebäuden – Diskussion von Messresultaten, Bauphysik 27 (2005), Heft 4

Huber, A., Good, J., et al. (2001): „Gekoppelte Kälte- und Wärmeerzeugung mit Erdsonden", i.A. Forschungsprogramm UAW, Bundesamt für Energie, Bern

Jakob, M. Menti, U.P., Grenzkosten bei forcierten Energie-Effizienzmassnahmen und optimierter Gebäudetechnik für Wirtschaftsbauten (Industrie-, Gewerbe- und Dienstleistungsbauten – Projektbeschrieb vom 11. Juli 2003. CEPE und A+W, Zürich.

Jakob, M., Jochem, E., Christen, K., 2002, „Grenzkosten bei forcierten Energieeffizienzmassnahmen bei Wohngebäuden", i.A. des Forschungsprogramms EWG des Bundesamts für Energie (BFE), zu beziehen bei BBL, 3003 Bern, Bestellnr. 805.054d oder www.ewg-bfe.ch, www.cepe.ethz.ch.

Jakob, M., Jochem, E. (2003), "Erneuerungsverhalten im Bereich Wohngebäude", Zürich, 2003.

Jochem, E., Gruber, E. u.a. (2003): „Energie Modell Hohenlohe. Phase I", ISI-Bericht Karlsruhe, April.

Jochem, Jakob (Hrsg.) "Energieperspektiven und CO2-Reduktionspotenziale in der Schweiz", vdf-Verlag der ETH Zürich, Zürich, 2004.

Jochem, E., Madlener, R. (2004). „The Forgotten Benefits of Climate Change Mitigation: Innovation, Technological Leapfrogging, Employment, and Sustainable Development", OECD Working Paper ENV/EPOC/GSP(2003)16/FINAL, OECD, Paris.

Jochem, E.[mj87], Alberti, K. Kristof, K. et al. (2005): „Studie zur Konzeption eines Programms für die Steigerung der Materialeffizienz in mittelständischen Unternehmen. Potential- und Hemmnisanalyse", Fraunhofer ISI, Karlsruhe, Arthur D. Little, Wiesbaden, Wuppertal Institut, Wuppertal

Jochem, E. et al. (2003) „CO_2-Reduktionspotenzial Erdgas, Referenz-Szenario und Nachhaltigkeit-Szenario I und II", i.A. FOGA, VSG, Zürich.

Jochem, E. review editor, (2001) „Costing Methodologies, Chapter 7" in: Mitigation, Working Group III, Third Assessment Report of the IPCC, Cambridge University Press.

Kegel, B. (2005). Gebäudekühlung- Was bringt die Zukunft? Unterlagen zum Vortrag vom 16. November 2005 am Energieapero beider Basel, Muttenz.

Koschenz, M. Lehmann, B. (2004). Thermoaktive Bauteilsysteme tabs mit PCM. In: ZEN-Info Nr. 9, EMPA, Dübendorf.

Landert, R. (2005). „Gebäudekühlung - Wer die Wahl hat...", Unterlagen zum Vortrag vom 16. November 2005 am Energieapero beider Basel.

Leibundgut, H., Mielebacher, R. (2004): „Bauteilaktivierung: Raus aus dem Beton", Reihe z.B., Nr. 25, Amstein+Walthert (Hrsg.), Zürich

Ménard, M., Seidinger, W. (2006): „SIA-380/4-Tool Klimatisierung und SIA-Merkblatt 2024", 14. Schweizerisches Status-Seminar 2006 – Energie und Umweltforschung im Bauwesen, brenet/EMPA, Luzern/Dübendorf.

Menti, U.P. (1999): „'Standby-Verbrauch' von Dienstleistungsgebäuden - Verbrauchsmessungen an 32 Objekten", Amstein+Walthert im Auftrag des Bundesamtes für Energie, Bern.

Migros-Genossenschafts-Bund (2005): „Best Practice", zahlreiche Arbeits- und Planungsgrundlagen zuhanden der einzelnen Filialen und Gebäudebewirtschafter, Zürich.

Minergie (Hrsg.) (undatiert): „Effiziente Bürobeleuchtung – Die bessere Stehleuchte", Bern.

Nipkow, J. (2003): „Kleinstklimageräte", Unterlagen zum Vortrag gehalten am EnergiePraxis-Seminar Herbst 2003, www.energie.zh.ch .

Nipkow, J. (2004): „Ratgeber T5-Adapter – Stand 3/2004", SAFE, Zürich.

Nitz, Th. (2006): „Energiesparpotential durch bedarfsabhängige Druckregelung bei VAV Systemen", 14. Schweizerisches Status-Seminar 2006 – Energie und Umweltforschung im Bauwesen, brenet/EMPA, Luzern/Dübendorf.

Ostertag, K., (2003): „No-regret potentials in Energy Conservation" Technology, Innovation and Policy, Physika Verlag .

Ott, W., Baur, M., Jakob, M. (2006) „Direkte und indirekte Zusatznutzen bei energie-effizienten Wohngebäuden" econcept, CEPE, i.a. EWG/BFE, Bern.

Prochaska, V. (2006): „Kälteerzeugung mit höchster Energieeffizienz", Vortragsunterlagen zur Fachveranstaltung Forum Energie Zürich vom 14. März, Zürich

Püntener, T. (2004): „Merkblatt Arbeiten und Wohnen im Sommer – alles rund ums Kühlen" Unterlagen zum Vortrag gehalten EnergiePraxis-Seminar Frühling 2004.

Pfeiffer, A. (2006): „MICS – Passive Raumkühlung mit PCM", 14. Schweizerisches Status-Seminar 2006 – Energie und Umweltforschung im Bauwesen, brenet/EMPA, Luzern/Dübendorf.

Raetz, M. (2002): „Die Hybriden rechnen sich" chemie Produktion, September, 48 – 49.

Seidinger, W. (2003) „SIA 380/4, Elektrische Energie im Hochbau Anwendungsinstrument zu SIA 380/4, Teil Lüftung/Kühlung/Befeuchtung, Minergie-Nachweis für Lüftung / Kühlung / Befeuchtung, Version 2.2, 11.11. 2003", Lemon Consult GmbH, i.A. SIA, SWKI / Minergie / EnergieSchweiz / Konferenz der Kantonalen Energiedirektoren, Amt für Hochbauten, www.380-4.ch und www.energycodes.ch. .

Schadegg, E., Baggi, P. (2006): „ Studie zu Klimaanlagen und Raumkonzepten in Bürogebäuden im Kanton Zürich - Vernehmlassung des Schlussberichts", Forum Energie Zürich und Grünberg+Partner i.A. des Kantons Zürich (AWEL)und der Stadt Zürich (UGZ) .

Schadegg, E. (2006): „Stand der Technik bei Büro Lüftungsanlagen" Unterlagen zum Vortrag gehalten am EnergiePraxis-Seminar Frühling 2006, www.energie.zh.ch.

Schröder, R. (2005) „Erfolgsfaktoren im Fensterbau", in: Tagungsunterlagen „windays 2005 – Treffpunkt der Fensterbranche" Hochschule für Architektur, Bau und Holz (HSB), Biel .

Schwarz, D. (2006): „Vom Solarhaus zur Solarcity", 14. Schweizerisches Status-Seminar 2006 – Energie und Umweltforschung im Bauwesen, brenet/EMPA, Luzern/Dübendorf.

SIA 380/4 (2005): „Elektrische Energie im Hochbau", Entwurf 6/05 zuhanden der KHE vom 22. August 05, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (Hrsg.), Zürich

SIA 380/4 (2005): „Elektrische Energie im Hochbau", Entwurf 5/05 für 2. Vernehmlassung, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (Hrsg.), Zürich

SIA 382/1 (2004): „SIA 381/1 – Lüftungs- und Klimaanlagen – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen", Entwurf zur Vernehmlassung, SIA, Zürich.

SWKI 95-3 (1995): „Richtlinie 95-3, Jährlicher Energiebedarf von lüftungstechnischen Anlagen", SWKI 11/2001, Schönbühl.

RAVEL (1992): „Strom rationell nutzen – Umfassende Grundlagen und praktischer Leitfaden zur rationellen Verwendung von Elektrizität", Bundesamt für Konjunkturfragen (Hrsg.), vdf Verlag, Zürich.

Roeder, G. (2004): „Gebäudeautomation: Im Spannungsfeld zwischen Trends und Kosteneffizienz", Reihe z.B., Nr. 24, Amstein+Walthert (Hrsg.), Zürich

Tödtli, J., Gwerder, M. et al. (2006): „TABS-Control – Regelung und Steuerung von thermoaktiven Bauteilsystemen", 14. Schweizerisches Status-Seminar 2006 – Energie und Umweltforschung im Bauwesen, brenet/EMPA, Luzern/Dübendorf.

Tschudy, D., Schrader, B. (2005): „Standort LED", Reihe z.B., Nr. 28, Amstein+Walthert (Hrsg.), Zürich

Uetz, R. (2005): „Energieeffizienz statt CO2-Abgabe", Reihe z.B., Nr. 29, Amstein+Walthert (Hrsg.), Zürich

Weber, L., Menti, U., Keller, I. (1999) „Energieverbrauch in Bürogebäuden" ETH Zürich, Amtstein + Walthert AG, i.A. PSEL, BFE u.a., Bern.

Weber, L. (2002): Weber, L. (2002). Energie in Bürogebäuden: Verbrauch und energierelevante Entscheidungen, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich.

Wellig, B., Kegel, B. et al. (2006): „Verdopplung der Jahresarbeitszahl von Klimakälteanlagen durch Ausnützung eines kleinen Temperaturhubs", Ernst Basler + Partner, Zürich, i.A. Forschungsprogramm UAW, Bundesamt für Energie, Bern

Wellig, B. (2005): „Verdoppelung der Arbeitszahl von Wärmepumpen und Kälteanlagen mit kleinem Temperaturhub", FEZ Event-6, 5.4.2005, Zürich

WWF (2006). „Klimaschutz spart Geld beim Wohnen" inkl. Berechnungstool mit Standardwerten „Vergleich der Jahreskosten von Heizungssystemen (mit Warmwasserversorgung)", www.wwf.ch.

Zimmermann, M. (2003): „Handbuch der passiven Kühlung", Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.

9 Anhang

9.1 EKZ als Funktion der Gebäudegrösse

Der ungewichtete Mittelwert der in Weber, 2001 untersuchten Stichprobe liegt bei 236 MJ/m^{2}a, das mit der EBF gewichtete Mittel bei 329 MJ/m^{2}a (Weber, 2001, S. 118). Dies deutet darauf hin, dass die grossen Gebäuden eine höhere EKZ aufweisen als die kleineren. Dies wird durch Weber (2001) bestätigt. Teilweise wird die höhere EKZ_{el} bei grösseren Gebäuden durch den höheren Anteil Lüftung/Klimatisierung erklärt, aber nicht allein dadurch (Weber, 2001, S. 132).

Wenn die EKZel des Samples ungewichtet gemittelt werden, erhalten die kleineren Gebäude innerhalb des Samples eine zu hohe Bedeutung. Weil die grossen Gebäude anzahlmässig im Sample übervertreten sind, erhalten die grossen Gebäude beim gewichteten Mittel eine zu hohe Bedeutung (im Vergleich zur Grundgesamtheit). Es ist zu vermuten, dass die ungewichtete mittlere Energiekennzahl des Samples näher bei der Grundgesamtheit des Bürogebäudebestandes liegt als die mit den EBF gewichtete EKZ des Samples (korrekt wäre, das Sample EBF-gewichtet zu mitteln und die grossen Gebäude gemäss ihrer Übervertretung herunter- und die kleinen Gebäude herauf zu gewichten).

Die Häufigkeitsverteilung hat ein Maximum zwischen 100 und 200 MJ/m^{2}a und bei ca. 70'% der Gebäude liegt die EKZel zwischen 100 und 300 MJ/m^{2}a. Ein geringer Teil der Werte liegt unter 100 MJ/m^{2}a bzw. über 300 MJ/m^{2}a.

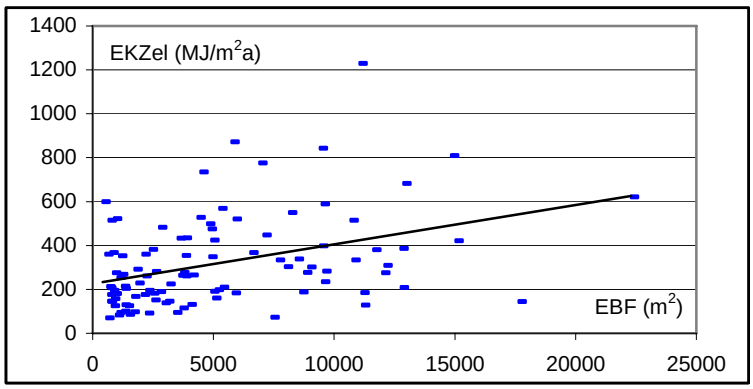
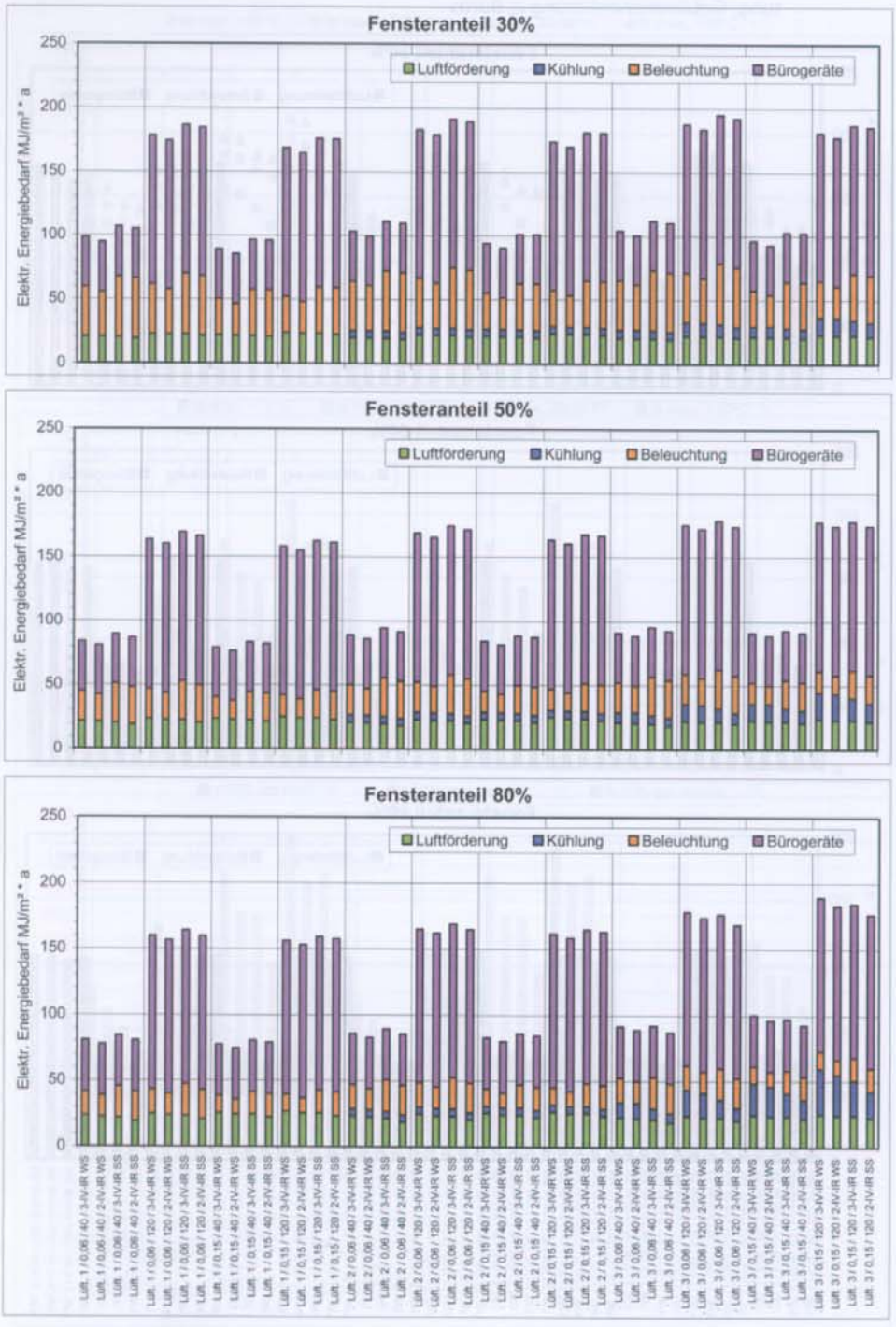


Abbildung 105 Energiekennzahlen Elektrizität des Samples „100 Bürogebäude“ aus (Weber, 2001)

9.2 SIA Dokumentation D 0176

Abbildung 106 (nachfolgende Seite) SIA D0176: Elektrischer Energiebedarf für Luftförderung, Kühlung, Beleuchtung und Bürogeräte in Abhängigkeit des Fensteranteils, der energetischen Kennwerte von Fenster und Sonnenschutz sowie des Luftwechsel/-Kühlungskonzeptes (Legende: Luftwechsel-Kühlung / kombinierter g-Wert von Sonnenschutz und Fenster bei geschlossenem Sonnenschutz / interne Last in W/m^2 / Glastyp der Fenster. Lüft. 1: Mechanische Lüftung ohne Kühlung, 30 m^3 / (h Person), 7 – 19 Uhr, Nacht- oder Wochenendkühlung. Lüft. 2: wie Lüft. 1, aber Kühlung der Zuluft auf 18°C. Lüftung 3: wie Lüftung 2, zusätzlich Umluftkühlung mit max. 20 W/m^2 möglich.

Bild 11-10 Spezifischer Verbrauch elektrische Energie total: Luftförderung, Kühlung, Beleuchtung, Bürogeräte; Gebäudeorientierung a; Büros



Quelle: SIA Dokumentation D 0176: Gebäude mit hohem Glasanteil – Behaglichkeit und Energie-Effizienz

9.3 Modelltechnische Spezifikationen

Die Gebäudesimulationen werden mit dem Programm IDA ICE durchgeführt. Die gebäudephysikalische Funktionsweise bzw. Modellbildung ist ähnlich wie diejenige des bekannteren DOE 2. IDA ICE ist jedoch wesentlich benutzerfreundlicher, sowohl was die Bedienung als auch was die Möglichkeit für Anpassungen betrifft, um zusätzliche Effekte zu simulieren.

9.3.1 Behaglichkeit

Um realistische Aussagen bzgl. PPD zu erhalten, wird berücksichtigt, dass die Bekleidung der Gebäudenutzenden von der Aussentemperatur abhängig ist. Die entsprechenden Annahmen sind in Abbildung 107 dokumentiert.

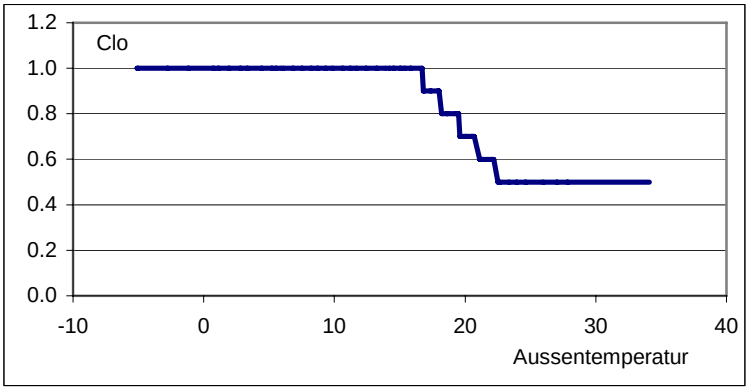


Abbildung 107 Bekleidungsfaktor (Clo-Werte) in Abhängigkeit der Aussenlufttemperatur

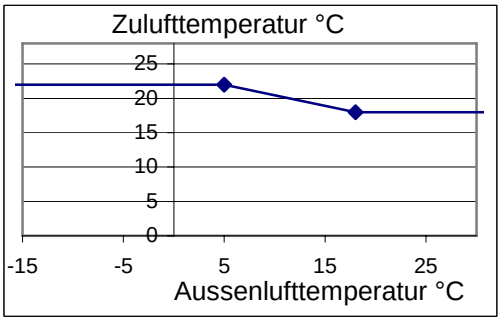


Abbildung 108 Konditionierung der Zuluft in Abhängigkeit der Aussenlufttemperatur

9.3.2 Positionierung der Personen innerhalb des Raums.

Die Positionierung der Personen innerhalb der Räume ist aus folgenden zwei Gründen relevant:

- Berechnung des Bedarfs an Kunstlicht durch die Beleuchtung (je tiefer im Raum die Person platziert ist, desto eher ist an kritischen Tagen das Tageslicht nicht mehr ausreichend und entsprechend wird die Beleuchtung notwendig).

- Berechnung der Behaglichkeit (PPD): Je tiefer im Raum die Person platziert ist, desto geringer ist der Strahlungseinfluss des Fensters auf die Behaglichkeit der Person. Unterschiede zwischen verschiedenen Positionierungen sind vor allem den Winter zu erwarten (siehe Abbildung 109).

Um möglichst realistische Aussagen bzgl. Beleuchtungsbedarf UND bzgl. Behaglichkeit zu erhalten, sollte der Lichtbedarf aufgrund einer tiefer im Raum liegenden Position und die Behaglichkeit aufgrund einer nahe am Fenster liegenden Position berechnet werden. IDA ICE bietet diese Unterscheidung in der Standardversion nicht. Evtl. wird für das hier durchgeführte Projekt von der HTA Luzern eine Anpassung vorgenommen.

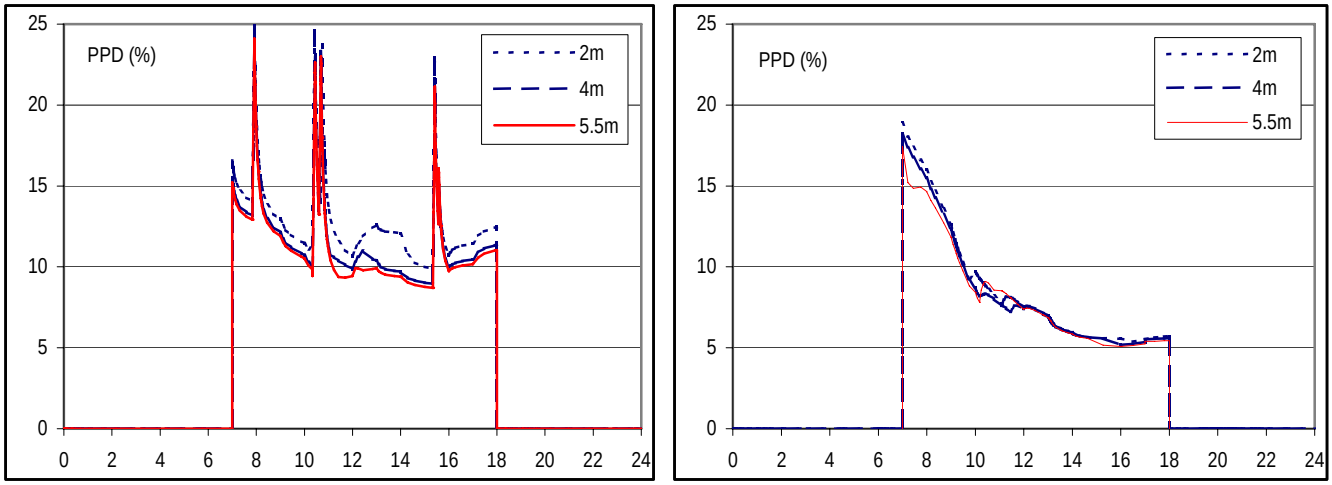


Abbildung 109 PPD in Abhängigkeit der Positionierung innerhalb des Raum (Distanz ab Fenster) für einen typischen Wintertag (linke Abbildung) und für einen typischen Sommertag (rechte Abbildung)

9.3.3 Luftwechsel

Der Luftwechsel von Gebäuden ohne Lüftungsanlagen wird mittels Fugenöffnungen simuliert. Während der Nutzungszeit können einzelne Stosslüftungen (z.B. 4 mal 10 Minuten pro Tag) simuliert werden. Simulationstechnisch und bzgl. Interpretation der resultierenden PPD hat dies jedoch zwei Nachteile: Erstens beeinflussen während der Öffnungszeiten der Fenster die eintretenden Luftströme und deren Temperaturen die PPD-Werte negativ. In der Praxis wird es jedoch so sein, dass die Nutzenden die Fenster nur so lange offen halten werden, wie sie sich noch wohl fühlen, so dass die berechneten Werte die Realität wohl überschätzen. Und in grösseren Büroräumen findet ohnehin kaum ein gleichzeitiges Lüften statt, sondern eine Überlagerung. Zweitens sind Stossöffnungen wesentlich rechenzeitintensiver. Aus diesen beiden Gründen werden die Fensteröffnungen auf die ganze Nutzungszeit während des Tages „verteilt", was energetisch im Wesentlichen äquivalent zu expliziten Stosslüftung ist und bzgl. Komfortauswertung zudem realistischer.

9.3.4 Zeitlicher Verlauf der Raumbelegung

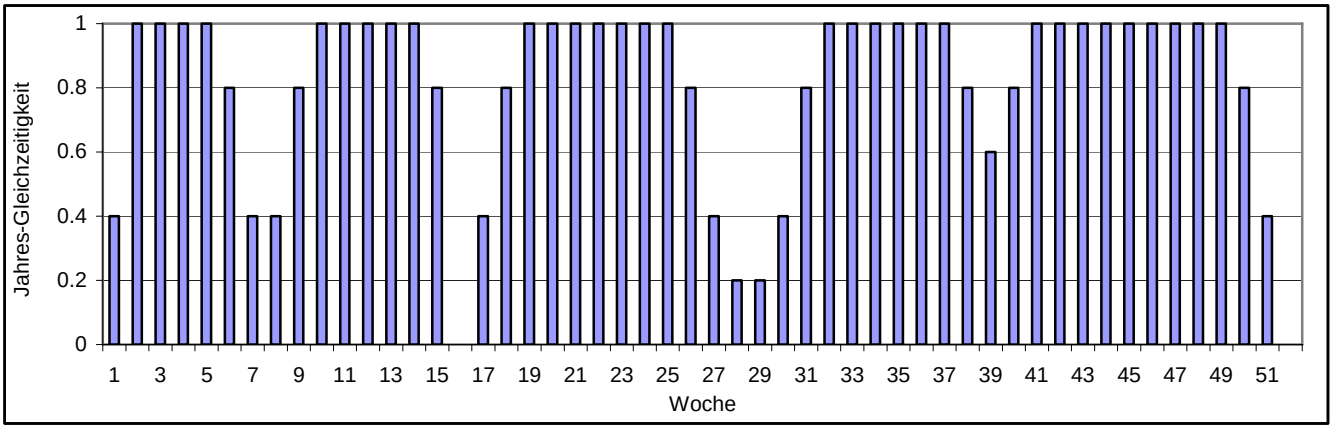


Abbildung 110 Verlauf der Jahresgleichzeitigkeit bei Bürogebäuden (SWKI 1.1) Quelle: SWKI 95-3

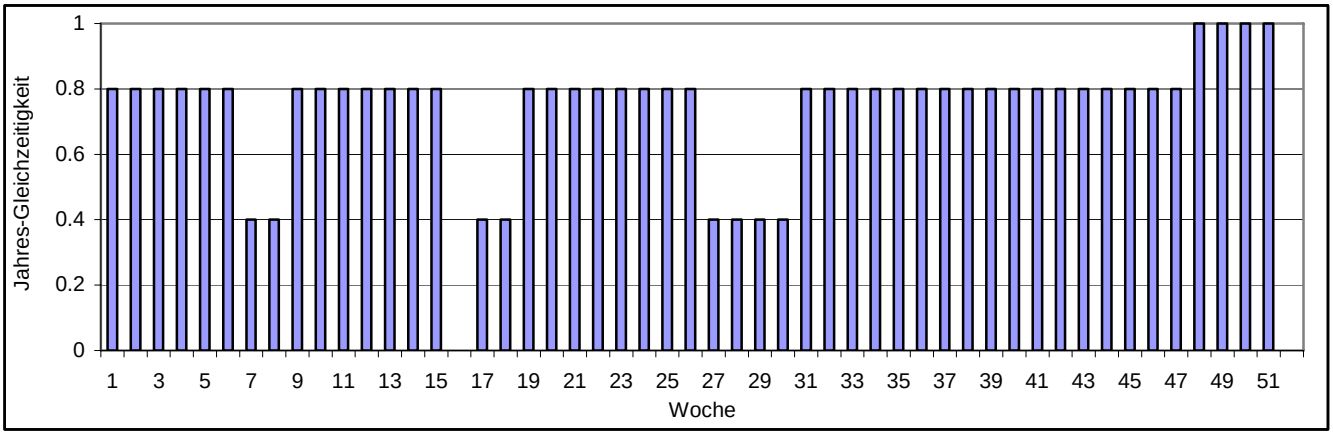


Abbildung 111 Verlauf der Jahresgleichzeitigkeit bei Einkaufszentren Quelle: (SWKI 95-3)

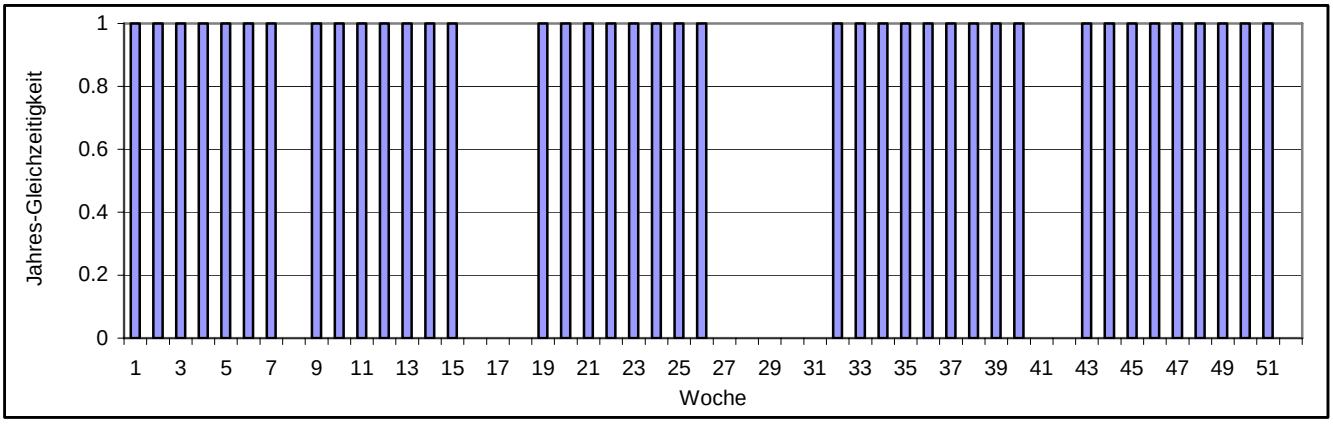


Abbildung 112 Verlauf der Jahresgleichzeitigkeit bei Schulen (Quelle: SWKI 95-3)

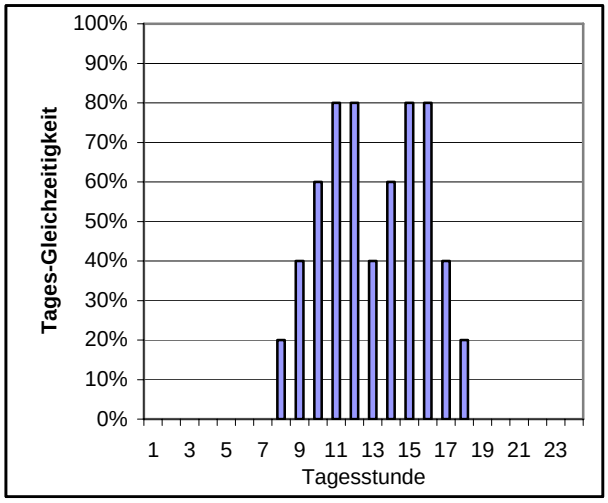


Abbildung 113 Gleichzeitig der Belegung der Räume gemäss SWKI in Bürogebäuden (Quelle: SWKI 95-3)

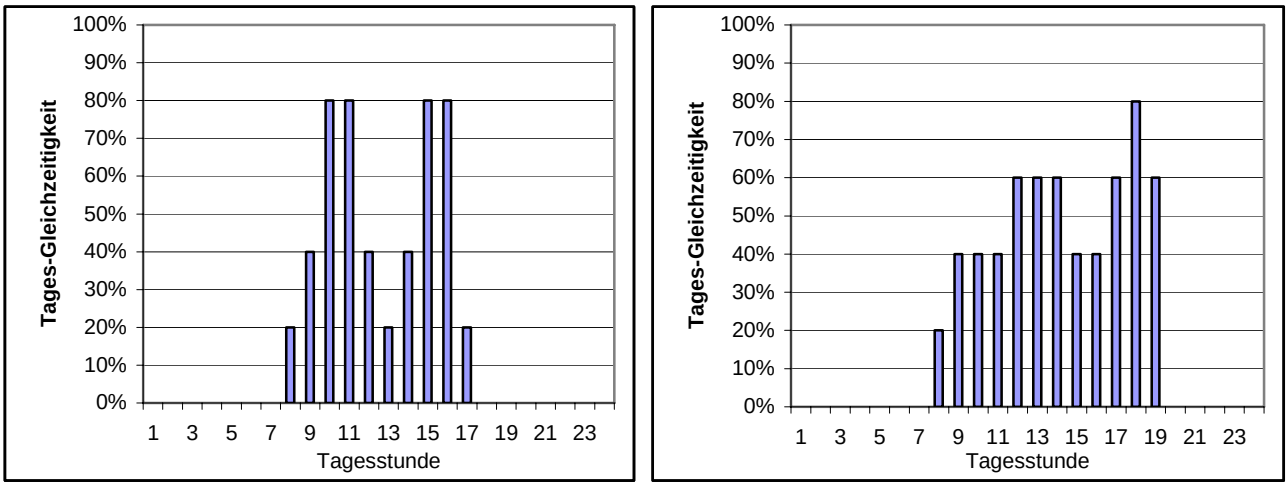


Abbildung 114 Gleichzeitig der Belegung der Räume gemäss SWKI bei Schulen (linke Abbildung) und bei Einkaufszentren (rechte Abbildung) Quelle: SWKI 95-3

9.4 Anhang zum Kapitel 3.3

Auf den folgenden drei Seiten sind Detailergebnisse der im Kapitel 3.3 beschriebenen Simulationsrechnungen dokumentiert.

Luftwechsel-Kühlung			LWK0	LWK1	LWK6.1	LWK6.2	LWK2.1	LWK2.2	LWK2.3	LWK2.4	LWK2.5	LWK2.6	LWK3.5	LWK3.6	LWK4.3	LWK5
Beschrieb			LW natürlich hoch, keine Kühlung	LW natürlich, keine Kühlung	LW mechanisch, ohne WRG, keine Kühlung		LW mechanisch, mit WRG, keine Kühlung						LW mechanisch, mit WRG, Kühlung Zuluft		LW mechanisch, mit WRG, Kältevert. hydr., Kühlelem., inkl. Zuluft	LW natürlich, Kühlung dezentrale FanCoils
Betriebszeiten Lüftung					24h/d	7 - 19	24h/d	7 - 19	24h/d	24h/d	7 - 19	7 - 19	7 - 19	7 - 19	7 - 19	
Wirkungsgrad WRG							65%	65%	80%	90%	80%	90%	80%	90%	80%	
So.Schutz	U Wand	Fenster														
Aussen 1	0.83	1		-	169	60	147	53	-	-	53	53	52	52	52	7
		2		-	169	60	147	53	147	-	53	53	52	-	53	7
		3		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		4		-	-	60	-	-	-	-	53	-	52	-	53	7
		5		-	-	-	-	-	-	-	-	-	52	-	-	-
		6		-	-	60	-	-	-	-	53	-	52	-	53	6
	0.29	1		-	169	60	-	-	-	-	53	-	52	-	-	8
		2		-	169	60	147	53	147	147	53	53	52	52	53	8
		3		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		4		-	-	-	-	53	-	-	53	53	53	-	53	8
		5		-	-	-	-	-	-	-	53	-	52	-	53	7
		6		-	-	-	-	53	-	-	53	53	52	-	53	7
	0.18	2		-	-	60	-	53	-	-	-	-	52	52	53	9
		4		-	-	-	147	53	-	147	-	53	53	52	-	-
		5		-	-	-	-	-	-	-	-	-	52	52	53	7
		6		-	-	-	-	53	-	-	-	53	52	52	53	7
Aussen 2	0.83	2		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.29	1		-	-	60	-	-	-	-	53	-	52	-	-	7
		2		-	-	60	-	-	-	-	53	-	52	-	53	8
		3		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		4		-	-	-	-	-	-	-	53	-	53	-	53	-
		5		-	-	-	-	-	-	-	53	-	52	-	53	-
		6		-	-	-	-	-	-	-	53	-	52	-	53	-
	0.18	2		-	-	-	-	-	-	-	-	-	52	-	-	8
		4		-	-	-	-	-	-	-	-	-	53	-	-	-
		5		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7
		6		-	-	-	-	-	-	-	-	-	52	-	-	7

Tabelle 93 Elektrizitätsbedarf für Lüftung (MJ/m²a) für das Stockwerk des Modellgebäudes, gemäss Definition Tabelle 11

Luftwechsel-Kühlung			LWK0	LWK1	LWK6.1	LWK6.2	LWK2.1	LWK2.2	LWK2.3	LWK2.4	LWK2.5	LWK2.6	LWK3.5	LWK3.6	LWK4.3	LWK5
Beschrieb			LW natürlich hoch, keine Kühlung	LW natürlich, keine Kühlung	LW mechanisch, ohne WRG, keine Kühlung		LW mechanisch, mit WRG, keine Kühlung						LW mechanisch, mit WRG, Kühlung Zuluft		LW mechanisch, mit WRG, Kältevert. hydr., Umluftkühler, inkl. Zuluft	LW natürlich, Kühlung dezentrale FanCoils
Betriebszeiten Lüftung					24h/d	7 - 19	24h/d	7 - 19	24h/d	24h/d	7 - 19	7 - 19	7 - 19	7 - 19	7 - 19	
Wirkungsgrad WRG							65%	65%	80%	90%	80%	90%	80%	90%	80%	
So.Schutz	U Wand	Fenster														
Aussen 1	0.83	1		-									6	6	12	50
		2		-									6	-	13	52
		3		-									-	-	-	-
		4		-									6	-	14	51
		5		-									6	-	-	-
		6		-									6	-	13	45
	0.29	1		-									6	-	-	55
		2		-									6	6	17	60
		3		-									-	-	-	-
		4		-									6	-	19	60
		5		-									6	-	14	49
		6		-									6	-	17	53
	0.18	2		-									6	6	18	62
		4		-									6	6	-	-
		5		-									6	6	15	50
		6		-									6	6	19	55
Aussen 2	0.83	2		-									-	-	-	-
	0.29	1		-									6	-	-	52
		2		-									6	-	16	57
		3		-									-	-	-	-
		4		-									6	-	18	-
		5		-									6	-	14	-
		6		-									6	-	17	-
	0.18	2		-									6	-	-	60
		4		-									6	-	-	-
		5		-									-	-	-	48
		6		-									6	-	-	53

Tabelle 94 Elektrizitätsbedarf für Kühlung (MJ/m²a) für das Stockwerk des Modellgebäudes, gemäss Definition Tabelle 11

Luftwechsel-Kühlung			LWK0	LWK1	LWK6.1	LWK6.2	LWK2.1	LWK2.2	LWK2.3	LWK2.4	LWK2.5	LWK2.6	LWK3.5	LWK3.6	LWK4.3	LWK5
Beschrieb			LW natürlich hoch, keine Kühlung	LW natürlich, keine Kühlung	LW mechanisch, ohne WRG, keine Kühlung		LW mechanisch, mit WRG, keine Kühlung						LW mechanisch, mit WRG, Kühlung Zuluft		LW mechanisch, mit WRG, Kältevert. hydr., Umluftkühler, inkl. Zuluft	LW natürlich, Kühlung dezentrale FanCoils
Betriebszeiten Lüftung					24h/d	7 - 19	24h/d	7 - 19	24h/d	24h/d	7 - 19	7 - 19	7 - 19	7 - 19	7 - 19	
Wirkungsgrad WRG							65%	65%	80%	90%	80%	90%	80%	90%	80%	
So.Schutz	U Wand	Fenster														
Aussen 1	0.83	1	137	138	139	139	139	139	-	-	139	138	138	138	138	139
		2		145	145	145	145	145	145	-	145	145	145	-	146	145
		3		163	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		4		163	-	163	-	-	-	-	163	-	163	-	163	163
		5		146	-	-	-	-	-	-	-	-	145	-	-	-
		6		163	-	163	-	-	-	-	163	-	163	-	163	163
	0.29	1		138	138	138	-	-	-	-	138	-	138	-	-	138
		2		145	145	146	145	145	146	145	146	146	146	146	146	146
		3		163	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		4		163	-	-	-	163	-	-	163	163	163	-	163	163
		5		146	-	-	-	-	-	-	146	-	145	-	146	145
		6		163	-	-	-	163	-	-	163	163	163	-	163	163
	0.18	2		146	-	146	-	145	-	-	-	-	145	145	146	146
		4		163	-	-	163	163	-	163	-	163	163	163	-	-
		5		-	-	-	-	-	-	-	-	-	145	145	146	145
		6		163	-	-	-	163	-	-	-	163	163	163	163	163
Aussen 2	0.83	2		144	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.29	1		136	-	136	-	-	-	-	136	-	136	-	-	136
		2		144	-	144	-	-	-	-	144	-	144	-	144	144
		3		162	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		4		162	-	-	-	-	-	-	162	-	162	-	162	-
		5		144	-	-	-	-	-	-	144	-	144	-	144	-
		6		162	-	-	-	-	-	-	162	-	162	-	162	-
	0.18	2		144	-	-	-	-	-	-	-	-	144	-	-	144
		4		162	-	-	-	-	-	-	-	-	162	-	-	-
		5		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	144
		6		162	-	-	-	-	-	-	-	-	162	-	-	162

