



Schlussbericht 28. Mai 2018

ParkGap – Performance Gap Gebäude

Bestandsaufnahme und Handlungsempfehlungen für den Gebäudepark der Schweiz





Datum: 28. Mai 2018

Ort: Bern und Luzern

Auftraggeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Energie in Gebäuden
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer/in:

Aicher, De Martin, Zweng AG
Würzenbachstrasse 56, CH-6006 Luzern
www.adz.ch

Synergy BTC AG
Laupenstrasse 20, CH-3008 Bern
www.synergy.ch

Autor/in:

Beat Frei, Aicher, De Martin, Zweng AG, Luzern	beat.frei@adz.ch
Carina Sagerschnig, Synergy BTC AG, Bern	carina.sagerschnig@synergy.ch
Dimitrios Gyalistras, Synergy BTC AG, Bern	dimitrios.gyalistras@synergy.ch

BFE-Bereichsleitung:	Andreas Eckmanns, andreas.eckmanns@bfe.admin.ch
BFE-Programmleitung:	Rolf Moser, moser@enerconom.ch
BFE-Vertragsnummer:	SI/501452-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch



Zusammenfassung

Unter „Performance Gap“ versteht man üblicherweise das Auftreten von Differenzen zwischen den geplanten und den tatsächlich erreichten technischen Kennzahlen eines Gebäudes. Die vorliegende Studie beinhaltet eine Systemanalyse (GapMap), eine Review von über 250 Literaturquellen (GapReview), und zwölf Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Performance Gaps im Schweizer Gebäudepark (GapNavi).

Je nach Zielgrösse und Bewertungsmethode können drei Typen von Performance Gap-Fragestellungen unterschieden werden: Diese betreffen die Einhaltung von Planungsstandards, die Erreichung von Bauprojektzielen, sowie den Vergleich mit vorgegebenen Entwicklungspfaden. Es wird vorgeschlagen, die Diskussion auf die Behaglichkeit und die Betriebsaufwände auszudehnen.

Schwerpunkt in der Literatur ist der Energy Performance Gap. Ursachen für Performance Gaps können heute bestenfalls für einzelne Gebäude nach Wichtigkeit rangiert werden. Aus der Literatur kann nicht abgeleitet werden, ob im Schweizer Gebäudepark als Ganzes ein energetischer Performance Gap vorliegt. Hauptgründe sind die kleine Datenbasis und ein zu wenig genauer Umgang mit Begriffen, Definitionen und Schlüsselannahmen.

Gezielter Einsatz von Statistik und Modellierung ist für eine differenziertere Betrachtung von Ziel- und Grenzwerten unabdingbar. Eine statistisch gut durchdachte Datenerhebung in Kombination mit darauf abgestimmten Modellrechnungen ist unerlässlich, um die Performance des nationalen Gebäudeparks zuverlässig verfolgen und dessen (energetische) Entwicklung gezielt beeinflussen zu können.

Performance Gaps sollten insgesamt (i) besser verstanden, (ii) korrekt erfasst und, nach einer breiteren Diskussion, (iii) zielführend gelenkt werden. Diese Diskussion ist eine Chance für die Schweiz, um innovative Ansätze im Planen, Bauen, Betreiben und im Monitoring von Anlagen, Gebäuden und Gebäudeparks zu erproben, die weit über die rein technischen Aspekte der Gebäudetechnik und der Digitalisierung hinausgehen sollten.

Résumé

Le „Performance Gap“ est défini comme la différence entre les valeurs de planification et les valeurs réelles. La présente étude contient une analyse des systèmes (GapMap), le compte rendu d'une recherche littéraire basée sur plus de 250 sources (GapReview), et douze recommandations à mettre en œuvre afin de réduire le Performance Gap en Suisse (GapNavi).

Selon les valeurs cibles et la méthode d'évaluation choisies, trois types différents de questions peuvent être associés au Performance Gap: le respect des valeurs de planification, l'atteinte des normes de qualité de construction exigées et la divergence des profils de puissance prédéfinis. Il est recommandé d'étendre la discussion au confort ainsi qu'aux difficultés rencontrées durant l'exploitation.

L'aspect prépondérant qui ressort de la littérature est le „Performance Gap énergétique“ qui s'applique principalement aux bâtiments individuels. En revanche, il n'est pas possible de déterminer si un Performance Gap énergétique existe au niveau global du parc immobilier Suisse. Ceci s'explique par une base de données réduite et une interprétation trop inexacte des définitions et des hypothèses déterminantes.

L'utilisation ciblée des méthodes statistiques pour la récolte de données et la modélisation est recommandée. Ces dernières sont indispensables pour permettre aux études sur le Performance Gap de s'appuyer sur une base solide et ainsi permettre de pouvoir influencer la trajectoire énergétique dudit sujet.

Le Performance Gap devrait en général être mieux compris, être défini de manière exacte et, sur la base d'une discussion plus étendue, suivre un objectif précis. Cette discussion constitue une chance à



saisir en Suisse, laquelle devrait aboutir à des solutions innovantes à mettre en œuvre dans la planification, la construction, l'exploitation et le monitoring d'installations, de bâtiments et parcs immobiliers. La réflexion ne doit pour autant pas se limiter uniquement aux installations techniques du bâtiment et à la digitalisation.

Summary

The term „Performance Gap“ is typically used to denote deviations between a building's planned and actual technical performances. The present study includes a systems analysis (GapMap), a review of over 250 literature sources (GapReview), and twelve recommendations for dealing with performance gaps in the Swiss building park (GapNavi).

Depending on the particular target value and evaluation method, three types of questions about the performance gap can be distinguished: These relate to the compliance with planning standards, the achievement of construction project objectives, and the comparison with given performance trajectories. We propose to extend the discussion to thermal comfort and operational cost.

The literature focuses on the energy performance gap. So far, causes of performance gaps can be ranked by importance at best for individual buildings only. From literature it cannot be inferred whether an energy performance gap exists in the Swiss building park as a whole. The main reasons are the small database and an imprecise handling of terms, definitions and key assumptions.

Purposeful use of statistics and modeling is indispensable for a more differentiated consideration of target and threshold values. A statistically sound data collection strategy and carefully matched modeling approaches are imperative to be able to reliably assess and track the national building park's performance and direct its (energy) trajectory.

Overall, we conclude that performance gaps need to be (i) better understood, (ii) accurately evaluated and, after broader debate, (iii) expediently managed. The current discussion is an opportunity for Switzerland to experiment with innovative approaches in the planning, construction, operation and monitoring of facilities, buildings and building parks in a manner that encompasses far more than the technical aspects of building technology and digitization.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Résumé	3
Summary	4
Inhaltsverzeichnis	5
Abkürzungsverzeichnis	7
1 Executive Summary	8
2 Einleitung	11
2.1 Einführung in das Thema	11
2.2 Vorgehensweise	14
3 „GapMap“: Systemanalyse	15
3.1 Gap-Definitionen	15
3.2 Gap-Dimensionen	17
3.3 Gaps in Gebäudeparks	19
3.4 Unsicherheiten	20
3.4.1 Strategien für den Umgang mit Unsicherheiten	20
3.4.2 Arten von Unsicherheiten empirischer Grössen	21
3.4.3 Unsicherheit und Risiko in Bauprojekten	22
3.4.4 Unsicherheitsanalysen	22
3.5 Regelkreise	23
4 „GapReview“: Stand des Wissens	24
4.1 Quantifizierung von Performance Gaps	25
4.2 Ursachen und Massnahmen	27
4.3 Gap-Definitionen	29
4.4 Gap-Dimensionen	34
4.4.1 Übersicht	34
4.4.2 Fokus: Energy Performance Gap	39
4.4.3 Fokus: Indoor Environmental Quality Gap	41
4.4.4 Fokus: Operating Expenses Gap	41
4.5 Gaps in Gebäudeparks	42
4.5.1 Theoretische Grundlagen	42
4.5.2 Erfahrungen aus der Literatur	43
4.5.3 Energiebilanzierungsmodelle	46
4.6 Unsicherheiten	52
4.6.1 Werkzeuge	52
4.6.2 Unsicherheiten von Energiebilanzierungen	52



4.6.3	Unsicherheiten im Nutzungsgrad	54
4.6.4	Umgang mit Unsicherheiten in der Praxis	55
4.6.5	Fach- und Systemkompetenz	56
4.7	Regelkreise	58
4.7.1	Regelkreise für Einzelgebäude	58
4.7.2	Regelkreise für Gebäudeparks	61
4.8	Experteninterviews	63
5	„GapNavi“: Handlungsempfehlungen	68
5.1	Gemeinsames Verständnis	68
5.1.1	Motivation	68
5.1.2	Diskussionsrahmen	69
5.1.3	Methodische Aspekte	70
5.1.4	Abschliessende Bemerkungen	74
5.2	Open Source Software	75
5.2.1	Motivation	75
5.2.2	Unsicherheitsanalysen	76
5.2.3	Schweizerisches Gebäudeparkmodell	79
5.2.4	Abschliessende Bemerkungen`	81
5.3	Schweizerisches Gebäudeparkmessnetz	82
5.3.1	Messnetz: Motivation und Beschrieb	82
5.3.2	Performance-Monitoring von Einzelgebäuden	83
5.3.3	Abschliessende Bemerkungen	84
6	Quellenverzeichnis	85
6.1	Literatur	85
6.2	Online Ressourcen	93
Anhang		94
Anhang A	Eigene Publikationen	95
Anhang B	Experteninterviews	96
Anhang C	Literaturanalyse – Detail	98
Anhang D	Literatur zu Ursachen und Massnahmen	110
Anhang E	Unsicherheitsanalyse: Methoden und Beispiel	119
Anhang F	Ergänzende Literatur	124



Abkürzungsverzeichnis

AMEV	Arbeitskreis Maschinen und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen (D)
BIM	Building Information Modeling
BMS	Building Management Systems
BSRIA	Building Services Research and Information Association (UK)
DHW	Domestic Hot Water
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (D)
EFH	Einfamilienhaus
EKZ	Energiekennzahl
EnEV	Energieeinsparverordnung (D)
EnDK	Konferenz Kantonalen Energiedirektoren
EPBD	Energy Performance of Buildings Directive (EU)
HVAC	Heating, Ventilation, Air-Conditioning
GA	Gebäudeautomation
GEAK	Gebäudeenergieausweis der Kantone
GEFMA	German Facility Management Association (D)
GUM	Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
GWR	Eidgenössisches Gebäude- und Wohnungsregister
IEA	International Energy Agency
IEQ	Indoor Environmental Quality
IPMVP	International Performance Measurement and Verification Protocol
ISO	Internationale Organisation für Normung
JAZ	Jahresarbeitszahl
JNG	Jahresnutzungsgrad
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design (USA)
MFH	Mehrfamilienhaus
MuKE	Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich
NIST	National Institute of Standards and Technology (USA)
NREL	National Renewable Energy Laboratory (USA)
O&M	Operations and Maintenance
PeBBu	Performance Based Building Thematic Network
POE	Post-Occupancy Evaluation
PG	Performance Gap
SAP	Standard Assessment Procedure (UK)
SCCER	Swiss Competence Centers for Energy Research
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
SGNI	Schweizer Gesellschaft für nachhaltige Immobilienwirtschaft
SNBS	Standard Nachhaltiges Bauen Schweiz
SWKI	Schweizerischer Verein von Gebäudetechnik-Ingenieuren
TMon	Technisches Monitoring
THGE	Treibhausgasemissionen
VDI	Verein Deutscher Ingenieure (D)
VFS	Verband Fernwärme Schweiz



1 Executive Summary

Unter „Performance Gap“ versteht man üblicherweise das Auftreten von Differenzen zwischen den geplanten und den tatsächlichen erreichten Kennzahlen eines Gebäudes. Allgemein steht der Begriff für unerwünschte Abweichungen von einem gegebenen Leistungsziel.