Tabelle 95 Elektrizitätsbedarf für Beleuchtung (MJ/m²a) für das Stockwerk des Modellgebäudes, gemäss Definition Tabelle 11

9.5 Anhang zum Kapitel 3.4

Bauteil, Gebäudespezifi	Wert	BN1.1a	BN1.1b	BN1.1c	BN12a	BN12b	BN21a	BN21b	BN22a	BN22b	BN23a	BN23b	BB41a	BB41b	BB42a	BB42b	BB3.1a	BB3.1b	BB3.2a	BB3.2b	BB2a	BB2b	BB1.1	BB1.2	BB1.3	BB1.4
Bauweise	leicht	R	R	Test	R	R							R	R	R	R					R	R				
Bauweise	massiv						Test	Test	R	R	R	R					R	R	R	R			R	R0	R2	R2
Interne Last Geräte/Pers	hoch	R	R	T		R			R	R			R	R	R	R							R	R0		
Interne Last Geräte/Pers	tief						T	T	M5		R	R					R	R	R	R	R	R			R2	R2
Glasanteil	0.25																						R	R0	R2	R2
Glasanteil	0.35										R	R					R	R	R	R	R	R				
Glasanteil	0.50				M3	M1	Test	Test	R	R			R	R	R	R										
Glasanteil	0.80	R	R	Test	R	R																				
Fensterlüftung	FLS tagsüber			M0		M0	R0, M9	R0		M0	M14.1	M0	M7.1	M0		M0		M0		R		M0	R	R2	R2	M8.4
Fensterlüftung	FLS tagsüber und nachts			M9		M11								M10				M10		M10						M8.6
Fensterlüftung	kein FLS	R	R	T	R	R	T, R1	T	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R		R	R		R0, M11.1		R2, M11.1
Fensterlüftung	nur Nachtauskühlung	M9			M11		M7a						M10				M10		M10					M11.3		M8.5, M11.3
U-Wert o. WB	1.50																				R	R				
U-Wert o. WB	1.30												R	R	R	R										
U-Wert o. WB	1.10																R	R	R	R			R	R0	R2	R2
U-Wert o. WB	0.40				M3	M0	T	T	R	R	R	R						M14	M14	M14						
U-Wert o. WB	0.35					M2																	M1		M1b	
U-Wert o. WB	0.30				M4	M3					M6	M1						M15	M15.1	M15			M2		M2b	
U-Wert o. WB	0.29	R	R	T	R	R																				
U-Wert o. WB	0.25					M13						M2											M3	M3b	M3b	M3b
U-Wert o. WB	0.20				M13	M14					M7	M7												M9		M11.1
U-Wert o. WB	0.15										M15	M15														
Fenstertyp 0	U_g=3.0, g-Wert=0.75, T_{vis}=0.82, U_f=2.2																R	R	R	R			R	R0	R2	R2
Fenstertyp 1	U_g=2.2, g-Wert=0.7, T_{vis}=0.8, U_f=1.8												R	R	R	R					R	R				
Fenstertyp 2	U_g=1.1, g-Wert=0.52, T_{vis}=0.73, U_f=1.8	R	R	T	R	R	T	T	R	R	R	R	M1	M1	M7	M7	M9	M9	M9	M9	M7	M7				
Fenstertyp 3	U_g=0.7, g-Wert=0.41, T_{vis}=0.6, U_f=1.6	M1		M1																						
Fenstertyp 4	U_g=0.5, g-Wert=0.41, T_{vis}=0.6, U_f=1.6	M6	M4	M6					M8	M8					M8	M8										
Fenstertyp 6	U_g=0.5, g-Wert=0.35, T_{vis}=0.6, U_f=1.6		M2										M13	M13					M15.3				M8.2		M8.2	M11.4
Fenstertyp 7	U_g=1.2, g-Wert=0.63, T_{vis}=0.8, U_f=1.8							M1										M12	M12	M12						
Fenstertyp 8	U_g=1.2, g-Wert=0.63, T_{vis}=0.8, U_f=1.4							M2		M1													M4	M4	M4	M4
Fenstertyp 9	U_g=0.9, g-Wert=0.51, T_{vis}=0.7, U_f=1.4											M3														
Fenstertyp 10	U_g=0.9, g-Wert=0.51, T_{vis}=0.7, U_f=1.1						M3	M3	M2	M2																
Fenstertyp 12	U_g=0.7, g-Wert=0.51, T_{vis}=0.7, U_f=1.4										M4	M4														
Fenstertyp 13	U_g=0.5, g-Wert=0.51, T_{vis}=0.7, U_f=1.4											M9	M12	M12							M11a/b	M11				
Fenstertyp 14	U_g=0.5, g-Wert=0.59, T_{vis}=0.71, U_f=1.4											M10												M5		
Fenstertyp 15	U_g=0.5, g-Wert=0.59, T_{vis}=0.71, U_f=1										M11	M11						M13	M13	M13			M8	M6	M8.1	M8, M11.1
Fenstertyp 16	U_g=0.5, g-Wert=0.25, T_{vis}=0.5, U_f=1.6		M3.0	M11.1																			M8.3		M8.3	M8.31
Fenstertyp 17	U_g=1.2, g-Wert=0.27, T_{vis}=0.43, U_f=1.4																				M8, M10	M8				
Luftwechsel d. Fenster	hoch																R	R	R	R			R			
Luftwechsel d. Fenster	tief	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	M9	M9	M9	M9	R	R	M4	R0	R2	R2

Tabelle 96 Dokumentation der Annahmen zu den Energie- und Komfortberechnungen im Kapitel 3.4

Bauteil, Gebäudespezifi	Wert	BN1.1a	BN1.1b	BN1.1c	BN12a	BN12b	BN21a	BN21b	BN22a	BN22b	BN23a	BN23b	BB41a	BB41b	BB42a	BB42b	BB3.1a	BB3.1b	BB3.2a	BB3.2b	BB2a	BB2b	BB1.1	BB1.2	BB1.3	BB1.4
Leistung Licht	294 / 96 (6 W/m²)								M5	M5	M12	M12														
Leistung Licht	343 / 112 (7 W/m²)																				M6	M5				
Leistung Licht	441 / 144 (9 W/m²), präsenzgesteuert	M10b1	M4		M6	M6	T	T		M3	R	R					M8	M8				M3	M8	M8	M8.1	M8
Leistung Licht	539 / 176 (11 W/m²)												M5	M5	M5	M5		M6	M8	M8						
Leistung Licht	588 / 192 (12 W/Wm²)																							M7		
Leistung Licht	662 / 216 (13.5 W/m²)	R	R	T	R	R			R	R																
Leistung Licht	735 / 240 (15 W/m²)												R	R	R	R					R	R				
Leistung Licht	882 / 288 (18 W/m²)																R	R	R	R			R	R0	R2	R2
Sonnenschutzqualität	S_2												R	R	R	R							R	R0	R2	R2, M11.1
Sonnenschutzqualität	SoSchG1																R	R	R	R	R	R				
Sonnenschutzqualität	SoSchG2				M7	M7			R	R	R	R														
Sonnenschutzqualität	SoSchG3				M8	M8	M6	M6	M10	M9	M14	M14	M9	M8	M1	M1		M11	11, M15	M11	M2	M1				
Sonnenschutzqualität	SoSchG4						T	T	M7	M7																
Sonnenschutzqualität	SoSchG5	M8	M4	M8																						
Sonnenschutzqualität	SoSchG6	M5		M5	M2	R																				
Sonnenschutzqualität	SoSchG7	M4b		M4b																						
Sonnenschutzqualität	SoSchG8	R	R	T	R																					
Sonnenschutzqualität	SoSchG9	M10b2	M5																M15.2				M8.1		M8.1	M8.31, M11.5
Sonnenschutzfahrplan	SSch_vonH_6_21 / 150 / 180																						M8.4			
Sonnenschutzfahrplan	SSch_vonH_6_21 / 150 / 80	M4a	M4	M4a			M7	M7	M10	M10	M14	M13	M9	M8							M2	M2				
Sonnenschutzfahrplan	SSch_vonH_6_21 / 500 / 70				M9	M9																			M8.4	
Sonnenschutzfahrplan	SSch_vonH_6_21 / 500 / 80										M14.2															
Sonnenschutzfahrplan	Ssch_vonH_9_17_08 / 250 / 70	R	R	T	R	R	T	T	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R0	R2	R2
Sonnenschutzfahrplan	Ssch_vonH_9_17_08 / 500 / 70				M5																					
Beleuchtungsregelung	manuell	R	R	T	R	R	T	T	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R0	R2	R2
Beleuchtungsregelung	Ein-Aus-Regelung	M3		M3	M10	M10			M5	M4	M7	M8	M6	M6	M6.1	M6	M8	M7	M8	M8		M4	M8		M8.1	M8
Beleuchtungsregelung	gedimmt	M7	M4	M7	M12	M12.1							M11	M11	M9	M9					M6	M6				
eta Ventilator	0.55	R	R	T	R	R	T	T	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R								
eta Ventilator	0.65		M3.1b																							
eta Kühlung	1.6						M3					R														
eta Kühlung	2												R	R	R	R										
eta Kühlung	2.2																R	R			M10a	M9		M10		
eta Kühlung	2.5	R	R	T, M10	R	R	T, M4a	T	R	R	R	M5														
eta Kühlung	2.8																M5	M5								
eta Kühlung	4							M4.2	M10.1	M6.2																
eta Kühlung	4.4	M10c	M3.1a																							
eta Kühlung	5			M11.2											M6.2											
Zulufttemperatur	16°	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R
Zulufttemperatur	18°												M9	M9	M8	M8	M5	M5	M8	M8						
Solltemperatur Kühlung	23°	R	R		R		T	T	R		R		M9		M3.3						R			M11.1		M11.1
Solltemperatur Kühlung	25°			R	M14	R	M4b		M11	R	M6.1	R	R	R	R	R	R	R				R		M10, M11.2		M11.2
Leistungsbeschränkung	ja (gr. Räume: 3000 W, kl.: 1000 W)	M2	M10b	R	M2	R	M3	M4.1	R	R	R	R	M9	M9	M3.1	M3.1					M6	R		M11.1		M11.1
Leistungsbeschränkung	nein (gr. Räume: 6000 W, kl.: 2000 W)	R	R		R		R1														R					

Tabelle 96 (Fortsetzung) Dokumentation der Annahmen zu den Energie- und Komfortberechnungen im Kapitel 3.4

Leistung Licht	441 / 144 (9 W/m2), präsenzgesteuert	M10b1	M4	0	M6	M6	T	T	0	M3	R	R	0	0	0	0	M8	M8	0	0	0	M3	M8	M8	M8.1	M8
Betrieb Lüftung	keine Lüftung						T	T			R	R							R	R	R	R	R	R0	R2	R2
Betrieb Lüftung	nur an Arbeitstagen	R	M1		M1	R	M6		R	R			R	R	R	R	R	R				M9		M10		
Betrieb Lüftung	auch Sa und So		R	T	R																					
Luftwechselrate	18.7 $m^3/h/m^2$						M3	M4.1			R	R														
Luftwechselrate	12 $m^3/h/m^2$												R	R	R	R										
Luftwechselrate	8 $m^3/h/m^2$																R	R								
Luftwechselrate	4 $m^3/h/m^2$	R	R	R	R	R	R, M6	R, M5.1	R	R	M5	M5	M7	M7	M2	M2	M4	M3			M10a	M9		M10		
Betriebszeit Lüftung	Immer aus						T	T			R	R			M2	M2										
Betriebszeit Lüftung	Immer ein																R	R								
Betriebszeit Lüftung	6 - 20 h (ZPI_Lueftung_6_20)		R	T	R								R	R	R	R										
Betriebszeit Lüftung	7 - 19 h (ZPI_Lueftung_7_19)		M1		M1	R	M6	M5.1	R	R	M5	M5	M2	M2	M4	M4	M4	M4			M10a	M9		M10		
Betriebszeit Lüftung	7 - 19 h, 24 h Mitte Mai - Ende Sep.																	M2								
WRG	0						T	T		M6.1	R	R			M2	M2	R	R	R	R	R	R	R	R0	R2	R2
WRG	0.45														M3.1	M3.1					M10a					
WRG	0.55												R	R	R	R										
WRG	0.65	R	R	T	R				R	R			M3	M3			M4	M1								
WRG	0.80	M2			M2	R															M10/11b	M10		M10		
WRG	0.90		M4	M2		M4					M5	M5	M4	M4												
Zuluft / Abluft	1500 / 800																R	R								
Zuluft / Abluft	1325 / 900												R	R	R	R										
Zuluft / Abluft	1300 / 725																	M1								
Zuluft / Abluft	1050 / 625												M3	M3												
Zuluft / Abluft	700 / 475	R	R	T	R	R	R	R	R	R	R	R														
Zuluft / Abluft	850 / 525																M4									
Zuluft / Abluft	500 / 300																							M10		
Zuluft / Abluft	300 / 475														M2	M2										
Zuluft / Abluft	300 / 200														M3.1	M3.1										
Zuluft / Abluft	150 / 475																				M10a	M9				
WP	Erdsonde					M12.2	M7.1	M7.1	M7	M6.4					M6.2											
WP	Luft														M3.2	M3.2										
WP	Abluft					M12.2																M9				
WP Jahresnutzungsgrad	3					M12.2									M3.2	M3.2										
WP Jahresnutzungsgrad	4					M12.2	M7.1	M7.2	M7													M10				
WP Jahresnutzungsgrad	4.5									M6.4					M6.2											
WP Jahresnutzungsgrad	5																					M9				

Tabelle 96 (Fortsetzung) Dokumentation der Annahmen zu den Energie- und Komfortberechnungen im Kapitel 3.4

9.5.1 Charakterisierung des thermischen Komforts anhand von drei Komfortmassen

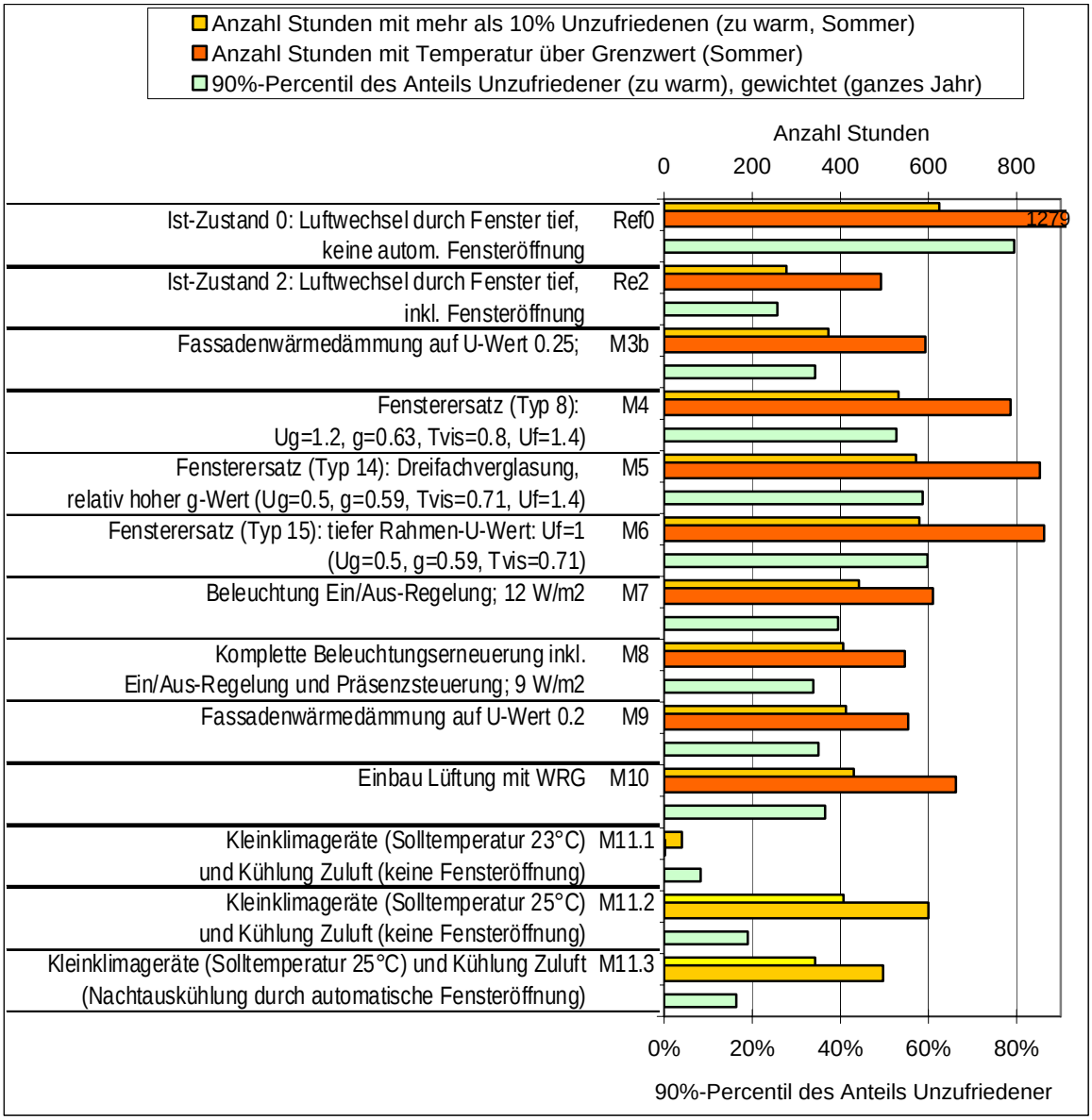


Abbildung 115 Charakterisierung des thermischen Komforts beim Gebäudetyp BB1.1, Südraum, 7 m Raumtiefe: Bestehendes Bürogebäude der Bauperiode vor 1947, 860 m², geringer Fensteranteil (25%), Massivbau, U-Wert Aussenwand ohne Wärmebrücke 1.1, hohe interne Lasten, Beleuchtung: 18 W/m², Lochfenster Typ 0 (U_g=3.0, g=0.75, T_{vis}=0.82, U_f=2.2), geringe Luftinfiltration durch Fenster, Fensteröffnung bei Überhitzung (z.B. FLS), Sonnenschutz: alter Rollladen aussen (S2); keine Kühlung; Fassade: verputztes Mauerwerk (U=1.1) energetisch zwar suboptimal, aber sonst noch funktional

9.5.2 Gegenüberstellung von Energiebedarf und thermischem Komforts

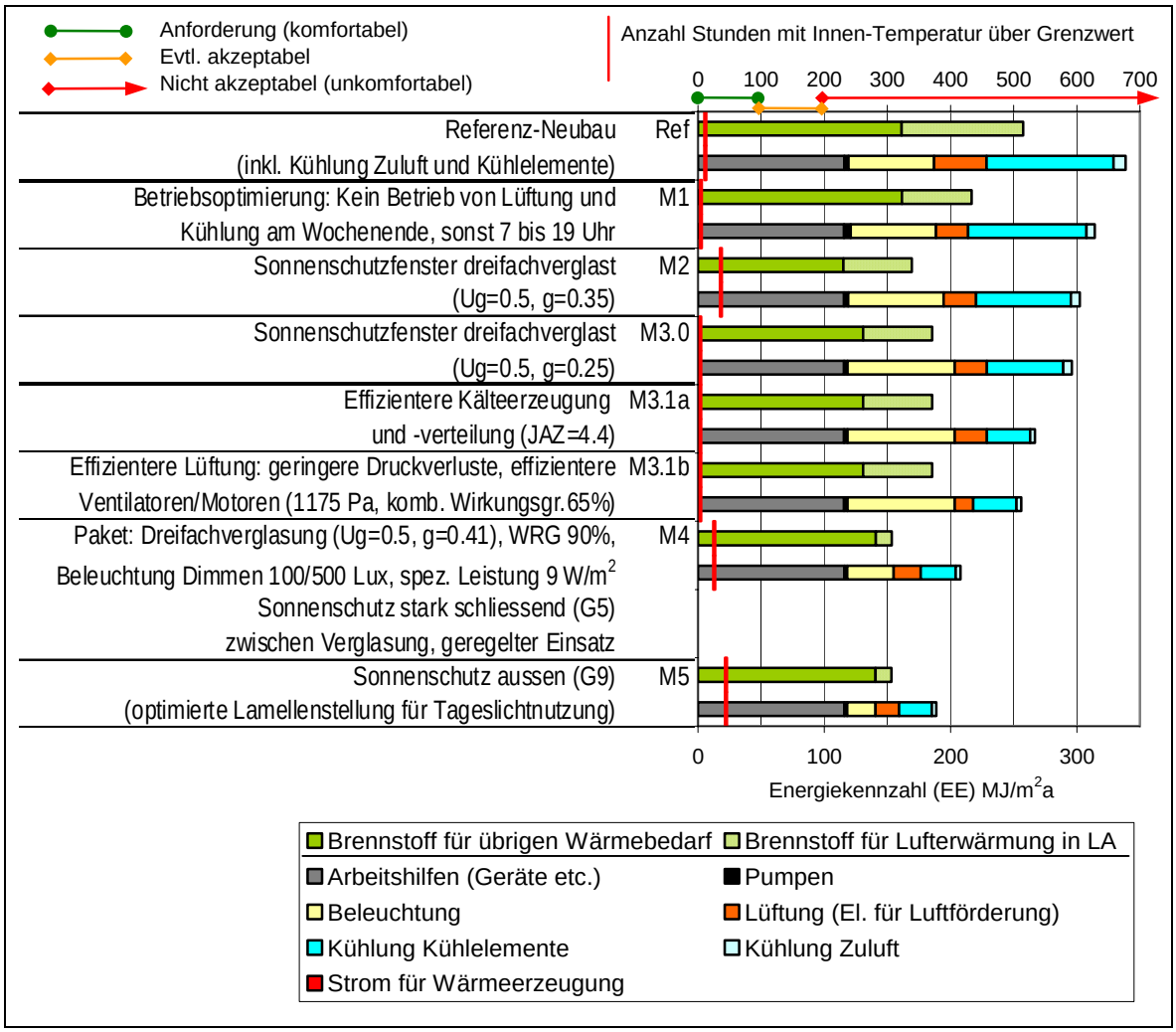


Abbildung 116 **Energiebedarf und thermischer Komfort bei Gebäudetyp BN1.1b:** Neubau eines grossen Bürogebäudes, EBF 10'000 m², hoher Fensteranteil (80%), ohne Fensteröffnung bei Überhitzung, Leichtbauweise, hohe interne Lasten, Beleuchtung: 13.5 W/m², Fassaden-U-Wert 0.77 W/m²K (inkl. WB), innerer, von Hand bedienter Sonnenschutz (G8), Lüftung mit WRG 65%, Fenstertyp 2 (U_g=1.1, g=0.52, T_{vis}=0.73, U_f=1.8), Beleuchtung: manuell (800 Lux), Zuluftkühlung und Kühlelemente)

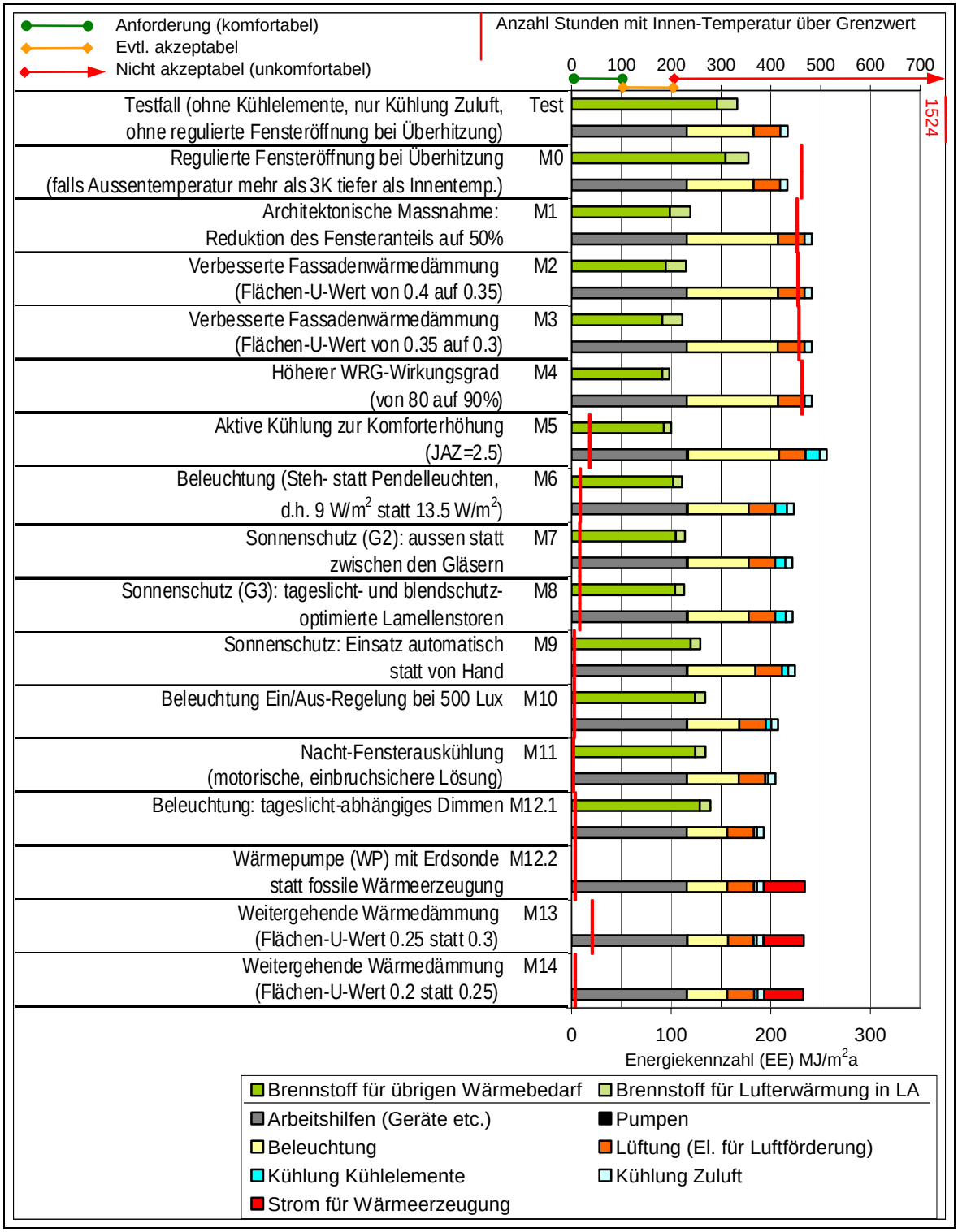


Abbildung 117 Energiebedarf und thermischer Komfort bei Gebäudetyp BN1.2b: Neubau eines mittleren Bürogebäudes, EBF 4600 m², hoher Fensteranteil (80%), inkl. automatische Fensteröffnung bei Überhitzung (ausser Fall Test), Leichtbauweise, U-Wert 0.29 W/m²K (o. WB), hohe interne Lasten, Beleuchtung: 13.5 W/m², innerer, von Hand bedienter Sonnenschutz (G6), Lüftung mit WRG 80%, Kühlung der Zuluft und Kühlelemente, JAZ=2.5, Fenster Typ 2 (U_g=1.1, g=0.52, T_{vis}=0.73, U_f=1.8), Beleuchtung: manuelles Ein-/Ausschalten (bei 800 Lux)

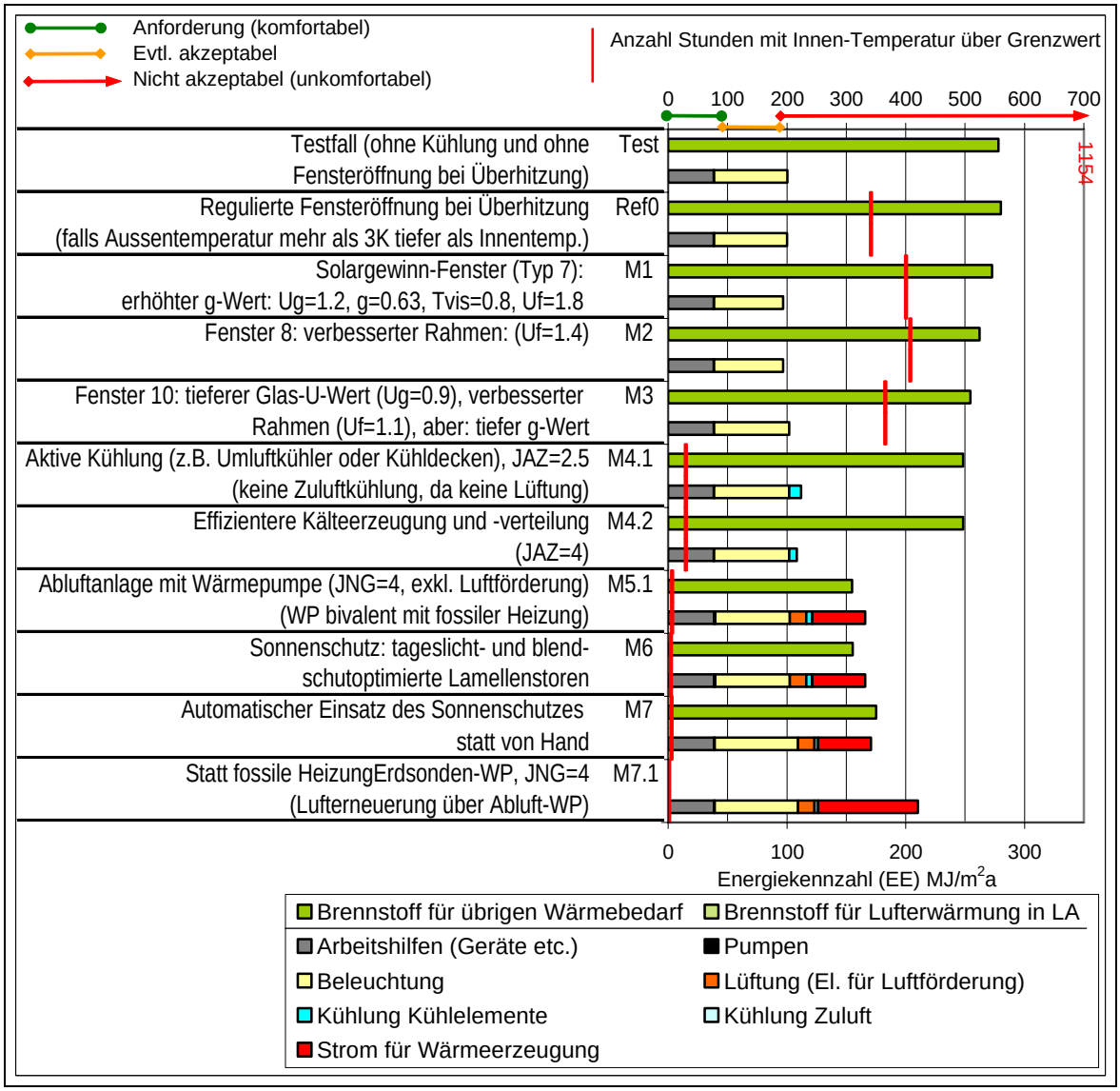


Abbildung 118 Energiebedarf und thermischer Komfort bei Gebäudetyp BN2.1b: Bürogebäude-Neubau, relativ hoher Fensteranteil (50%), Massivbauweise, U-Wert Aussenwand 0.4 bzw. 0.54 W/m²K (ohne bzw. mit Wärmebrücken), geringe interne Lasten, aussenliegender, von Hand bedienter Sonnenschutz (G4), keine mechanische Lüftungsanlage (Fensterlüftung), keine Kühlung, inkl. automatische Fensteröffnung bei Überhitzung (ausser Fall Test), Metallfassade, Fenster Typ 2 (U_g=1.1, g=0.52, T_{vis}=0.73, U_f=1.8), Beleuchtung: manuelles Ein-/Ausschalten (bei 800 Lux), 9 W/m²

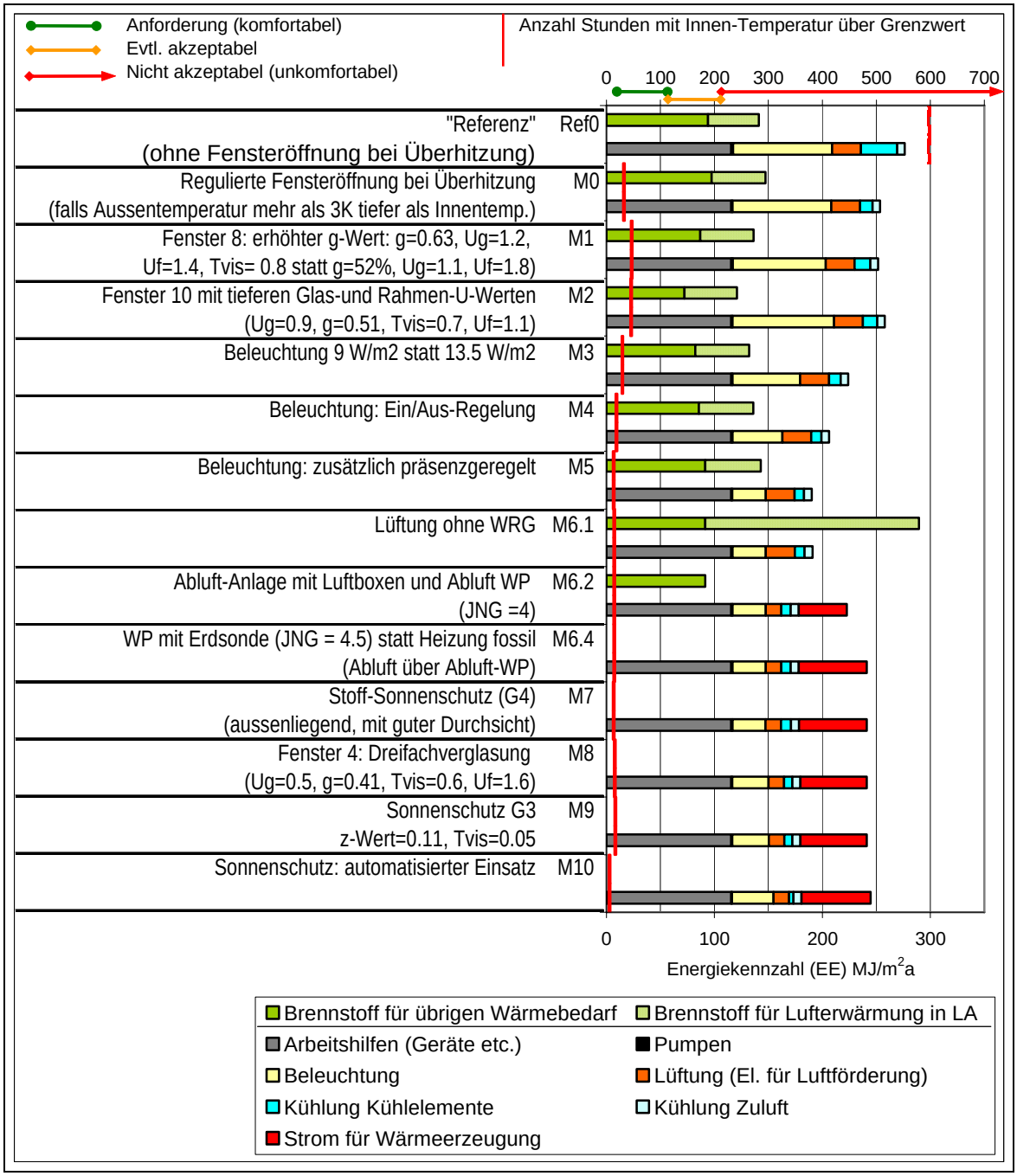


Abbildung 119 **Energiebedarf und thermischer Komfort bei Gebäudetyp BN2.2b: Bürogebäude mit relativ hohem Fensteranteil (50%) und Metallfassade, inkl Fensteröffnung bei Überhitzung (ausser Ref0), Massivbauweise, U-Wert Aussenwand 0.4 bzw. 0.54 W/m²K (ohne bzw. mit Wärmebrücken), geringe interne Lasten,** aussenliegender, von Hand bedienter Sonnenschutz (G2), mechanische Lüftung mit WRG 65%, Kühlung der Zuluft und Kühlelemente (JAZ=2.5, Solltemperatur=25°C), Fenster Typ 2 (U_g=1.1, g=0.52, T_{vis}=0.73, U_f=1.8), Beleuchtung: manuelles Ein-/Ausschalten (bei 800 Lux), 13.5 W/m²

Aufgrund des geringen Kühlenergiebedarfs erhöhen Sonnenschutzmassnahmen den Strombedarf wegen zusätzlicher Beleuchtung etwas, wenn auch nur geringfügig um wenige MJ/m²a.

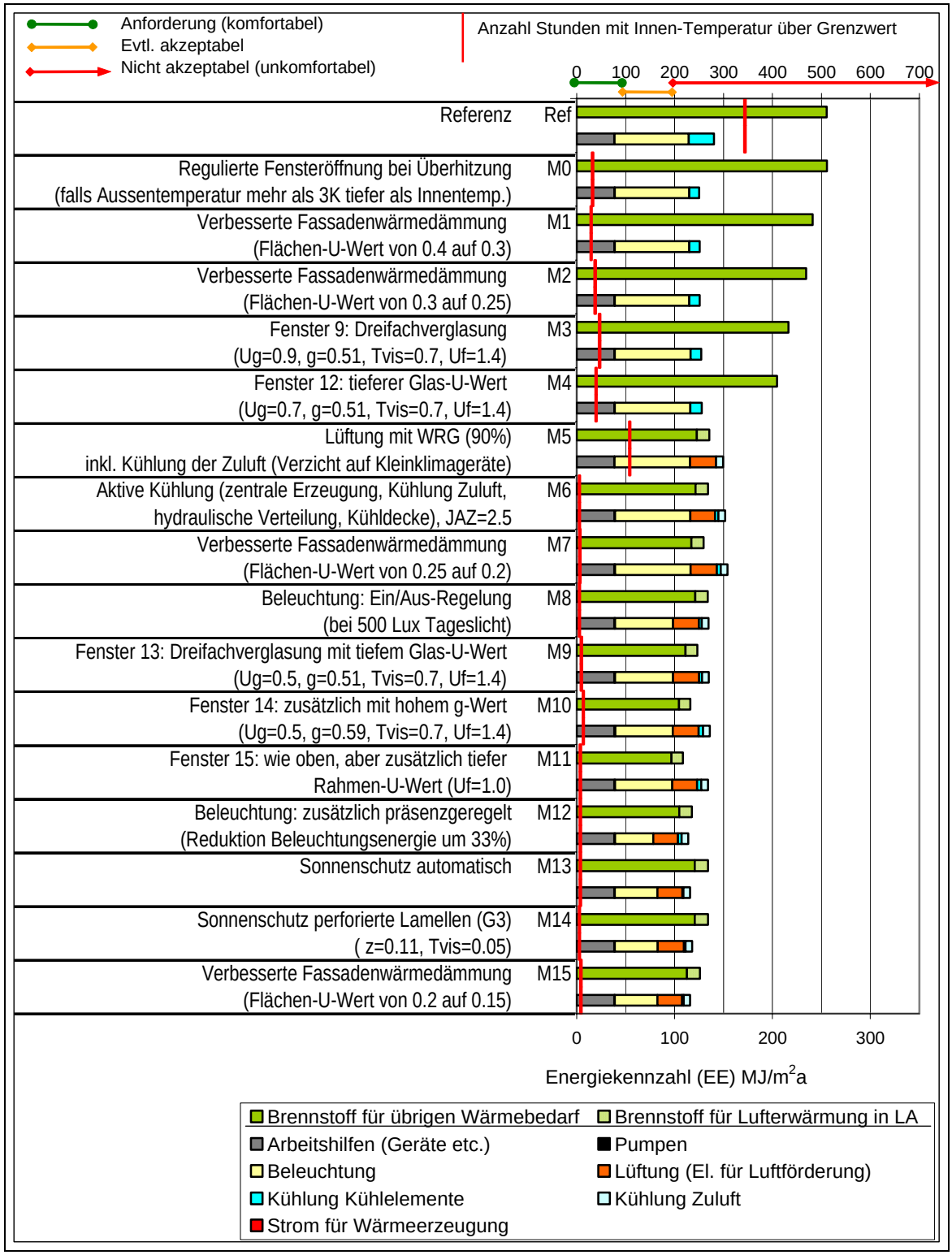


Abbildung 120 Energiebedarf und thermischer Komfort bei Gebäudetyp BN2.3b: Bürogebäude-Neubau mit relativ geringem Fensteranteil (35%), inkl. Fensterlüftung bei Überhitzung, Massivbauweise, U-Wert Aussenwand 0.4 bzw. 0.54 W/m²K (ohne bzw. mit Wärmebrücken), geringe interne Lasten, von Hand bedienter Lamellen-Sonnenschutz aussen (G2), keine mechanische Lüftung (Fensterlüftung), Kleinklimageräte (JAZ=1.6), Fenster Typ 2 (U_g=1.1, g=0.52, T_{vis}=0.73, U_f=1.8), Beleuchtung: manuelles Ein-/Ausschalten (bei 800 Lux), 9 W/m²

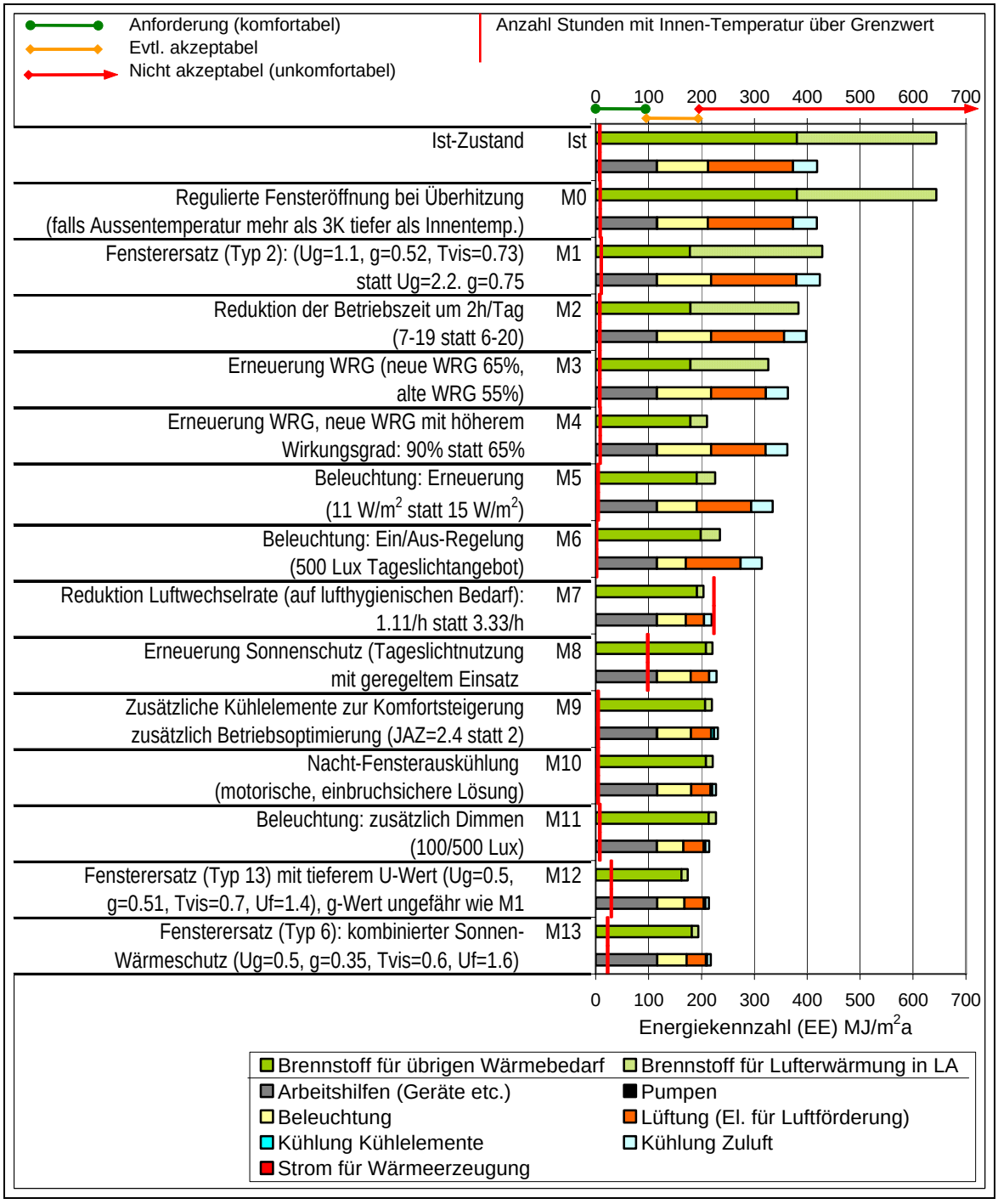


Abbildung 121 Energiebedarf und thermischer Komfort bei Gebäudetyp BB4.1b: Bestehendes Bürogebäude der Bauperiode ab 1976, 8600 m², rel. hoher Fensteranteil (50%), inkl. Fensteröffnung bei Überhitzung, Leichtbauweise, U-Wert Aussenwand ohne Wärmebrücke 1.3, hohe interne Lasten, Deckenleuchten (abgehängte Decke), Beleuchtung: 15W/m², mechanische Lüftung (hoher Luftwechsel) mit WRG (45%), Kühlung der Zuluft, von Hand bedienter Lamellen-Sonnenschutz aussen (S2), Metallfassade, Fenster Typ 1 (U_g=2.2, g=0.7, T_{vis}=0.8, U_f=1.8)

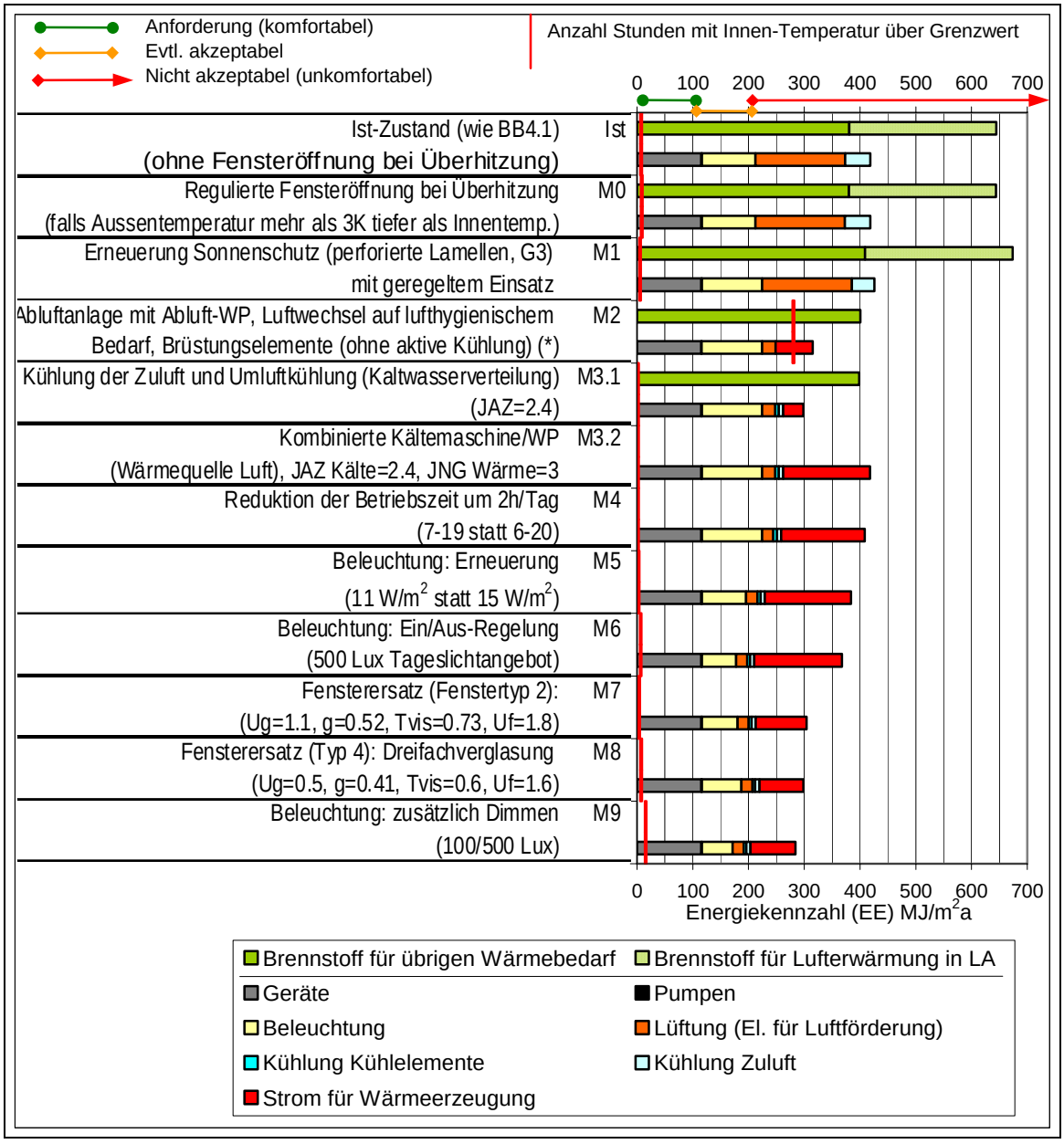


Abbildung 122 Energiebedarf und thermischer Komfort bei Gebäudetyp BB4.2b: Bestehendes Bürogebäude der Bauperiode 1976-2000, 8600 m², relativ hoher Fensteranteil (50%), inkl Fensteröffnung / Brüstungsgerät bei Überhitzung (ausser Ist-Zustand) Leichtbauweise, U-Wert Aussenwand ohne Wärmebrücke 1.3, hohe interne Lasten, Deckenleuchten (abgehängte Decke), Beleuchtung: 15W/m², mechanische Lüftung (hoher Luftwechsel) mit WRG (45%), Kühlung der Zuluft, von Hand bedienter Lamellen-Sonnenschutz aussen (S2), Metallfassade, Fenster Typ 1 (U_g=2.2, g=0.7, T_{vis}=0.8, U_f=1.8)

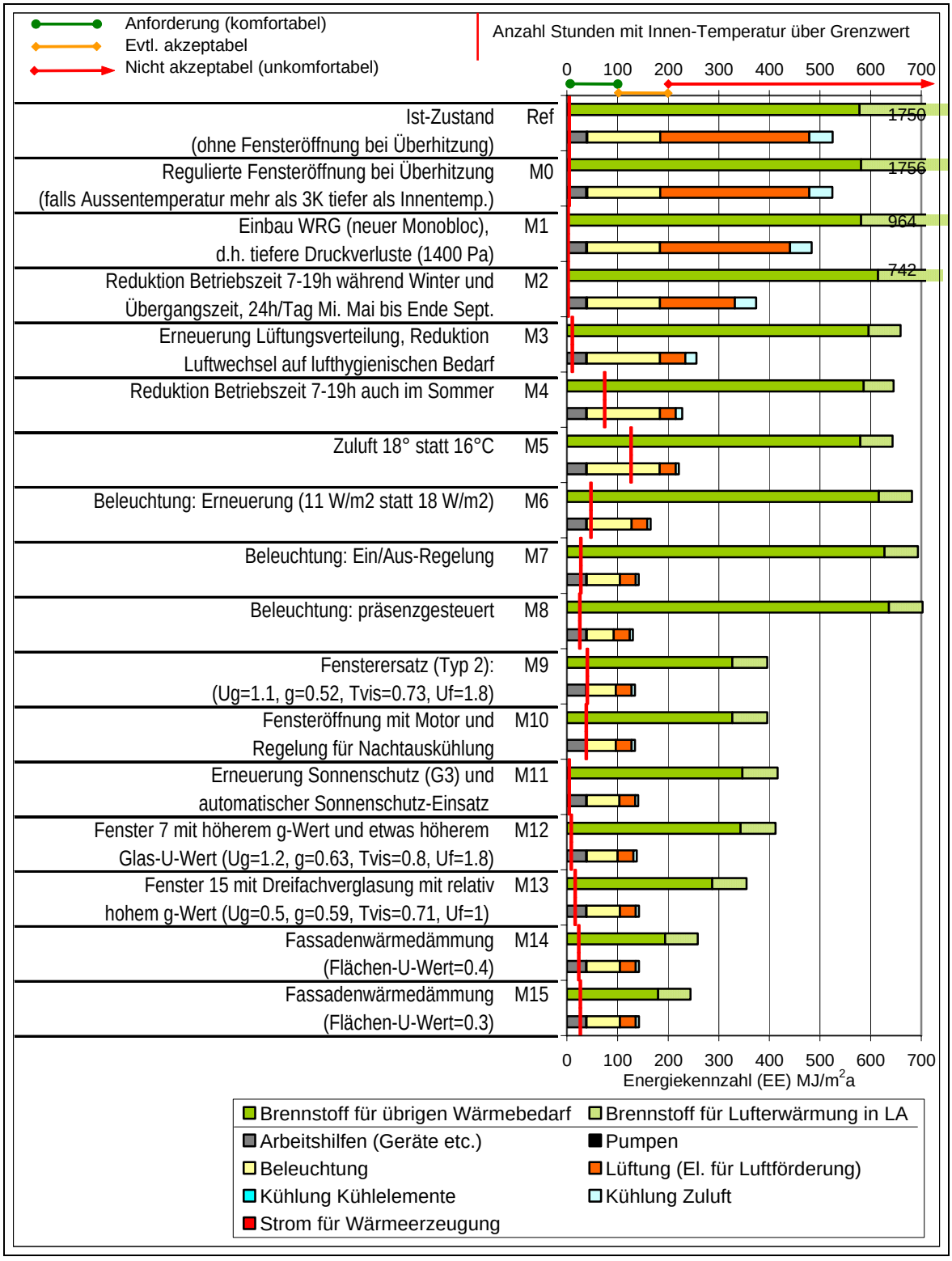


Abbildung 123 Energiebedarf und thermischer Komfort bei Gebäudetyp BB3.1b: Bestehendes Bürogebäude der Bauperiode 1947-1975, 2900 m², eher tiefer Fensteranteil (35%), inkl. Fensteröffnung / Brüstungsgerät bei Überhitzung (ausser Ist-Zustand), Massivbauweise, U-Wert Aussenwand ohne Wärmebrücke 1.1, geringe interne Lasten, Beleuchtung: 18 W/m², Deckenanbauleuchten, alte mechanische Lüftung ohne WRG mit hohen Druckverlusten (2300 Pa), Kühlung der Zuluft, Luftwechsel doppelt so hoch wie lufthygienisch erforderlich, 24h/Tag, von Hand bedienter Lamellen-Sonnenschutz aussen (G1), Mauerwerk, Fenster Typ 0 (U_g=3.0, g=0.75, T_{vis}=0.82, U_f=2.2)

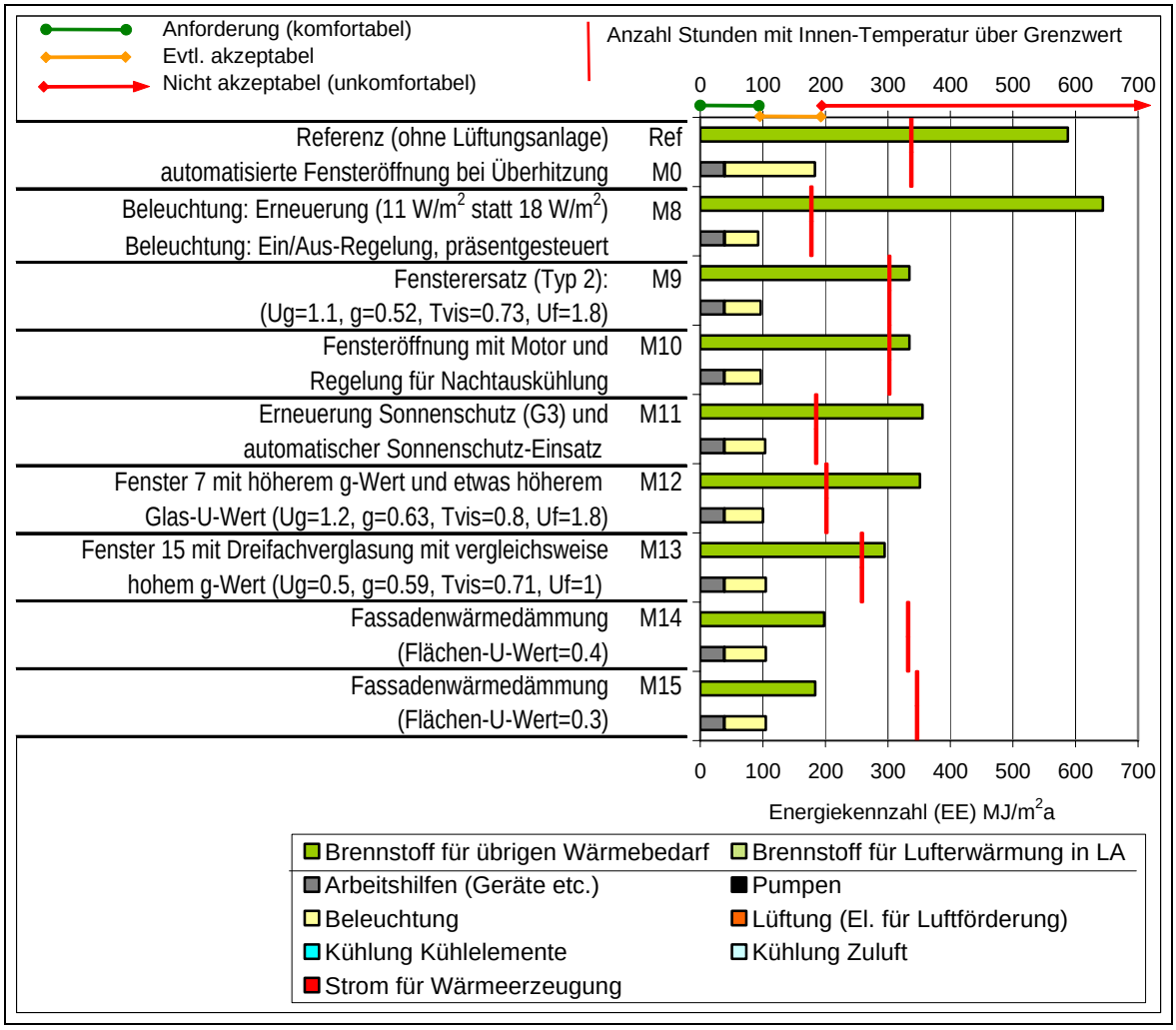


Abbildung 124 Energiebedarf und thermischer Komfort bei Gebäudetyp BB3.2b: Bestehendes Bürogebäude der Bauperiode 1947-1975, 2900 m², eher tiefer Fensteranteil (35%), alte Fenster (hohe Lüftungsverluste durch Undichtigkeit), inkl. Fensteröffnung / Brüstungsgerät bei Überhitzung, Massivbauweise, U-Wert Aussenwand ohne Wärmebrücke 1.1, geringe interne Lasten, Beleuchtung: 18 W/m², Deckenanbauleuchten, ohne mechanische Lüftung, von Hand bedienter Lamellen-Sonnenschutz aussen (G1), Mauerwerk, Fenster Typ 0 (U_g=3.0, g=0.75, T_{vis}=0.82, U_f=2.2)

Wird auf die Kleinklimageräte zugunsten einer Abluft-Anlage mit Nachströmöffnung verzichtet, verschlechtert sich die Komfortsituation, falls im Brüstungsgerät keine Zuluftkühlung vorgesehen wird (Abbildung 125, M9). Mit Zuluftkühlung kann dies korrigiert werden, dies zum Preis eines geringen Elektrizitätsbedarfs von weniger als 10 MJ/m^{2}a (M10).

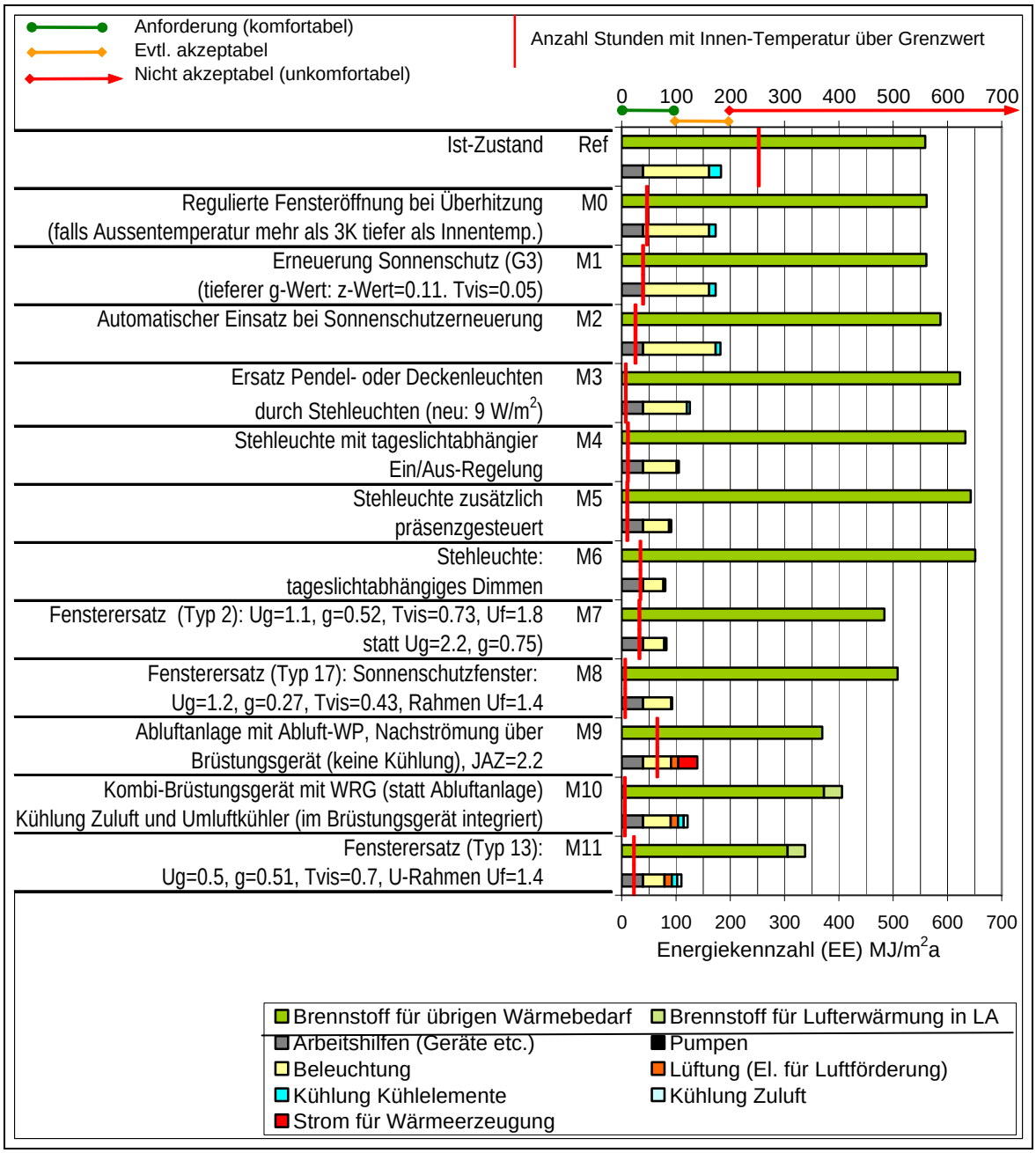


Abbildung 125 Energiebedarf und thermischer Komfort bei Gebäudetyp BB2b: Bestehendes Bürogebäude der Bauperiode 1947-1975, 1150 m^2, eher geringer Fensteranteil (35%), inkl. Fensteröffnung / Brüstungsgerät bei Überhitzung (ausser Ist-Zustand), Leichtbau, U-Wert Aussenwand ohne Wärmebrücke 1.1 W/m2K (Fassade energetisch zwar suboptimal, aber sonst noch funktional), geringe interne Lasten, Beleuchtung (15 W/m^2), Sonnenschutz aussen (Flachlamelle, G1), Kleinklimageräte, Solltemperatur 25°C, Fenster Typ 1 (U_g=2.2, g=0.7, T_{vis}=0.8, U_f=1.8)

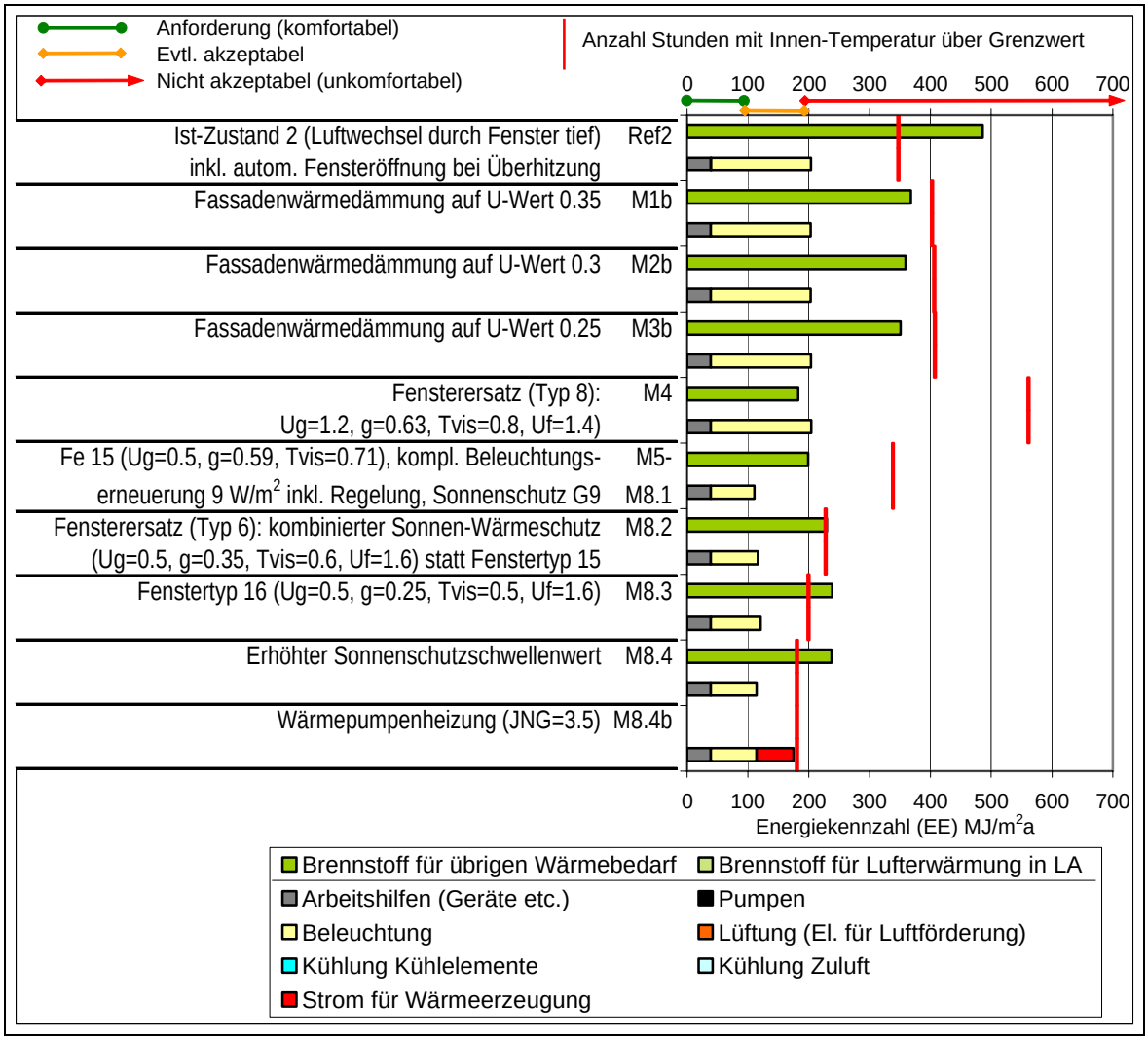


Abbildung 126 Energiebedarf und thermischer Komfort bei Gebäudetyp BB1.3: Bestehendes Bürogebäude der Bauperiode vor 1947, 860 m², geringer Fensteranteil (25%), Massivbau, Aussenwand 1.1 W/m²K (Wert ohne Wärmebrücken), tiefe interne Lasten, Beleuchtung: 18 W/m², Lochfenster Typ 0 (U_g=3.0, g=0.75, T_{vis}=0.82, U_f=2.2), Lüftungsverluste durch Fenster tief, inkl. Fensteröffnung bei Überhitzung, Sonnenschutz: alter Rollladen aussen (S2); keine Kühlung; Fassade: verputztes Mauerwerk (U=1.1) energetisch zwar suboptimal, aber sonst noch funktional

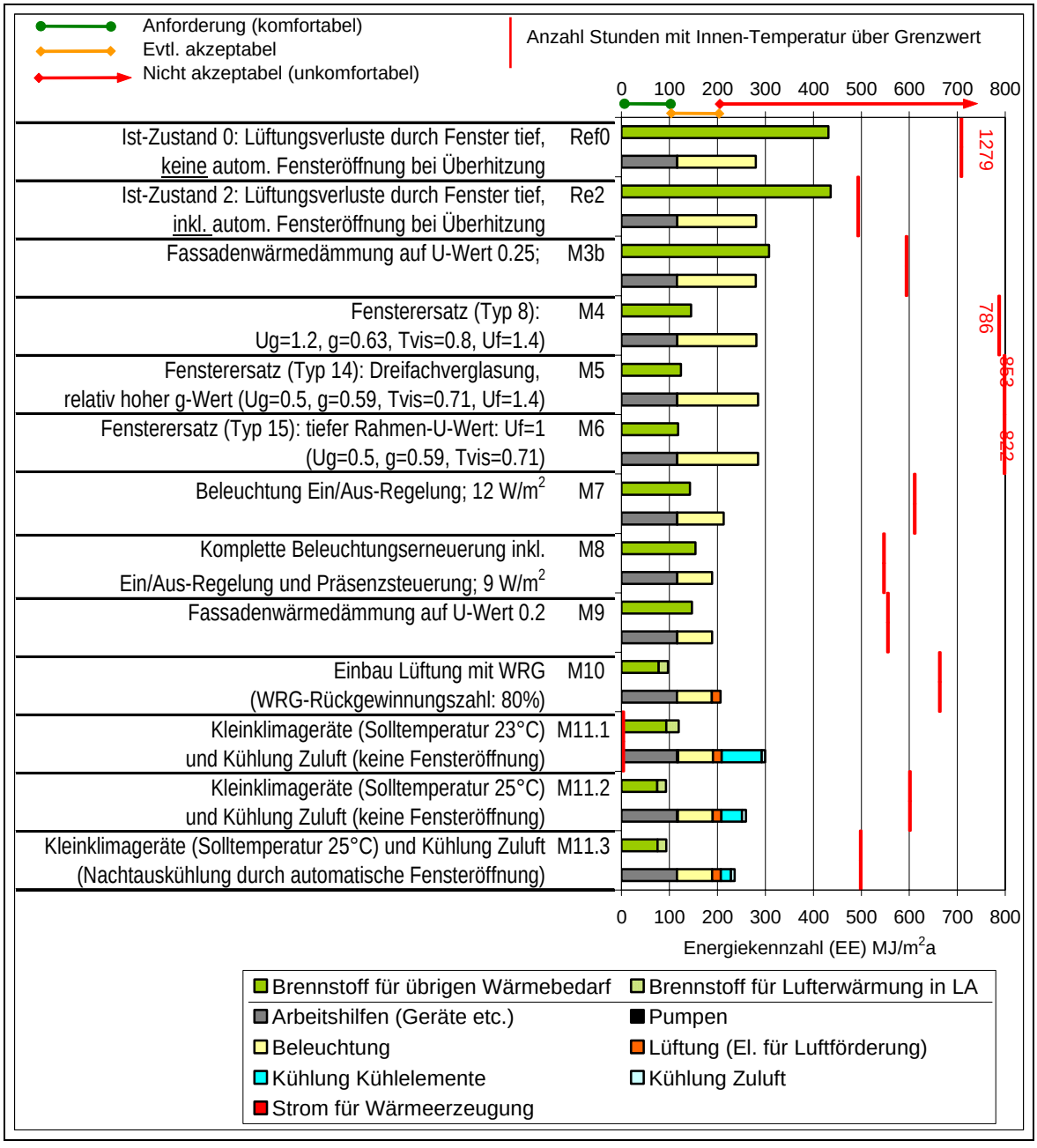


Abbildung 127 Energiebedarf und thermischer Komfort bei Gebäudetyp BB1.2: Bestehendes Bürogebäude der Bauperiode vor 1947, 860 m², hohe interne Lasten, geringer Fensteranteil (25%), Massivbau, U-Wert Aussenwand 1.1 W/m²K (Wert ohne Wärmebrücken), Beleuchtung: 18 W/m², Lochfenster Typ 0 (U_g=3.0, g=0.75, T_{vis}=0.82, U_f=2.2), Lüftungsverluste durch Fenster tief, Fensteröffnung bei Überhitzung, Sonnenschutz: alter Rollladen aussen (S2); keine Kühlung; Fassade: verputztes Mauerwerk (U=1.1) energetisch zwar suboptimal, aber sonst noch funktional

9.5.3 Sensitivität Fensteröffnung bei Energiebedarf und thermischem Komfort

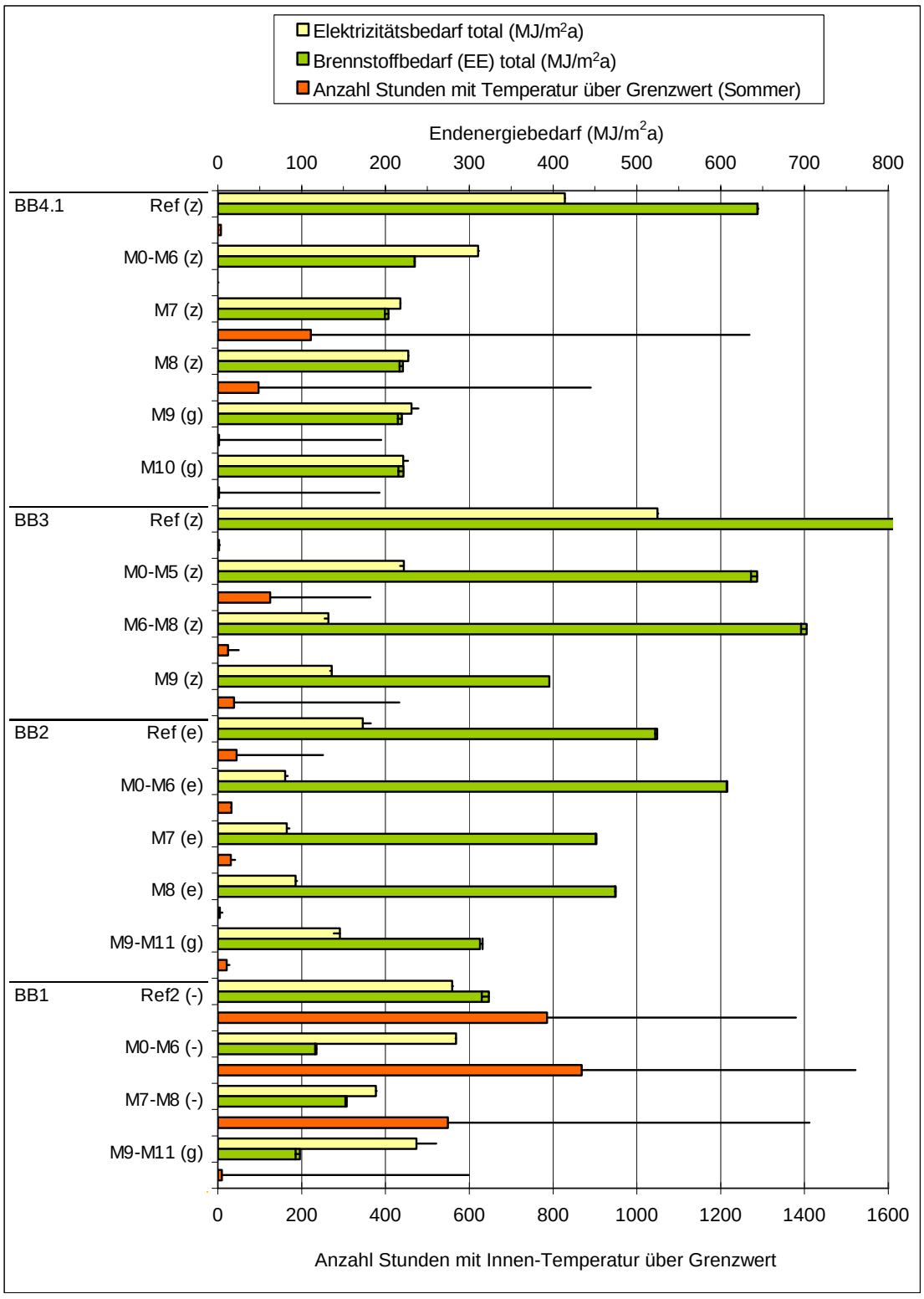


Abbildung 128 Sensitivität bzgl. „Fenster geschlossen“ im Vergleich zu „Fensteröffnung bei Überhitzung“ bei Energiebedarf und thermischem Komfort bei den Gebäudetypen BB4.1 bis BB1 (Bezeichnung der Massnahmen siehe Abbildung 20 bis Abbildung 127, S. 112 bis 295), (-) keine Kühlung, (z)= Kühlung der Zuluft, (e)=Kühlelemente wie Umluftkühler, Kühldecken etc. (g)=Kühlung Zuluft und Kühlelemente gemeinsam

9.5.4 Sensitivität Sonnenschutzeinsatz

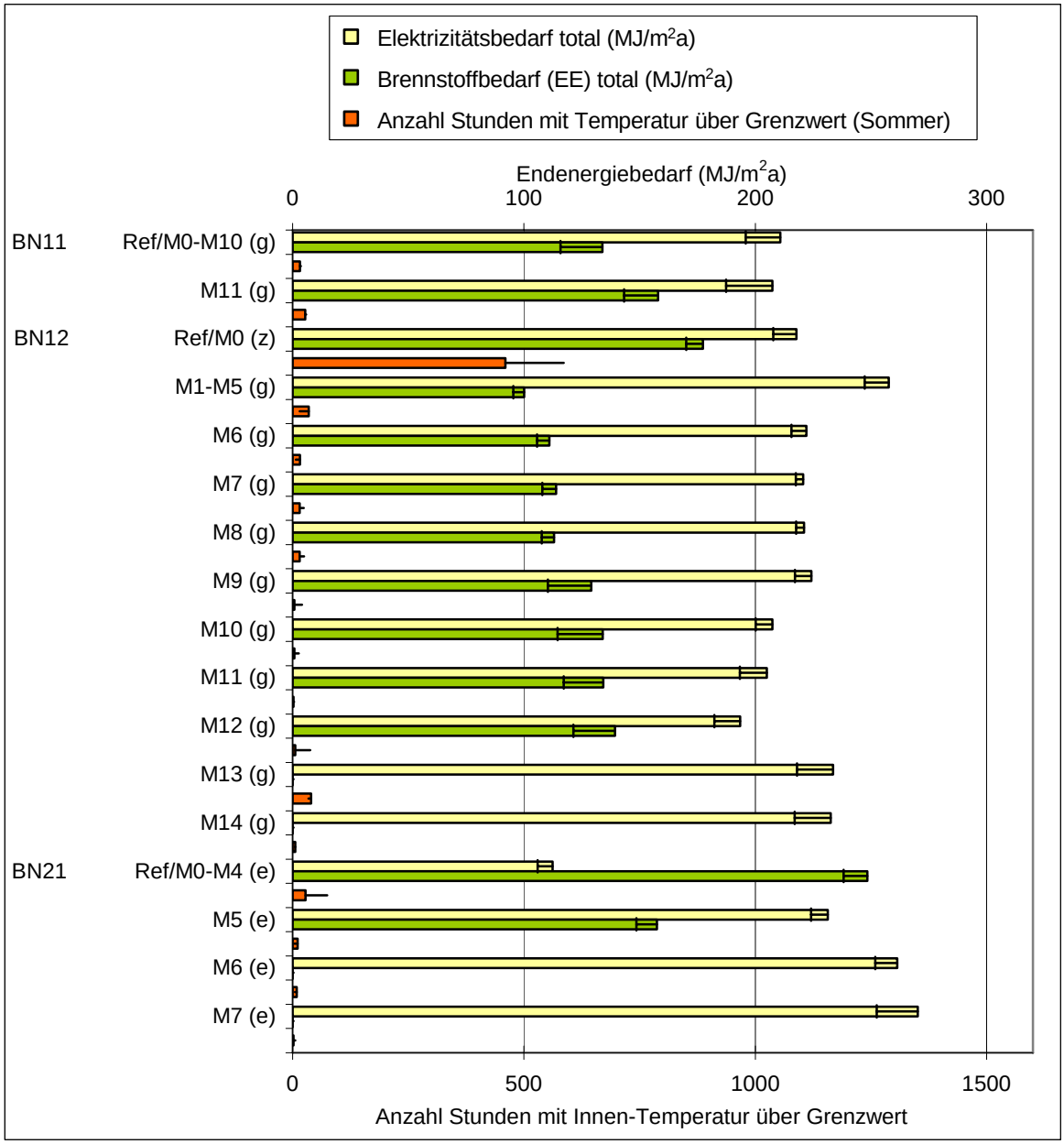


Abbildung 129 Sensitivität bei Energiebedarf und thermischem Komfort bzgl. Sonnenschutzeinsatz bei den Gebäudetypen BN1.1 bis BN2.1, inkl. Fensteröffnung bei Überhitzung (Bezeichnung der Abbildung 13 bis Abbildung 16, S. 101 bis S. 107), (z)= Kühlung der Zuluft, (e)=Kühlelemente wie Umluftkühler, Kühldecken etc. (g)=Kühlung Zuluft und Kühlelemente gemeinsam