Die Vielschichtigkeit und die Komplexität der „Performance Gap“ Thematik legt eine systematische und systemische Betrachtung nahe. Mit dem vorliegenden Bericht liegen zum ersten Mal eine umfassende Review, Analyse und Synthese für die Schweiz vor.

Der Bericht richtet sich primär an staatliche, kantonale und private Akteure, die sich mit der strategischen Lenkung von Gebäuden und Gebäudeparks befassen. Er soll als Diskussionsgrundlage für langfristige Initiativen im Bereich Gebäudeperformance dienen.

Personen, die sich rasch in das Thema vertiefen möchten, können von einer gründlichen Aufarbeitung des heutigen Wissensstandes und dem umfangreichen Literaturverzeichnis profitieren. Der Bericht enthält schliesslich eine Reihe von praxisrelevanten Anregungen und Hinweisen zur Konzipierung, Durchführung und Einschätzung von Performance-Analysen.

Im Zusammenhang mit der Analyse von Gebäuden und Gebäudeparks stellten wir drei grundlegende Typen von Performance Gap-Fragestellungen fest, die mit unterschiedlichen Zielgrössen und Bewertungsmethoden einhergehen:

- Performance Gap „Planungsstandard“

Definition: Vergleich von Betriebsdaten mit Standardwerten gemäss Planungsrichtlinien

Anwendung: Überprüfen der individuellen Gebäudeplanung, aber auch der Richtigkeit, Genauigkeit und praktischen Fairness der Verfahren, die zur Regulierung der Planung bzw. des Baus eingesetzt werden

- Performance Gap „Bauprojektziel“

Definition: Vergleich von Betriebsdaten mit projektspezifischen Vorgaben

Anwendung: Überprüfen der Bauprojektziele und der Leistung im Betrieb auf Basis projektspezifischer Vorgaben

- Performance Gap „Entwicklungspfad“

Definition: Vergleich von Betriebsdaten mit Vorgaben aus Referenzerhebungen („Benchmark“) oder extern gesetzten Zielen (z.B. „Energiesstrategie 2050“)

Anwendung: Steuern des Entwicklungspfads für die Performance eines Gebäudes oder Gebäudeparks durch den Vergleich von Betriebskennzahlen mit Vorgaben aus Referenzerhebungen oder unabhängig festgelegten Leistungszielen

Es wird vorgeschlagen, die Performance (Gap) Diskussion auf die Bereiche Behaglichkeit („Indoor Environmental Quality“, z.B. thermischer Komfort, Raumluftqualität) und Betriebsaufwände („Operational Expenses“, z.B. Unterhaltskosten, Reinigungsaufwände) auszuweiten.

Im Rahmen der Literaturanalyse wurden über 250 nationale und internationale Quellen zum Performance Gap in Gebäuden identifiziert und analysiert. Es zeigte sich, dass die Quellen vorwiegend den Energy Performance Gap behandeln. Die Detailtiefe der gefundenen Studien variiert sehr stark und es wird ein breites Spektrum an empirischen Methoden und Modellen abgedeckt.



Energetische Performance Gaps sind meist multikausal begründet. Mögliche Gründe sind:

- Hohe Sicherheitszuschläge;
- Verwenden von Standardwerten und unvermeidbaren Vereinfachungen im Planungsprozess;
- Informationsverluste im Lebenszyklus eines Gebäudes;
- Verzicht auf eine kontinuierliche Betriebsüberwachung;
- mangelnder Einbezug der Nutzer und
- ungenügende Messkonzepte und Auswertemethoden.

Diese Gründe können heute bestenfalls für einzelne Gebäude, jedoch nicht für Gebäudeparks nach Wichtigkeit rangiert werden.

Aus der gefundenen Literatur konnte nicht abgeleitet werden, ob im schweizerischen Gebäudepark als Ganzes überhaupt ein energetischer Performance Gap vorliegt, geschweige denn, wie gross er tatsächlich sein könnte, und was die wesentlichen Ursachen dafür sein könnten. Die Gründe dafür sind:

- Keine Definition eines schweizweit gültigen und messbaren Performance Gaps;
- Ungenügende Datenbasis und Modelle für den schweizerischen Gebäudepark;
- Kleine Anzahl von Studien;
- Uneinheitliche Messkonzepte und Auswertemethoden.

Bei der Durchführung oder dem Vergleich von Performance Gap-Studien ist es entscheidend, dass Begriffe und Definitionen sorgfältig verwendet und die Schlüsselannahmen hinterfragt werden. Wichtige Stolpersteine sind:

- Annahmen für den Nutzungsgrad zur Berechnung der Nutzenergie im Betrieb;
- Verwendung von Projekt- oder Standardwerten, die zur Quantifizierung von Performance Gaps speziell interpretiert oder nachberechnet werden sollten;
- Verwendung verschiedener Bilanzgrenzen (Nutz-, End- oder Primärenergie), welche die Vergleichbarkeit von Studien erschwert;
- Vernachlässigung von Mess- und Modell-Unsicherheiten.

Der Bericht präsentiert, begründet und diskutiert zwölf Handlungsempfehlungen, die darauf zielen, Performance Gaps im schweizerischen Gebäudepark besser verstehen, erfassen und lenken zu können. Die Handlungsempfehlungen wurden wie folgt unter drei Schwerpunktthemen gruppiert:

Gemeinsames Verständnis schaffen:

- [1\)](#) Eine breite Diskussion über Performance-Ziele, Performance Gap-Definitionen und die daraus folgenden Massnahmen für den schweizerischen Gebäudepark führen
- [2\)](#) Die reale Gebäudeperformance als eigenständige Bewertungskategorie für Gebäude und Gebäudeparks etablieren
- [3\)–7\)](#) Empfehlungen zu: Vorgehen, Fragestellungen, Checkliste und Übersichtsgrafiken für Performance-Analysen von Einzelgebäuden und Gebäudeparks

Open Source Software etablieren:

- [8\)](#) Eine Auswahl von praxisnahen Open Source Softwarebausteinen und Modellen für Performance Gap-Analysen aufbauen und aktiv bewirtschaften
- [9\)](#) Die Belastbarkeit und Repräsentativität von Performance Gap-Analysen mittels transparenter Unsicherheitsanalysen überprüfen
- [10\)](#) Ein Open Source Modell für die Modellierung und Simulation der Performance des schweizerischen Gebäudeparks entwickeln



Schweizerisches Gebäudeparkmessnetz aufbauen:

- [11\)](#) Ein auf das schweizerische Gebäudeparkmodell abgestimmtes, langfristiges Messnetz für die Performance des schweizerischen Gebäudeparks etablieren
- [12\)](#) Das Performance-Monitoring von Einzelgebäuden fördern

Der vorliegende Bericht bildet den Stand unserer Arbeiten per März 2018 ab. Die Diskussion von Performance Gaps in Gebäuden wird national und international laufend durch neue Beiträge ergänzt. Gleichzeitig findet eine rasante technische Entwicklung bei der Erhebung riesiger Datenmengen aus Gebäuden, in der Vernetzung von Computersystemen, sowie im maschinellen Lernen für die automatisierte Entscheidungsfindung statt.

Eine proaktive, an freiheitlich-demokratischen Grundsätzen orientierte Haltung des Bundes und der Kantone im Hinblick auf die Verwendung von Daten aus Gebäuden erachten wir als wichtig. So sollten im Zusammenhang mit der Performance-Erhebung von Gebäuden die Interessen, Herangehensweisen und Expertisen einer Vielzahl von Stakeholdern berücksichtigt werden. Das Ziel sollte sein, in Zukunft nicht nur Performance Gaps im schweizerischen Gebäudepark, sondern auch die enormen Möglichkeiten der modernen Informationstechnologien umsichtig lenken zu können.

2 Einleitung

Der „Performance Gap“ als Differenz zwischen geplanter und realer Performance eines Gebäudes, ist ein komplexes, vielschichtiges und meist nur bruchstückhaft behandeltes Thema.

Das Projekt „ParkGap – Performance Gap Gebäude“ hat zum Ziel, erstens, eine strukturierte Übersicht von Gap-Definitionen zu erstellen und die Beziehungen zwischen den relevanten Akteuren, Prozessen und Technologien über die gesamte Lebensdauer eines Gebäudes zu kartieren („GapMap“). Zweitens sollen internationale Initiativen zum Erkennen, Analysieren und Reduzieren von Performance Gaps recherchiert und evaluiert und mit schweizerischen Projekten verglichen werden („Gap-Review“). Daraus gilt es schliesslich Handlungsempfehlungen für eine gezielte und systematische Behandlung von Performance Gaps im Gebäudepark der Schweiz abzuleiten und zu priorisieren („Gap-Navi“).

2.1 Einführung in das Thema

Gebäude-Performance ist mehr als der Energieverbrauch. Da aber die aktuelle Performance Gap-Diskussion vor allem auf das Thema Energie fokussiert, gehen wir hier als erstes auf diesen Aspekt ein.

Um den Energieverbrauch zu bewerten ist die Bilanzgrenze des betrachteten Systems entscheidend. Im Gebäudesektor gibt es drei wichtige Stufen: Nutz-, End- und Primärenergie (siehe Abbildung 1).



Abbildung 1: Energiebilanzgrenzen im Gebäude

- **Nutzenergie**
Verwendete Energie im Raum
- **Endenergie**
Energiebedarf zur Bereitstellung der Nutzenergie, abhängig vom *Nutzungsgrad* (η_{Erzeuger})
Bilanzgrenze = Gebäude/Grundstück
- **Primärenergie**
vom Gebäude verursachte Energiebilanz, abhängig von den verwendeten *Energieträgern*.
(Bilanzgrenze = global)

Performance-Analysen, die sich auf ein grösseres Gebäudeportfolio oder einen nationalen Gebäudepark beziehen, sollten unseres Erachtens in der Regel alle drei Bilanzgrenzen thematisieren. Dies ist nötig, um einer möglicherweise fatalen Reduktion des Sachverhalts auf ein einziges Ziel vorzubeugen, sowie der Komplexität von Gebäuden und deren Energiehaushalt Rechnung zu tragen.

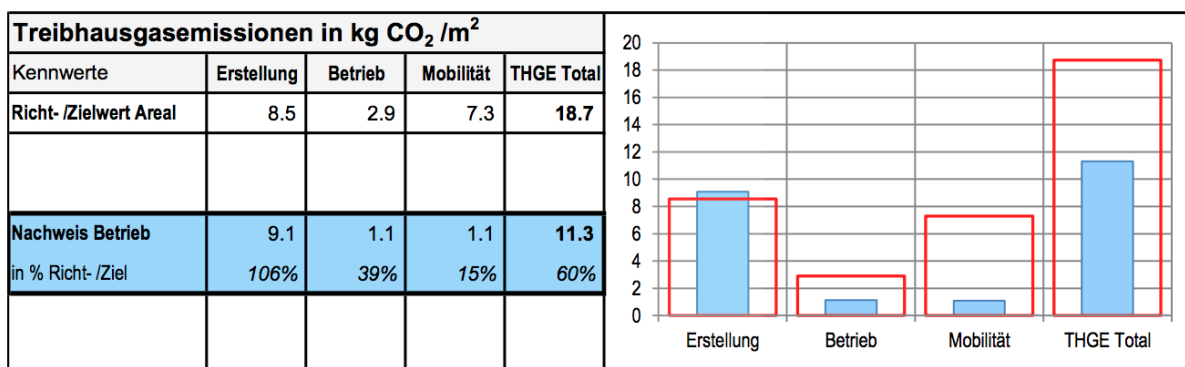
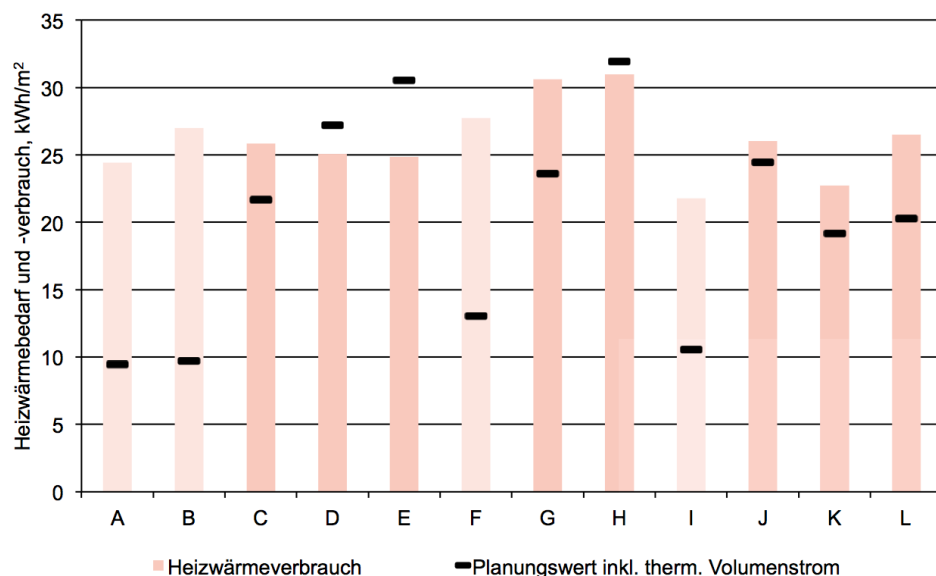
Was für die Bewertung der Qualität der thermischen Gebäudehülle die Nutzenergie ist, ist für die Betrachtung des Verbrauchs an Energieressourcen die Primärenergie. Zur Bestimmung der Effizienz von technischen Massnahmen wird die Endenergie benötigt, im Idealfall in Kombination mit der Nutzenergie.

In der laufenden Performance Gap-Diskussion werden viele verschiedene Fragen gleichzeitig behandelt. Wie ist die Qualität und Repräsentativität bestimmter Planungsverfahren oder Gebäudemodelle?



Wie nahe kommt der Energieverbrauch des schweizerischen Gebäudeparks an die von der nationalen Energiestrategie erhoffte Entwicklung? Wie entwickelt sich der Verbrauch aus nicht erneuerbaren Energiequellen?

Die Beantwortung einer jeden dieser Fragestellungen verlangt nach einem anderen Messkonzept und anderen Metriken. In der aktuellen Diskussion werden die verschiedenen Fragestellungen jedoch bunt gemischt behandelt [9, 10, 48]. Die Bewertung kann je nach Blickwinkel ändern. So werden die gleichen Gebäude als positive Beispiele einer guten Performance und gleichzeitig als Evidenz für nicht zu vernachlässigende Performance Gaps herangezogen (Abbildung 2).



Nachweis 2000-Watt-Areal im Betrieb, Auszug aus Zertifizierungstool

Abbildung 2: Soll-Ist Vergleich des Heizwärmeverbrauchs von 12 Gebäuden (oben) und summarische Betrachtung derselben Gebäude (unten), aus Mühlebach et al. [50]. Oben: Planungswerte des Heizwärmeverbrauchs (schwarze Balken) werden für die meisten Gebäude überschritten. Unten: Zielwert für den „Betrieb“ aller Gebäude (zweites rotes Rechteck von links) wird unterschritten. Vgl. Abschnitt 4.1.

Die Betrachtung der Gebäudeperformance wird noch anspruchsvoller, wenn neben energetischen Fragestellungen auch weitere Gebäudeleistungen berücksichtigt werden. In diesem Bericht schliessen wir die Aspekte „Behaglichkeit“ und „Betriebskosten“ von Gebäuden in die Diskussion ein. Damit werden



unserer Meinung nach die drei wesentlichsten Dimensionen der Gebäudeperformance während der Betriebsphase eines Gebäudes erfasst.

Die Liste liesse sich beliebig um weitere Aspekte wie zum Beispiel die Graue Energie, die Schadstoffbelastung oder die Sicherheit erweitern. Dies würde jedoch den Umfang dieser Arbeit sprengen.

Wir denken, dass keiner der sich ergebenden – energetischen oder sonstigen – Fragestellungen prinzipiell eine grössere Bedeutung oder Daseinsberechtigung als einer anderen zukommt.

Die Aufgabe von Ingenieuren in Wissenschaft und Praxis sehen wir im Rahmen der Performance Gap-Diskussion darin, relevante Fragen zu formulieren, Komplexität und Multidimensionalität methodisch zu meistern, Soll und Ist auf allen Ebenen sorgfältig zu analysieren, sowie das Resultat transparent und verständlich zu kommunizieren und Empfehlungen auszusprechen.

Auf der Ebene Einzelgebäude unterliegen Entscheide, die über die gesetzlichen Vorschriften hinausgehen, den Interessen und Prioritäten der Gebäudebesitzer. Dies ist bei der Beurteilung von Performance Gaps ebenso zu berücksichtigen, wie die oft zitierten Bedienungsfehler, Modellierungsunsicherheiten oder Nutzungsänderungen.

Welche Konsequenzen aus der Performance Gap-Diskussion für die Steuerung des nationalen Gebäudeparks zu ziehen sind, sollte nicht nur unter Fachleuten erörtert werden. Mit der vorliegenden Arbeit wollen wir einen Beitrag zur Strukturierung der Diskussion leisten, den mangelhaften Stand des heutigen Wissens dokumentieren, sowie verschiedene Handlungsoptionen aufzeigen.



2.2 Vorgehensweise

Der gesamte Bericht ist das Resultat einer Synthese, die nach den drei Schritten „GapMap“ (Abschnitt 3), „GapReview“ (Abschnitt 4) und „GapNavi“ (Abschnitt 5) strukturiert wurde. Die Synthesearbeit wurde im Rahmen von 24 Arbeitstreffen des Projektteams in der Periode November 2016 bis März 2018 vorangetrieben.

Grundlage der vorliegenden Arbeit bildete das Auffinden, Einordnen und das gezielte Auswerten von über 250 Referenzen. Im Text wird auf die entsprechenden Arbeiten mit weiterführendem Material verwiesen. Wichtiges detaillierendes Material ist in Anhang C zu finden.

Die Analyse der Schweizer Studien wurde durch Experteninterviews, sowie durch von uns durchgeführte Auswertungen zu Messdaten aus aktuellen CH-Studien ergänzt. Die Mitglieder des Projektteams nahmen an aktuellen Veranstaltungen und Workshops zum Thema teil (siehe Anhang A).

Zu Beginn unserer Arbeit orientierten wir uns an vier Grundfragen, die bei jeder Performance Gap-Studie zum Tragen kommen:

- | | |
|----------------|--|
| 1. Interesse | Wen betrifft es? |
| 2. Erwartung | Welche Performance soll gelten |
| 3. Detektion | Welche Methoden und Prozesse werden zum Ermitteln von Performance-Abweichungen eingesetzt? |
| 4. Attribution | Worin liegen die Ursachen für die gefundenen Abweichungen? |

Bei der Beantwortung dieser Fragen kristallisierten sich die folgenden fünf Leitthemen heraus, nach denen letztlich die „GapMap“ und die „GapReview“ strukturiert wurden:

- | | |
|------------------|--|
| – Definitionen | Performance-Ziele und -Abweichungen klar definieren |
| – Dimensionen | Performance Gaps präzise festlegen und diskutieren |
| – Gebäudepark | Eine Vielzahl von Gebäuden betrachten |
| – Unsicherheiten | Korrekte und belastbare Interpretationen ermöglichen |
| – Regelkreise | Performance Gaps in den Griff bekommen |

Sachverhalte, die mehreren Leitthemen zugeordnet werden können, behandelten wir unter dem jeweils wichtigsten Leitthema.

Unsere Handlungsempfehlungen („GapNavi“) betreffen gleichermassen die drei miteinander verhängten Aspekte „Verstehen“, „Erfassen“ und „Lenken“ von Performance Gaps im Gebäudepark der Schweiz.

Die Handlungsempfehlungen werden im letzten Abschnitt 5 unter den folgenden drei Schwerpunkten vorgestellt und diskutiert:

- Gemeinsames Verständnis,
- Open Source Modelle und
- Schweizerisches Gebäudeparkmessnetz.



3 „GapMap“: Systemanalyse

Die Systemanalyse dient der geordneten Aufarbeitung des Themas Performance Gap mit dem Ziel, einen strukturierten Überblick über alle relevanten Aspekte für die gesamte Lebensdauer eines Gebäudes zu schaffen. Damit soll ein vertieftes Verständnis des Performance Gap und eine präzise Kommunikation ermöglicht werden.

Abschnitt 3.1 erläutert allgemeine Definitionen von Performance Gaps in Gebäuden und vergleicht drei verschiedene Gap-Typen. In Abschnitt 3.2 werden Dimensionen, die bei der Definition von Performance Gaps zu berücksichtigen sind, thematisiert.

Die Bedeutung der Aggregationsebene für die Analyse und Interpretation von Performance Gaps wird in Abschnitt 3.3 diskutiert. Abschnitt 3.4 und 3.5 gehen auf die Begriffe „Unsicherheit“ und „Regelkreise“ aus dem Blickwinkel von Performance Gaps ein.