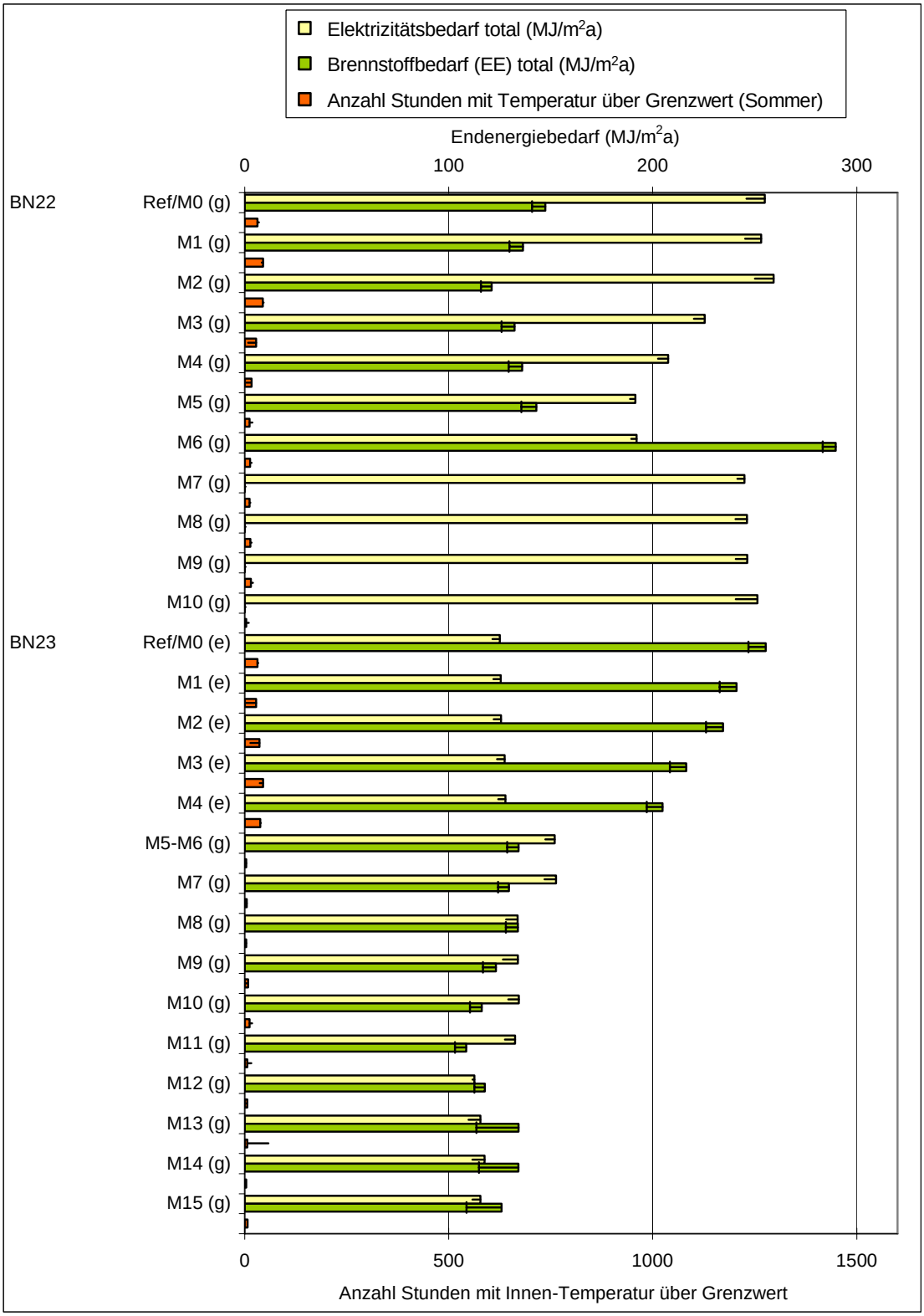


Abbildung 130 Sensitivität bei Energiebedarf und thermischem Komfort bzgl. Sonnenschutzeinsatz bei den Gebäudetypen BN1.1 bis BN2.1, inkl. Fensteröffnung bei Überhitzung (Bezeichnung der Abbildung 17 und Abbildung 18, S. 108 und 109), (z)= Kühlung der Zuluft, (e)=Kühlelemente wie Umluftkühler, Kühldecken etc. (g)=Kühlung Zuluft und Kühlelemente gemeinsam

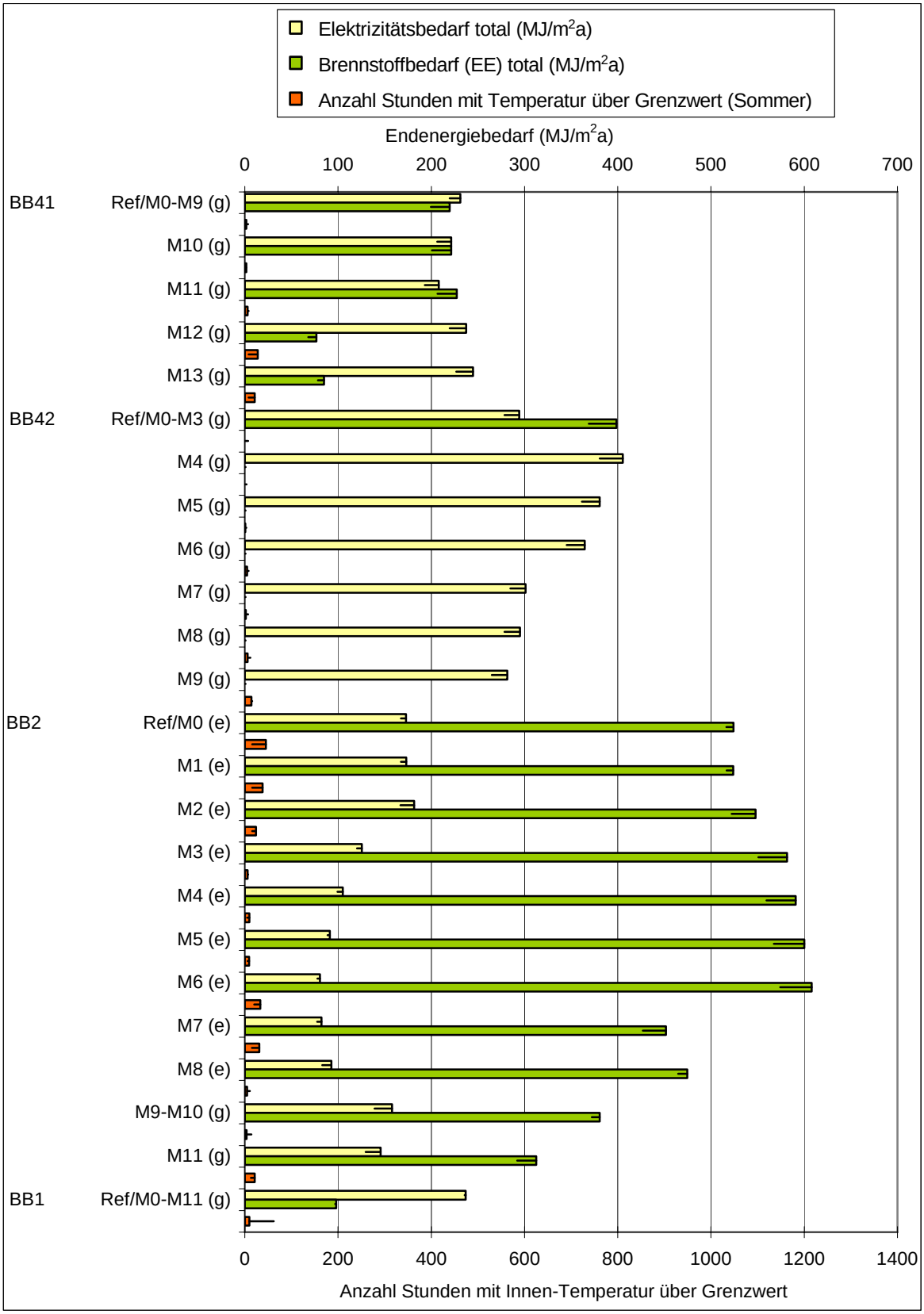


Abbildung 131 Sensitivität bei Energiebedarf und thermischem Komfort bzgl. Sonnenschutzeinsatz bei den Gebäudetypen BN1.1 bis BN2.1, inkl. Fensteröffnung bei Überhitzung (Bezeichnung der Massnahmen siehe Abbildung 20 bis Abbildung 127, S. 112 bis 295), (z)= Kühlung der Zuluft, (e)=Kühlelemente wie Umluftkühler, Kühldecken etc. (g)=Kühlung Zuluft und Kühlelemente gemeinsam

9.6 Anhang zum Kapitel 4

9.6.1 Liste der Daten und Informationen liefernden Unternehmen und Institutionen

Die nachfolgende Tabelle 97 enthält die Liste der Daten und Informationen liefernden Unternehmen und Institutionen. Aus Datenschutzgründen entspricht die Reihenfolge in dieser Tabelle nicht der Nummerierung in den einzelnen Abbildungen und Tabellen in den vorangehenden Kapiteln.

Bereich	Unternehmen, Institution
Allgemein, Diverse	Amstein+Walthert AG, Engineering and Consulting, Zürich
	EMPA, Dübendorf
	ETH Zürich, Bauabteilung und Energiebeauftragter, Zürich
	Holzenergie Schweiz, Zürich
	Migros-Genossenschafts-Bund, Zürich
Gebäudehülle	4B Fenster, Adliswil/Hochdorf
	Biene Fenster, Winikon
	EgoKiefer AG, Fenster und Türen, Zürich/Altstätten
	Fenster Dörig AG, Appenzell
	Glas Trösch, Isolierglas, Bützberg
	Griesser, Aadorf
	Pilkington, Isolierglasfabrik, Wikon
	Schenker Storen
	Schweizer AG[mj91], Hedingen
	Steiner AG[mj92], Zürich
	Wenger Fenster, Blumenstein
	WFT[mj93], Fassadentechnik AG, Weinfelden
Lüftung, Kühlung	Axair Kobra[mj94], Schwerzenbach
	Axima [mj95](Friotherm), Winterthur
	BARCOL-AIR AG, Stäfa[mj96]
	Belimo Automation AG, Hinwil[mj97]
	CTA AG[mj98], Zürich
	Emco Heiz- und Klimatechnik AG, [mj99]Zwingen
	Ernst Basler + Partner AG, Zürich[mj100]
	Jäggi/Güntner AG, Trimbach[mj101]
	MWH, Metallwaren Heiterschen[mj102], Zürich
	Stramax[mj103], Urdorf
	Todt, Gmür + Partner AG, Zürich[mj104]
	Walter Wettstein AG, WWAG[mj105], Kältetechnik, Gümligen
	York Schweiz, [mj106]Bassersdorf

Tabelle 97 Liste der Daten und Informationen liefernden Unternehmen und Institutionen (Teil 1)

Bereich	Unternehmen, Institution
Beleuchtung	Bering AG, Elektroplanung, Bern
	Camenisch, Ingenieurbüro für Elektroplanung, St. Gallen
	Hefti, Hess und Martignoni (HHM), Elektro Engineering, Zürich
	Hege AG, Ingenieurbüro für Elektrotechnik, Zürich
	Industrielle Betriebe Aarau, Aarau
	Lichtplan GmbH, Turgi
	Mettler und Partner, Zürich
	Neuco AG, Licht, Zürich
	Optilux AG, Zürich
	Regent Beleuchtungskörper AG, Zürich
	Schmidiger+Rosasco AG, Ingenieure für Elektroplanung, Zürich
	Swisspro AG, Elektroinstallation, Zürich
	Winergie GmbH, Energieberatungen, Buchs
	Zumtobel Staff AG, Beleuchtungstechnik, Zürich

Tabelle 97 Liste der Daten und Informationen liefernden Unternehmen und Institutionen (Fortsetzung)

9.6.2 Lichtausbeute verschiedener Lampentypen im Vergleich

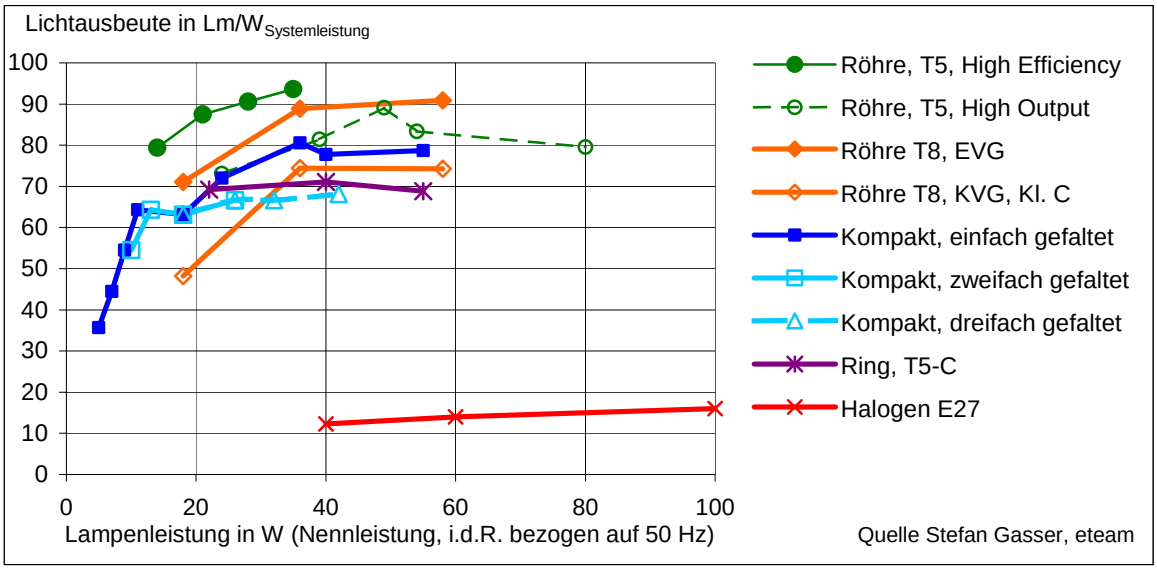


Abbildung 132 Übersicht über die Lichtausbeute von Lampen inkl. Vorschaltgerät als Funktion der Lampenleistung (Nennleistung, i.d.R. bezogen auf 50 Hz)

Typ	Lampenleistung (W)	EVG (CELMA-Klasse A2)	Systemleistung (W)	Lichtstrom (Lm)	Lichtausbeute (Lm/W)
Röhre, T5, High Efficiency	14	3	17	1350	79.4
Röhre, T5, High Efficiency (35°)	21	3	24	2100	87.5
Röhre, T5, High Efficiency (35°)	28	4	32	2900	90.6
Röhre, T5, High Efficiency (35°)	35	4	39	3650	93.6
Röhre, T5, High Output	24	2	26	1900	73.1
Röhre, T5, High Output (35°)	39	4	43	3500	81.4
Röhre, T5, High Output (35°)	49	6	55	4900	89.1
Röhre, T5, High Output (35°)	54	6	60	5000	83.3
Röhre, T5, High Output (35°)	80	8	88	7000	79.5
Röhre T8, EVG	18	1	19	1350	71.1
Röhre T16	36	0	36	3200	88.9
Röhre T16	58	-3	55	5000	90.9
Kompakt, TC-SEL (einfach gefaltet)	5	2	7	250	35.7
Kompakt, TC-SEL (einfach gefaltet)	7	2	9	400	44.4
Kompakt, TC-SEL (einfach gefaltet)	9	2	11	600	54.5
Kompakt, TC-SEL (einfach gefaltet)	11	3	14	900	64.3
Kompakt, TC-SEL (einfach gefaltet)	18	1	19	1200	63.2
Kompakt, TC-SEL (einfach gefaltet)	24	1	25	1800	72.0
Kompakt, TC-SEL (einfach gefaltet)	36	0	36	2900	80.6
Kompakt, TC-SEL (einfach gefaltet)	40	5	45	3500	77.8
Kompakt, TC-SEL (einfach gefaltet)	55	6	61	4800	78.7
Kompakt, TC-DEL (zweifach gefaltet)	10	1	11	600	54.5
Kompakt, TC-DEL(zweifach gefaltet)	13	1	14	900	64.3
Kompakt, TC-DEL (zweifach gefaltet)	18	1	19	1200	63.2
Kompakt, TC-DEL(zweifach gefaltet)	26	1	27	1800	66.7
Kompakt, TC-TEL (dreifach gefaltet)	18	1	19	1200	63.2
Kompakt, TC-TEL (dreifach gefaltet)	26	1	27	1800	66.7
Kompakt, TC-TEL (dreifach gefaltet)	32	4	36	2400	66.7
Kompakt, TC-TEL (dreifach gefaltet)	42	5	47	3200	68.1
Ring, T5-C	22	4	26	1800	69.2
Ring, T5-C	40	5	45	3200	71.1
Ring, T5-C	55	6	61	4200	68.9
Halogen E27	40		40	490	12.3
Halogen E27	60		60	840	14.0
Halogen E27	100		100	1600	16.0
Röhre T8, KVG, Kl. C	18	10	28	1350	48.2
Röhre T8, KVG, Kl. C	36	9	45	3350	74.4
Röhre T8, KVG, Kl. C	58	12	70	5200	74.3

Tabelle 98 **Übersicht über typische Werte von Lichtausbeute, Systemleistung (Lampen inkl. Vorschaltgerät), Lichtstrom und Lichtausbeute für verschiedene Lampen- und Vorschaltgerätekombinationen.** Quellen Osram—Katalog 2005 (Lichtströme), CELMA (.....), Berechnungen und Darstellung St. Gasser (eteam) (Grundlagendaten für Abbildung 132 und Abbildung 53)

Marke	Modell	Richt-preis (CHF)	Strom-kosten (CHF in 15 J.)	Energie (kWh/a)	Lampen	Vor-schalt-gerät	Elek-trische Leistung (Watt)	Leistung Standby (Watt)	Leuch-tenwir-kungsgra d (%)	Direkt-licht (%)	Indirekt-licht (%)	Beleuch-tungs-stärke (Lux)	Blendung (cd/m2)	Elek-trisches Feld (V/m)
Baltensweiler	Eco Lit Parabol	1180	504	168	2x55 W PL	EVG	112	0	83	18	65	693	40	2.7
Tulux	Ergo 1/80	1464	364.5	122	1x80 W PL	EVG (*)	81	0	93	22	71	572	1200	3
Tulux	Ergo 2/55	2155	490.5	164	2x55 W PL	EVG (*)	109	0	93	22	71	709	900	2.5
Belux	Flat-12-Multisens	2056	504	168	2x55 W PL	EVG (*)	112	1.2	71	15	56	598	140	3
Waldmann AG	LXS 255 M	1640	535.5	179	2x55 W PL	EVG (*)	119	1.2	74	19	55	585	900	2.9
Regent	Level 80H08.P255.S	1540	540	180	2x55 W PL	EVG (*)	120	0.3	81	17	64	580	1940	0.6
Zumtobel	Light Fields	2135	553.5	185	3x40 W PL	EVG (*)	123	0.2	90	13	77	709	1500	4.5
Trilux	Offset	1955	504	168	2x54 W T5	EVG (*)	112	0.3	89	18	71	564	780	1.2
Neue Werkstatt	SEC A alusilber	1750	522	174	2x55 W PL	EVG (*)	116	0	87	13	74	671	40	3.3
Belux	Select	1320	531	177	2x55 W PL	EVG (*)	118	1.3	81	17	64	707	80	2
Neuco	TAVA CDP 2x55W	1496	510	170	2x55 W PL	EVG (*)	113	0.3	71	9	62	550	580	2.1
Neuco	TAVA CDP 4x40 W (141 W)	2088	645	215	4x40 W PL	EVG (*)	143	0.3	73	10	63	623	400	2.1
Neuco	Tera 2x55W DLD Sensonic	2281	510	170	2x55 W PL	EVG (*)	113	0.3	75	13	62	563	740	2.4
Neuco	Tera 4x40 W (141 W)	1749	645	215	4x40 W PL	EVG (*)	143	0.3	75	13	62	638	630	2.4
Ribag	UniQ	2090	477	159	4x24 W T5	EVG (*)	106	0.7	88	32	56	786	1760	2.5
Optilux AG	Widelight	2154	652.5	218	6x21 W T5	EVG (*)	145	0	95	6	89	577	33	1.1
Fluora	Para	auf An-frage	570	191	2x55 W PL	EVG (*)	127	0.3	76	25	51	778	40	3

Tabelle 99 **Richtpreise sowie beleuchtungstechnische Kennwerte von energie-effizienten Stehleuchten** (Quelle www.topten.ch, Stand 17.11.2005)
(*) dimmbar

9.6.3 Erhebungsraster Beleuchtungen

Auf den nachfolgenden Seiten sind die für die Erhebung der Richtpreise und der technischen Kennwerte verwendeten Erhebungsraster dokumentiert.

Fall 1: Neubau, Nutzung Büro oder Schule, Bodenfläche pro Raum: 81 m2 (7 m Tiefe * 11.5 m Breite), Glas- zu Bodenfläche: 30%							
	Standard-Neubau	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	Variante 5	Variante 6
Massnahmen-Beschrieb		Leuchtstoffröhren 16 mm mit EVG statt Leuchtstoff-röhren 26 mm	Präsenzsteuerung	Tageslicht-steuerung (Ein-/Aus, kein Dimmen)	Energie-effizientere Leuchten inkl. Licht-steuerung (Präsenz, Ein/Aus)	Energie-effizientere Leuchten inkl. Kon-stantlichtregelung (Dimmen)	Minergie-Stehleuchten
Raumhelligkeit	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	
Beleuchtungsstärke	> 500 Lux	500 Lux	500 Lux	500 Lux	500 Lux	500 Lux	
Leuchtentyp	Kostengünstige Pendel- oder De-ckenleuchte	Kostengünstige Pen-del oder Decken-leuchte	Kostengünstige Pen-del oder Deckenleuch-te	Kostengünstige Pen-del oder Decken-leuchte	Pendelleuchten di-rekt/indirekt mit Re-flektor und Blendbe-grenzung	Pendelleuchten di-rekt/indirekt mit Reflek-tor und Blendbegren-zung	Stehleuchten Minergie,
Anzahl Leuchten	18	18	18	18	18	18	Anzahl:.....
Anzahl Lampen pro Leuchte	2	2	2	2	1	1	.....
Lampentyp	Leuchtstoffröhre 26 mm, 32 W	Leuchtstoffröhre 16 mm, 28 W	Leuchtstoffröhre 16 mm, 28 W	Leuchtstoffröhre 16 mm, 28 W	Leuchtstoffröhre 16 mm, 54 W	Leuchtstoffröhre 16 mm, 54 W	.....
Vorschaltgerät	VVG	EVG	EVG	EVG	EVG	EVG	
Systemleistung Leuchte	72 W	64 W	64 W	64 W	58 W	58 W	.....W
Lichtsteuerung	Manuell	Manuell	Präsenzsteuerung	Tageslicht-steuerung Ein/Aus	Präsenz- und Tages-lichtsteuerung Ein/Aus	Präsenzsteuerung und Konstantlichtre-gelung (Dimmen)	Präsenzsteuerung und Konstantlichtregelung
Kosten Lampen (*)							
Kosten Leuchten (*)							
Kosten Arbeit etc (**)							
Kosten Total							

(*) Angabe Kosten pro Raum oder evtl. pro m², Kalkulationsbasis für Rabatte etc.: 30 Räume
(**) Schätzwert für Demontage, Montage, Leitungen, Steuerung, inkl Planung etc.

Fall 2: Altanlage, Baujahr 1970, Nutzung Büro oder Schule, Bodenfläche pro Raum: 81 m2 (7 m Tiefe * 11.5 m Breite), Glas- zu Bodenfläche: 20%

	Ist-Zustand	Instandhaltung	Sofortmassnahme	Erneuerung 1	Erneuerung 2	Erneuerung 3	Erneuerung 4 (= 1, 2 u. 3 zusammen)
Massnahmen-Beschrieb		Leuchte reinigen	Ersatz der Leuchtstoffröhren 26 mm durch 16 mm mit EVG-Adapter	Installation Präsenzsteuerung	Installation Tageslichtsteuerung (Ein-/Aus, kein Dimmen)	Leuchtenersatz	Leuchtenersatz inkl. Tageslicht- und Präsenzsteuerung
Raumhelligkeit	Normal, Anstrich vergilbt	Normal, Anstrich vergilbt	Normal, Anstrich vergilbt	Normal, Anstrich vergilbt	Normal, Anstrich vergilbt	Neuer Anstrich (Decke reinweiss)	Neuer Anstrich (Decke reinweiss)
Beleuchtungsstärke	400 Lux	400 Lux	400 Lux	400 Lux	400 Lux	500 Lux	500 Lux
Leuchtentyp	Deckenanbauleuchte mit opaler Abdeckung	Deckenanbauleuchte mit opaler Abdeckung	Deckenanbauleuchte mit opaler Abdeckung	Deckenanbauleuchte mit opaler Abdeckung	Deckenanbauleuchte mit opaler Abdeckung	Pendelleuchten direkt/indirekt mit Reflektor und Blendbegrenzung	Pendelleuchten direkt/indirekt mit Reflektor und Blendbegrenzung
Anzahl Leuchten	18	18	18	18	18	18	18
Anzahl Lampen pro Leuchte	2	2	2	2	2	1	1
Lampentyp	Leuchtstoffröhre 26 mm, 36 W	Leuchtstoffröhre 26 mm, 36 W	Leuchtstoffröhre 16 mm, 28 W	Leuchtstoffröhre 16 mm, 28 W	Leuchtstoffröhre 16 mm, 28 W	Leuchtstoffröhre 16 mm, 54 W	Leuchtstoffröhre 16 mm, 54 W
Vorschaltgerät	KVG od. VVG	KVG od. VVG	EVG mit Adapter	EVG mit Adapter	EVG mit Adapter	EVG	EVG
Systemleistung Leuchte	80 W bzw. 90 W	80 W bzw. 90 W	64 W	64 W	64 W	58 W	58 W
Lichtsteuerung	Manuell	Manuell	Manuell	Präsenzsteuerung	Tageslichtsteuerung Ein/Aus	Manuell	Tageslicht- und Präsenzsteuerung
Kosten Lampen (*)							
Kosten Leuchten (*)							
Kosten Arbeit etc (**)						(+)	
Kosten Total							

(*) Angabe Kosten pro Raum oder evtl. pro m², Kalkulationsbasis für Rabatte etc.: 30 Räume

(**) Schätzwert für Demontage, Montage, Leitungen, Steuerung, Planung, inkl. Anpassungsarbeiten etc.

(+) Mehrkosten heruntergehängte Decke:.....

Fall 3: Erneuerung Indirektbeleuchtung Nutzung Büro, Bodenfläche pro Raum: 20 m^2 (4 m Tiefe * 5 m Breite), Glas- zu Bodenfläche: 30%							
	Ist-Zustand	Erneuerung 1	Erneuerung 2	Erneuerung 3	Erneuerung 4	Erneuerung 5	
Massnahmen-Beschrieb		Neue Leuchte Standard	Neue Leuchte direkt/indirekt	Neue Leuchte direkt/indirekt inkl. Regelung	Neue Leuchte direkt/indirekt inkl. Regelung und reduzierter Standby	Neue Leuchte direkt/indirekt inkl. Regelung und Stand-by-Abschaltung	Neue Leuchte (wie Erneuerung 5), zusätzlich Deckenerneuerung
Raumhelligkeit	Normal, Akustikdecke mit Löchern	Normal, Akustikdecke mit Löchern	Normal, Akustikdecke mit Löchern	Normal, Akustikdecke mit Löchern	Normal, Akustikdecke mit Löchern	Normal, Akustikdecke mit Löchern	Normal, Akustikanstrich ohne Löcher
Beleuchtungsstärke (Arbeitsfl.)	500 Lux	600 Lux	600 Lux	600 Lux	600 Lux	600 Lux	600 Lux
Leuchtentyp	Stehleuchte indirekt	Neue Stehleuchte indirekt	Stehleuchte direkt/ indirekt mit Blendbegrenzung	Stehleuchte direkt/ indirekt mit Blendbegrenzung	Stehleuchte direkt/ indirekt mit Blendbegrenzung	Stehleuchte direkt/ indirekt mit Blendbegrenzung	Stehleuchte direkt/ indirekt mit Blendbegrenzung
Leuchtenbetriebswirkungsgrad	60%	80%	80%	80%	80%	80%	80%
Anzahl Leuchten	2	2	2	2	2	2	2
Anzahl Lampen pro Leuchte	4	4	2	2	2	2	2
Lampentyp	Kompaktleuchtstofflampe 55 W	Kompaktleuchtstofflampe 42 W	Kompaktleuchtstofflampe (***) 55 W	Kompaktleuchtstofflampe 55 W	Kompaktleuchtstofflampe 55 W	Kompaktleuchtstofflampe 55 W	Kompaktleuchtstofflampe 55 W
Vorschaltgerät	EVG	EVG	EVG	EVG	EVG	EVG	EVG
Systemleistung Leuchte	240 W	180 W	ca. 120 W	120 W	120 W	120 W	120 W
Standby	6 Watt	z.B. 4 Watt	4 Watt	4 Watt	0.3 Watt	0.3 W, inkl. Standby-Abschaltung	0.3 W, inkl. Standby-Abschaltung
Lichtsteuerung	Manuell	Manuell	Manuell	Präsenzmelder und Konstantlichtsteuerung	Präsenzmelder und Konstantlichtsteuerung	Präsenzmelder und Konstantlichtsteuerung	Präsenzmelder und Konstantlichtsteuerung
Kosten Leuchten (*)							
Kosten Arbeit etc (**)							
Kosten Total							

(*) Angabe Kosten pro Raum oder evtl. pro m^2, Kalkulationsbasis für Rabatte etc.: 30 Räume

(**) Schätzwert für Demontage, Montage, Leitungen, Steuerung, Planung, inkl. Anpassungsarbeiten etc.

(***) Evtl. FL T5

Fall 4: Altes Ladenkonzept (1990), Kleiner Laden, z.B. Kleider-Boutique, Bodenfläche 100 m^2, Glas- zu Bodenfläche: 0%				
	Ist-Zustand	Unterhalt	Sofortmassnahme	Erneuerung 1
Massnahmen-Beschrieb		Lampen wechseln	Ersatz der Standard-Halogen-Lampen durch Halogenlampen IRC	Leuchtenersatz
Raumhelligkeit	normal	normal	normal	normal
Beleuchtungsstärke	2000 Lux	2000 Lux	2000 Lux	2000 Lux
Leuchtentyp	Halogen-Spots + Grundbeleuchtung	Halogen-Spots + Grundbe-leuchtung	Halogen-Spots + Grundbeleuchtung	Spots mit Halogen-metalldampflampen
Anzahl Leuchten	100	100	100	60
Anzahl Lampen pro Leuchte	1	1	1	1
Lampentyp	Niedervolt-Halogen, 50 W	Niedervolt-Halogen, 50 W	Niedervolt-Halogen IRC, 35 W	Halogenmetalldampflampen , 20 W
Vorschaltgerät	Konventionell	Konventionell	Konventionell	Elektronisch
Systemleistung Leuchte	55 W	55 W	39 W	23 W
Standby pro Leuchte	1 W	1 W	1 W	1 W
Lichtsteuerung	Manuell über Taster	Manuell über Taster	Manuell über Taster	Manuell über Taster
Kosten Lampen (*)				
Kosten Leuchten (*)				
Kosten Arbeit etc (**)				(+)
Kosten Total				

(*) Angabe Kosten pro Raum oder evtl. pro m^2, Kalkulationsbasis für Rabatte etc.: 1 Raum
(**) Schätzwert für Demontage, Montage, Leitungen, Steuerung, Planung, inkl. Anpassungsarbeiten etc.
(+) Mehrkosten heruntergehängte Decke:.....

9.7 Anhang zum Kapitel 5

9.7.1 Fenster und Verglasungen

Unternehmen	Variante	Ug W/m²K	g-Wert	Richtpreis CHF/m²	Transmissionsverlust MJ/m²Fea	Energiebilanz (MJ/m²Verglasunga) o.GS.	Süd	Ost	West	Nord	Kapitalkosten CHF/m²Verglasunga o.GS	Süd	Ost	West	Nord	Jahreskosten CHF/m²Verglasunga Süd	Ost	West	Nord
U1	Ref 0	1.1	0.56	59	-333	-333	76	81	96	-39	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	1.5	1.4	1.0	4.3
	Ref 1 (*)	1.1	0.60	55	-333	-333	105	111	127	-17	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	0.6	0.4	0.0	3.6
	V 1.0	1.0	0.55	81	-302	-302	99	104	119	-14	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	2.2	2.1	1.7	4.9
	V 1.1 (*)	1.0	0.6	80	-302	-302	135	141	157	13	4.6	4.6	4.6	4.6	4.6	1.3	1.1	0.7	4.2
	V1.2 (*)	1.0	0.56	85	-302	-302	106	111	126	-8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	2.3	2.1	1.8	5.0
	V 1.3 (*)	0.8	0.55	110	-242	-242	159	164	179	47	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	2.4	2.3	1.9	5.1
	V 2.0	0.7	0.52	129	-212	-212	167	173	186	61	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4	3.3	3.1	2.8	5.9
	V 2.1 (*)	0.7	0.52	120	-212	-212	167	173	186	61	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8	2.8	2.6	2.3	5.3
	V 3.0	0.6	0.58	140	-212	-212	211	217	232	93	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	2.8	2.7	2.3	5.7
	V 3.1 (*)	0.6	0.52	130	-181	-181	198	203	217	92	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4	2.6	2.5	2.1	5.2
	V 4.0	0.5	0.52	161	-181	-181	198	203	217	92	9.2	9.2	9.2	9.2	9.2	4.4	4.2	3.9	7.0
	V 4.1 (*)	0.5	0.52	150	-151	-151	228	233	247	122	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	3.0	2.9	2.5	5.6
U2	V 0	1.4	56%	72	-423	-423	-15	-10	5	-129	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.5	4.4	4.0	7.3
	Ref	1.1	56%	78	-333	-333	76	81	96	-39	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	2.6	2.5	2.1	5.4
	V 1b	1.1	67%	105	-333	-333	156	162	180	19	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	2.2	2.0	1.6	5.5
	V 1c	1.0	54%	94	-302	-302	91	97	111	-19	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	3.1	3.0	2.7	5.8
	V 2a	1.1	42%	82	-333	-333	-26	-22	-11	-112	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	5.3	5.2	4.9	7.4
	V 2b	1.1	27%	147	-333	-333	-136	-133	-126	-191	8.4	8.4	8.4	8.4	8.4	11.7	11.6	11.4	13.0
	V 4a	0.7	43%	108	-212	-212	102	106	117	14	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1	3.7	3.6	3.3	5.8
	V 4b	0.8	62%	146	-242	-242	210	216	233	84	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	3.2	3.1	2.7	6.3
	V 5a	0.5	42%	139	-151	-151	162	166	178	75	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	4.0	3.9	3.6	6.1
	V 5b	0.5	57%	185	-151	-151	264	270	285	148	10.6	10.6	10.6	10.6	10.6	4.1	4.0	3.6	6.9

Tabelle 100 **Richtpreise sowie Energiebilanz, Kapitalkosten und Gesamtjahreskosten von verschiedenen Verglasungsvarianten.** Basis: Richtpreise bei zwei grossen schweizerischen Fensterglaslieferanten (Preisstand Mitte 2005, inkl. MWST, ausser (*): Anfang 2006). Erhebung und Berechnungen CEPE (Annahmen: Realzinssatz 3%, Lebensdauer 25 Jahre, Verschattung durch Rahmen 25%, Verschattungsfaktor durch Sonnenschutz Orientierung Süd 0.5, Ost 0.65, West 0.65, Nord 0.8, Ausnutzungsgrad freie Wärme 60%)

Unternehmen	Variante	Verglasung	Ug W/m²K	g-Wert	Richtpreis CHF/m²	Transmissionsverlust MJ/m²Fea	Differenz Energiebilanz (MJ/m²Fea) im Vergleich zu Referenz					Grenzkosten (CHF/kWhNE) im Vergleich zu Referenz				
							o.GS.	Süd	Ost	West	Nord	o.GS.	Süd	Ost	West	Nord
U1	Referenz	2	1.1	56%	59	-333										
	Variante 1.0		1.0	55%	81	-302	*30*	23	23	23	25	*0.15*	0.19	0.19	0.20	0.18
	Variante 2.0	3	0.7	52%	129	-212	*121*	92	91	90	100	*0.12*	0.16	0.16	0.16	0.14
	Variante 3.0	3	0.7	58%	140	-181	*121*	136	136	136	131	*0.14*	0.12	0.12	0.12	0.13
	Variante 4.0	3	0.6	52%	161	-151	*151*	122	122	121	130	*0.14*	0.17	0.17	0.17	0.16
U2	Variante 0	2	1.4	56%	72	-423	*-91*	-91	-91	-91	-91	*0.01*	0.01	0.01	0.01	0.01
	Referenz	2	1.1	56%	78	-333										
	Variante 1b	2	1.1	67%	105	-333	*0*	112	100	104	65	*k.A.*	0.05	0.06	0.05	0.09
	Variante 1c	2	1.0	54%	94	-302	*30*	10	12	11	18	*0.11*	0.33	0.27	0.28	0.18
	Variante 2a	2	1.1	42%	82	-333	*0*	-143	-127	-132	-83	Fragestellung nicht relevant, da nur Sonnenschutz (Ug wie Referenz)				
	Variante 2b	2	1.1	27%	147	-333	*0*	-296	-264	-273	-171					
	Variante 4a	3	0.7	43%	108	-212	*121*	-12	3	-1	44	*0.05*	k.A	k.A	k.A	0.14
	Variante 4b	3	0.8	62%	146	-242	*91*	152	145	147	126	*0.15*	0.09	0.10	0.09	0.11
	Variante 5a	3	0.5	42%	139	-151	*181*	49	63	59	105	*0.07*	0.25	0.20	0.21	0.12
	Variante 5b	3	0.5	57%	185	-151	*181*	192	191	191	187	*0.12*	0.11	0.11	0.11	0.12

Tabelle 101 Sensitivitätsbetrachtung Verschattung (Verschattungsfaktor durch Sonnenschutz Orientierung Süd 0.7, Ost 0.8, West 0.8, Nord 0.9, Ausnutzungsgrad freie Wärme 60%): Energiebilanz und Grenzkosten von verschiedenen Verglasungsvarianten im Vergleich zur Referenzverglasung. Basis: Richtpreise bei zwei grossen schweizerischen Fensterglaslieferanten (Preisstand Mitte 2005, inkl. MWST). Erhebung und Berechnungen CEPE (Annahmen: Realzinssatz 3%, Lebensdauer 25 Jahre, Verschattung durch Rahmen 25%)

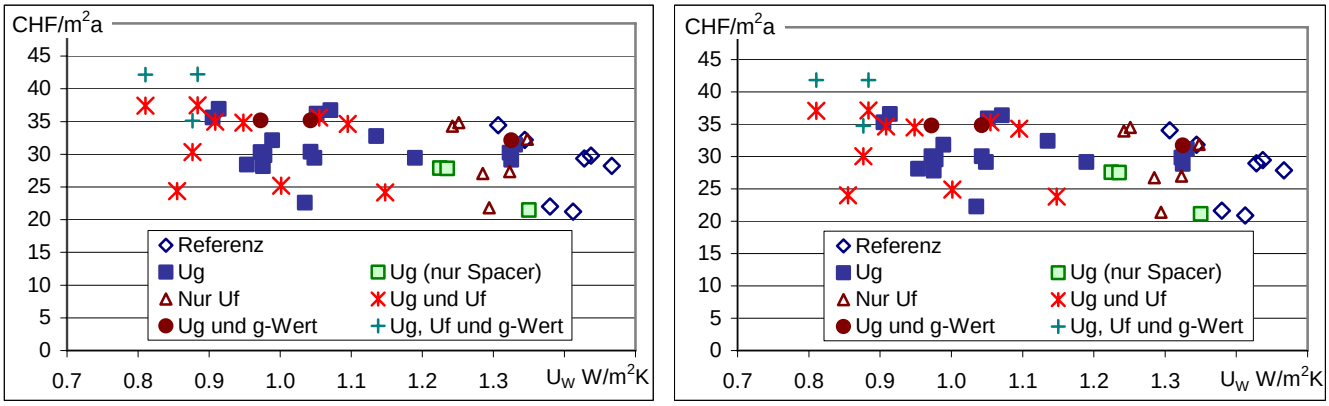


Abbildung 133 Jahreskosten (CHF/m²Fea) als Funktion des erreichten Fenster-U-Werts Uw für die Orientierungen Ost (links) und West (rechts)

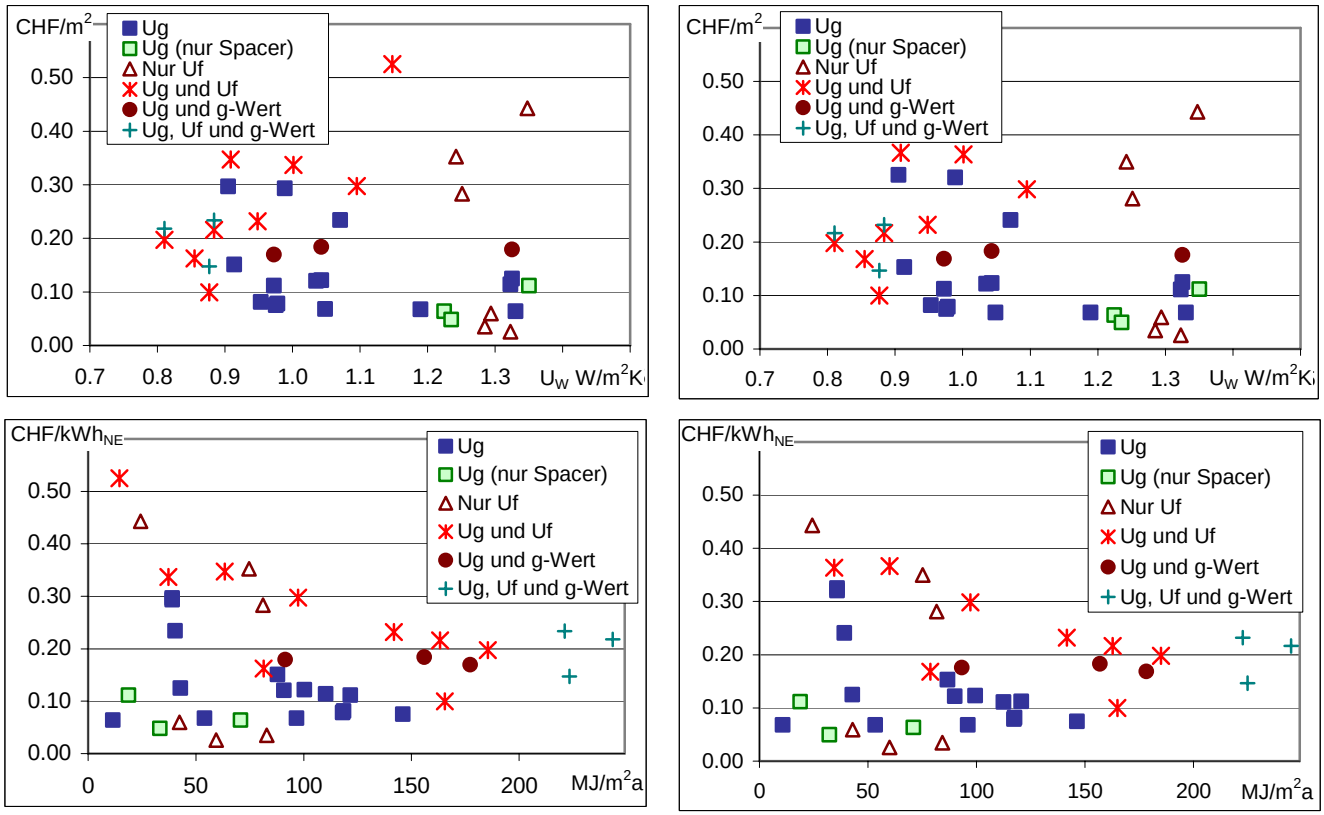


Abbildung 134 Grenzkosten (CHF/kWh$_{NE}$) im Vergleich zum jeweiligen Referenzfenster als Funktion des erreichten Fenster-U-Werts Uw (obere Abbildungen) und der erreichten Heizwärmebedarfsreduktion (MJ$_{NE}$/m²a, untere Abbildungen) für die Orientierungen Ost (links) und West (rechts)

9.7.2 Lüftungsanlagen

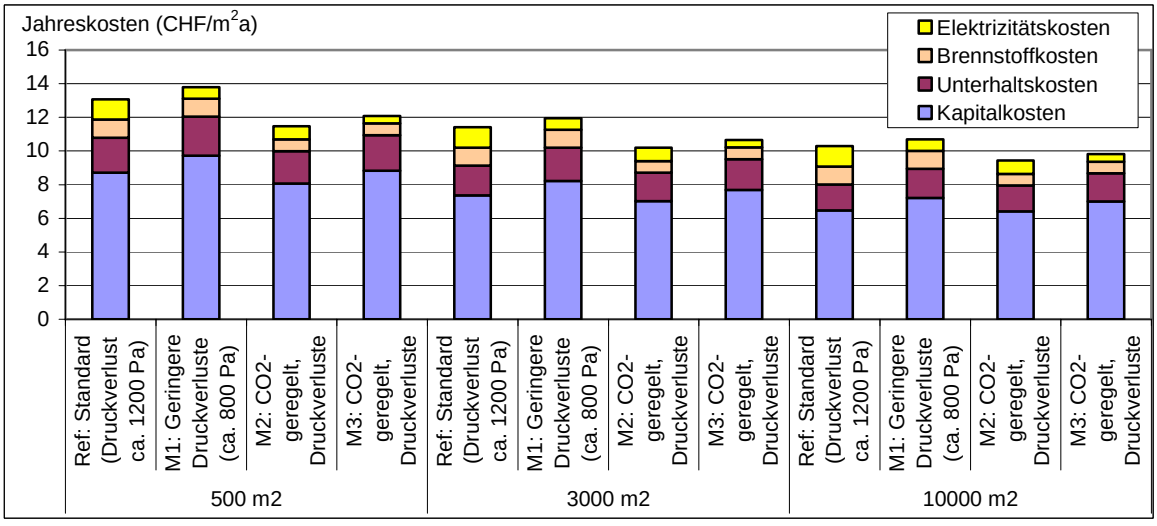


Abbildung 135 Struktur der spezifischen Jahreskosten von Lüftungsanlagen mit WRG unterschiedlicher Energie-Effizienz als Funktion der zu belüftenden Fläche (Investitionskosten gemäss Abbildung 46, Annahmen gemäss Tabelle 78, WRG-Wg. 65%)

		Endenergie Wärme MJ/m²a	Endenergie Strom MJ/m²a	Investitionen CHF/m²	Jahreskosten Kapital CHF/m²a	Jahreskosten Unterhalt CHF/m²a	Jahreskosten Brennstoff CHF/m²a	Jahreskosten Elektrizität CHF/m²a	Jahreskosten Total CHF/m²a
R1.1	Zweifache Luftmenge (LM), 8 (m³/h)/m², 24 h/Tag, 2700 Pa, ohne [bzw. R1.2 inkl.] Unterhaltskosten	383	385			[3.1]	7.5	18.2	25.7 [28.8]
R2.1	Zweifache Luftmenge (LM), 8 (m³/h)/m², 12 h/Tag, 2700 Pa, ohne [bzw. R2.2 inkl.] Unterhaltskosten	127	239			[3.1]	2.5	11.3	13.8 [16.9]
E1	LM gemäss Bedarf: 4 (m³/h)/m², 12 h/Tag, neue Lüftungsanlage (alte Verteilung), 2025 Pa	59	54	59	5.7	2.1	1.2	2.8	11.7
E2	LM gemäss Bedarf: 4 (m³/h)/m², 12 h/Tag, neue Lüftungsanlage, neue Verteilung, 1375 Pa	59	44	104	8.7	2.1	1.2	2.1	14.0

Tabelle 102: **Energiebedarf, Investitions- und Jahreskosten bei Lüftungserneuerungen (neuer Monobloc ohne bzw. inkl. neuer Verteilung), Fallbeispiel Bürogebäudeneubau mit 3000 m² EBF, inkl. Zuluftkühlung** (Annahmen: Lebensdauer 15 Jahre, Realzinssatz 3%, Brennstoffpreis 7 Rp/kWh, Elektrizitätspreis 17 Rp/kWh, *energetische Werte gemäss Simulationsrechnungen.

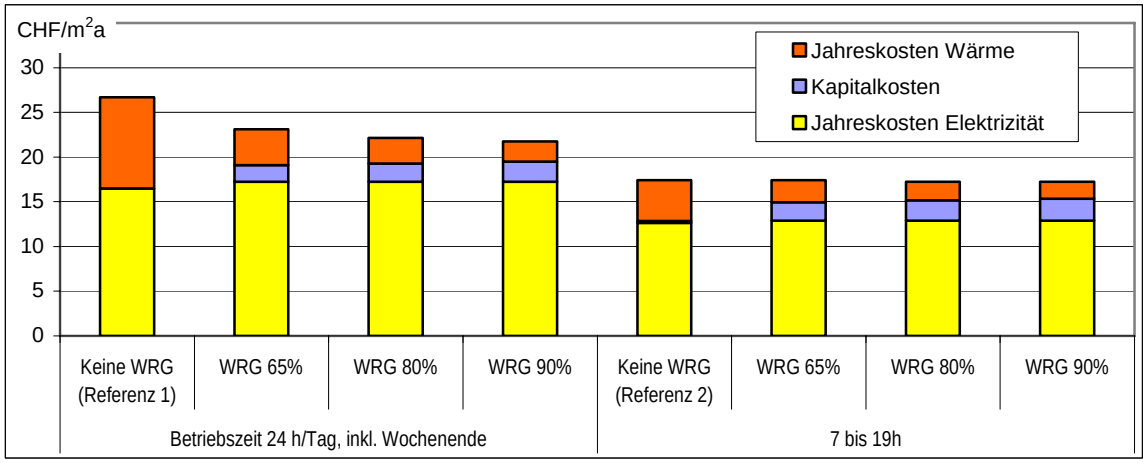


Abbildung 136 **Jahreskosten nach Einbau von WRG sowie Einbau von WRG und Betriebszeit-Reduktion** im Vergleich zu Lüftung ohne WRG im 24h-Betrieb (Referenz 1) und im 12h-Betrieb (Referenz 2), Beispiel 1500 m^2_{EBF}, Investitionskosten gem. Abbildung 47 (Mittelwert), 5% Realzins, Elektrizitätspreis 17 Rp/kWh, Brennstoffpreis 5 Rp/kWh, Luftmenge 4 (m³/h)/m², energ. Wirkung gem. Tabelle 81

9.7.3 Komfortkühlung

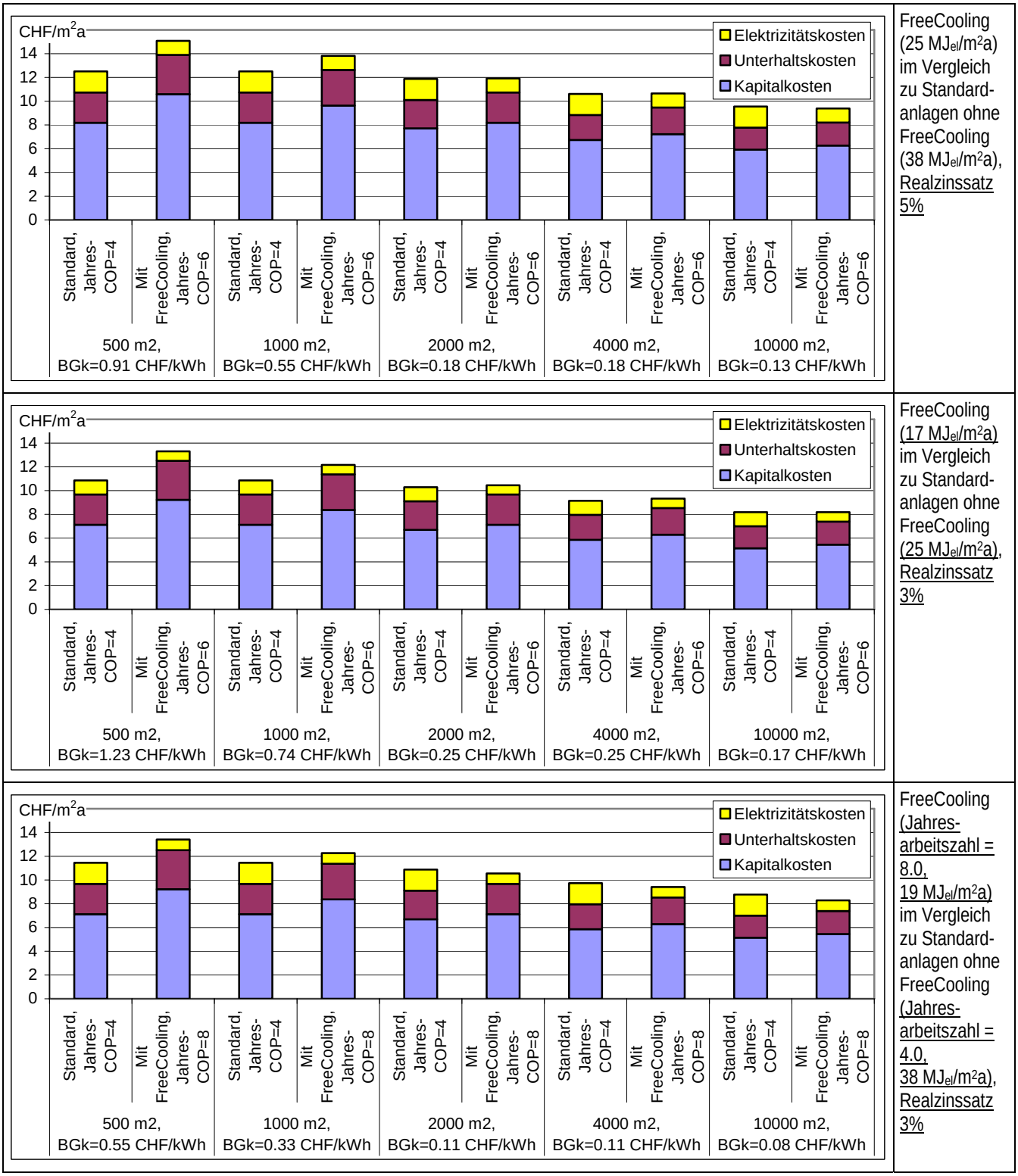


Abbildung 137 Jahreskosten (Elektrizitätspreis 17 Rp/kWh) und Grenzkosten von Kühlanlagen mit FreeCooling im Vergleich zu Standardanlagen ohne FreeCooling für verschiedene Gebäudegrössen (50 W_{th}/m^2 und Realzinssätze, Investitionskosten gemäss Abbildung 48: Mittelwert für Neubauten, K1 und K2, Jährliche Unterhaltskosten = 3% der Investitionskosten)

9.7.4 Beleuchtungen

a) Ein-/Aus-Regelung

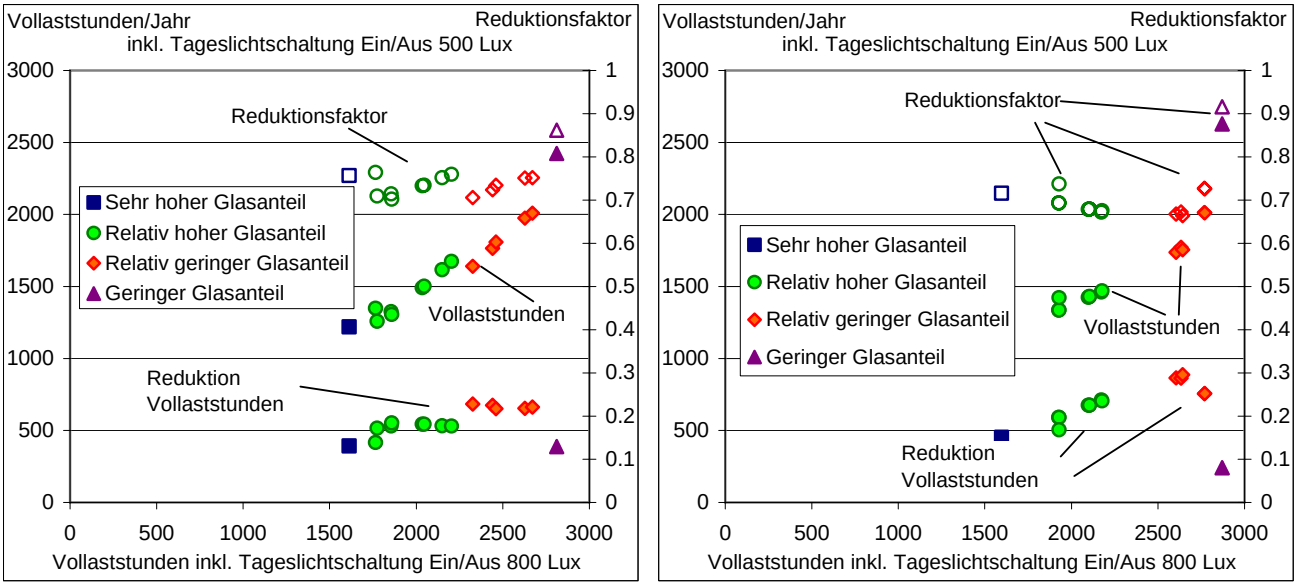


Abbildung 138 Volllaststunden bei geregelten Beleuchtungen für einen grossen Westraum (links) und einen grossen Nordraum (rechts). Grosser Raum: Raumtiefe 7 m, Arbeitsplatz 5m; kleiner Raum: 4 m: Glasfläche / Fassadenfläche: sehr hoch: 0.68, relativ hoch: 0.38, relativ gering: 0.26, gering: 0.18

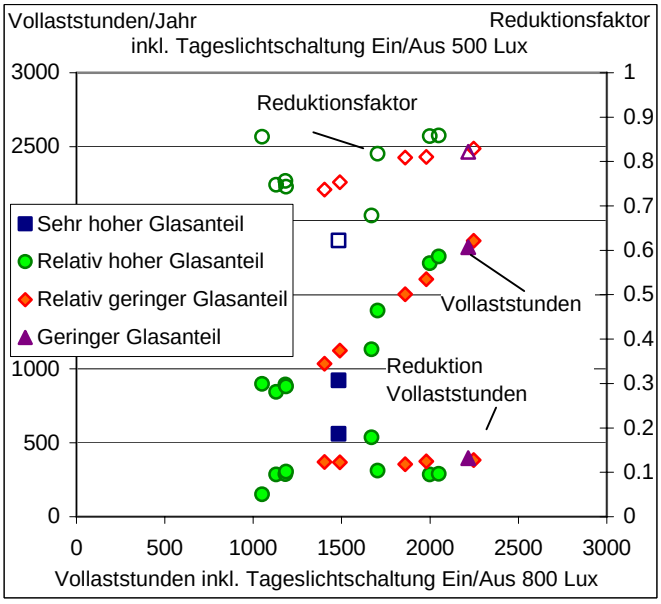


Abbildung 139 Volllaststunden bei geregelten Beleuchtungen für einen kleinen Südraum. Geometrie: Raumtiefe: 4 m, Arbeitsplatz: Glasanteile (Glasfläche / Fassadenfläche): sehr hoher Glasanteil: 0.68, relativ hoher Glasanteil: 0.38, relativ geringer Glasanteil: 0.26, geringer Glasanteil: 0.18

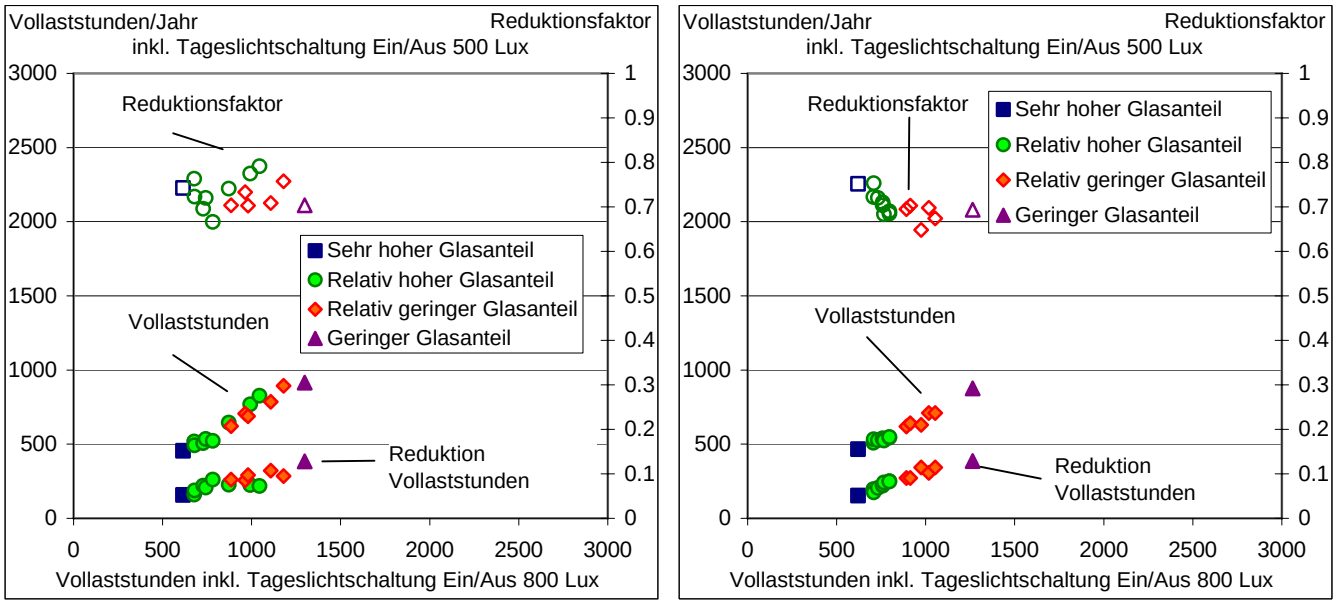


Abbildung 140 Volllaststunden bei geregelten Beleuchtungen für Eckräume: Südwest (linke Abbildung) und Nordost rechte Abbildung). Geometrie: Raumtiefe: 4 m, Arbeitsplatz: Glasanteile (Glasfläche / Fassadenfläche): sehr hoher Glasanteil: 0.68, relativ hoher Glasanteil: 0.38, relativ geringer Glasanteil: 0.26, geringer Glasanteil: 0.18

b) Tageslichtbasiertes Dimmen

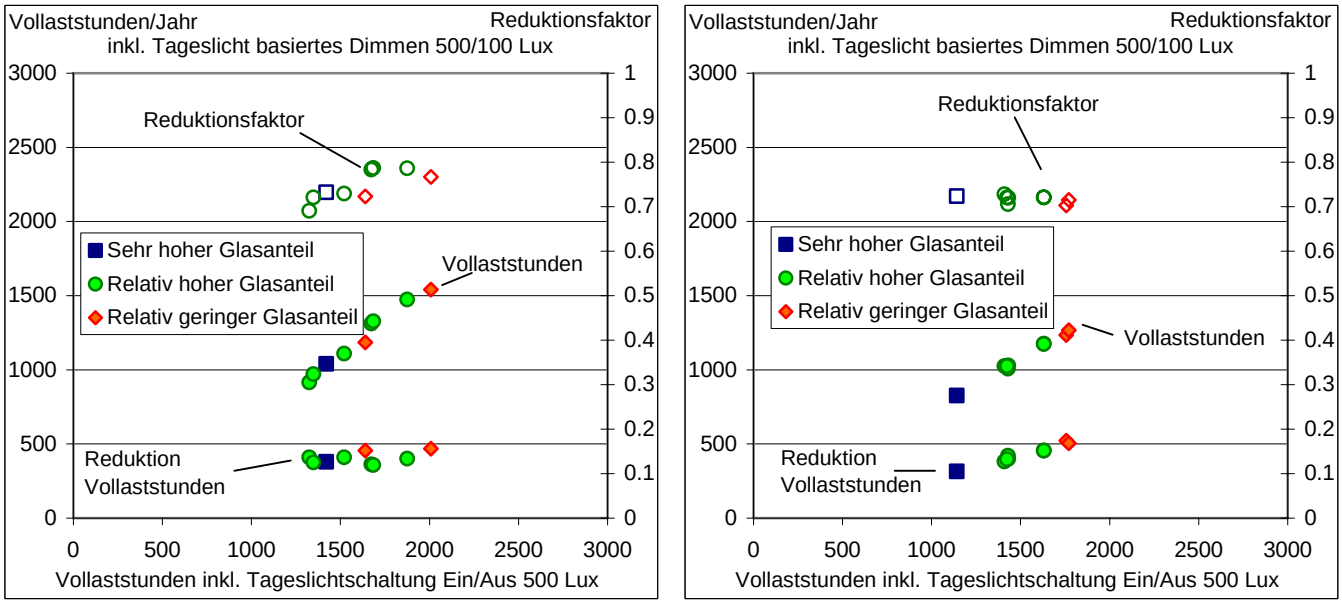


Abbildung 141 Volllaststunden bei geregelten Beleuchtungen (Dimmen zwischen 100 und 500 Lux) für einen grossen Westraum (linke Abbildung) und einen grossen Nordraum (rechte Abbildung). Geometrie grosser Raum: Raumtiefe 7 m, Arbeitsplatz 5m; Geometrie kleiner Raum: Raumtiefe: 4 m, Arbeitsplatz: Glasanteile (Glasfläche / Fassadenfläche): sehr hoher Glasanteil: 0.68, relativ hoher Glasanteil: 0.38, relativ geringer Glasanteil: 0.26, geringer Glasanteil: 0.18

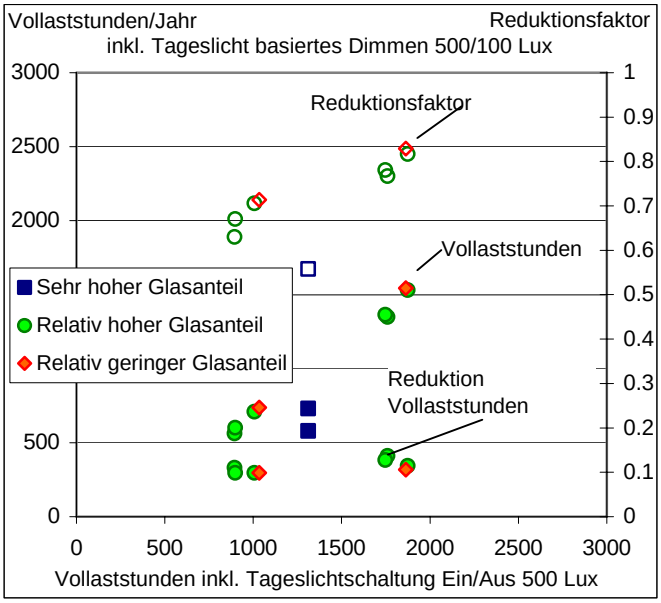


Abbildung 142 **Volllaststunden bei geregelten Beleuchtungen (Dimmen zwischen 100 und 500 Lux) für einen kleinen Südraum.** Geometrie: Raumtiefe: 4 m, Arbeitsplatz: Glasanteile (Glasfläche / Fassadenfläche): sehr hoher Glasanteil: 0.68, relativ hoher Glasanteil: 0.38, relativ geringer Glasanteil: 0.26, geringer Glasanteil: 0.18

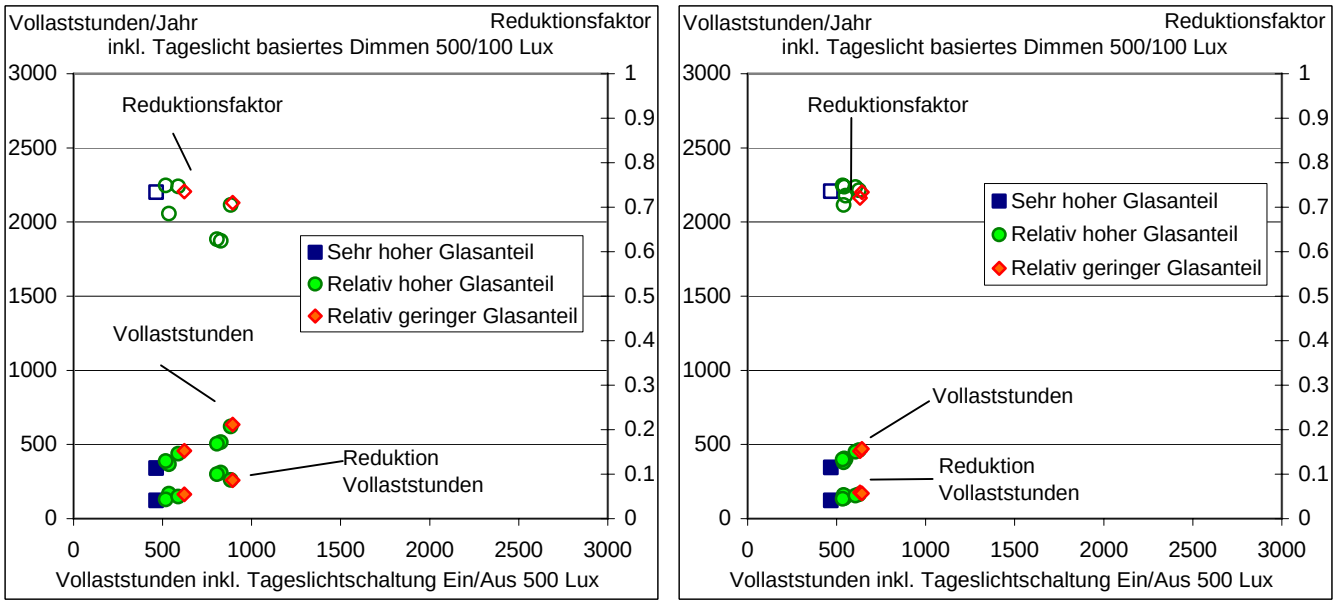


Abbildung 143 **Volllaststunden bei geregelten Beleuchtungen (Dimmen zwischen 100 und 500 Lux) für Eckräume: Südwest (linke Abbildung) und Nordost rechte Abbildung).** Geometrie: Raumtiefe: 4 m, Arbeitsplatz: Glasanteile (Glasfläche/Fassadenfläche): sehr hoher Glasanteil: 0.68, relativ hoher Glasanteil: 0.38, relativ geringer Glasanteil: 0.26, geringer Glasanteil: 0.18

9.7.5 Wärmeerzeugung

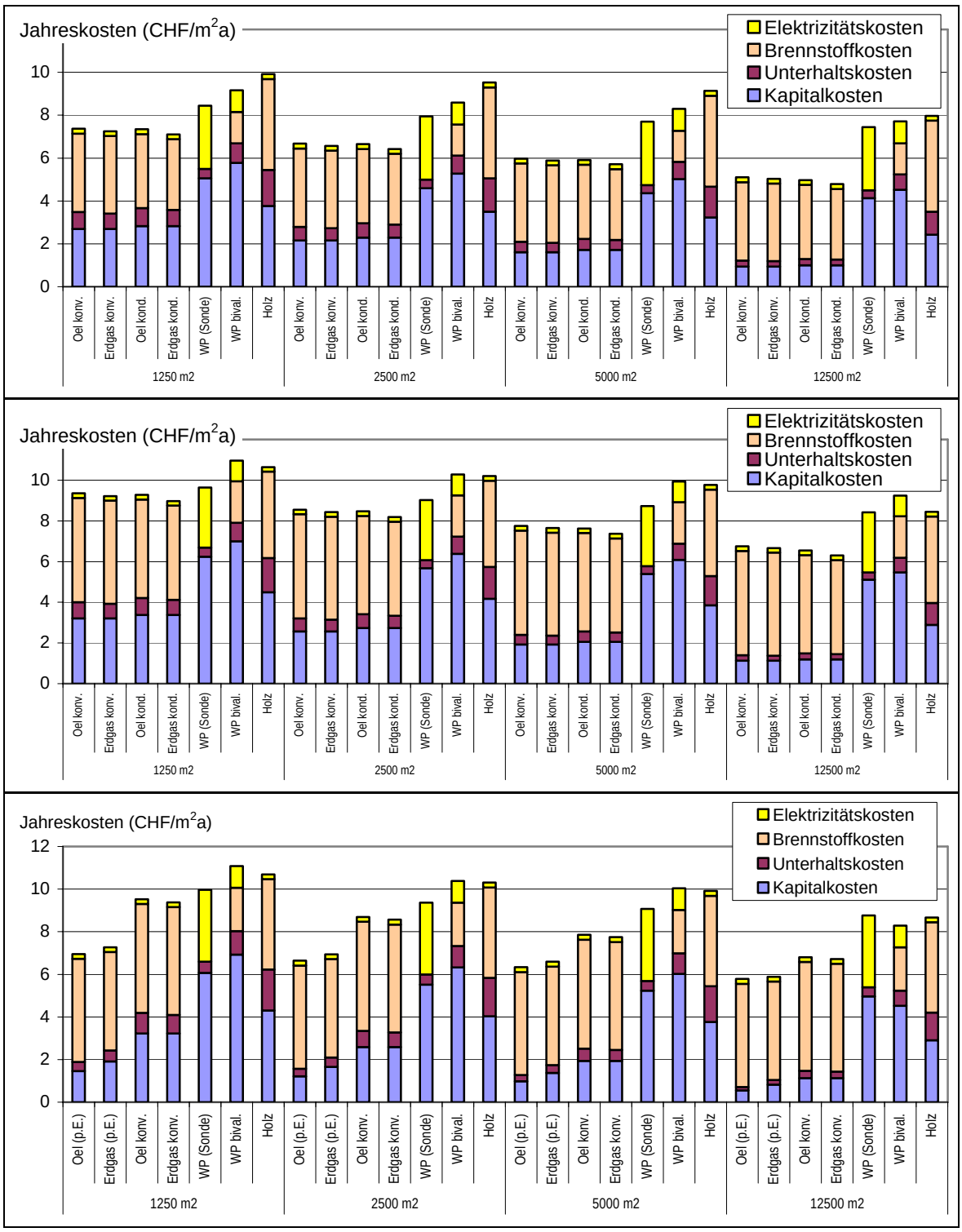


Abbildung 144 Struktur der Jahreskosten von verschiedenen Wärmeerzeugungssystemen
Realzins=3%, fossiler Energiepreis=0.05 CHF/kWh, Neubau (obere Abbildung),
Realzins=5%, fossiler Energiepreis=0.07 CHF/kWh, Neubau (mittlere Abbildung)
Realzins=5%, fossiler Energiepreis=0.07 CHF/kWh, Gebäudebestand (untere Abbildung)
Pelletspreis 0.055 CHF/kWh, Strompreis=0.17 CHF/kWh, JAZ WP=3.5 bzw. 4 (Neubau),
JAZ WP=3 bzw. 3.5 (Gebäudebestand), JNG Pelletsfeuerung=0.9

9.8 Anhang zum Kapitel 6

9.8.1 **Struktur der Kapitalkosten**

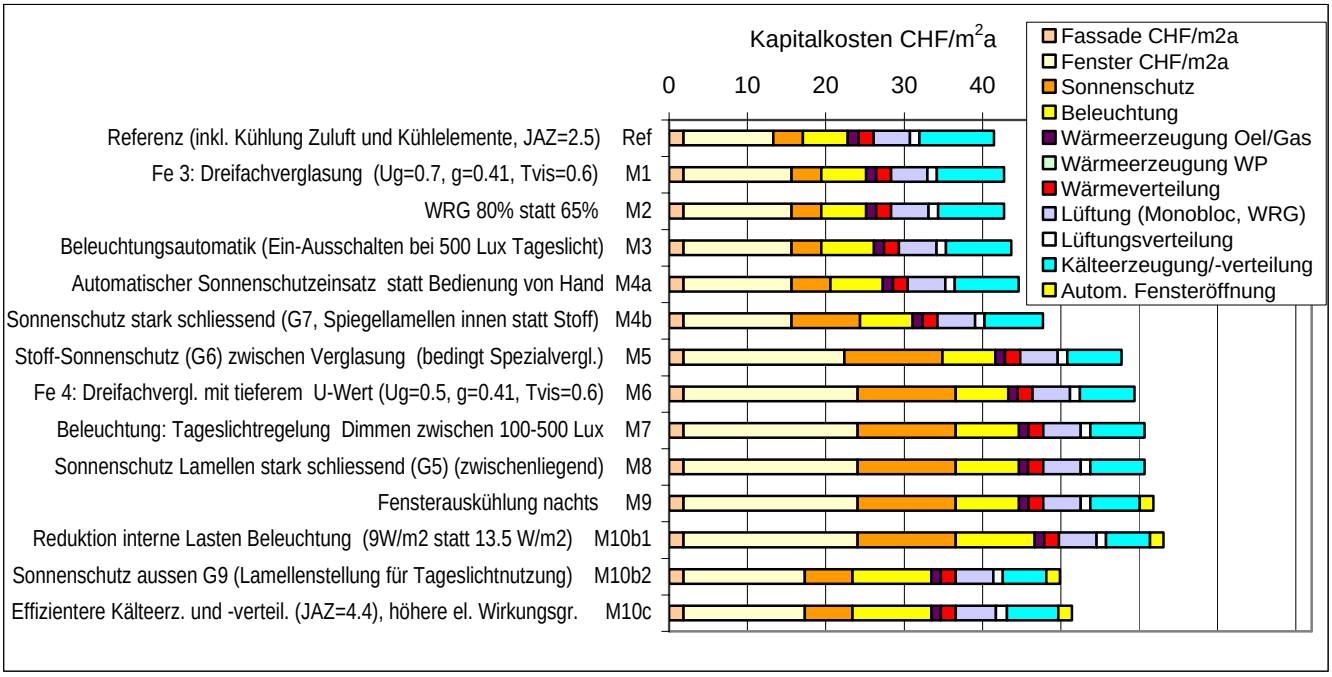


Abbildung 145 **Struktur der Kapitalkosten bei Gebäudetyp BN1.1a:** Neubau eines grossen Bürohochhauses, EBF 10'000 m², hoher Fensteranteil (80%), ohne Fensteröffnung bei Überhitzung, Leichtbauweise, hohe interne Lasten, Beleuchtung: 13.5 W/m², U-Wert Aussenwand 0.29 bzw. 0.77 W/m²K (Wert ohne bzw. mit Wärmebrücken, innerer, von Hand bedienter Sonnenschutz (G8), Lüftung (Druckverluste 1200 Pa, Ventilatorwirkungsgrad 55%) mit WRG (thermischer Wirkungsgrad 65%), Fenstertyp 2 (U_g=1.1, g=0.52, T_{vis}=0.73, U_f=1.8), Beleuchtung: manuelles Ein-/Ausschalten (bei 800 Lux), Kühlung der Zuluft und Kühlelemente (Kühldecke/Umluftkühler) ohne Leistungsbeschränkung, JAZ=2.5

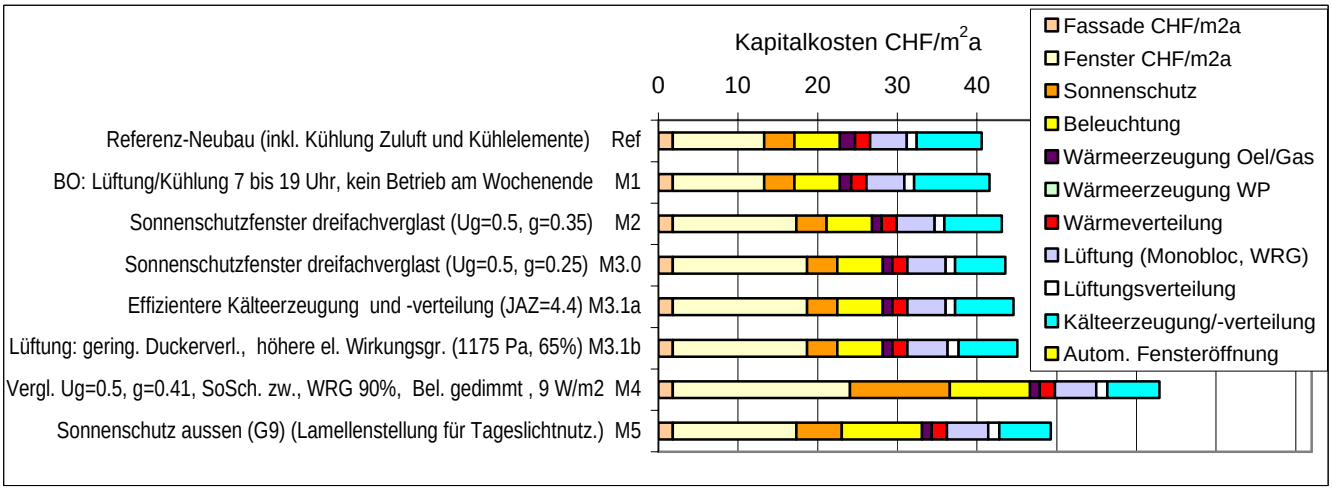


Abbildung 146 **Struktur der Kapitalkosten bei Gebäudetyp BN1.1b:** Neubau eines grossen Bürogebäudes, EBF 10'000 m², hoher Fensteranteil (80%), ohne Fensteröffnung bei Überhitzung, Leichtbauweise, hohe interne Lasten, Beleuchtung: 13.5 W/m², Fassaden-U-Wert 0.77 W/m²K (inkl. WB), innerer, von Hand bedienter Sonnenschutz (G8), Lüftung mit WRG 65%, Fenstertyp 2 (U_g=1.1, g=0.52, T_{vis}=0.73, U_f=1.8), Beleuchtung: manuell (800 Lux), Zuluftkühlung und Kühlelemente)

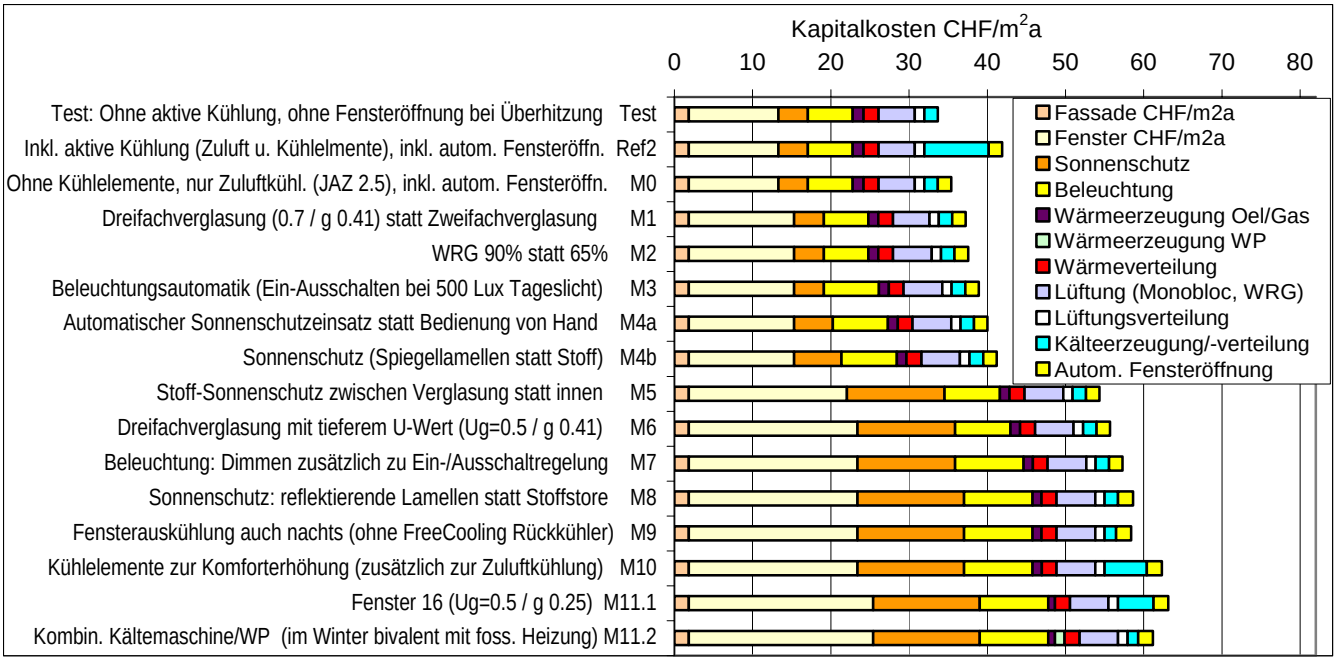


Abbildung 147 Struktur der Kapitalkosten bei Gebäudetyp BN1.1c: Neubau eines Bürogebäudes, hoher Fensteranteil (80%), inkl. automatische Fensteröffnung bei Überhitzung (ausser Fall Test), Leichtbauweise, hohe interne Lasten, Beleuchtung: 13.5 W/m2, U-Wert Aussenwand ohne Wärmebrücke 0.29, innerer, von Hand bedienter Sonnenschutz (G8), Lüftung mit WRG 65%, Fenstertyp 2 (U_g=1.1, g=0.52, T_{vis}=0.73, U_f=1.8), Beleuchtung: manuelles Ein-/Ausschalten (bei 800 Lux), Kühlung der Zuluft und Kühlelement (Kühldecke/Umluftkühler)