3.1 Gap-Definitionen

Unter „Performance Gap“ versteht man üblicherweise das Auftreten von Differenzen zwischen den geplanten und den tatsächlich erreichten Kennzahlen eines Gebäudes. Allgemein steht der Begriff für unerwünschte Abweichungen von einem gegebenen Leistungsziel.

Der Begriff des Performance Gap ist in der Baubranche weder normiert, noch reguliert oder allgemeingültig definiert. Performance Gaps sind nicht zwingend Abweichungen von einer rechtsgültigen Norm im Sinne eines Bauschadens, Planungsfehlers oder Mangels. Ebenso wenig müssen sie Auslöser oder der Fokus von Betriebsoptimierung, Energiemanagement oder Energiecontracting sein.

Performance Gap-Studien legen Ziele, Methoden und Bewertungsaspekte fest und sind als solches Teil der Qualitätssicherung sowie des Erwartungs- und Risikomanagements.

Ein Performance Gap muss nachvollziehbar und belastbar aus vorhandener Evidenz hergeleitet werden können, d.h. es muss sowohl eine nachvollziehbare und belastbare Baseline (Ziel) als auch einen nachvollziehbaren, belastbaren und vergleichbaren Ist-Zustand geben. Baseline und Ist-Zustand können dabei je nach Fall aus Messungen, Modellen, Befragungen, Auswertungen und Vergleichen hergeleitet werden.

Bei der Analyse von Gebäuden und Gebäudeparks stellten wir drei grundlegende Typen von Performance Gap-Fragestellungen fest, die mit unterschiedlichen Zielgrössen und Bewertungsmethoden einhergehen.

Performance Gap „Planungsstandard“

- Ziel: Überprüfen der individuellen Gebäudeplanung, aber auch der Richtigkeit, Genauigkeit und praktischen Fairness der Verfahren, die zur Regulierung der Planung beziehungsweise des Baus eingesetzt werden
- Vorgehen: Vergleich von Betriebsdaten mit Standardwerten gemäss Planungsrichtlinien, zum Beispiel Vergleich von Messdaten mit Planungsdaten nach SIA 380/1
- Zu beachten: Das Messkonzept ist auf das in der jeweiligen Richtlinie verwendete Modell abzustimmen



Performance Gap „Bauprojektziel“

- Ziel: Überprüfen der Gebäudeleistung im Betrieb
- Vorgehen: Vergleich von Betriebsdaten mit projektspezifischen Vorgaben, zum Beispiel Vergleich zwischen Messdaten und betrieblichen Sollwerten, die in der Planung festgelegt wurden
- Zu beachten: Kennzahlen, Messkonzept und Verantwortlichkeiten sollten bereits in frühen Planungsphasen festgelegt werden

Performance Gap „Entwicklungspfad“

- Ziel: Steuern des Entwicklungspfads eines Gebäudes oder Gebäudeparks
- Vorgehen: Vergleich von Betriebsdaten mit Vorgaben aus Referenzerhebungen („Benchmark“) oder extern gesetzten Zielen (zum Beispiel „Energiestrategie 2050“)
- Zu beachten: Die Zielgrösse muss verlässlich abgestützt sein (Repräsentativität, Streubreite, Konsensfindung)

Die aktuelle Diskussion von Performance Gaps in Gebäuden bezieht sich in den meisten Fällen (siehe Abschnitt 4) auf den Performance Gap „Planungsstandard“ für den Energieverbrauch.

Bei der Gebäudeperformance kann man jedoch neben Energie auch weitere Aspekte wie zum Beispiel die Behaglichkeit, die Wirtschaftlichkeit, oder die Nachhaltigkeit eines Gebäudes berücksichtigen. Die verschiedenen Dimensionen von Performance Gaps werden im nachfolgenden Abschnitt besprochen.



3.2 Gap-Dimensionen

Bei der Definition eines Performance Gap wird aus einem grossen Variantenraum eine bestimmte Kombination von Entscheidungen getroffen. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die verschiedenen zu berücksichtigenden Dimensionen.

Dimension	Ausprägungen (Beispiele)
Interesse	Abhängig vom Stakeholder; siehe Text und Tabelle 2 und Tabelle 3
Fokus	– Energie (Energy Performance Gap); siehe Text und Tabelle 4 – Behaglichkeit (Indoor Environmental Quality Gap) – Betriebskosten (Operating Expenses Gap) – Nachhaltigkeit – Kombination mehrerer Performance Gaps
Aggregationsebene	– Gebäudepark; siehe Abschnitt 3.3 – Kleinportfolio – Quartier/Areal – Einzelgebäude; siehe Abschnitt 3.3 – Anlage – Komponente
Bezugsgrösse	– Standardisierter Grenzwert (z.B. Minergie) – Individueller Planwert (z.B. aus Gebäudesimulation) – Empirisch ermittelter Wert (z.B. Durchschnittswert oder Perzentil)
Kontext	– Planung vs. Betrieb (Neubau) – Vor / nach Betriebsoptimierung – Vor / nach Sanierung
Art des Vergleichs	– Performance-Wert Einzelgebäude zu Referenzwert pro Kategorie – Performance-Wert Einzelgebäude zu projektspezifischem Referenzwert – Durchschnittliche Performance-Werte Gebäudepark zu Referenzwerten pro Kategorie – Durchschnittliche relative (%) Performance des Gebäudeparks, basierend auf Vergleichen zu projektspezifischen Referenzwerten

Tabelle 1: Dimensionen bei der Definition von Performance Gaps

Die Performance von Gebäuden wird in allen Lebenszyklusphasen durch die Entscheidungen, Unterlassungen und Handlungen verschiedenster Akteure beeinflusst. Tabelle 2 listet die wichtigsten Stakeholdergruppen im Zusammenhang mit Gebäuden auf (vgl. Voss et al. [15]).

Da die verschiedenen Akteure zu unterschiedlichen Zeitpunkten und mit unterschiedlicher Intensität und Zielen beteiligt sind, ist ein breites Spektrum an Interessen und Erwartungen vorhanden. Tabelle 3 gibt eine Übersicht der Freiheitsgrade, entlang derer sich die Interessen der Stakeholder gestalten.



In Anbetracht dieser Vielfalt und der Komplexität auf Grund der sich überlappenden und teilweise widersprechenden Interessen ist eine allgemeingültige Bewertung und Priorisierung der Stakeholder kaum möglich und von den jeweiligen Gegebenheiten eines Projekts abhängig.

– Architekt – Auftraggeber / Bauherr – Betreiber – Dienstleister – Eigentümer – Energieversorger – Ersteller von Regulierungsvorschriften – Erwerber – Fach- und Interessensverbandsvertreter – Fachplaner – Forscher – Gesetzgeber – Interessensvertreter (z.B. Bauherrenvertreter)	– Investor – institutioneller Nutzer – individueller Nutzer – Mieter – Projektmanager – Unternehmer – Vermieter – Verwalter – Vollzugsbehördenvertreter – Mieter – Projektmanager – Unternehmer – Vermieter – Verwalter – Vollzugsbehördenvertreter
--	---

Tabelle 2: Stakeholder im Zusammenhang mit Gebäuden (alphabetische Reihung)

Freiheitsgrad	Mögliche Ausprägungen
Aktivität	legt fest, bestimmt, reguliert; beeinflusst, berät; bearbeitet, plant, baut; erlebt, nutzt; evaluiert; informiert; ist verantwortlich; fördert; entscheidet; bezahlt;
Blickwinkel	ökonomisch, ökologisch, technisch, politisch, sozial
Lebenszyklusphase	Planung, Bau, Betrieb, Sanierung, Abbruch
Risikofokus	Zeit, Gewinn, Kosten, Komfort, Sicherheit, Image

Tabelle 3: Freiheitsgrade, welche die Interessen der Stakeholder im Zusammenhang mit Performance Gaps beeinflussen

Eine besonders wichtige Differenzierung bei der Betrachtung von Energy Performance Gaps muss im Hinblick auf die Energiebilanzgrenze gemacht werden (Tabelle 4). Zudem ist auch die Qualität der betrachteten Energie zu berücksichtigen. So sind Elektrizitäts- und Wärmeverbräuche separat zu bilanzieren und zu analysieren und nur auf Ebene Primärenergie summarisch zu betrachten (vgl. IEA Annex 53 [118]).

Systemgrenze	Fragestellung	Anwendung (Schweiz)
Nutzenergie	Wieviel Energie wird durch die Nutzung konsumiert?	SIA 380/1 (MuKE, GEAK)
Endenergie	Wieviel Energie wird im Gebäude aufgewendet?	Heizkostenabrechnung
Primärenergie	Wie gross ist der Rohstoffverbrauch?	Minergie, GEAK, 2000-Watt-Gesellschaft

Tabelle 4: Unterdimension „Systemgrenze“ bei der Erhebung von Energy Performance Gaps



3.3 Gaps in Gebäudeparks

Performance kann individuell für einzelne Gebäude oder als summarische Betrachtung von grösseren Gebäudeportfolios erhoben werden. Auch bei der Betrachtung ähnlicher Fragestellungen (z.B. Wie viel Nutzenergie wird verbraucht?), unterscheiden sich die Analysen von Einzelgebäuden und Gebäudeparks (Tabelle 5).

	Einzelgebäude	Gebäudepark
Stakeholder-Interessen	Fokus auf das Einzelgebäude, dessen Umsetzung und Betrieb	Übergeordnete Interessen des Portfolios können über den Interessen einzelner Stakeholder stehen
Definition der Baseline	Grenz- oder Zielwerte für individuelles Gebäude	Grenz- oder Zielwerte für Portfolios können von individuellen Zielen abweichen
Detektion	Messkonzept individuell auf Gebäude abgestimmt; Einbezug von Unsicherheiten sinnvoll	Messkonzepte vieler Gebäude müssen harmonisiert werden; Einbezug von Unsicherheiten und Anwendung statistischer Methoden Voraussetzung
Attribution	Gezieltere Bestimmung der Ursachen und gezielte Einleitung von Massnahmen sind möglich	Bestimmung von Ursachen ist mit Unsicherheiten behaftet; Massnahmen benötigen grössere Streubreite

Tabelle 5: Vergleich von Performance Betrachtungen für die Aggregationsebenen Einzelgebäude und Gebäudepark

Eine hohe Richtigkeit¹ eines Compliance Modells auf Portfolio-Ebene führt nicht zwingend zu einer hohen Genauigkeit der Vorhersage des Energieverbrauchs für Einzelgebäude (vgl. Definitionen von Richtigkeit und Genauigkeit) – was auch nicht das Ziel sein muss. Die Zielsetzung der verwendeten Compliance Modelle kann variieren: zwischen der Führung eines gesamten Gebäudeparks (z.B. zur Erreichung der Ziele der Energiestrategie 2050²) oder der möglichst genauen Vorhersage des zu erwartenden Energieverbrauchs eines Einzelgebäudes.

Die nachfolgende Tabelle zeigt Beispiele, wie Energy Performance Gaps auf verschiedenen Aggregationsebenen aktuell in der Schweiz verwendet werden.

Aggregation	Vergleichsart	PG Berechnung	Anwendung
Einzelgebäude	Zielwert pro <i>Nutzungskategorie</i> (z.B: EFH, MFH)	Differenz Einzelgebäude zu Referenzwert der Kategorie	Erfolgskontrolle von Minergie-Gebäuden [9]
Einzelgebäude	Zielwert <i>projektspezifisch</i>	Differenz Einzelgebäude zu Referenzwert des Gebäudes	Erfolgskontrolle von MuKEN-Gebäuden [9]
Gebäudepark	Zielwert pro <i>Nutzungskategorie</i> (z.B: EFH, MFH)	Summe aller Einzelgebäude zu Referenzwert Areal	2000-Watt-Areale [46, 48]

Tabelle 6: Beispiele für verschiedene Arten von Energy Performance Gaps beim Vergleich von Planung und Betrieb

¹ Zur Definition von Richtigkeit und Genauigkeit siehe <https://de.wikipedia.org/wiki/Genauigkeit>

² Informationen zur Energiestrategie: <http://www.bfe.admin.ch/energiestrategie2050/index.html?lang=de>

3.4 Unsicherheiten

Erstellung und Betrieb von Gebäuden finden in einem vernetzten, offenen und dynamischen Umfeld statt, so dass das Thema „Unsicherheit“ bei der Betrachtung von Performance Gap nicht ausser Acht gelassen werden kann. Im Zusammenhang mit komplexen sozio-technischen Systemen unterscheidet man technische, ökonomische, soziale und politische Unsicherheiten [135].

Unsicherheiten können fundamental sein – man weiss nicht einmal, was man nicht weiss – oder sie sind bekannt und können im Prinzip durch weiteres Wissen reduziert werden. Zur letzteren Art von Unsicherheiten gehören Ungenauigkeit, mangelhafte Messungen, Nicht-Messbarkeit, Widersprüchlichkeit, Unbestimmtheit, sowie aufhebbares oder nicht-aufhebbares Unwissen. All diese Kategorien können mehr oder weniger gut mittels Wahrscheinlichkeitsrechnung adressiert werden.

3.4.1 Strategien für den Umgang mit Unsicherheiten

Es werden vier mögliche Strategien für den Umgang mit als objektiv deklarierten Unsicherheiten identifiziert [135] (Abbildung 3). Grundsätzlich können solche an einen Akteur herangetragenen Unsicherheiten von ihm entweder vernachlässigt (1, rotes Kästchen in Abbildung 3) oder anerkannt werden.

Wird eine Unsicherheit als solche anerkannt, so kann ihr mit passiven (orange) oder aktiven (grün) Strategien begegnet werden. Zu den passiven Strategien (2) gehören das Ertragen und Aushalten von Unsicherheit sowie das Delegieren an andere Akteure.

Der aktive Umgang mit Unsicherheit kann aus einer der zwei Strategien „anpassen“ oder „transformieren“ bestehen. Bei einer Anpassungsstrategie (3) passen sich die Akteure an, indem sie Schutz- oder Vorbereitungsmaßnahmen treffen. Bei einer Transformationsstrategie (4) wird versucht, die Unsicherheit zu reduzieren oder, sei es mittels Uminterpretation oder mittels materieller Umgestaltung der Situation, zu beseitigen [135].

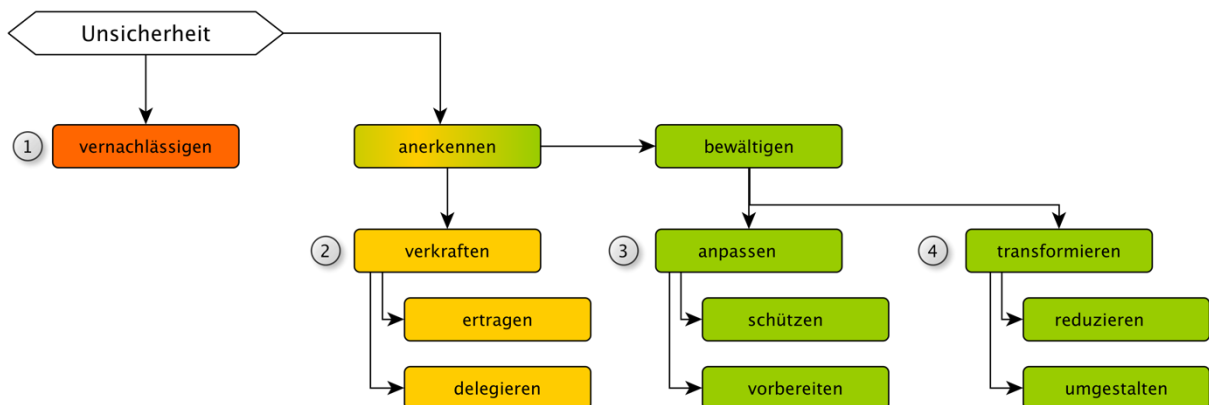


Abbildung 3: Mögliche Strategien für den Umgang mit Unsicherheiten (adaptiert und übersetzt nach Bornemann et al. [135])



Zusätzlich unterscheiden Bornemann et al. [135] drei Herangehensweisen, um Unsicherheit aktiv zu begegnen:

- **Planung:** basierend auf einer möglichst umfangreichen Wissensbasis werden Ziele definiert und die entsprechenden Massnahmen geplant
- **Schrittweises Herantasten** (Inkrementalismus): ausgehend von einem lückenhaften Wissen werden Entscheide in kurzen Zeitabständen überprüft und an aktuelle Erkenntnisse angepasst
- **Gerichtetes Herantasten** (gerichteter Inkrementalismus): die kontinuierliche Überprüfung und Anpassung der getroffenen Entscheide orientiert sich an übergeordneten Leitstrategien

Die Performance Gap-Diskussion findet in einem komplexen sozio-technischen Umfeld mit vielen Unwägbarkeiten und Interessenskonflikten statt (vgl. Tabelle 2 und Tabelle 3). Die oben beschriebenen Strategien und Herangehensweisen können unseres Erachtens helfen, die Positionen zu klären und die Diskussion zu strukturieren.

Im Weiteren beschränken wir uns auf die technisch motivierten Aspekte von Unsicherheiten im Zusammenhang mit Performance Gaps.

3.4.2 Arten von Unsicherheiten empirischer Grössen

Als Grundlage für den Umgang mit Unsicherheiten empirischer Grössen und die Wahl geeigneter Methoden zu ihrer Verminderung werden von Morgan und Henrion [114] die folgenden Quellen und Typen von Unsicherheiten vorgeschlagen:

- Systematische Fehler
- Zufallsfehler und statistische Variation
- Zufälligkeit und Unvorhersagbarkeit
- Variabilität
- Annäherungen
- Mangelnde sprachliche Präzision
- Subjektive Einschätzungen
- Uneinigkeit

Unter Zufallsfehler und statistischer Variation fallen die typischen Messunsicherheiten, wie sie durch zufällige Schwankungen der Messbedingungen und den Messmethoden verursacht werden. Die Betrachtung dieses Unsicherheitstyps hat in den Natur- und Ingenieurwissenschaften weite Verbreitung und einen hohen Standardisierungsgrad erreicht. Ein wichtiges Grundlagendokument ist der ISO/IEC Guide 98-3/2008 „Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement“ (GUM) [97].

Zufallsprozesse können mit dem Instrumentarium der Häufigkeitsstatistik beschrieben werden. Der Zufallsfehler einer Messung kann gemäss dem wahrscheinlichkeitstheoretischen „Gesetz der grossen Zahlen“ durch Wiederholung reduziert werden. Limitierend können dabei die Kosten für die Wiederholungen, die Gewährleistung der Konstanz der Messbedingungen und die ausreichende Verfügbarkeit des Untersuchungsgegenstandes für die Messungen sein.



3.4.3 Unsicherheit und Risiko in Bauprojekten

Die Auswirkungen von Unsicherheiten auf Ziele können mittels Risikoabschätzungen bewertet werden. Dabei wird für verschiedene Szenarien das Produkt der Eintrittswahrscheinlichkeit eines jeden Szenarios mit der zugehörigen Gewinn- oder Schadenshöhe betrachtet. Stempkowski und Waldauer [90] unterscheiden die positiven und negativen Auswirkungen von Unsicherheiten auf ein Bauprojekt als „Chancen“ und „Risiken“.

Der vorausschauende Umgang mit Unsicherheiten ist Teil eines Risikomanagements. Die allgemeinen Grundlagen des Risikomanagements sind in der ISO-Richtlinie 31000 [110] definiert. Umsetzen lässt sich das Risikomanagement im Bauprozess und Gebäudelebenszyklus beispielhaft nach der ONR 49001 (Risikomanagement) [111] und der ONR 49002-2 (Methoden der Risikobeurteilung) [113].

Risiken für Performance Gaps ergeben sich oft aus unvorhergesehenen oder unvorhersehbaren Ereignissen oder Entwicklungen in der Planungs-, Bau- und Betriebsphase von Gebäuden. Darüber hinaus gelten die im vorherigen Abschnitt erwähnten Arten von Unsicherheiten.

3.4.4 Unsicherheitsanalysen

Für die Unsicherheitsanalyse von technischen Messungen und Berechnungen bieten sich zwei bewährte Methoden an, die auch für die Evaluation von Performance Gaps nützlich sind:

3.4.4.1 GUM-Methode

Der „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)“ [97] ist ein international anerkanntes und einheitlich praktiziertes Verfahren zur Angabe von Messunsicherheiten, das auch von akkreditierten Prüf- und Kalibrierstellen verwendet wird.

Bei der GUM-Methode wird für jede Eingangsgrösse angegeben, wie stark sie die gesamte Messunsicherheit beeinflusst. Es werden die folgenden zwei Berechnungsmethoden unterschieden:

- Typ A: Berechnung der Messunsicherheit mittels statistischer Analyse gemessener Werte
- Typ B: Berechnung der Messunsicherheit basierend auf sonst verfügbaren Informationen, insbesondere Annahmen über die erwartete Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung (Rechteck, Dreieck, Gauss, Student, Weibull etc.)

Die GUM-Methode lässt sich auch zur Angabe von Berechnungsunsicherheiten verwenden. Dabei wird jede Eingangsgrösse einer statistischen Analyse unterzogen und die erwartete Verteilung festgelegt.

Ein Softwareprogramm, das die GUM-Methode unterstützt, stellen wir in Abschnitt 4.6.1 vor. Ein Beispiel ist in Anhang E zu finden.

3.4.4.2 Monte-Carlo-Simulation

Monte-Carlo-Simulationen sind ein weiteres Hilfsmittel zur Quantifizierung des Effekts von Messunsicherheiten und unsicherheitsbehafteten Eingangsgrössen auf Berechnungsergebnisse. Dabei wird eine grosse Anzahl gleichartiger Zufallsexperimente definiert, die auf einem Computer simuliert und gezielt ausgewertet werden.

Der Einsatz von Monte-Carlo-Simulationen wird in Abschnitt 4.6.1 besprochen. Ein Beispiel findet sich in Anhang E.