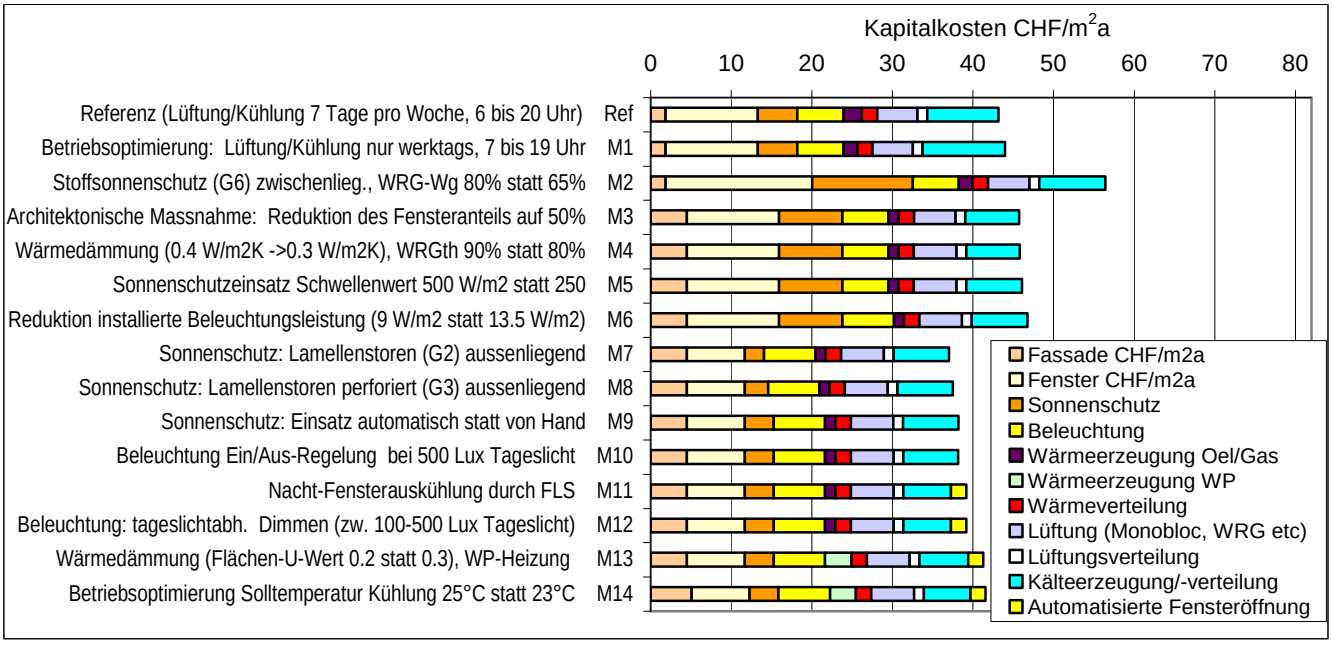


Abbildung 148 Struktur der Kapitalkosten bei Gebäudetyp BN1.2a: Neubau eines mittleren Bürohochhauses, EBF 4600 m², hoher Fensteranteil (80%), ohne Fensteröffnung bei Überhitzung, Leichtbauweise, U-Wert Aussenwand ohne Wärmebrücke 0.29, hohe interne Lasten, Beleuchtung: 13.5 W/m², innerer, von Hand bedienter Sonnenschutz (G8), Lüftung mit WRG 65%, Kühlung der Zuluft und Kühlelemente (Kühldecke oder Umluftkühler), JAZ=2.5, Fenster Typ 2 (U_g=1.1, g=0.52, T_{vis}=0.73, U_f=1.8), Beleuchtung: manuelles Ein-/Ausschalten (bei 800 Lux)

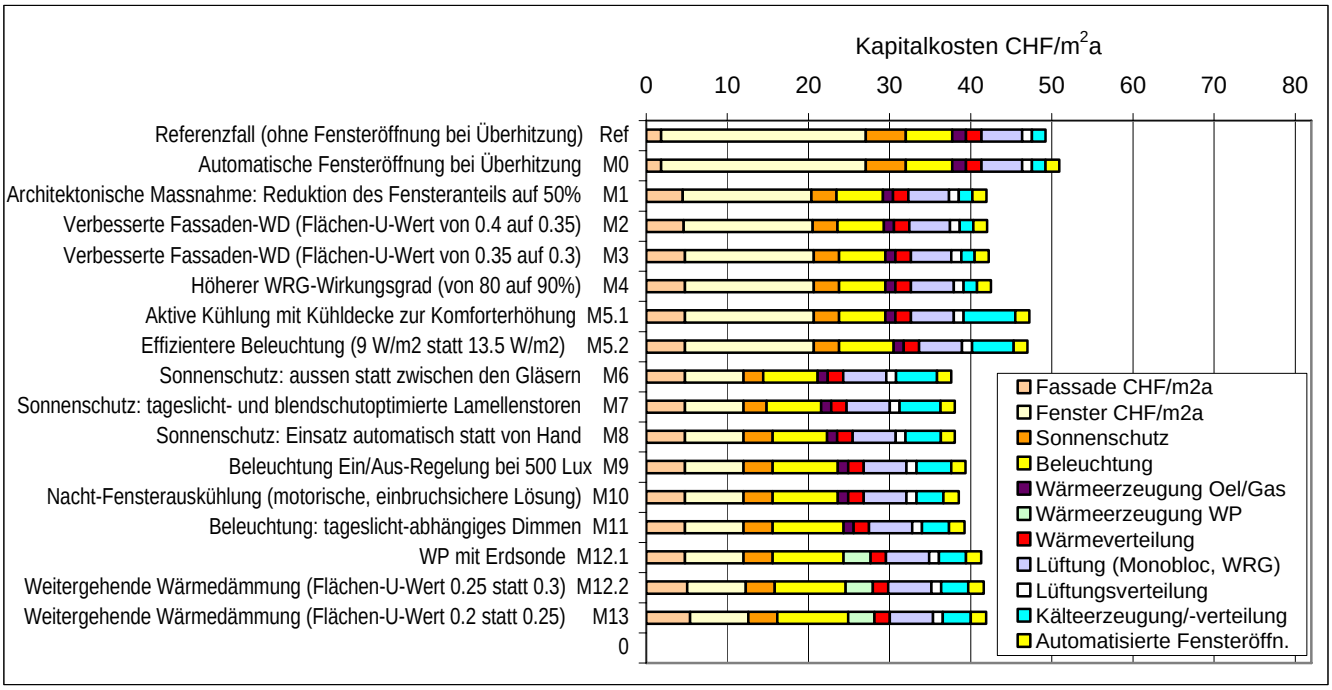


Abbildung 149 Struktur der Kapitalkosten bei Gebäudetyp BN1.2b: Neubau eines mittleren Bürogebäudes, EBF 4600 m², hoher Fensteranteil (80%), inkl. automatische Fensteröffnung bei Überhitzung (ausser Fall Test), Leichtbauweise, U-Wert 0.29 W/m²K (o. WB), hohe interne Lasten, Beleuchtung: 13.5 W/m², innerer, von Hand bedienter Sonnenschutz (G6), Lüftung mit WRG 80%, Kühlung der Zuluft und Kühlelemente, JAZ=2.5, Fenster Typ 2 (U_g=1.1, g=0.52, T_{vis}=0.73, U_f=1.8), Beleuchtung: manuelles Ein-/Ausschalten (bei 800 Lux)

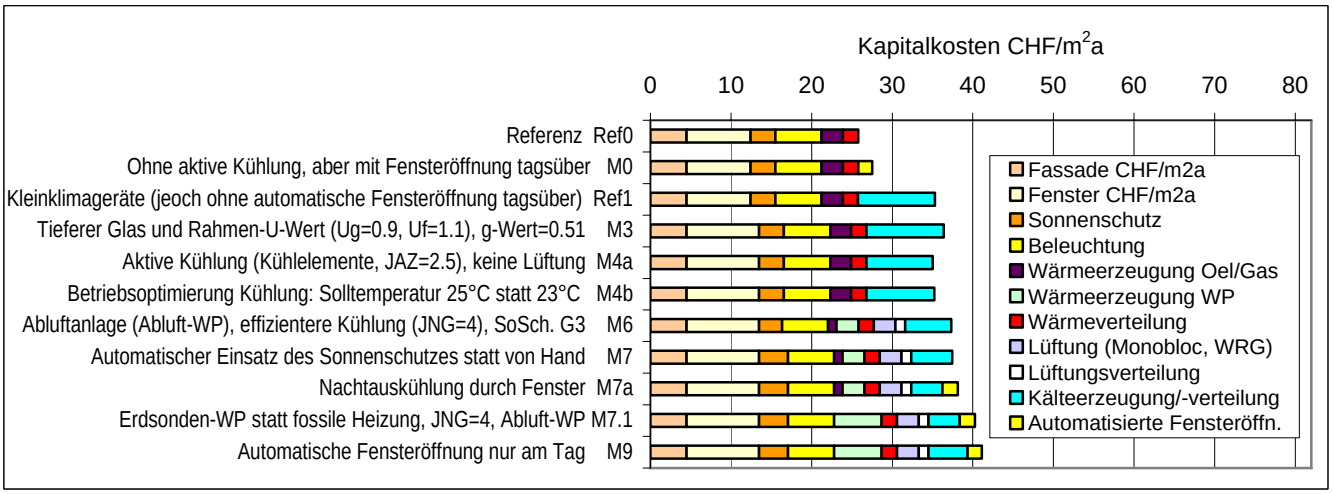


Abbildung 150 Struktur der Kapitalkosten bei Gebäudetyp BN2.1a: Bürogebäude-Neubau, relativ hoher Fensteranteil (50%), Massivbauweise, U-Wert Aussenwand 0.4 bzw. 0.54 W/m²K (ohne bzw. mit Wärmebrücken), geringe interne Lasten, aussenliegender, von Hand bedienter Sonnenschutz (G4), keine mechanische Lüftungsanlage (Fensterlüftung), keine Kühlung, Metallfassade, ohne Fensteröffnung bei Überhitzung (ausser M0 und M7a und folgende), Fenster Typ 2 (U_g=1.1, g=0.52, T_{vis}=0.73, U_f=1.8), Beleuchtung: manuelles Ein-/Ausschalten (bei 800 Lux), 9 W/m²

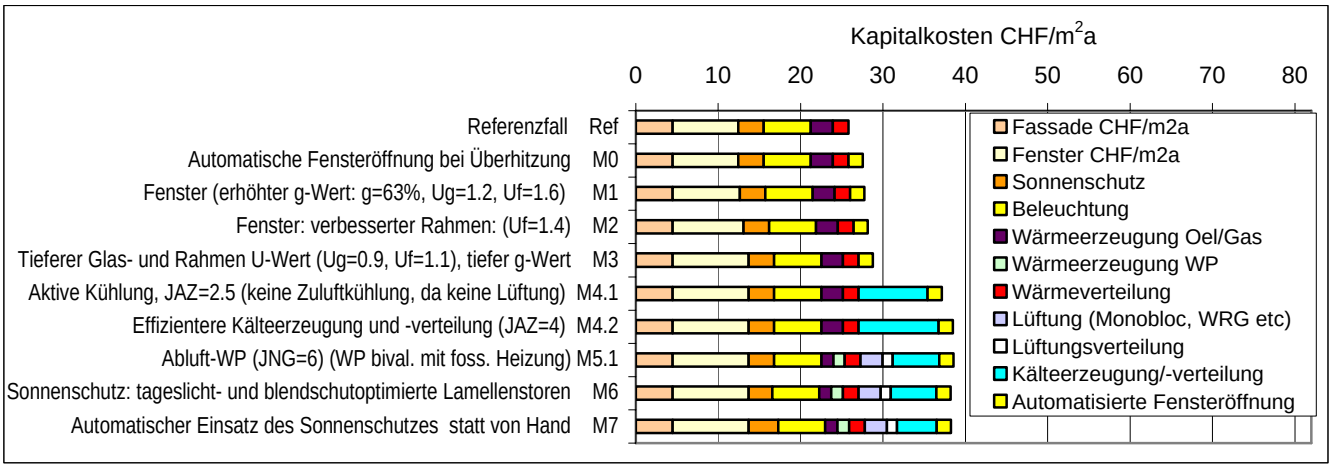


Abbildung 151 Struktur der Kapitalkosten bei Gebäudetyp BN2.1b: Bürogebäude-Neubau, relativ hoher Fensteranteil (50%), Massivbauweise, U-Wert Aussenwand 0.4 bzw. 0.54 W/m²K (ohne bzw. mit Wärmebrücken), geringe interne Lasten, aussenliegender, von Hand bedienter Sonnenschutz (G4), keine mechanische Lüftungsanlage (Fensterlüftung), keine Kühlung, inkl. automatische Fensteröffnung bei Überhitzung (ausser Fall Test), Metallfassade, Fenster Typ 2 (U_g=1.1, g=0.52, T_{vis}=0.73, U_f=1.8), Beleuchtung: manuelles Ein-/Ausschalten (bei 800 Lux), 9 W/m²

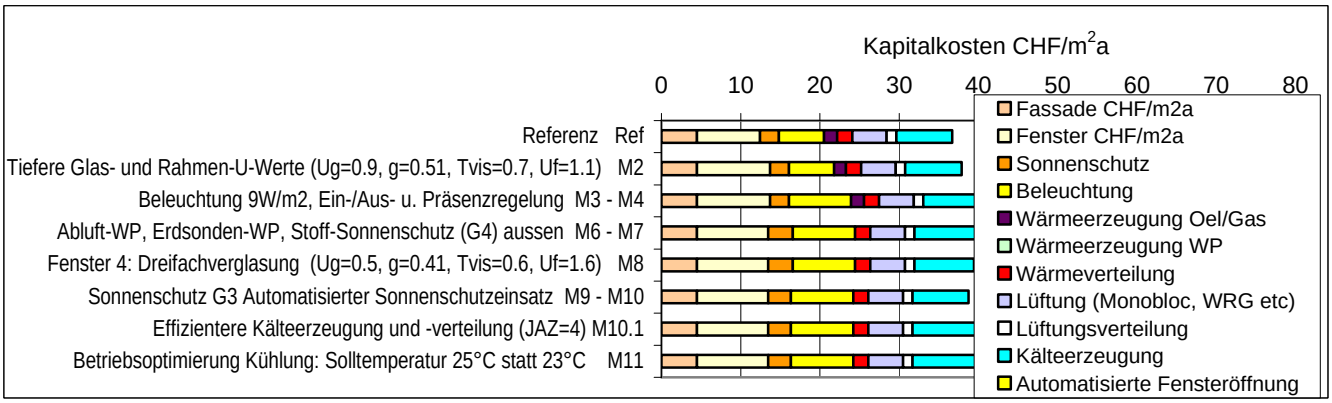


Abbildung 152 Struktur der Kapitalkosten bei Gebäudetyp BN2.2a: Bürogebäude mit relativ hohem Fensteranteil (50%) und Metallfassade, ohne Fensteröffnung bei Überhitzung, Massivbauweise, U-Wert Aussenwand 0.4 bzw. 0.54 W/m²K (ohne bzw. mit Wärmebrücken), hohe interne Lasten, aussenliegender, von Hand bedienter Sonnenschutz (G2), mechanische Lüftung mit WRG 65%, Kühlung der Zuluft und Kühlelemente (JAZ=2.5, Solltemperatur=25°C), Fenstertyp 2 (U_g=1.1, g=0.52, T_{vis}=0.73), Beleuchtung: manuelles Ein-/Ausschalten (bei 800 Lux), 13.5 W/m²

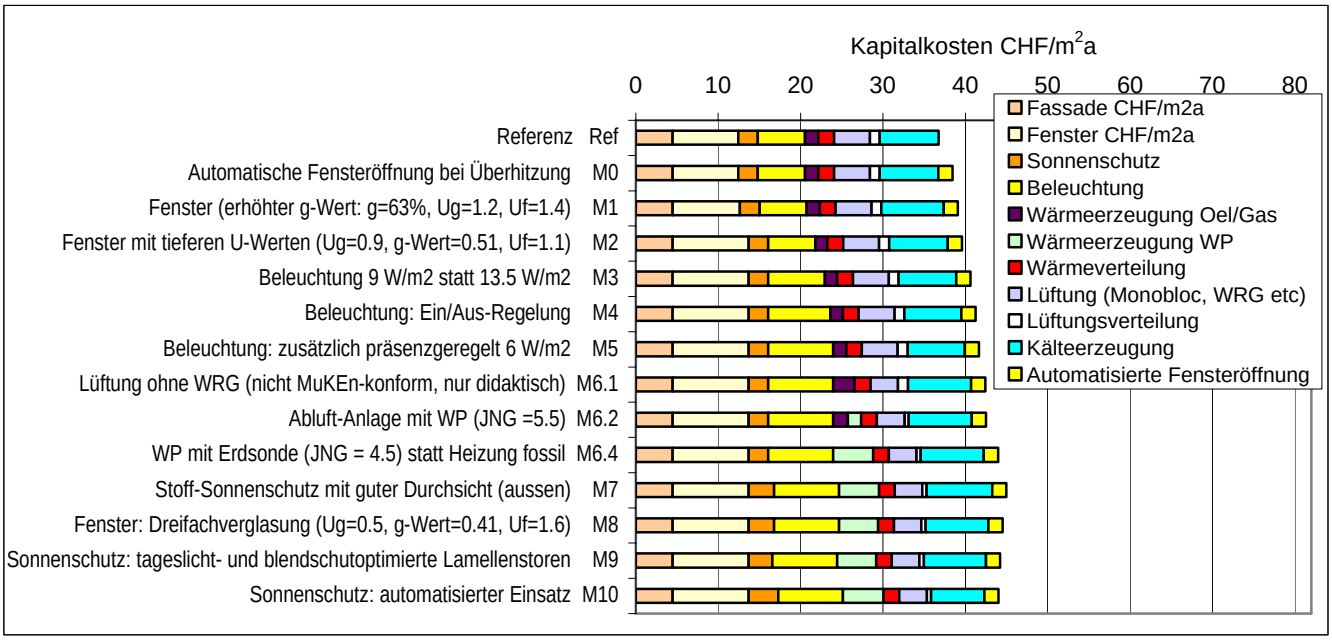


Abbildung 153 Struktur der Kapitalkosten bei Gebäudetyp BN2.2b: Bürogebäude mit relativ hohem Fensteranteil (50%) und Metallfassade, inkl Fensteröffnung bei Überhitzung (ausser Ref0), Massivbauweise, U-Wert Aussenwand 0.4 bzw. 0.54 W/m²K (ohne bzw. mit Wärmebrücken), geringe interne Lasten, aussenliegender, von Hand bedienter Sonnenschutz (G2), mechanische Lüftung mit WRG 65%, Kühlung der Zuluft und Kühlelemente (JAZ=2.5, Solltemperatur=25°C), Fenster Typ 2 (U_g=1.1, g=0.52, T_{vis}=0.73, U_f=1.8), Beleuchtung: manuelles Ein-/Ausschalten (bei 800 Lux), 13.5 W/m²

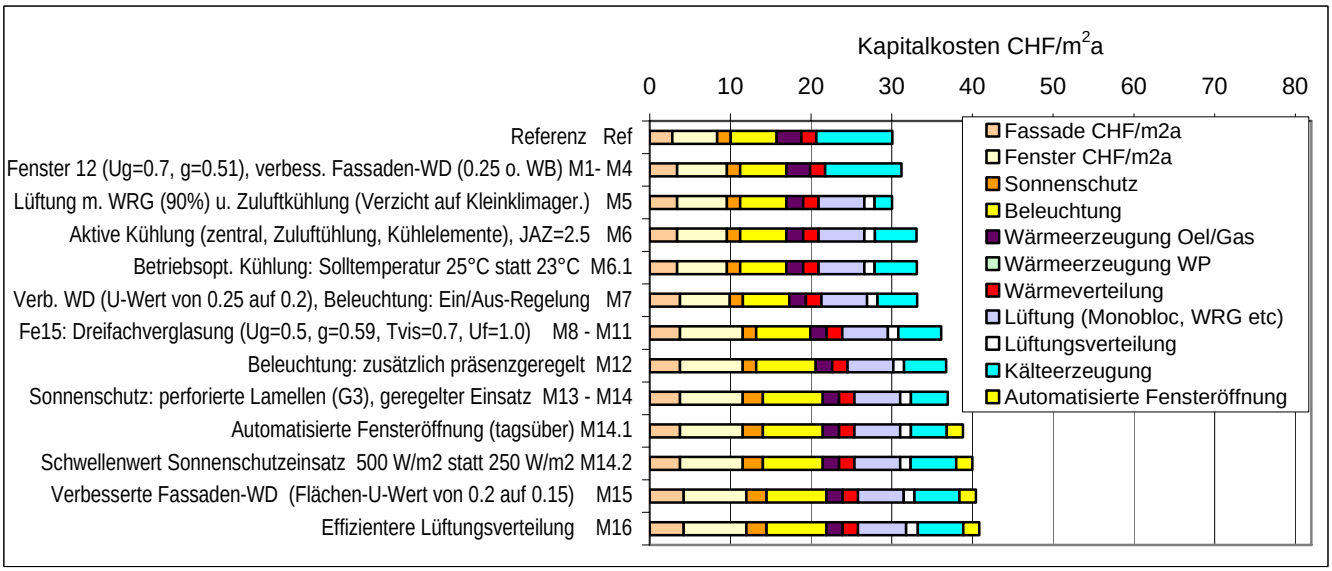


Abbildung 154 Struktur der Kapitalkosten bei Gebäudetyp BN2.3a: Bürogebäude-Neubau mit relativ geringem Fensteranteil (35%), ohne Fensterlüftung bei Überhitzung, Massivbauweise, U-Wert Aussenwand 0.4 bzw. 0.54 W/m²K (ohne bzw. mit Wärmebrücken), geringe interne Lasten, von Hand bedienter Lamellen-Sonnenschutz aussen (G2), keine mechanische Lüftung (Fensterlüftung), Kleinklimageräte (JAZ=1.6), Fenster Typ 2 (U_g=1.1, g=0.52, T_{vis}=0.73, U_f=1.8), Beleuchtung: manuelles Ein-/Ausschalten (bei 800 Lux), 9 W/m²

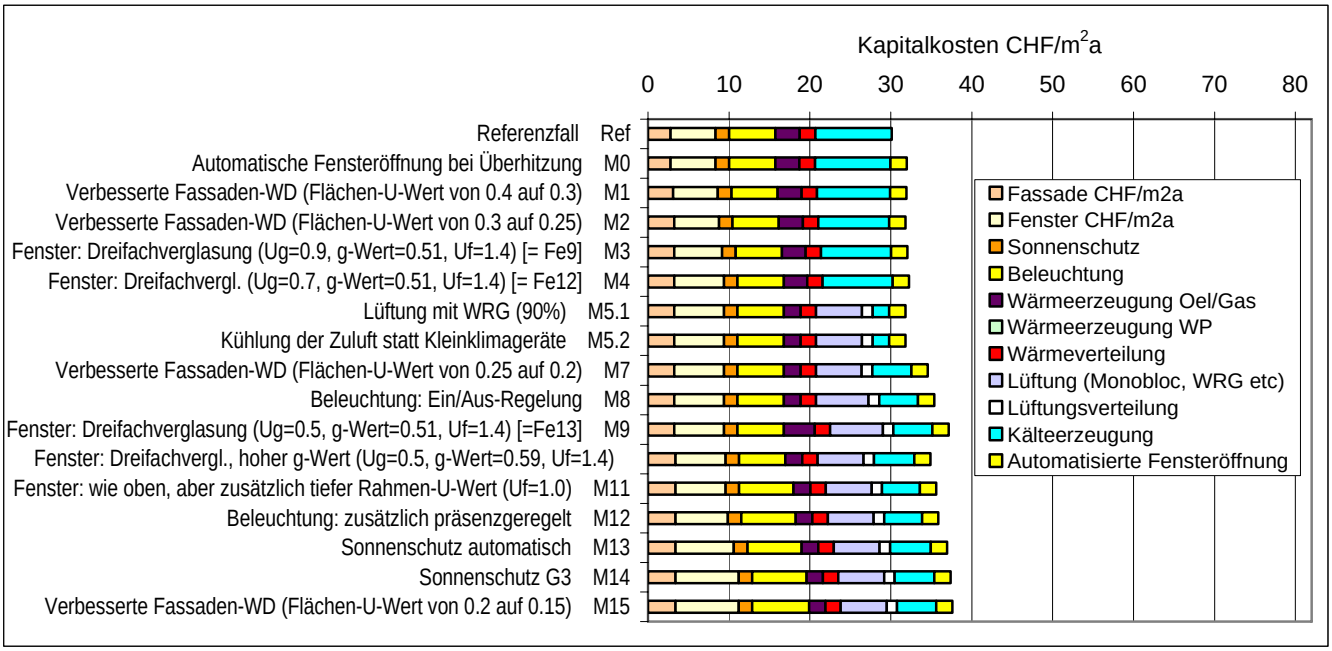


Abbildung 155 Struktur der Kapitalkosten bei Gebäudetyp BN2.3b: Bürogebäude-Neubau mit relativ geringem Fensteranteil (35%), inkl. Fensterlüftung bei Überhitzung, Massivbauweise, U-Wert Aussenwand 0.4 bzw. 0.54 W/m²K (ohne bzw. mit Wärmebrücken), geringe interne Lasten, von Hand bedienter Lamellen-Sonnenschutz aussen (G2), keine mechanische Lüftung (Fensterlüftung), Kleinklimageräte (JAZ=1.6), Fenster Typ 2 (U_g=1.1, g=0.52, T_{vis}=0.73, U_f=1.8), Beleuchtung: manuelles Ein-/Ausschalten (bei 800 Lux), 9 W/m²

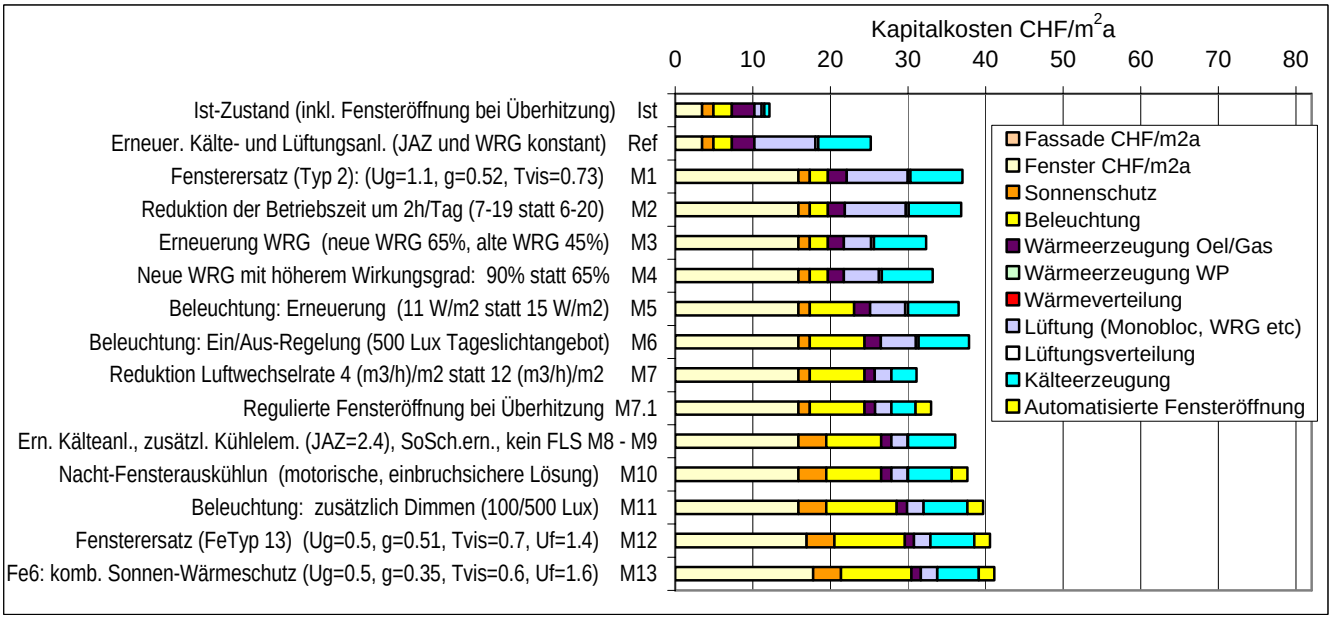


Abbildung 156 Struktur der Kapitalkosten bei Gebäudetyp BB4.1a: Bestehendes Bürogebäude der Bauperiode ab 1976, 8600 m², rel. hoher Fensteranteil (50%), ohne Fensteröffnung bei Überhitzung (ausser M7.1 und M10 folgende), Leichtbauweise, U-Wert Aussenwand 1.3 W/m²K (ohne WB), hohe interne Lasten, Deckenleuchten (abgehängte Decke), Beleuchtung: 15W/m², mechanische Lüftung (hoher Luftwechsel: 12 m³/h/m²) mit WRG (45%), Kühlung der Zuluft, von Hand bedienter Lamellen-Sonnenschutz aussen (S2), Metallfassade, Fenster Typ 1 (U_g=2.2, g=0.7, T_{vis}=0.8, U_f=1.8)

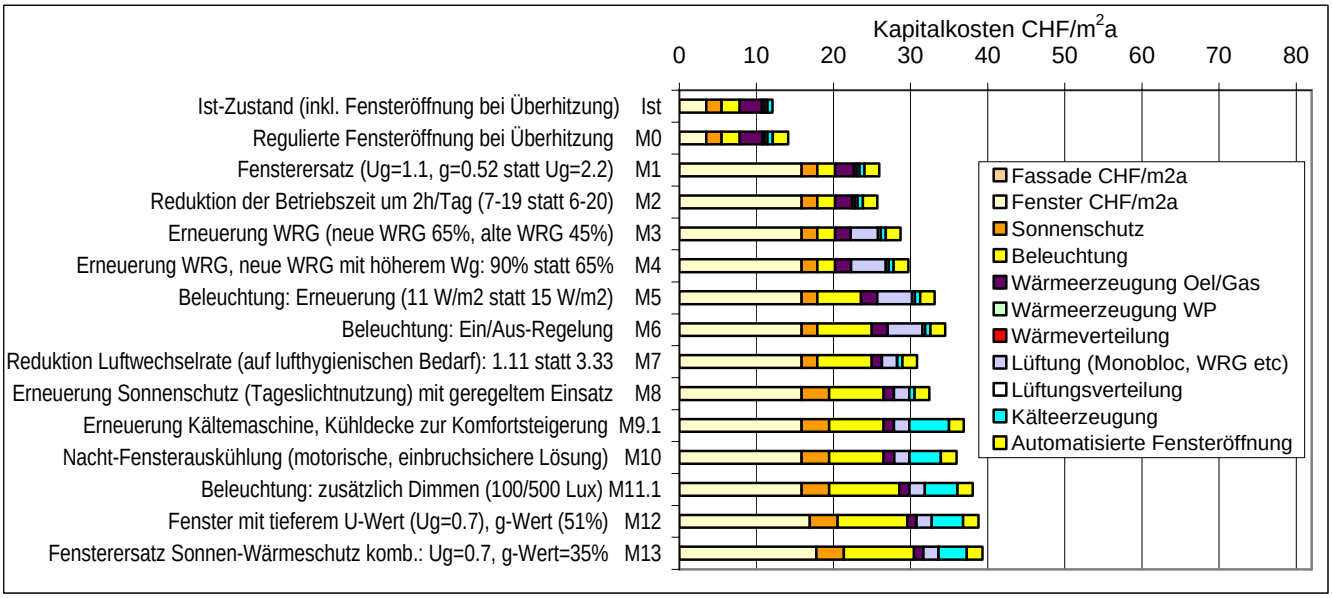


Abbildung 157 Struktur der Kapitalkosten bei Gebäudetyp BB4.1b: Bestehendes Bürogebäude der Bauperiode ab 1976, 8600 m², rel. hoher Fensteranteil (50%), inkl. Fensteröffnung bei Überhitzung, Leichtbauweise, U-Wert Aussenwand ohne Wärmebrücke 1.3, hohe interne Lasten, Deckenleuchten (abgehängte Decke), Beleuchtung: 15W/m², mechanische Lüftung (hoher Luftwechsel) mit WRG (45%), Kühlung der Zuluft, von Hand bedienter Lamellen-Sonnenschutz aussen (S2), Metallfassade, Fenster Typ 1 (U_g=2.2, g=0.7, T_{vis}=0.8, U_f=1.8)

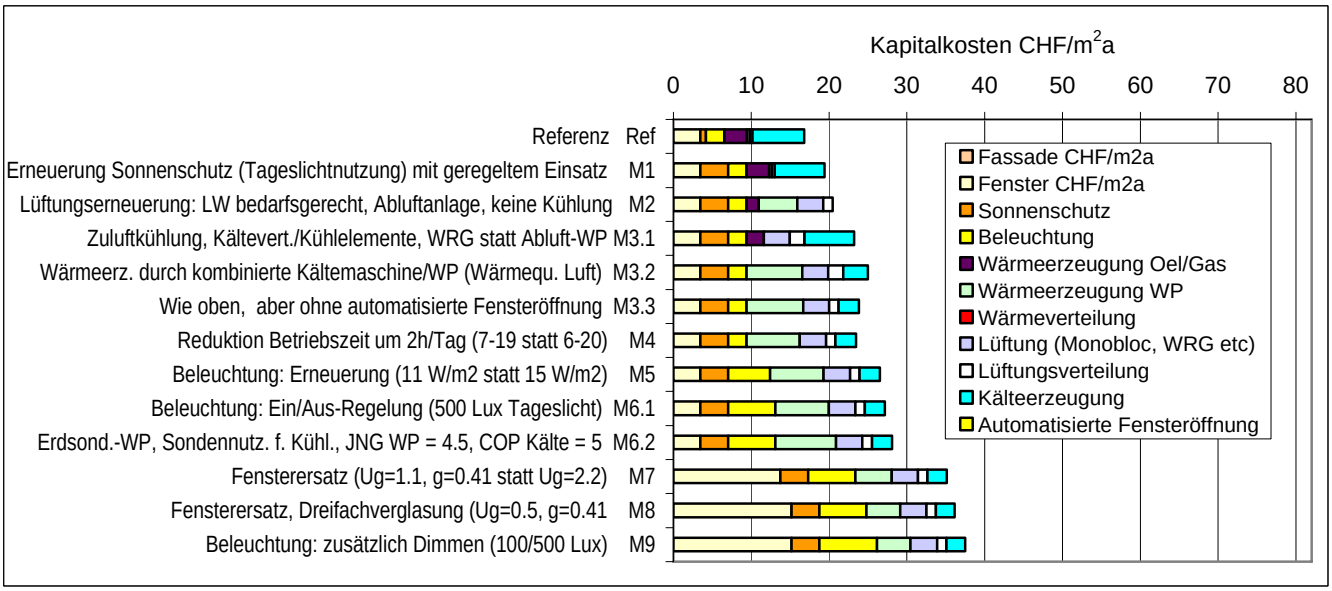


Abbildung 158 Struktur der Kapitalkosten bei Gebäudetyp BB4.2a: Bürogebäude der Bauperiode 1976-2000, 8600 m², relativ hoher Fensteranteil (50%), ohne Fensteröffnung / Brüstungsgerät bei Überhitzung (ausser M2 bis M3.2) Leichtbauweise, U-Wert Aussenwand ohne WB 1.3 W/m²K, hohe interne Lasten, Deckenleuchten (abgehängte Decke), Beleuchtung: 15W/m², mechanische Lüftung (hoher Luftwechsel) mit WRG (45%), Kühlung der Zuluft, von Hand bedienter Lamellen-Sonnenschutz aussen (S2), Metallfassade, Fenstertyp 1 (U_g=2.2, g=0.7, T_{vis}=0.8, U_f=1.8)

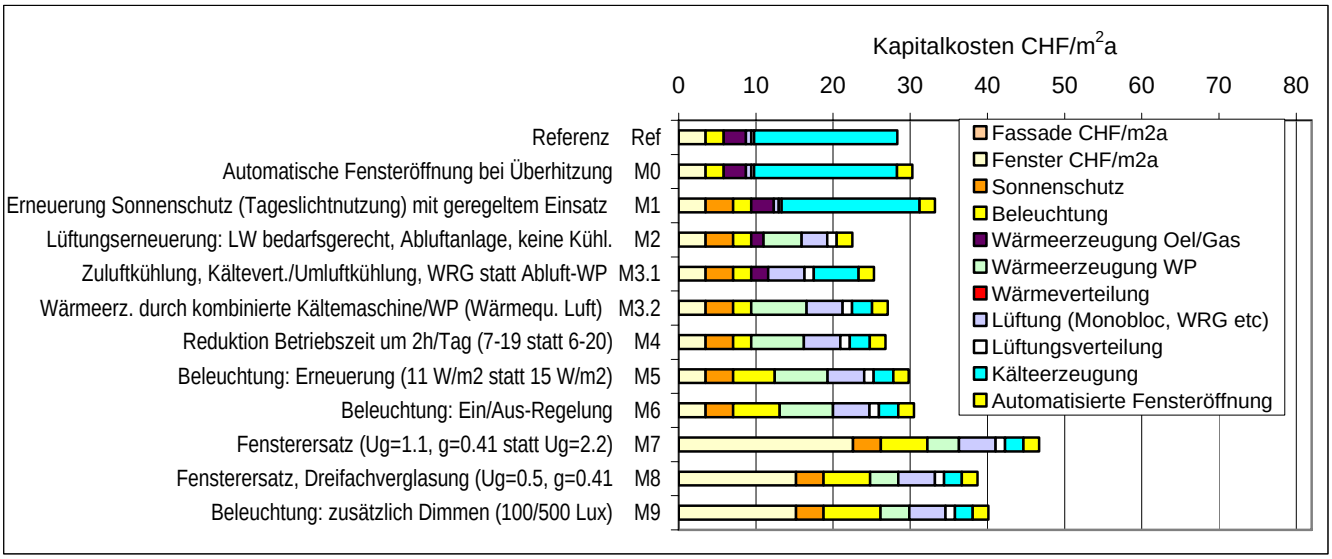


Abbildung 159 Struktur der Kapitalkosten bei Gebäudetyp BB4.2b: Bestehendes Bürogebäude der Bauperiode 1976-2000, 8600 m², relativ hoher Fensteranteil (50%), inkl Fensteröffnung / Brüstungsgerät bei Überhitzung (ausser Ist-Zustand) Leichtbauweise, U-Wert Aussenwand ohne Wärmebrücke 1.3, hohe interne Lasten, Deckenleuchten (abgehängte Decke), Beleuchtung: 15W/m², mechanische Lüftung (hoher Luftwechsel) mit WRG (45%), Kühlung der Zuluft, von Hand bedienter Lamellen-Sonnenschutz aussen (S2), Metallfassade, Fenster Typ 1 (U_g=2.2, g=0.7, T_{vis}=0.8, U_f=1.8)

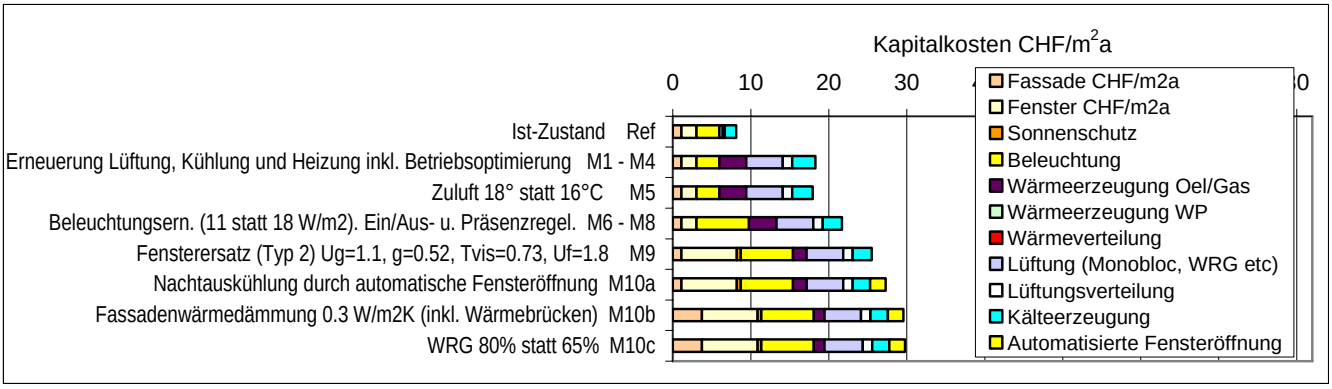


Abbildung 160 Struktur der Kapitalkosten bei Gebäudetyp BB3.1a: Bestehendes Bürogebäude der Bauperiode 1960-1975, 2900 m², eher tiefer Fensteranteil (35%), ohne Fensteröffnung / Brüstungsgerät bei Überhitzung, Massivbauweise, U-Wert Aussenwand 1.1 W/m²K (Werte ohne Wärmebrücken), geringe interne Lasten, Beleuchtung: 18 W/m², Deckenanbauleuchten, alte mechanische Lüftung ohne WRG mit hohen Druckverlusten (2300 Pa), Kühlung der Zuluft, Luftwechsel doppelt so hoch wie lufthygienisch erforderlich, 24h/Tag, von Hand bedienter Lamellen-Sonnenschutz aussen (G1), Mauerwerk, Fenster Typ 0 (U_g=3.0, g=0.75, T_{vis}=0.82, U_f=2.2)

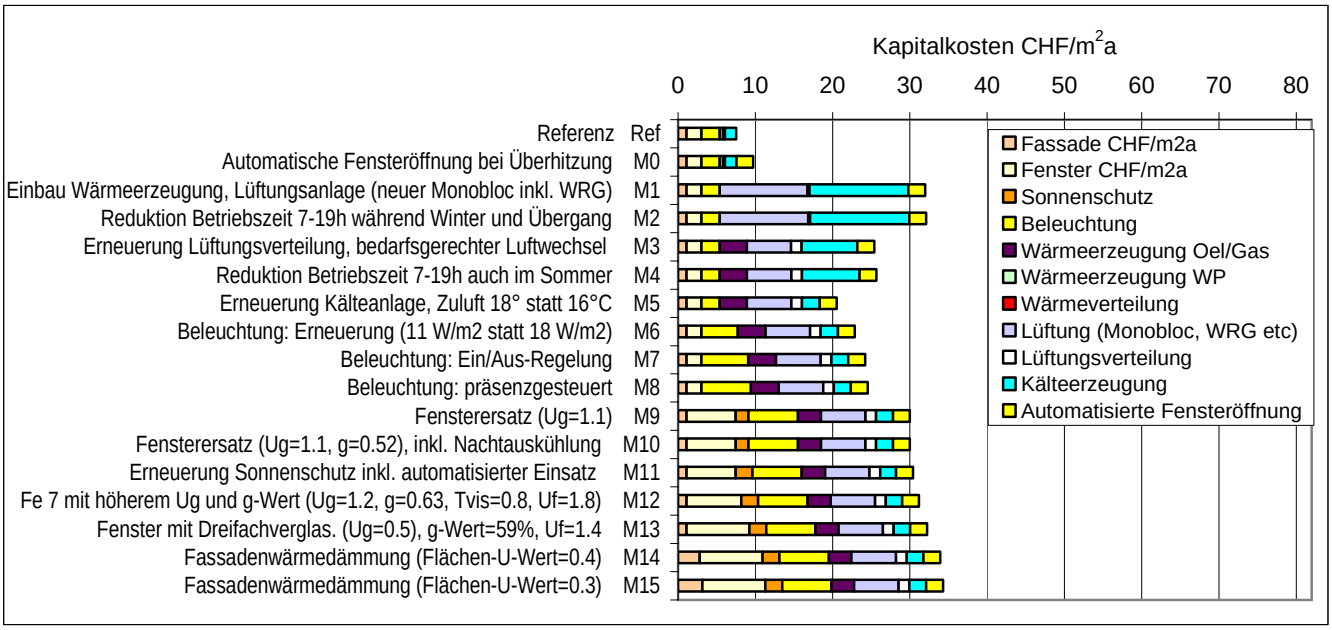


Abbildung 161 Struktur der Kapitalkosten bei Gebäudetyp BB3.1b: Bestehendes Bürogebäude der Bauperiode 1947-1975, 2900 m², eher tiefer Fensteranteil (35%), inkl. Fensteröffnung / Brüstungsgerät bei Überhitzung (ausser Ist-Zustand), Massivbauweise, U-Wert Aussenwand ohne Wärmebrücke 1.1, geringe interne Lasten, Beleuchtung: 18 W/m², Deckenanbauleuchten, alte mechanische Lüftung ohne WRG mit hohen Druckverlusten (2300 Pa), Kühlung der Zuluft, Luftwechsel doppelt so hoch wie lufthygienisch erforderlich, 24h/Tag, von Hand bedienter Lamellen-Sonnenschutz aussen (G1), Mauerwerk, Fenster Typ 0 (U_g=3.0, g=0.75, T_{vis}=0.82, U_f=2.2)

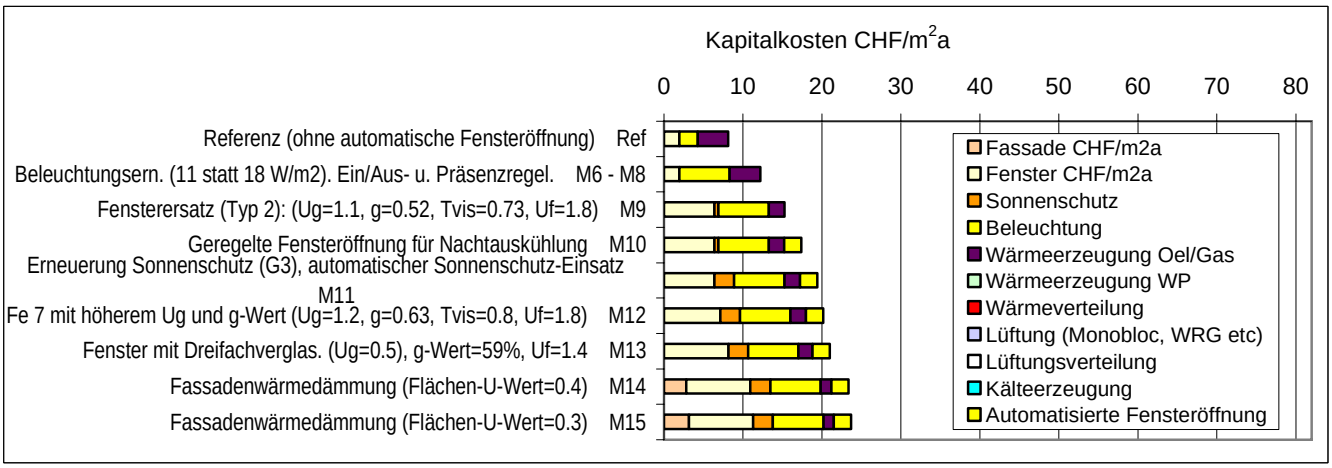


Abbildung 162 Struktur der Kapitalkosten bei Gebäudetyp BB3.2a: Bürogebäude der Bauperiode 1947-1975, 2900 m², eher tiefer Fensteranteil (35%), alte Fenster (hohe Lüftungsverluste durch Undichtigkeit), ohne Fensteröffnung bei Überhitzung, Massivbauweise, U-Wert Aussenwand 1.1 W/m²K (Wert ohne Wärmebrücken), geringe interne Lasten durch Geräte und Personen, Beleuchtung: 18 W/m², Deckenanbauleuchten, ohne mechanische Lüftung, von Hand bedienter Lamellen-Sonnenschutz aussen (G1), Fenster Typ 0 (U_g=3.0, g=0.75, T_{vis}=0.82, U_f=2.2)

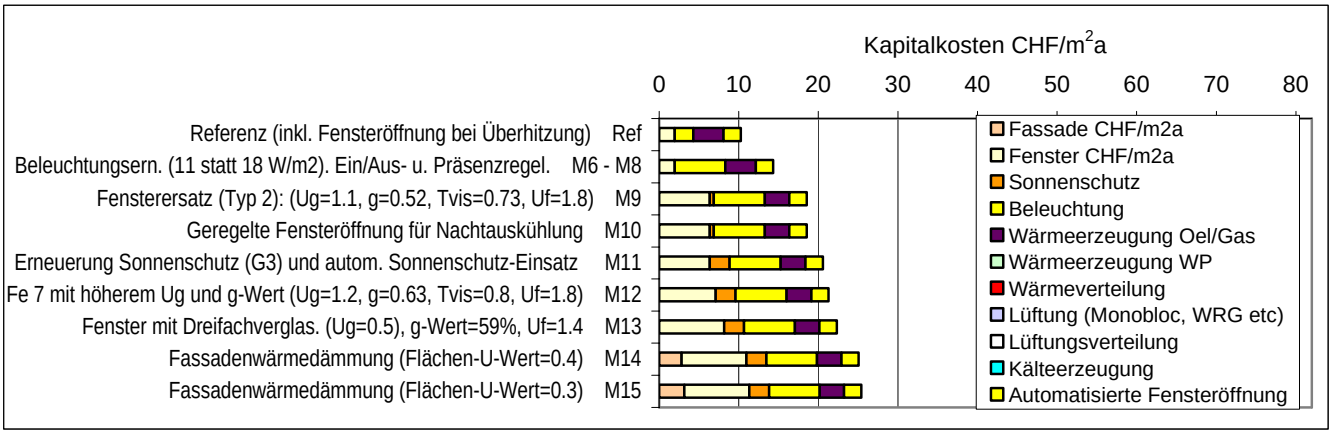


Abbildung 163 Struktur der Kapitalkosten bei Gebäudetyp BB3.2b: Bestehendes Bürogebäude der Bauperiode 1947-1975, 2900 m², eher tiefer Fensteranteil (35%), alte Fenster (hohe Lüftungsverluste durch Undichtigkeit), inkl. Fensteröffnung / Brüstungsgerät bei Überhitzung, Massivbauweise, U-Wert Aussenwand ohne Wärmebrücke 1.1, geringe interne Lasten, Beleuchtung: 18 W/m², Deckenanbauleuchten, ohne mechanische Lüftung, von Hand bedienter Lamellen-Sonnenschutz aussen (G1), Mauerwerk, Fenster Typ 0 (U_g=3.0, g=0.75, T_{vis}=0.82, U_f=2.2)

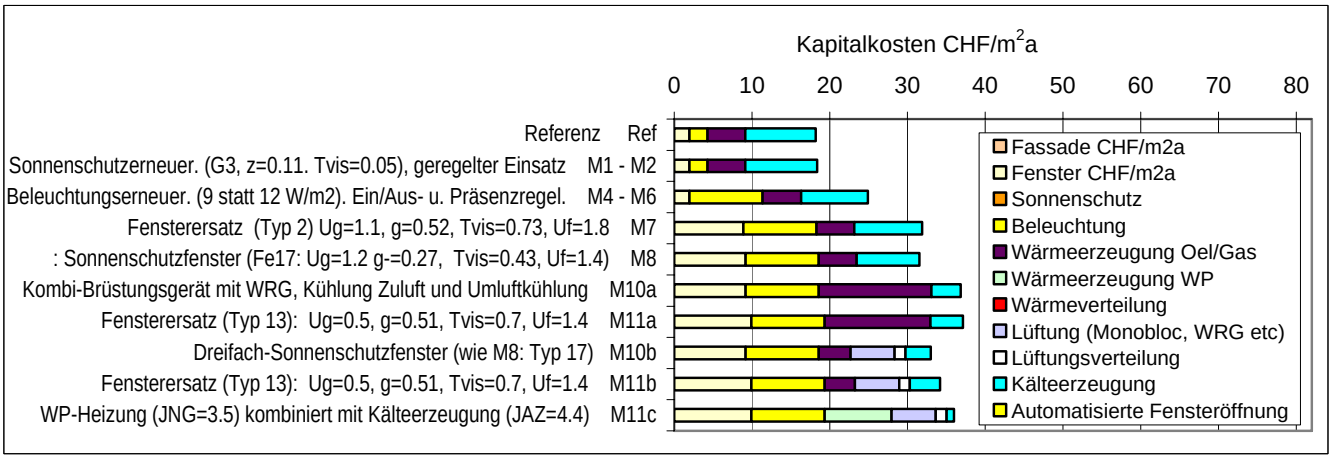


Abbildung 164 Struktur der Kapitalkosten bei Gebäudetyp BB2a: Bestehendes Bürogebäude der Bauperiode 1947-1975, 1150 m², eher geringer Fensteranteil (35%), ohne Fensteröffnung / Brüstungsgerät bei Überhitzung, Leichtbau, U-Wert Aussenwand 1.5 W/m²K (Werte ohne Wärmebrücken): Fassade energetisch zwar suboptimal, aber sonst noch funktional), geringe interne Lasten, Beleuchtung (15 W/m²), Sonnenschutz aussen (Flachlamelle, G1), Kleinklimageräte, Solltemperatur 23°C, Fenster Typ 1 (U_g=2.2, g=0.7, T_{vis}=0.8, U_f=1.8)

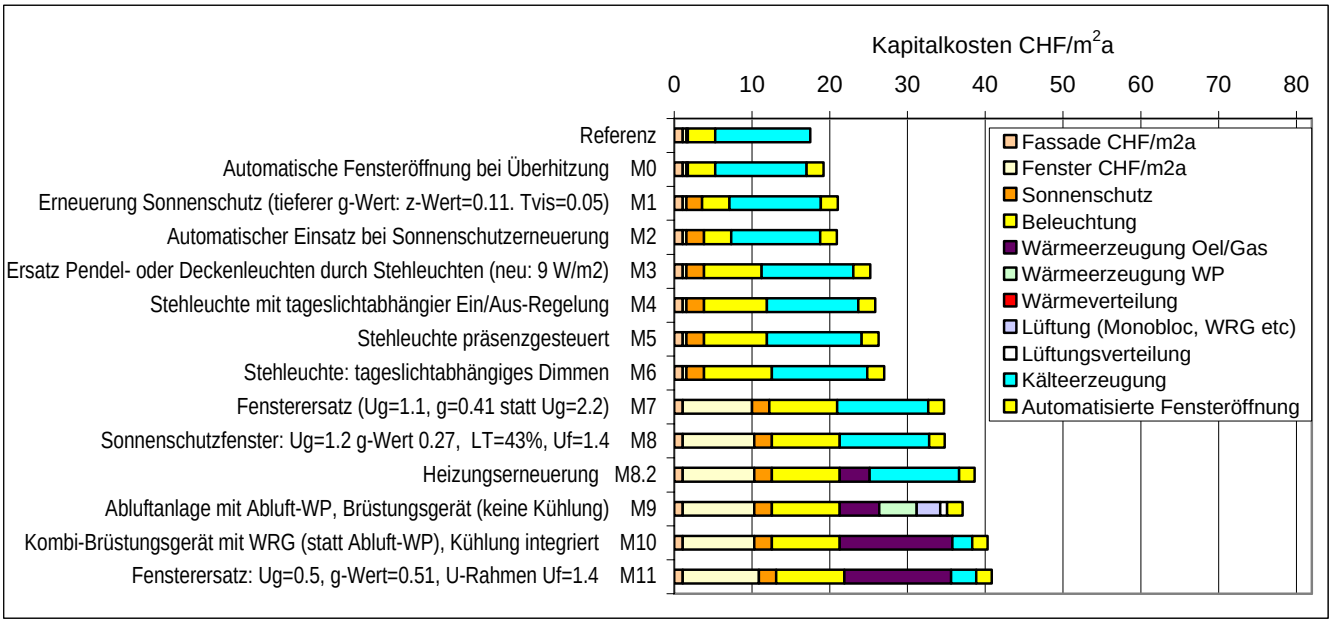


Abbildung 165 Struktur der Kapitalkosten bei Gebäudetyp BB2b: Bestehendes Bürogebäude der Bauperiode 1947-1975, 1150 m², eher geringer Fensteranteil (35%), inkl. Fensteröffnung / Brüstungsgerät bei Überhitzung (ausser Ist-Zustand), Leichtbau, U-Wert Aussenwand ohne Wärmebrücke 1.1 W/m2K (Fassade energetisch zwar suboptimal, aber sonst noch funktional), geringe interne Lasten, Beleuchtung (15 W/m²), Sonnenschutz aussen (Flachlamelle, G1), Kleinklimageräte, Solltemperatur 25°C, Fenster Typ 1 (U_g=2.2, g=0.7, T_{vis}=0.8, U_f=1.8)

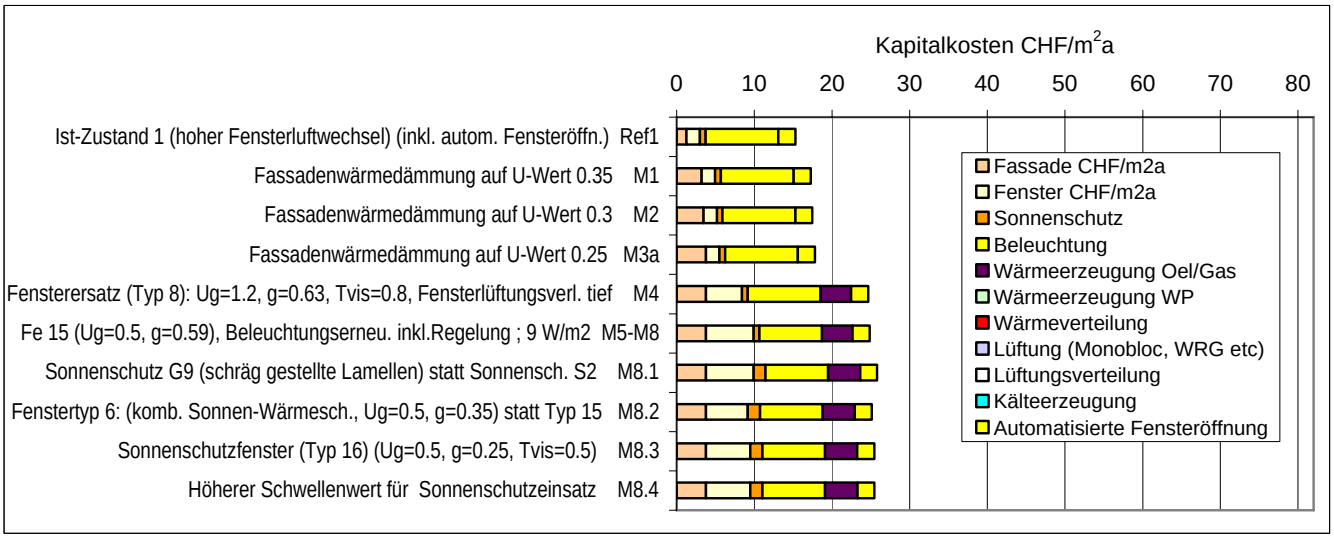


Abbildung 166 Struktur der Kapitalkosten bei Gebäudetyp BB1.1: Bestehendes Bürogebäude der Bauperiode vor 1947, 860 m², hohe interne Lasten, geringer Fensteranteil (25%), Massivbau, U-Wert Aussenwand 1.1 W/m²K (Wert ohne Wärmebrücken), Beleuchtung: 18 W/m², Lochfenster Typ 0 (U_g=3.0, g=0.75, T_{vis}=0.82, U_f=2.2), Lüftungsverluste durch bestehende Fenster hoch, Fensteröffnung bei Überhitzung, Sonnenschutz: alter Rollladen aussen (S2); keine Kühlung.

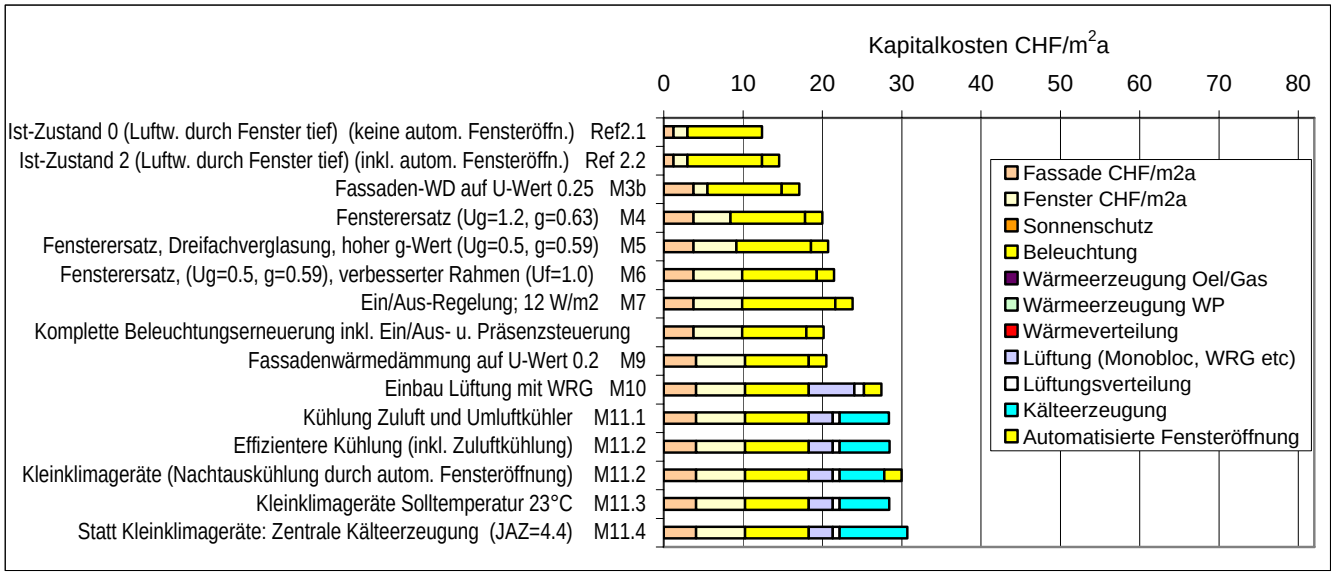


Abbildung 167 Struktur der Kapitalkosten bei Gebäudetyp BB1.2: Bestehendes Bürogebäude der Bauperiode vor 1947, 860 m², hohe interne Lasten, geringer Fensteranteil (25%), Massivbau, U-Wert Aussenwand 1.1 W/m²K (Wert ohne Wärmebrücken), Beleuchtung: 18 W/m², Lochfenster Typ 0 (U_g=3.0, g=0.75, T_{vis}=0.82, U_f=2.2), Lüftungsverluste durch Fenster tief, Fensteröffnung bei Überhitzung, Sonnenschutz: alter Rollladen aussen (S2); keine Kühlung; Fassade: verputztes Mauerwerk (U=1.1) energetisch zwar suboptimal, aber sonst noch funktional

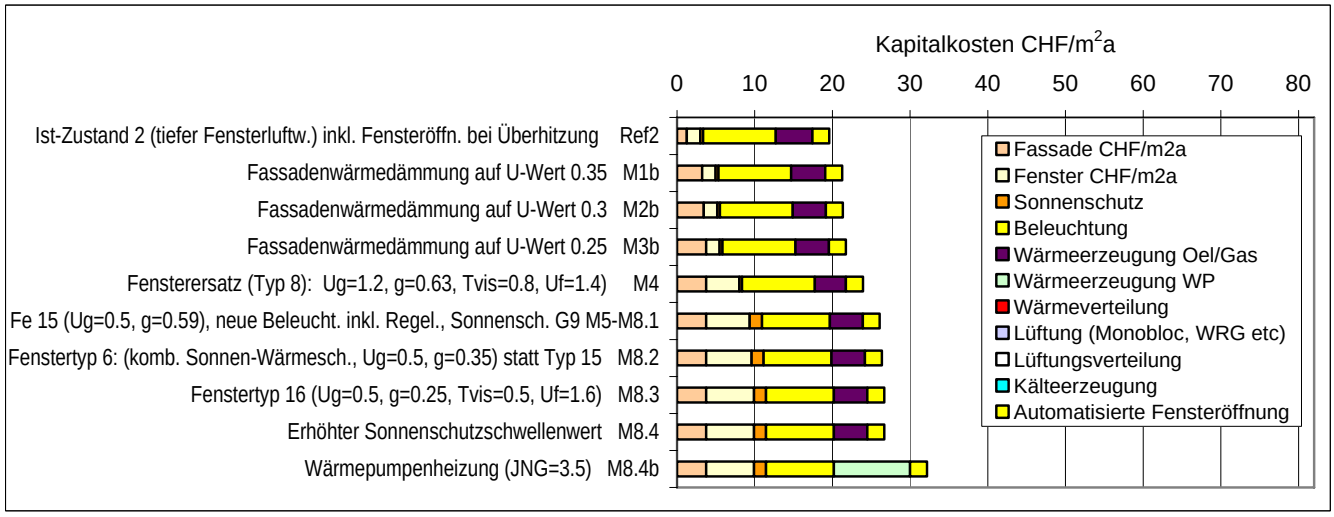


Abbildung 168 Struktur der Kapitalkosten bei Gebäudetyp BB1.3: Bestehendes Bürogebäude der Bauperiode vor 1947, 860 m², geringer Fensteranteil (25%), Massivbau, Aussenwand 1.1 W/m²K (Wert ohne Wärmebrücken), tiefe interne Lasten, Beleuchtung: 18 W/m², Lochfenster Typ 0 (U_g=3.0, g=0.75, T_{vis}=0.82, U_f=2.2), Lüftungsverluste durch Fenster tief, inkl. Fensteröffnung bei Überhitzung, Sonnenschutz: alter Rollladen aussen (S2); keine Kühlung; Fassade: verputztes Mauerwerk (U=1.1) energetisch zwar suboptimal, aber sonst noch funktional

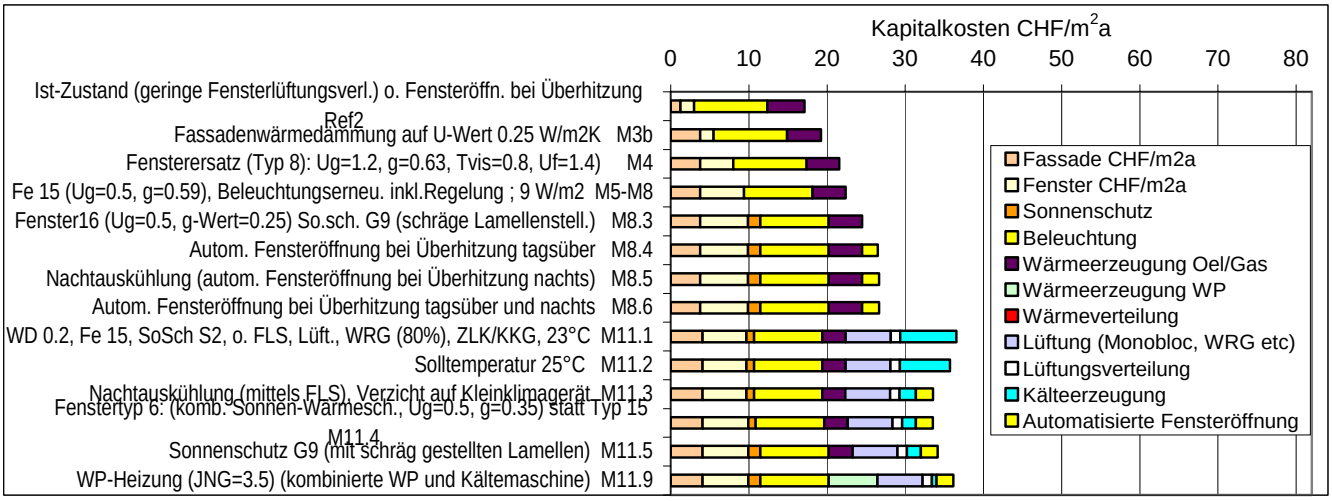


Abbildung 169 Struktur der Kapitalkosten bei Gebäudetyp BB1.4: Bestehendes Bürogebäude der Bauperiode vor 1947, 860 m², geringer Fensteranteil (25%), Massivbau, U-Wert Aussenwand 1.1 W/m²K (Wert ohne Wärmebrücken), geringe interne Lasten, Beleuchtung: 18 W/m², Lochfenster Typ 0 (U_g=3.0, g=0.75, T_{vis}=0.82, U_f=2.2), Lüftungsverluste durch Fenster tief, keine Fensteröffnung bei Überhitzung, Sonnenschutz: alter Rollladen aussen (S2), „manueller" Einsatz; keine Kühlung; Fassade: verputztes Mauerwerk (U=1.1) energetisch zwar suboptimal, aber sonst noch funktional

9.8.2 Struktur der Jahreskosten für weitere Fallbeispiele

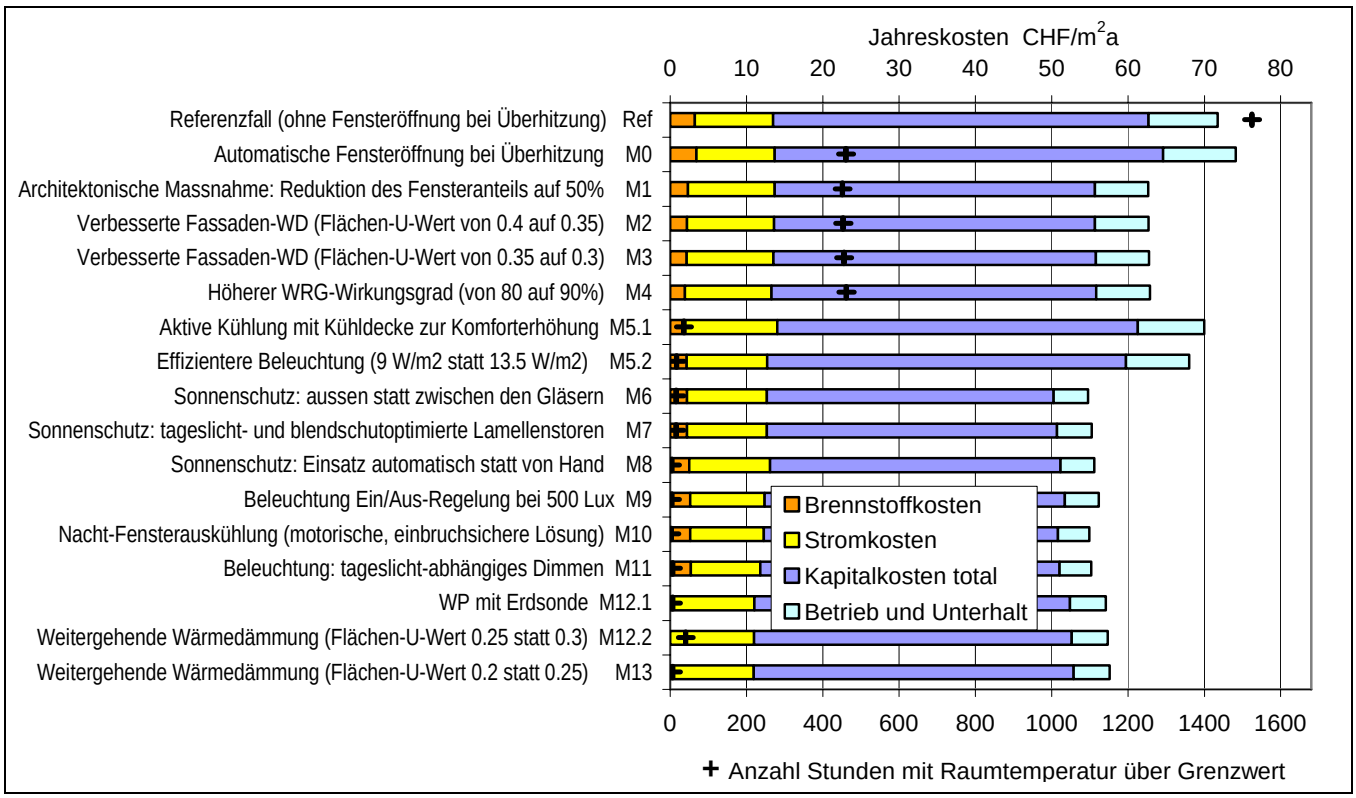


Abbildung 170 Struktur der Jahreskosten bei Gebäudetyp BN1.2b: Neubau eines mittleren Bürogebäudes, EBF 4600 m², hoher Fensteranteil (80%), inkl. automatische Fensteröffnung bei Überhitzung (ausser Fall Test), Leichtbauweise, U-Wert 0.29 W/m²K (o. WB), hohe interne Lasten, Beleuchtung: 13.5 W/m², innerer, von Hand bedienter Sonnenschutz (G6), Lüftung mit WRG 80%, Kühlung der Zuluft und Kühlelemente, JAZ=2.5, Fenster Typ 2 (U_g=1.1, g=0.52, T_{vis}=0.73, U_f=1.8), Beleuchtung: manuelles Ein-/Ausschalten (bei 800 Lux)

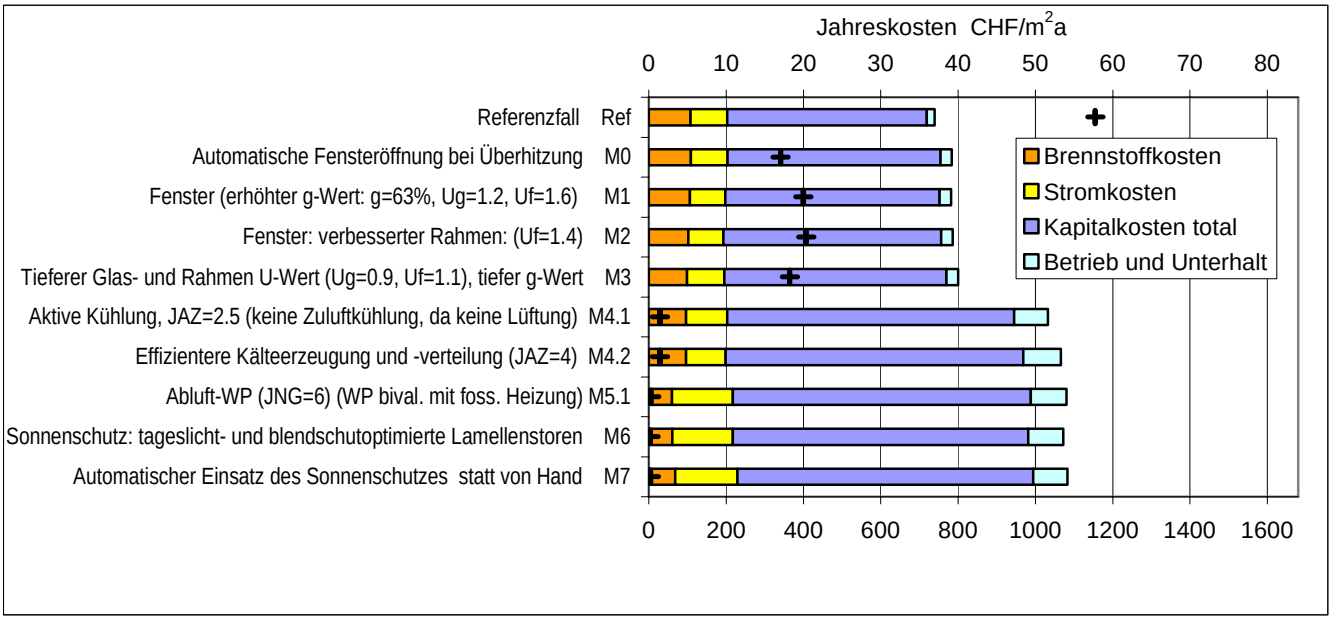


Abbildung 171 Struktur der Jahreskosten bei Gebäudetyp BN2.1b: Bürogebäude-Neubau, relativ hoher Fensteranteil (50%), Massivbauweise, U-Wert Aussenwand 0.4 bzw. 0.54 W/m²K (ohne bzw. mit Wärmebrücken), geringe interne Lasten, aussenliegender, von Hand bedienter Sonnenschutz (G4), keine mechanische Lüftungsanlage (Fensterlüftung), keine Kühlung, inkl. automatische Fensteröffnung bei Überhitzung (ausser Fall Test), Metallfassade, Fenster Typ 2 (U_g=1.1, g=0.52, T_{vis}=0.73, U_f=1.8), Beleuchtung: manuelles Ein-/Ausschalten (bei 800 Lux), 9 W/m²

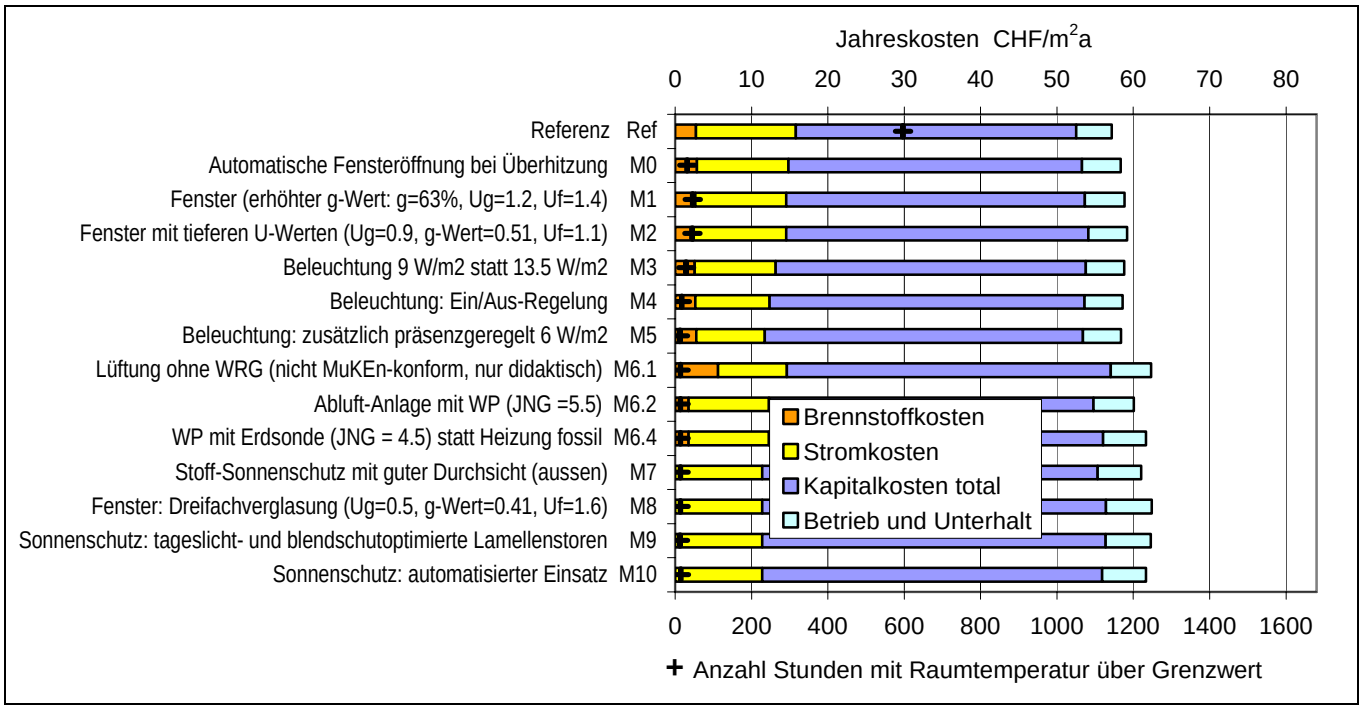


Abbildung 172 Struktur der Jahreskosten bei Gebäudetyp BN2.2b: Bürogebäude mit relativ hohem Fensteranteil (50%) und Metallfassade, inkl Fensteröffnung bei Überhitzung (ausser Ref0), Massivbauweise, U-Wert Aussenwand 0.4 bzw. 0.54 W/m²K (ohne bzw. mit Wärmebrücken), geringe interne Lasten, aussenliegender, von Hand bedienter Sonnenschutz (G2), mechanische Lüftung mit WRG 65%, Kühlung der Zuluft und Kühlelemente (JAZ=2.5, Solltemperatur=25°C), Fenster Typ 2 (U_g=1.1, g=0.52, T_{vis}=0.73, U_f=1.8), Beleuchtung: manuelles Ein-/Ausschalten (bei 800 Lux), 13.5 W/m²

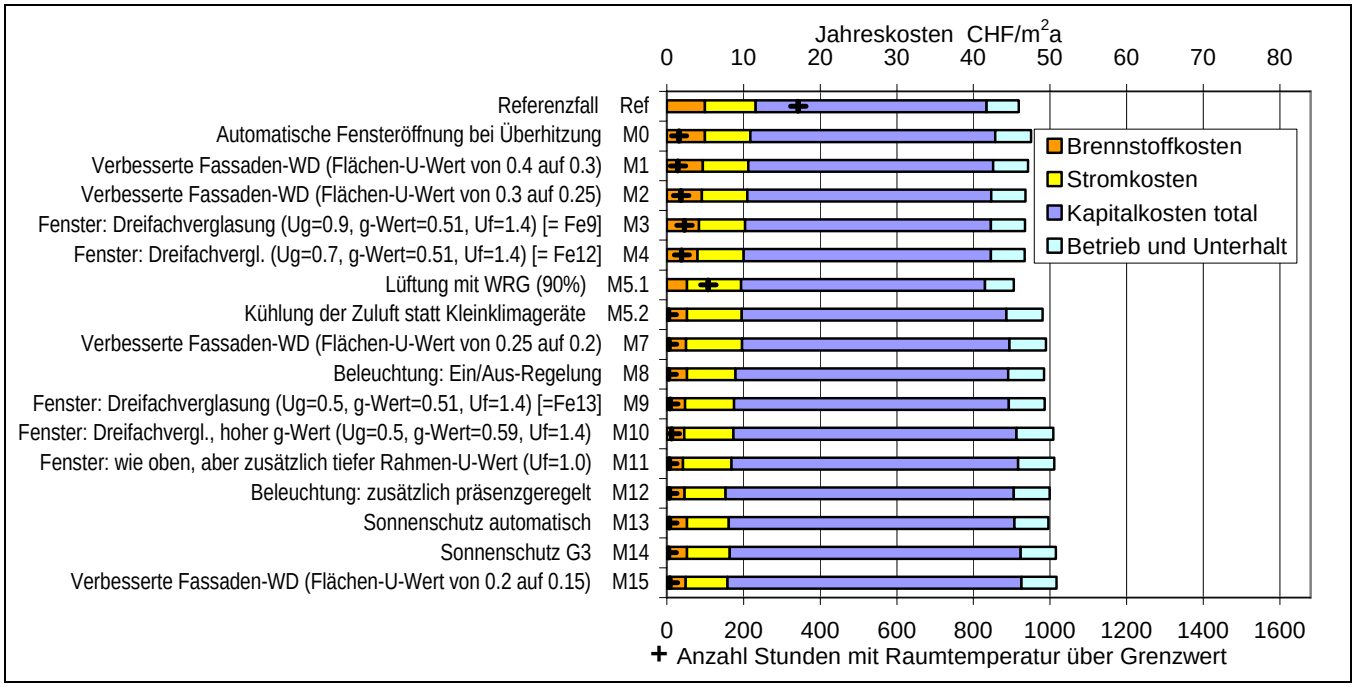


Abbildung 173 Struktur der Jahreskosten bei Gebäudetyp BN2.3b: Bürogebäude-Neubau mit relativ geringem Fensteranteil (35%), inkl. Fensterlüftung bei Überhitzung, Massivbauweise, U-Wert Aussenwand 0.4 bzw. 0.54 W/m²K (ohne bzw. mit Wärmebrücken), geringe interne Lasten, von Hand bedienter Lamellen-Sonnenschutz aussen (G2), keine mechanische Lüftung (Fensterlüftung), Kleinklimageräte (JAZ=1.6), Fenster Typ 2 (U_g=1.1, g=0.52, T_{vis}=0.73, U_f=1.8), Beleuchtung: manuelles Ein-/Ausschalten (bei 800 Lux), 9 W/m²