3.5 Regelkreise

In technischen Systemen bezeichnen Regelkreise einen geschlossenen Wirkungsablauf in dem die zu regelnde physikalische Grösse fortlaufend gemessen und mit einem Sollwert verglichen wird. Weichen Soll- und Ist-Werte voneinander ab, wirkt der Regler der Abweichung entgegen³. Für eine systemtheoretische Abhandlung technischer Regelkreise verweisen wir an dieser Stelle auf die zahlreichen Standardwerke wie zum Beispiel Mobus und Kalton [151] und Åström und Murray [152].

Die Anwendung der gleichen Prinzipien auf nicht-technische Systeme („Kybernetik“) wird in [154] behandelt. Das bestimmende Wirkprinzip geschlossener Regelkreise ist die fortlaufende Rückkopplung zwischen „Sensoren“, die den Ist-Zustand überwachen, und „Aktoren“, welche derart angesteuert werden, dass die Abweichungen zum Soll-Zustand reduziert werden. Solche Gedanken liegen beispielsweise auch dem betriebswirtschaftlichen Controlling zu Grunde.

In dieser Arbeit weiten wir den Begriff des technischen Regelkreises auf organisatorische und prozessorientierte Rückkopplungsschleifen aus und erörtern ihre Bedeutung in Zusammenhang mit Performance Gaps in Gebäuden. Im Sinne eines Regelkreises sind dabei (i) eine fortlaufende Überwachung des Ist-Zustands und (ii) die Kommunikation der relevanten Informationen an die betroffenen Akteure Voraussetzung, um über effiziente Rückkopplungsmechanismen zu verfügen.

Performance-Regelkreise für Gebäude und Gebäudeparks basieren auf Gebäudeanalysen und -bewertungen. Leaman et al. untersuchen in [124] die organisatorischen und methodischen Grundlagen für die Gebäudeanalyse und -bewertung. Die Autoren unterscheiden fünf verschiedene Ebenen von Rückkopplungen:

- | | | |
|---------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|
| – Level 1: Insight | → review now, benefit now | (Einblick) |
| – Level 2: Hindsight | → review now, benefit in the future | (Rückblick) |
| – Level 3: Foresight | → review the past to benefit now | (Voraussicht) |
| – Level 4: Knowledge management | → remember what you did | (Wissensmanagement) |
| – Level 5: Consolidation of knowledge | | (Verfestigen des Wissens) |

Die Performance-Evaluation von Gebäuden fällt gemäss [124] in die Rückkopplungskategorien *Rückblick* und *Voraussicht* (Ebenen 2 und 3). Gemeinsam mit der unmittelbarsten Form einer Rückkopplung (Ebene 1: *Einblick*) sollten diese drei Kategorien ins Wissensmanagement münden. Akademische Studien würden nach Leaman et al. vor allem auf Ebene 5 stattfinden.

Als eine besonders effektive und nachhaltige Rückkopplung aus Gebäudeevaluationen nennen die Autoren in [124] Fallstudien, die

- auf einer zuverlässigen Datenbasis aufbauen,
- in Beziehung zu nationalen Vergleichsobjekten gesetzt wurden,
- eine Übersicht der gewonnen Erkenntnisse („Lessons learned“) enthalten,
- Rückmeldungen von allen beteiligten Akteuren, besonders dem Planungsteam, einbeziehen und
- die Begleitumstände des Projekts nachvollziehbar darlegen.

Das Thema Regelkreise wird anhand von Beispielen aus der Literatur in den Abschnitten 4.7 und 5 vertieft behandelt.

³ vgl. <https://de.wikipedia.org/wiki/Regelkreis>

4 „GapReview“: Stand des Wissens

Die „GapReview“ dokumentiert den Stand des Wissens zu Performance Gaps in Gebäuden, sowie der verwendeten Methoden. Die Review hat *nicht* zum Ziel, die Relevanz und Qualität der einzelnen Studien abschliessend zu bewerten. Der Grund dafür liegt in der Vielzahl der möglichen Motivationen für die einzelnen Studien, wie auch in den verschiedenen möglichen Blickwinkeln und Bewertungskriterien (Abschnitt 3), die bei der Beurteilung einer jeden Studie zum Tragen kommen können. Die Synthese unserer Erkenntnisse aus der Review findet sich in Abschnitt 5.

Der Stand des Wissens wurde mit Hilfe einer umfangreichen nationalen und internationalen Literaturrecherche aufgearbeitet. Für die Recherche benutzten wir Suchmaschinen auf dem Web, den NEBIS Katalog der ETH-Bibliothek, die Websites von mehr als 15 peer-reviewed Journals, sowie unsere eigenen Wissens- und Literaturdatenbanken mit Quellen aus dem deutschsprachigen und angelsächsischen Raum.

Nebst peer-reviewed Journal Papers berücksichtigten wir auch akademische Forschungsberichte, Dissertationen, Proceedings von Konferenzen, Projektberichte von Organisationen und Behörden, sowie massgebende nationale und internationale Richtlinien und Normen.

Die gefundene Literatur wurde in zwei Gruppen aufgeteilt: (i) In diesem Bericht zitierte und aufbereitete Quellen sowie (ii) ergänzende Literatur (Anhang F). Alle Quellen aus Gruppe (i) wurden hinsichtlich der folgenden Gesichtspunkte ausgewertet: Arten der betrachteten Gaps, Gap-Ursachen, Bewertungsmethoden, Einbettung in Bau- und Betriebsprozesse, Empfehlungen zur Vermeidung von Gaps.

Im vorliegenden Bericht haben wir eine bereits von uns publizierte Literaturrecherche (Anhang A, Publikation b) um neu gefundene Referenzen erweitert, siehe Abschnitte 4.1 und 4.2. Zweitens haben wir die Literatur neu nach den 5 Leitthemen dieses Berichts ausgewertet und kurz besprochen (Abschnitte 4.3 bis 4.7). Detailauswertungen und ergänzende Analysen finden sich in Anhang C.

Ergänzend führten wir eine Online-Umfrage mit 19 ausgewählten Personen aus unterschiedlichen Bereichen der Baubranche durch. Die Aussagen aus den Interviews werden in Abschnitt 4.8 behandelt.

Vorab empfehlen wir die folgenden Schlüsselpublikationen zur Vertiefung der Performance Gap-Thematik über die hier beleuchteten Gesichtspunkte hinaus, Stand per März 2018:

- Voss et al. [15] bieten ein Kompendium von Methoden und Best Practices zu verschiedenen Performance-Arten. Sie betten Betrachtungen zur Performance in einen grösseren Kontext ein und schlagen zur Sicherstellung der Gebäudeperformance einen generischen „Qualitätsregelkreis“ vor.
- Van Dronkelaar [5] stellt eine umfangreiche Review von Energy Performance Gap-Studien zusammen und arbeitet Ursachen und Massnahmen auf.
- De Wilde [14] erweitert die Diskussion zum Energy Performance Gap um einen Vorschlag zur Klassifizierung von Energy Performance Gaps basierend auf den jeweils angewandten Modellen und Vergleichsmethoden.
- Borgstein et. al. [4] arbeiten in einer umfangreichen Studie zahlreiche Methoden zur Erfassung und Bewertung von Performance Gaps auf, wobei der Schwerpunkt ebenfalls auf der Energie liegt.
- Bluysen [3] zeigt die Komplexität von Performance-Anforderungen aus Stakeholder-Sicht auf. Die Performance-Anforderungen fallen je nach Stakeholder sehr unterschiedlich aus und sind daher in einzelne, separat nachvollziehbare Teilziele mit differenzierter Zuständigkeit aufzuschlüsseln.
- Wagner et al. [17] betrachten die Interessen verschiedener Stakeholder in Planung, Bau und Betrieb aus Sicht der Bewertung der Nutzerzufriedenheit in Bürogebäuden. Es wird ein methodischer Rahmen für das Management der Nutzerzufriedenheit vorgestellt und diskutiert.
- Liste von Online-Ressourcen, siehe Abschnitt 6.2

4.1 Quantifizierung von Performance Gaps

In diesem Abschnitt berichten wir Belege für Performance Gaps in Gebäuden aus nationalen und internationalen Studien. Wir beschränken uns hier auf die zahlreich vorhandenen Studien, die den Energy Performance Gap betreffen. Nur wenige der von uns gefundenen Studien betrachten die Themenbereiche Indoor Environmental und Operational Expenses im Kontext eines Performance Gaps. Auf diese Studien wird im Abschnitt Gap-Dimensionen (Kapitel 4.4) eingegangen.

Die Studien zum Energy Performance Gap fallen in zwei Kategorien. Erstens die Betrachtung von individuellen Gebäuden. Zweitens die Analyse der energetischen Performance von ganzen Gebäudeparks. In beiden Fällen werden normalerweise gemessene und in einigen Fällen simulierte Energieverbräuche mit einem gegebenen Grenz- oder Zielwert verglichen. Reviews sind zu finden bei Rafols [1], Borgstein et al. [4] und van Dronkelaar et al. [5].

Einzelgebäude

Aus der ersten Kategorie von Studien stechen die folgenden heraus:

- Cali et al. [6] und Osterhage et al. [82] untersuchen und vergleichen drei baugleiche Gebäude an denen verschiedene Sanierungsstrategien angewendet wurden. Es werden unterschiedliche Energieverbräuche festgestellt, die vor allem auf das Benutzerverhalten, Lageabhängigkeiten und gebäudetechnische Probleme zurückgeführt werden.
- Jones et al. [7] untersuchen in ihrer Studie sechs identische Wohnungen im gleichen Gebäude. Die Diskrepanzen der Ergebnisse zwischen statischer Berechnung und Simulation einerseits und Messung andererseits werden auf limitierte Berechnungsmethoden, unterschiedliche Kompetenz der Modellierer und das Benutzerverhalten zurückgeführt.