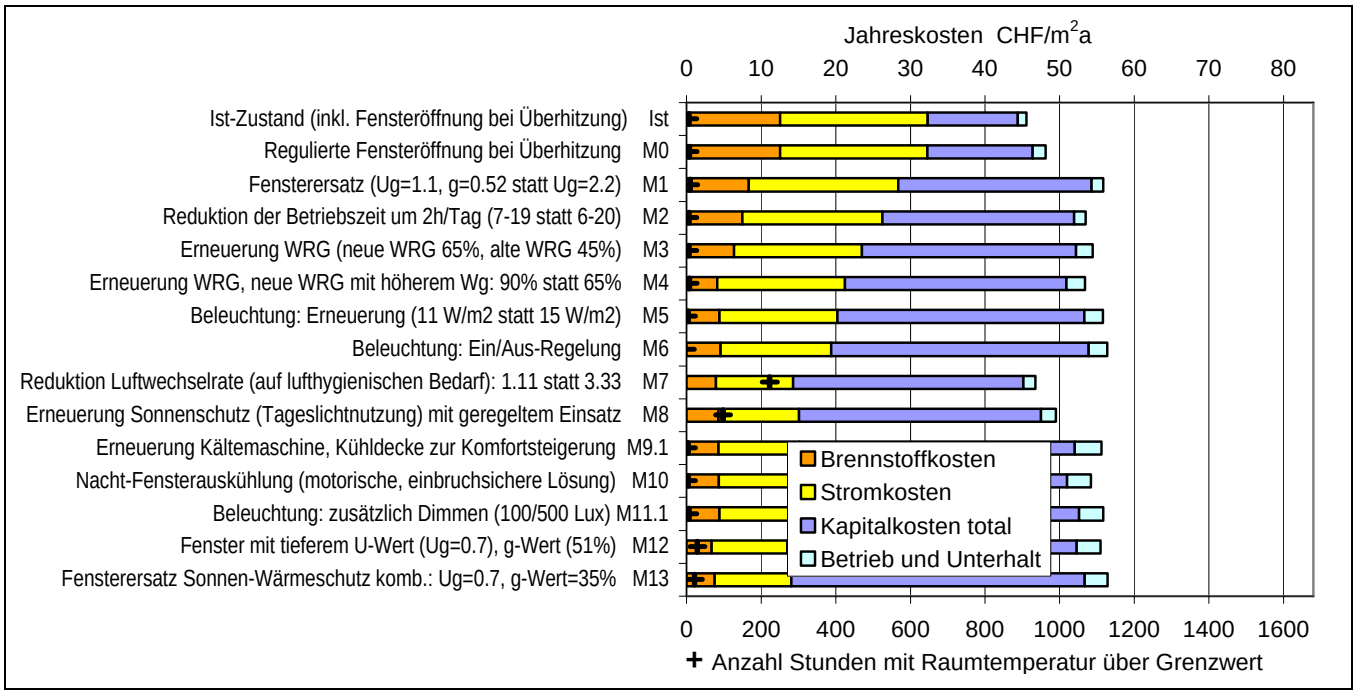


Abbildung 174 Struktur der Jahreskosten bei Gebäudetyp BB4.1b: Bestehendes Bürogebäude der Bauperiode ab 1976, 8600 m², rel. hoher Fensteranteil (50%), inkl. Fensteröffnung bei Überhitzung, Leichtbauweise, U-Wert Aussenwand ohne Wärmebrücke 1.3, hohe interne Lasten, Deckenleuchten (abgehängte Decke), Beleuchtung: 15W/m², mechanische Lüftung (hoher Luftwechsel) mit WRG (45%), Kühlung der Zuluft, von Hand bedienter Lamellen-Sonnenschutz aussen (S2), Metallfassade, Fenster Typ 1 (U_g=2.2, g=0.7, T_{vis}=0.8, U_f=1.8)

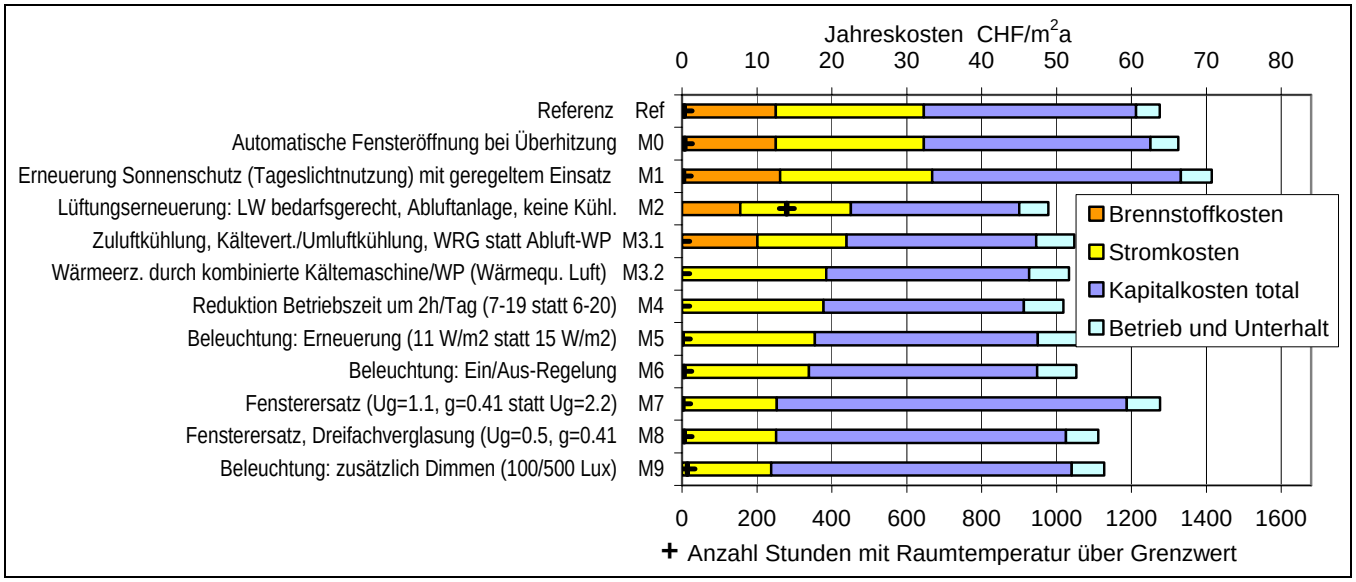


Abbildung 175 Struktur der Jahreskosten bei Gebäudetyp BB4.2b: Bestehendes Bürogebäude der Bauperiode 1976-2000, 8600 m², relativ hoher Fensteranteil (50%), inkl Fensteröffnung / Brüstungsgerät bei Überhitzung (ausser Ist-Zustand) Leichtbauweise, U-Wert Aussenwand ohne Wärmebrücke 1.3, hohe interne Lasten, Deckenleuchten (abgehängte Decke), Beleuchtung: 15W/m², mechanische Lüftung (hoher Luftwechsel) mit WRG (45%), Kühlung der Zuluft, von Hand bedienter Lamellen-Sonnenschutz aussen (S2), Metallfassade, Fenster Typ 1 (U_g=2.2, g=0.7, T_{vis}=0.8, U_f=1.8)

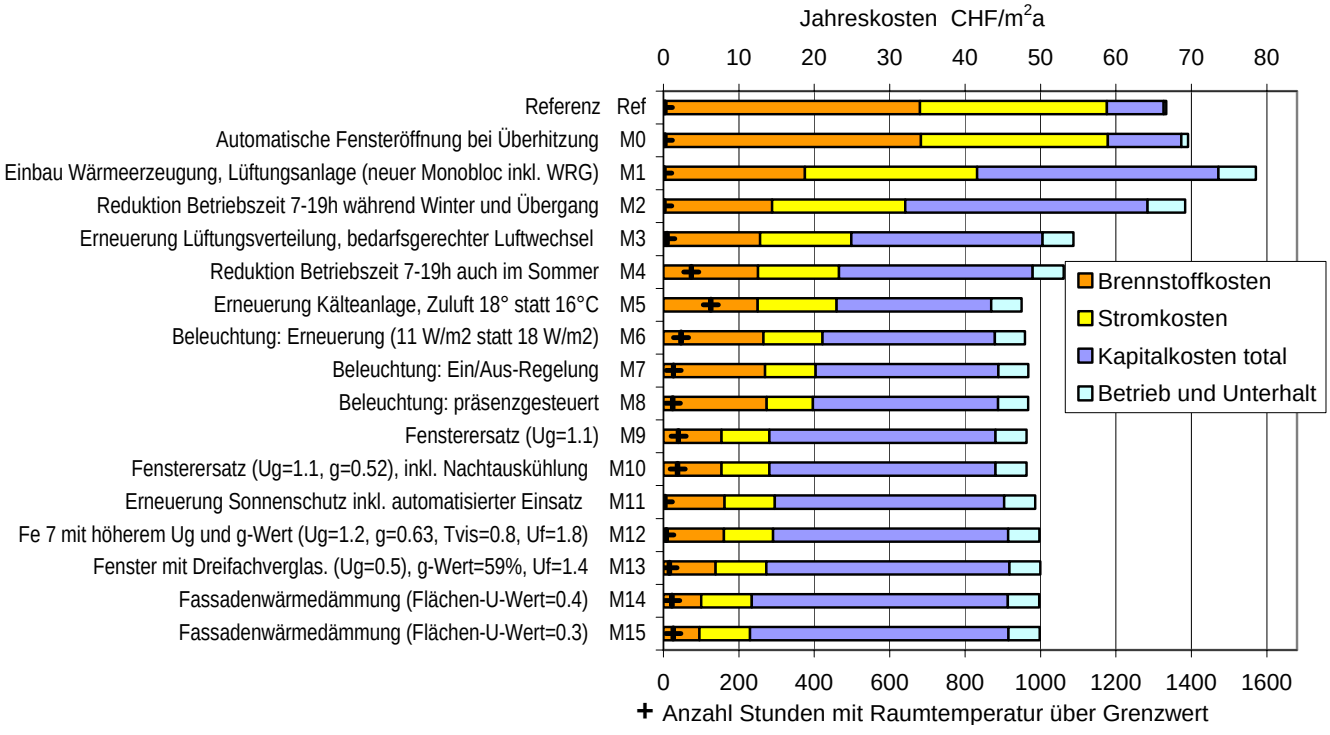


Abbildung 176 Struktur der Jahreskosten bei Gebäudetyp BB3.1b: Bestehendes Bürogebäude der Bauperiode 1947-1975, 2900 m², eher tiefer Fensteranteil (35%), inkl. Fensteröffnung / Brüstungsgerät bei Überhitzung (ausser Ist-Zustand), Massivbauweise, U-Wert Aussenwand ohne Wärmebrücke 1.1, geringe interne Lasten, Beleuchtung: 18 W/m², Deckenanbauleuchten, alte mechanische Lüftung ohne WRG mit hohen Druckverlusten (2300 Pa), Kühlung der Zuluft, Luftwechsel doppelt so hoch wie lufthygienisch erforderlich, 24h/Tag, von Hand bedienter Lamellen-Sonnenschutz aussen (G1), Mauerwerk, Fenster Typ 0 (U_g=3.0, g=0.75, T_{vis}=0.82, U_f=2.2)

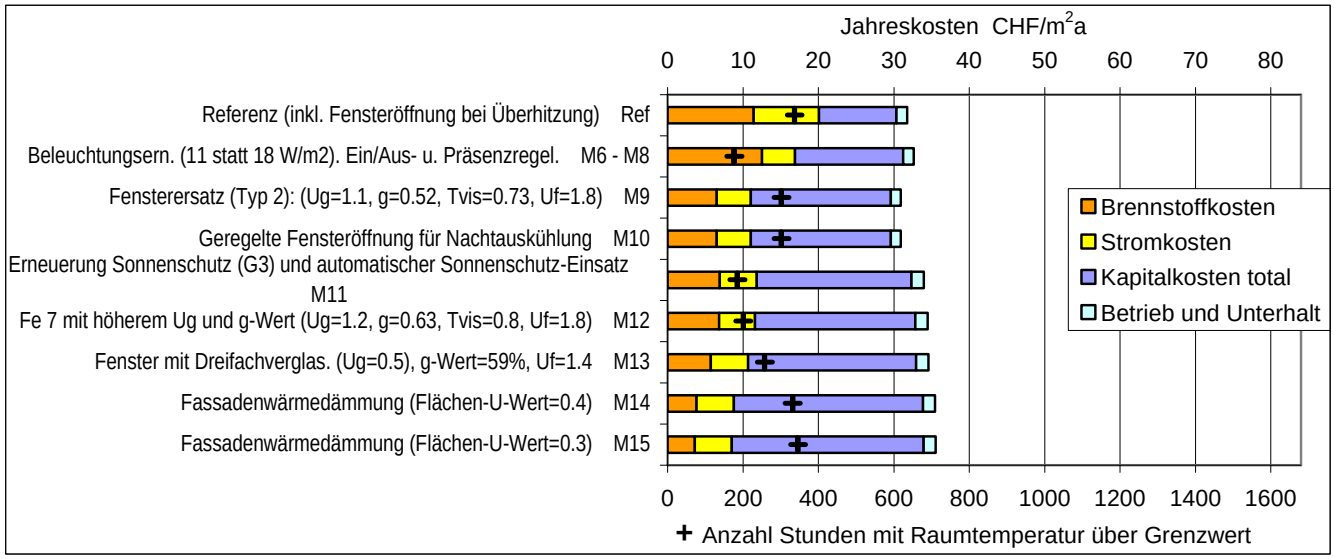


Abbildung 177 Struktur der Jahreskosten bei Gebäudetyp BB3.2b: Bestehendes Bürogebäude der Bauperiode 1947-1975, 2900 m², eher tiefer Fensteranteil (35%), alte Fenster (hohe Lüftungsverluste durch Undichtigkeit), inkl. Fensteröffnung / Brüstungsgerät bei Überhitzung, Massivbauweise, U-Wert Aussenwand ohne Wärmebrücke 1.1, geringe interne Lasten, Beleuchtung: 18 W/m², Deckenanbauleuchten, ohne mechanische Lüftung, von Hand bedienter Lamellen-Sonnenschutz aussen (G1), Mauerwerk, Fenster Typ 0 (U_g=3.0, g=0.75, T_{vis}=0.82, U_f=2.2)

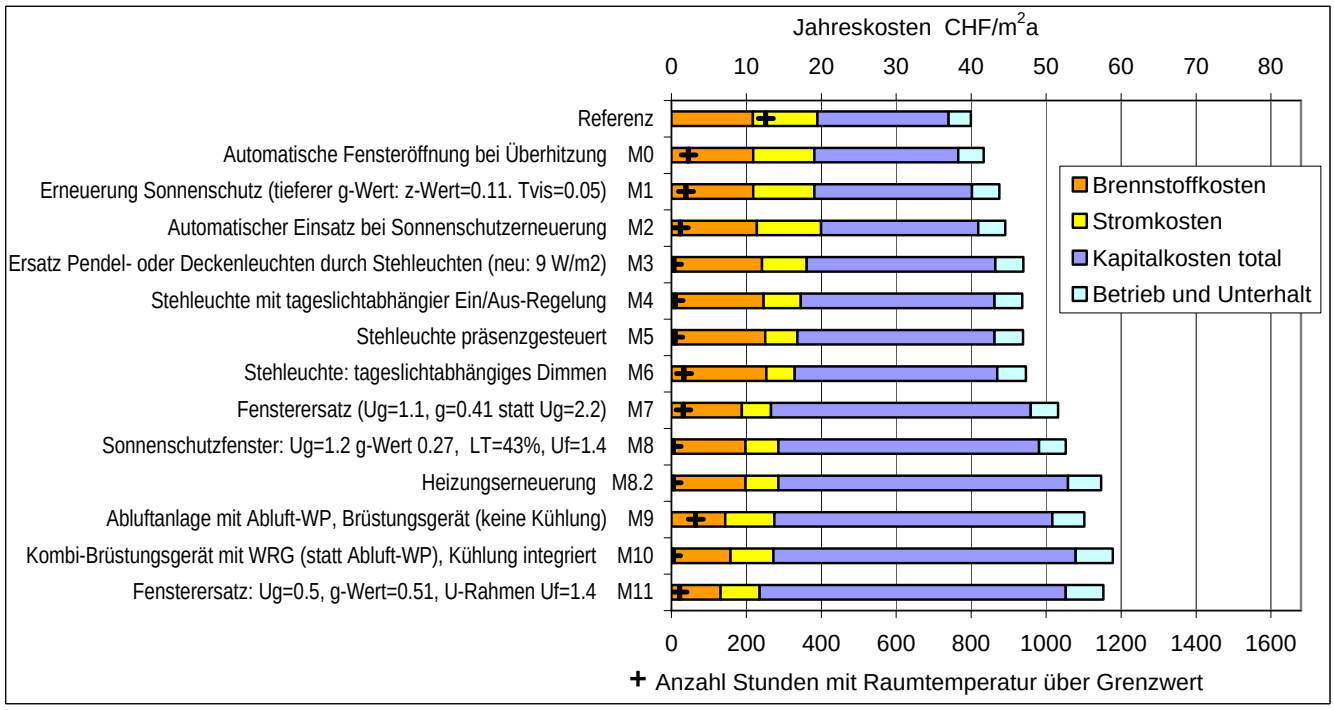


Abbildung 178 Struktur der Jahreskosten bei Gebäudetyp BB2b: Bestehendes Bürogebäude der Bauperiode 1947-1975, 1150 m², eher geringer Fensteranteil (35%), inkl. Fensteröffnung / Brüstungsgerät bei Überhitzung (ausser Ist-Zustand), Leichtbau, U-Wert Aussenwand ohne Wärmebrücke 1.1 W/m2K (Fassade energetisch zwar suboptimal, aber sonst noch funktional), geringe interne Lasten, Beleuchtung (15 W/m²), Sonnenschutz aussen (Flachlamelle, G1), Kleinklimageräte, Solltemperatur 25°C, Fenster Typ 1 (U_g=2.2, g=0.7, T_{vis}=0.8, U_f=1.8)

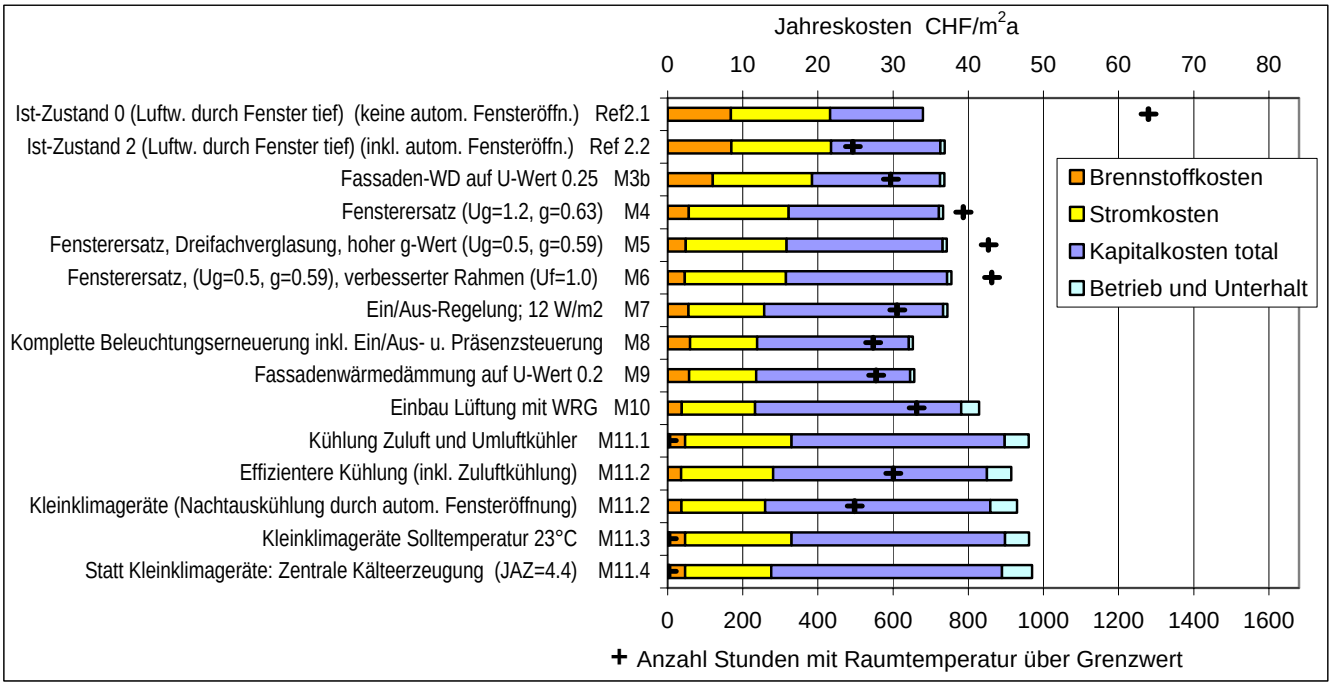


Abbildung 179 Struktur der Jahreskosten bei Gebäudetyp BB1.2: Bestehendes Bürogebäude der Bauperiode vor 1947, 860 m², hohe interne Lasten, geringer Fensteranteil (25%), Massivbau, U-Wert Aussenwand 1.1 W/m²K (Wert ohne Wärmebrücken), Beleuchtung: 18 W/m², Lochfenster Typ 0 (U_g=3.0, g=0.75, T_{vis}=0.82, U_f=2.2), Lüftungsverluste durch Fenster tief, Fensteröffnung bei Überhitzung, Sonnenschutz: alter Rollladen aussen (S2); keine Kühlung; Fassade: verputztes Mauerwerk (U=1.1) energetisch zwar suboptimal, aber sonst noch funktional

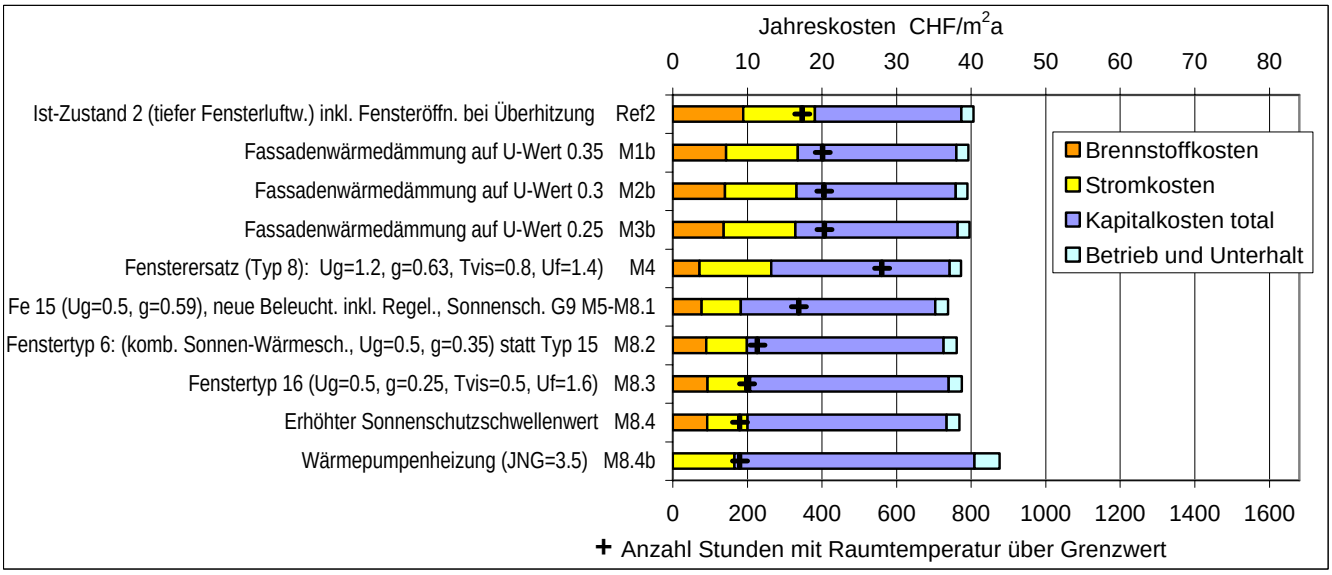


Abbildung 180 Struktur der Jahreskosten bei Gebäudetyp BB1.3: Bestehendes Bürogebäude der Bauperiode vor 1947, 860 m², geringer Fensteranteil (25%), Massivbau, Aussenwand 1.1 W/m²K (Wert ohne Wärmebrücken), tiefe interne Lasten, Beleuchtung: 18 W/m², Lochfenster Typ 0 (U_g=3.0, g=0.75, T_{vis}=0.82, U_f=2.2), Lüftungsverluste durch Fenster tief, inkl. Fensteröffnung bei Überhitzung, Sonnenschutz: alter Rollladen aussen (S2); keine Kühlung; Fassade: verputztes Mauerwerk (U=1.1) energetisch zwar suboptimal, aber sonst noch funktional

9.8.3 Jahreskosten, EKZ Elektrizität und thermischer Komfort als Funktion der Brennstoff-EKZ

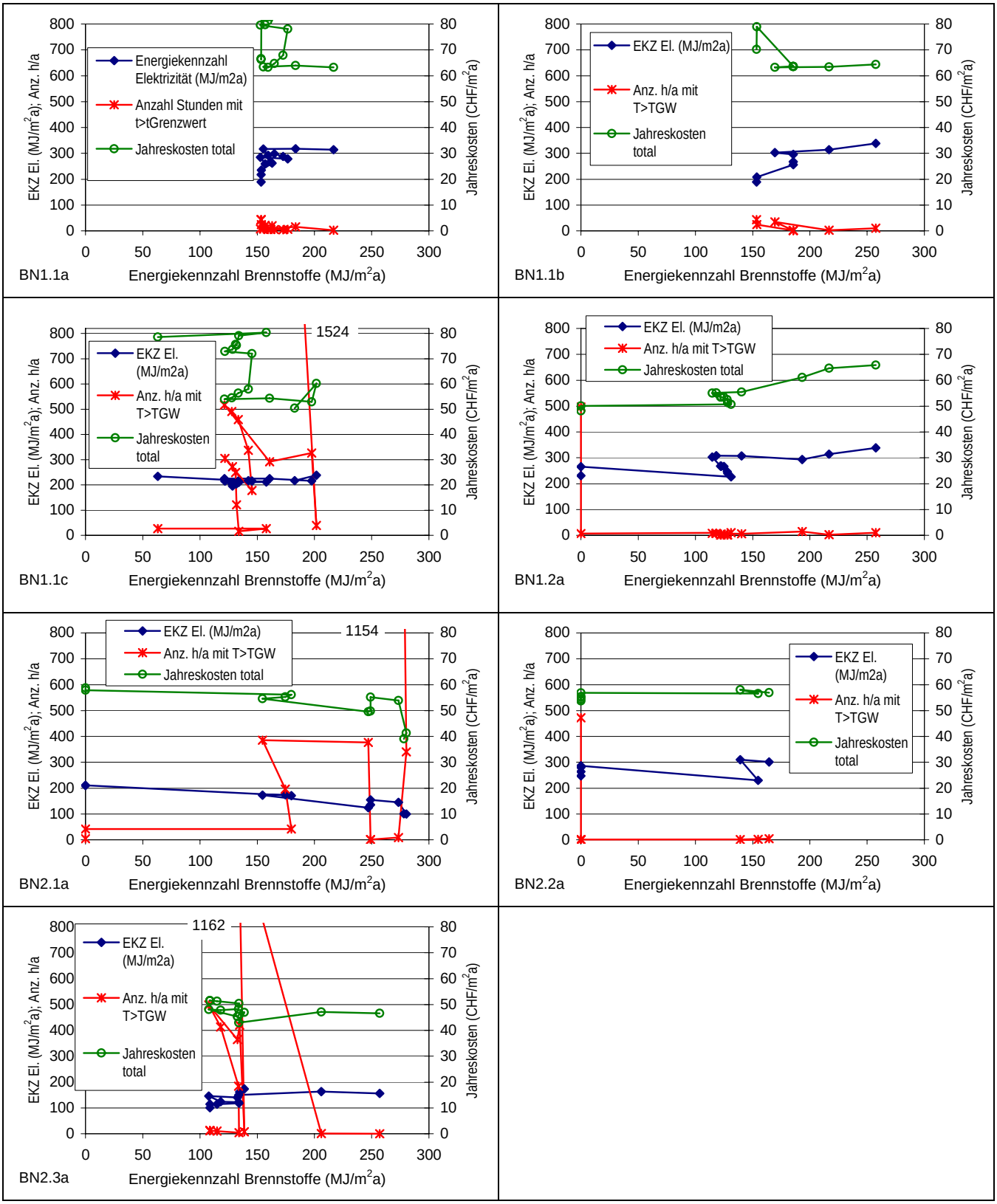


Abbildung 181 Jahreskosten, EKZ El. und thermischer Komfort als Funktion der Brennstoff-EKZ bei Neubauten (Kapitel 6.1)

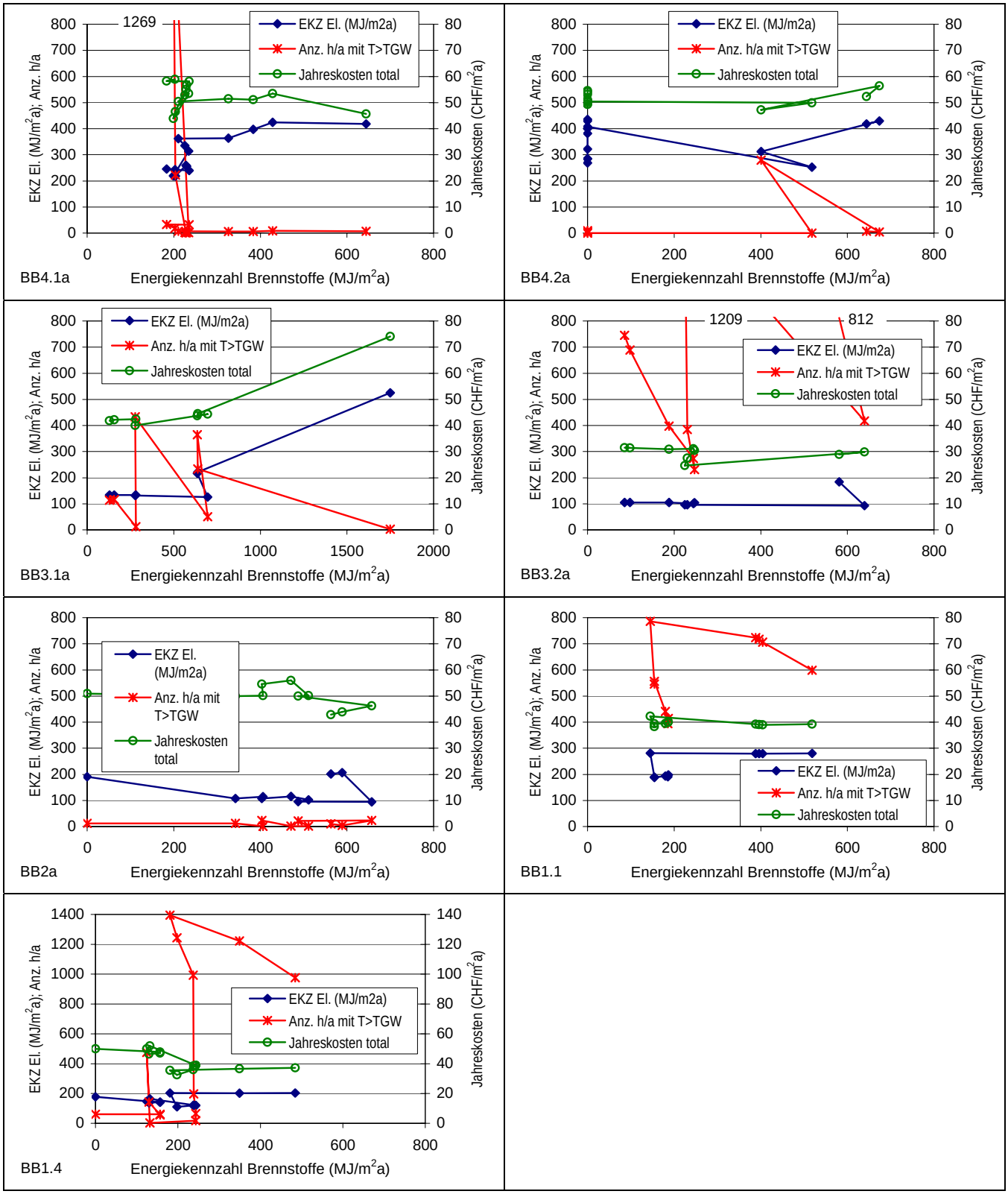


Abbildung 182 Jahreskosten, EKZ El. und thermischer Komfort als Funktion der Brennstoff-EKZ bei Gebäudeerneuerungen (Kapitel 6.2)

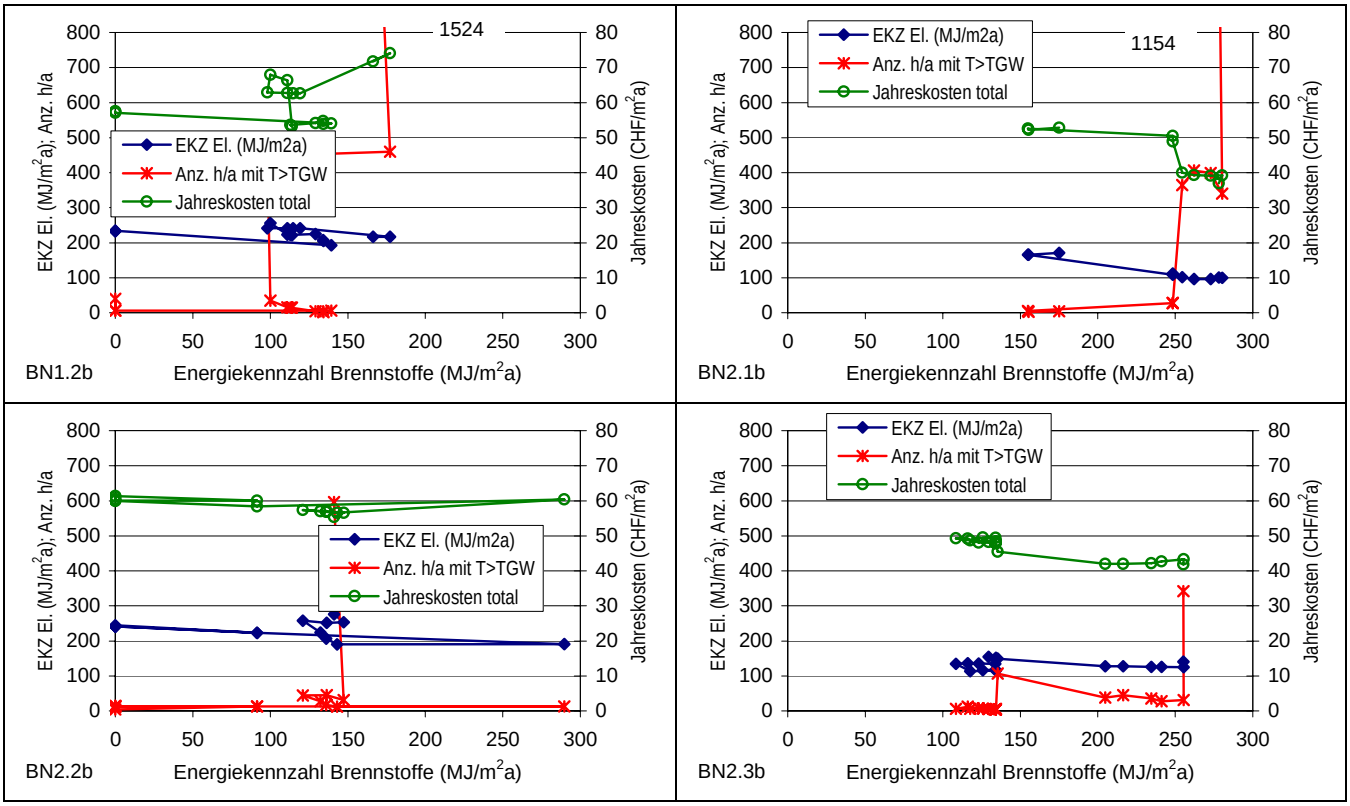


Abbildung 183 Jahreskosten, EKZ El. und thermischer Komfort als Funktion der Brennstoff-EKZ bei Neubau (weitere Fallbeispiele aus Anhang, Kap. 9.8.2)

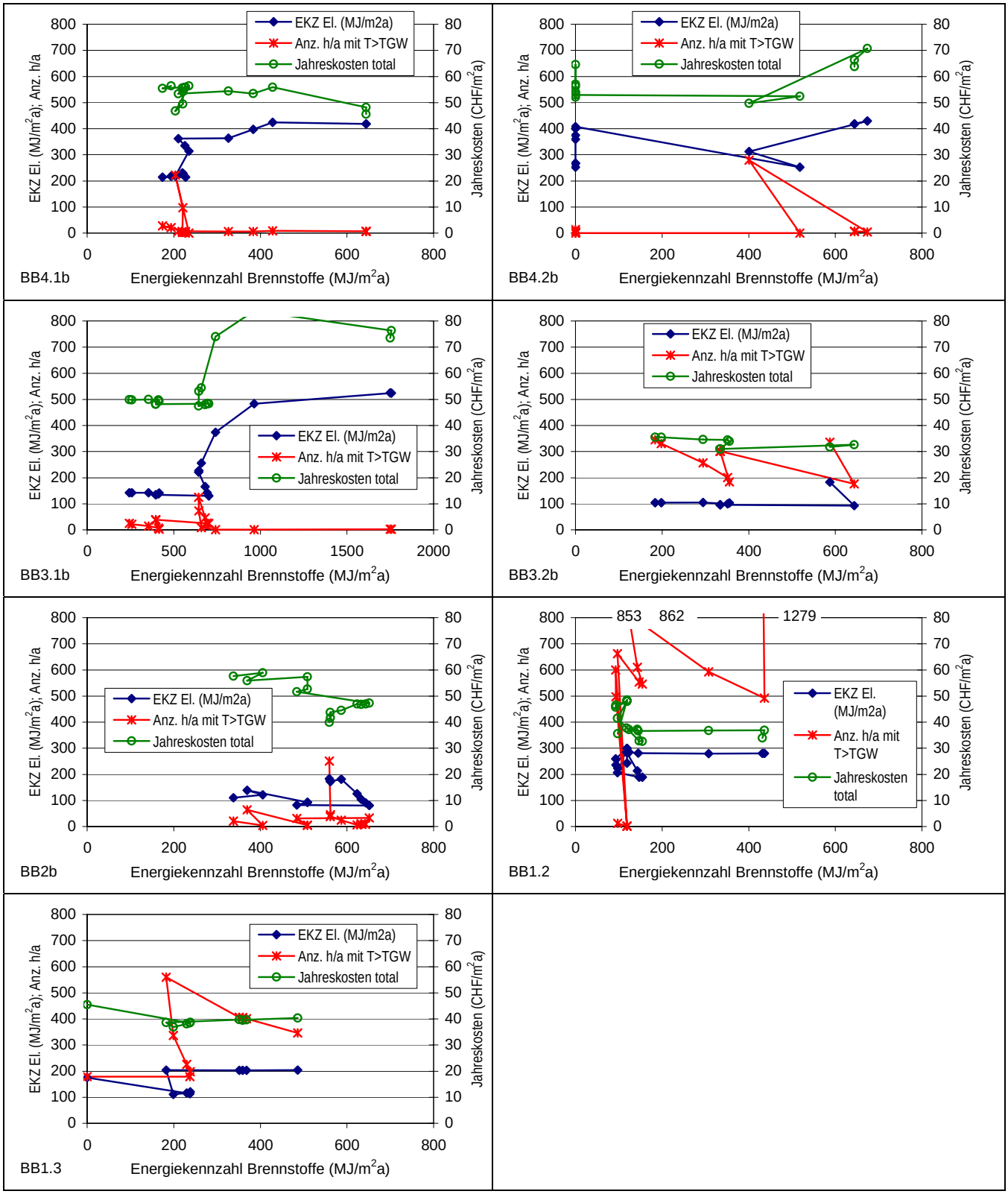


Abbildung 184 Jahreskosten, EKZ El. und thermischer Komfort als Funktion der Brennstoff-EKZ bei Gebäudeerneuerungen (weitere Fallbeispiele aus Anhang, Kap. 9.8.2)

Bundesamt für Energie BFE
Worblentalstrasse 32, CH-3063 Ittigen · Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. 031 322 56 11, Fax 031 323 25 00 · office@bfe.admin.ch · www.admin.ch/bfe

BBL Bestellnummer 805.xxx d / 00.00 / 0000