Gebäudeparks

Von den gefundenen Analysen zu Gebäudeparks seien hier wegen des Bezugs zur Schweiz und der Verwendung stark unterschiedlicher Bewertungsmethoden die folgenden hervorgehoben:

- Das BFE-Projekt „Erfolgskontrolle Gebäudeenergiestandards 2014-2015“ [9] führte für 214 Gebäude eine Erfolgskontrolle des Gebäudelabels Minergie® [28] und der Norm SIA 380/1 [27] durch. In 7 der 11 betrachteten Label-Kategorien liegt der Median aller Energieverbräuche bei oder unter dem aktuellen Grenzwert. In zwei Fällen liegt der Median klar innerhalb der Spannbreite des Grenzwerts und in weiteren zwei Fällen oberhalb des jeweiligen Grenzwerts. Die Streubreiten der gemessenen Energieverbräuche sind dabei grösser als die Unterschiede zwischen den Grenzwerten der verschiedenen Label-Kategorien. Lehmann et al. [96] berichten in einem Tagungsbeitrag ebenfalls über dieses Projekt (vgl. Abschnitte 4.4.2, 4.5.2.5, 5 und Anhang C).
- Khoury et al. [10] untersuchen den Energieverbrauch in 10 Fallstudien (gesamt 1'100 Wohnungen) und schätzen für den gesamten Kanton Genf das nicht genutzte Potenzial von Sanierungen nach der Norm SIA 380/1 auf 58% (392 GWh/a). Neben Einflussfaktoren aus dem Bauprozess werden auch der Einfluss von Unsicherheiten aufgrund von Standardwerten, Modelleingaben und Berechnungsmodellen auf den ermittelten Performance Gap diskutiert (vgl. Abschnitte 4.6.2.3, 4.6.3).
- Mühlebach et al. [50] zeigen in der Zürcher 2000-Watt Überbauung Hunziker-Areal, dass Gebäude mit Komfortlüftung einen erhöhten Heizwärmebedarf aufweisen. Eine vertiefte Untersuchung des Einflusses der Lüftungskonzepte wird empfohlen. Es ist darauf hinzuweisen, dass die gleichen Gebäude in einer Arealbetrachtung nach den Prinzipien der 2000-Watt-Gesellschaft die Grenzwerte für den Betrieb deutlich unterschreiten (ebenda) (vgl. Abschnitt 2 und Anhang C).
- Hoffmann et al. [61] untersuchen den Prebound-Effekt bei SIA 380/1 Berechnungen (vgl. Abschnitt 4.3) mittels einer systematischen Unsicherheitsanalyse und mehreren Fallstudien. Sie kommen zu



dem Schluss, dass Energy Performance Gaps unter $\pm 15\%$ aufgrund von Unsicherheiten nicht zu berücksichtigen sind. Für Bestandsbauten werden Empfehlungen für die einzusetzenden Parameter in der SIA 380/1 Berechnung gegeben (vgl. Abschnitte 4.6.2.3 und 4.6.3).

- Zwei Studien aus Deutschland (Deutsche Energie-Agentur [11], Peper und Feist [12]) belegen, dass der Energy Performance Gap eines Gebäudeparks weniger ausgeprägt ist, wenn (i) zur Ermittlung des Zielwertes verfeinerte Bilanzmodelle und (ii) bei der Überprüfung der Zielerreichung statistische Methoden eingesetzt werden. Beide Studien zeigen, dass die Durchschnittswerte des Energieverbrauchs aller untersuchten Objekte die spezifizierten Grenzwerte erreichen, wobei allerdings die einzelnen Werte eine grosse Streubreite aufweisen. Der Einfluss des Nutzers auf den Energieverbrauch wird unabhängig der betrachteten Energiestandards mit $\pm 50\%$ beziffert [12] (Details siehe Anhang C).
- Jährlich veröffentlicht der internationale Energiemanagement-Dienstleister Techem Energy Services GmbH⁴ eine Studie zur Entwicklung des Wärme- und Warmwasserverbrauchs in über 115'000 Mehrfamilienhäusern in Deutschland, Österreich und der Schweiz [39, 95]. Bezüglich berechnetem Energiebedarf und tatsächlichem Energieverbrauch besteht auch in dieser Studie ein Energy Performance Gap. Oberhalb eines mittleren Verbrauchsniveaus von rund 120 kWh/m²a wird der Heizwärmeverbrauch gegenüber dem Heizwärmebedarf überschätzt. Dieses Phänomen wird auch in den Studien [38, 39, 55, 61, 64, 95] festgestellt. Details zur Techem-Studie mit dem Vergleich von Energiebedarf und –verbrauch bei rund 70 Gebäuden: siehe Anhang C.
- Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts sind eine umfangreiche Auswertung des Energieverbrauchs von Gebäuden mit GEAK-Ausweisen⁵ sowie mehrere Studien des BFE⁶ zum Performance Gap in Arbeit.

⁴ <http://www.techem.de/>

⁵ future energy efficient buildings & districts, sccer: <http://www.sccer-feebe.ch>

⁶ Laufende BFE-Studien (Stand März 2018):

„ImmoGap“:	https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=38541
„WP-GAP“:	https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=38625
„GAPxPLORE“:	https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=40161
„EnBo800“:	https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=38543



4.2 Ursachen und Massnahmen

Die ausgewiesenen Ursachen für Energy Performance Gaps reichen von detaillierten, technischen Argumenten bis zu allgemeinen Aussagen über die Art, wie Gebäude geplant, gebaut und betrieben werden. In unserer Recherche haben wir die folgenden Kategorien von **Ursachen** ausfindig gemacht [1, 2, 5, 9, 10, 12, 13, 17, 18], geordnet nach Lebenszyklusphase:

Planung und Dimensionierung: limitiertes Verständnis der Auswirkungen von frühen Planungsentscheidungen, Komplexität der Planung, Unsicherheit der Gebäudeenergie-Modellierung, Spezifikation der Nutzung und Nutzungsbedingungen, Überdimensionierung der Gebäudetechnik-Systeme, unsichere Klimadaten

Ausführung und Inbetriebnahme: Value Engineering, z.B. ökonomisch bedingte Entscheidungen sind wichtiger als Planungsentscheide, mangelhafte Inbetriebnahme, Limitationen des Monitoring-Systems;

Betrieb: ungünstiger Teillastbetrieb, schlecht funktionierende Komponenten und Systeme, unvorteilhafte Interaktion zwischen Benutzer und Gebäudetechnik, Nutzerverhalten, Betriebsoptimierung und/oder Technisches Monitoring nicht vorhanden/verfügbar.

Auch das Spektrum an diskutierten vorbeugenden Massnahmen erstreckt sich von relativ konkreten Vorschlägen bis hin zu weitreichenden Anpassungen des Bauprozesses [1, 2, 5, 9, 10, 12, 13, 17, 19]. Wir fanden die folgenden **Massnahmen**, geordnet nach zunehmender Eingriffstiefe:

Datenerhebung und Monitoring; saisonale Inbetriebnahme und Betriebstests; betriebliches Management; Aus- und Weiterbildung; Verbesserungen in der Planung; verbesserte Kommunikation zwischen Planung und Ausführung; verbesserte Kommunikation zwischen Investoren, Eigentümern und Nutzern; Rückmeldungen von der Inbetriebnahme („continuous commissioning“) zu Planung und Betrieb („Closing the Loop“); Verwendung von „Energy Performance“ Verträgen und „grünen“ Mietverträgen⁷; gesetzliche Rahmenbedingungen.

Van Dronkelaar et al. [5] legen eine Grundlagenarbeit zu energetischen Performance Gaps vor und analysieren die Ergebnisse von über 60 Studien. Eine umfangreiche, strukturierte Übersicht von Evidenzen, Ursachen und Gegenmassnahmen für den Energy Performance Gap in Nicht-Wohngebäuden wird auf Basis einer umfangreichen Literaturrecherche erarbeitet. Vertiefte Besprechung siehe Anhang C.

Fedoruk et al. [59] arbeiten anhand einer Fallstudie systematisch Ursachen und Verbesserungsmassnahmen für energetische Performance Gaps auf. Erwähnenswert ist der Hinweis auf die Bedeutung der Systemgrenzen, des Einsatzes eines integrierten Designprozesses und einer gelebten Fehlerkultur. Des Weiteren wird darauf hingewiesen, dass der immer häufigere Gebrauch von Begriffen wie „smart“ und „intelligent“ zur Beschreibung von Gebäuden und deren Infrastruktur davon ablenkt, dass die wahre Intelligenz eines Gebäudes von seiner geplanten Fähigkeit definierte Funktionen wirksam und nützlich bereitzustellen, herrührt. Vertiefte Besprechung siehe Anhang C.

Eine weitere sehr umfangreiche, detaillierte Massnahmenliste wurde im Projekt Zero Carbon Hub [19] erarbeitet. Sie ist zum Teil sehr spezifisch auf Grossbritannien, auf die Gebäudehülle und einzelne Stakeholder bezogen.

⁷ Informationen zu „grünen“ Mietverträgen z.B. bei <http://der-gruene-mietvertrag.de/index.html>

2016 wurden zwei umfangreiche, von der EU geförderte Projekte gestartet, deren Ziele die Reduktion bzw. Vermeidung von Performance Gaps durch Qualitätsverbesserungen im Bauprozess sind („QUANTUM“ [20], „Built2Spec“ [21]). Das EU-Projekt „QUALICHECK“ [35] wurde 2017 abgeschlossen und erarbeitete Grundlagen für die Verbesserung und Qualitätssicherung von Energieausweisen und gesetzlichen Regulierungen im Gebäudeenergiebereich.

Auch für die Schweiz wurde bisher noch keine gesamtheitliche Strategie zum Umgang mit Performance Gaps erarbeitet. Struck et al. [2] thematisierten 2014 dessen Evidenz, Relevanz und Minderungsstrategien. Im Rahmen der Erfolgskontrolle der Gebäudestandards [9] wurden Ursachen beleuchtet und Einzelmassnahmen vorgeschlagen.

Khoury et al. [51] diskutieren neben Einflussfaktoren aus dem Bauprozess auch den Einfluss von Unsicherheiten aufgrund von Standardwerten, Modelleingaben und Berechnungsmodellen auf den ermittelten Performance Gap. Eine andere Schweizer Studie beziffert 150 (Einzel-)Massnahmen, um die Energieeffizienz der Gebäudetechnik zu verbessern [22].

Auf Grund ihrer Detailtiefe bzw. ihrer Bedeutung für die Schweiz werteten wir neun Studien detailliert aus [1, 2, 5, 9, 10, 12, 14, 36, 37]. Insgesamt werden in den Arbeiten 118 Ursachen und 129 mögliche Gegenmassnahmen und Lösungsvorschlägen zur Reduktion von Performance Gaps aufgeführt (Doppelnennungen zwischen den Studien sind dabei häufig). Eine vollständige Auflistung aller gefundenen Ursachen und Massnahmen findet sich in Anhang D.

Abbildung 4 zeigt die Verteilung der genannten Ursachen und Massnahmen nach generischen Themenbereichen zur Untersuchung von Performance Gaps (vgl. Abschnitt 2.2). Auffällig ist, dass die Stakeholder-Interessen sowie die Erwartungen (d.h. die gesetzten Ziele) seltener besprochen werden. Die Schwerpunkte liegen in der Ursachenforschung (Attribution) und der Diskussion der Detektionsmethoden.

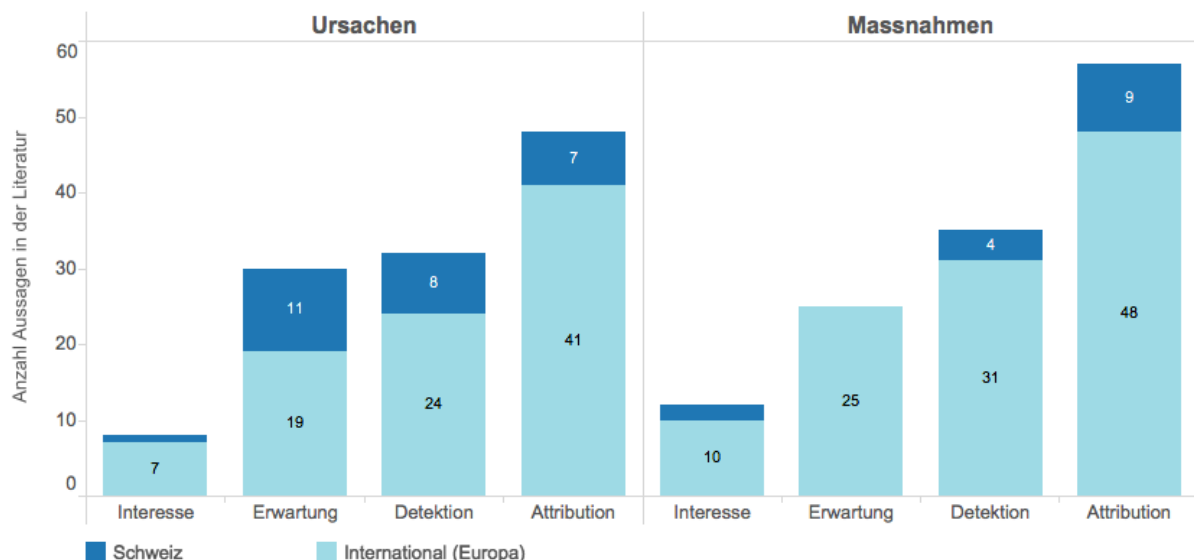


Abbildung 4: Betrachtung der genannten Ursachen und Massnahmen nach generischen Gesichtspunkten von Performance Gaps [1, 2, 5, 9, 10, 12, 14, 36, 37]

4.3 Gap-Definitionen

Die Definition von Performance Gaps (was genau will man wissen?) sollte unabhängig von der verwendeten Methodik (wie wird gemessen und gerechnet?) und dem Erhebungsprozess (wer macht wann was?) erfolgen. Diese Abgrenzungen werden in der uns bekannten Literatur zu wenig vorgenommen.

Die meisten Arbeiten zur Evidenz von Performance Gaps fokussieren auf ganz spezifische Soll-Ist-Vergleiche, die unter den Oberbegriff „Performance Gap“ gestellt werden. Dabei werden verschiedene Metriken, Methoden, Bilanzgrenzen, Zeitperioden und Messkonzepte verwendet und gewissenhaft rapportiert, jedoch ohne dass Gültigkeitsbereiche und Unsicherheiten der spezifischen Auswahl explizit diskutiert werden.

Die unterschiedlichen Herangehensweisen widerspiegeln einerseits länderspezifische Eigenheiten andererseits aber auch ganz einfach die unterschiedlichen Schwerpunktsetzungen der Autoren.

Allgemein scheint uns, dass methodische Aspekte und Gap-Definitionen in den praktischen Analysen am ehesten auf der Ebene Einzelgebäude reflektiert werden. Dies hängt damit zusammen, dass es gemäss unserer Recherche bis heute im deutsch- und englischsprachigen Raum keine Richtlinien gibt, die gleichzeitig verschiedene Definitionen, Methoden und Erhebungsprozesse von Performance Gaps in Gebäudeparks berücksichtigen und aufeinander abstimmen.

Tabelle 7 gibt eine Übersicht zu den Schwerpunkten der Gap-Definitionen, die in der Literatur behandelt werden, wobei nicht alle Quellen direkt auf Performance Gaps Bezug nehmen.

Quelle	Kurzbeschreibung	Fokus Definition	Fokus Methode	Fokus Prozesse
De Wilde et al. [14]	Klassifizierung von Performance Gaps auf Basis der angewandten Vergleichsmethoden	X	X	
Bluyssen [3]	Entwicklung eines "Performance-based Framework" mittels Top-Down Ansatz	X		X
Borgstein et al. [4]	Methoden zur Erfassung und Bewertung von Performance Gaps in Nicht-Wohnbauten	X	X	
VDI 3807 [66]	Verbrauchskennwerte für Heizenergie, Strom und Wasser (Richtlinien-Reihe)		X	
VDI 6041 [68]	Richtlinie zu technischem Monitoring von Gebäuden und Anlagen		X	
GEFMA 124 [69]	Energiemanagement (Richtlinien-Reihe)		X	X
AMEV 135 [70]	Empfehlung und Leitfaden zur Anwendung von technischem Monitoring zur Qualitätssicherung			X
ISO 50001 [71]	Aufbau und Betrieb eines systematischen Energiemanagements (Norm)			X
IPMVP [72]	Protokoll zur Bestimmung von Energie- und Wassereinsparungen	X	X	
QUANTUM [129]	Grundlagen für phasenübergreifende Qualitätsregelkreise in Gebäuden		X	X

Tabelle 7: Literaturquellen zu theoretischen Aspekten von Gap-Definitionen, Methoden und Prozessen

Nachfolgend stellen wir diejenigen Arbeiten und Richtlinien vor, die bevorzugt methodische Aspekte behandeln und daher im Zusammenhang mit dem Definieren von Gaps von besonderem Interesse sind:

- Bluyssen [3] macht einen Versuch einer allgemeinen Definition unabhängig von der verwendeten Methodik zur Ermittlung eines Gaps. Sie verwendet einen systemischen Ansatz, der Stakeholder über alle Bau- und Lebenszyklusphasen einbindet, und entwickelt eine Methode zur Definition, Kommunikation und Überprüfung von Performance. Aus ihrer Sicht ist dabei die korrekte „Übersetzung“ von funktionalen Performance-Aspekten in technische Anforderungen mit konkreten Teilzielen entscheidend (siehe Abschnitt 4.7.1.2).
- De Wilde [14] erweitert die Diskussion zum Energy Performance Gap um einen Vorschlag zur Klassifizierung von Energy Performance Gaps basierend auf den jeweils angewandten Modellen und Vergleichsmethoden (siehe Abschnitt 4.4.1.2).
- Burman et al. [106] weisen auf systematische Unsicherheiten im Rahmen von Energy Performance Gaps hin. Sie stellen ein vereinfachtes Mess- und Nachweiskonzept für die Überprüfung von Berechnungen im Sinne der EPBD⁸ auf und definieren zwei verschiedene Gap-Arten. Der sogenannte „**Procurement Gap**“ entsteht als Folge nicht nachgeführter Berechnungsgrundlagen, d.h. die Annahmen der Energiebedarfsberechnungen stimmen nicht mit der späteren Ausführung überein. Der „**Operational Gap**“ entspricht der verbleibenden Differenz, wenn die Energiebedarfsberechnungen nach Inbetriebnahme des Gebäudes aktualisiert werden.
- Borgstein et. al. [4] arbeiten in einer umfangreichen Studie zahlreiche Methoden zur Erfassung und Bewertung von Performance Gaps in Nicht-Wohnbauten auf, wobei der Schwerpunkt ebenfalls auf der Energie liegt (siehe Abschnitt 4.4.1.2). Sie weisen darauf hin, dass es neben dem Energy Performance Gap auch einen „**Indoor Environmental Quality Gap**“ und einen „**Service Provisions Gap**“ gibt.
- Im laufenden EU-Projekt „QUANTUM“ [20, 128, 129] werden sogenannte „**Quality Gaps**“ untersucht. Es werden zwei Arten von Quality Gaps unterschieden: (i) Veränderungen zwischen den verschiedenen Lebenszyklusphasen eines Gebäudes und (ii) Differenzen zwischen Mess- und Planwerten hinsichtlich Energieverbrauch, Komfort und den erwarteten technischen Funktionen. Die Qualitätsdefizite im Lebenszyklus eines Gebäudes werden in vier Untergruppen eingeteilt: Gap zwischen Planung und Ausschreibung; Gap zwischen Ausschreibung und Bauübergabe; Gap zwischen Inbetriebnahme und Betrieb sowie Gap zwischen Planung und Betrieb [128]. Im Rahmen des Projekts werden geeignete Prozesse und konkrete Werkzeuge zur Überbrückung dieser Gaps entwickelt und im Feld getestet [129] (siehe Abschnitt 4.7.1.1).
- Khoury et al. führen in [10] einen „**Energy demand performance gap**“ und einen „**Energy saving performance gap**“ ein. Ersterer bezieht sich auf die Differenz zwischen dem gemessenen und dem berechneten Heizwärmebedarf (Q_h nach SIA 380/1). Der „Energy saving performance gap“ bezieht sich auf den Vergleich der gemessenen und der berechneten Energieeinsparungen aufgrund einer Sanierung.

Es werden drei Arten von Energieeinsparungen durch Sanierungen unterschieden: (i) normierte Einsparungen (Vergleich der Berechnungen vor/nach der Sanierung), (ii) theoretische Einsparungen (Vergleich Messung vor der Sanierung und Berechnung nach der Sanierung) und (iii) tatsächliche Einsparungen (Vergleich der Messungen vor/nach der Sanierung). In [10] stellen die Autoren eine Korrelation zwischen den theoretischen und tatsächlichen Einsparungen fest. Die in [10] vorgestellten Definitionen kommen ebenfalls in den Folgestudien [133, 136] zum Einsatz (siehe Abschnitte 4.1 und 4.6.3).

⁸ Energy Performance of Buildings Directive (EPBD): Richtlinie des Europäischen Parlaments über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden

- Die VDI-Richtlinienreihe 3807 [66] ist ein Beispiel dafür, dass Vergleichsgrößen für den gemessenen Energieverbrauch nicht zwingend aus Planungsvorgaben stammen müssen. Ein empirisches Benchmarking mit einheitlicher Bezugsbasis ist genauso gut denkbar. Die VDI-Richtlinienreihe enthält neben methodischen Grundlagen auch umfangreiche Verbrauchsstatistiken, die für Benchmarkanalysen eingesetzt werden können. Häufigkeitsverteilungen für Heizenergie-, Strom- und Wasserverbrauchskennwerte werden für verschiedenste Nutzungskategorien angegeben. Zusätzlich sind u.a. Mittelwerte, Standardabweichungen, sowie Richt- bzw. Zielwerte pro Gebäudeart dokumentiert. Als Richtwert wird dabei das arithmetische Mittel des unteren 25%-Perzentils (unterer Quartils-Mittelwert) für eine gegebene Gebäudeart definiert.
- Sunikka-Blank und Galvin [41] führen das Konzept von „**Rebound-Prebound**“ ein (Abbildung 5, oben), das in zahlreichen Studien übernommen wird [6, 10, 53]. Rebound-Effekte treten auf, wenn das volle Einsparpotential – das aufgrund von Effizienzmassnahmen möglich wäre – nicht ausgenutzt wird, da sich Verhaltensweisen ändern (z.B. Energiemehrverbrauch durch längere Betriebszeiten energiesparender Geräten). Prebound bezeichnet systematische Berechnungsunsicherheiten aufgrund von Annahmen oder Randbedingungen. Cali et al. [6] verfeinern die Definitionen von Sunikka-Blank und Galvin und teilen Rebound und Prebound Gaps in mehrere Teilaspekte auf (siehe Abbildung 5, unten).

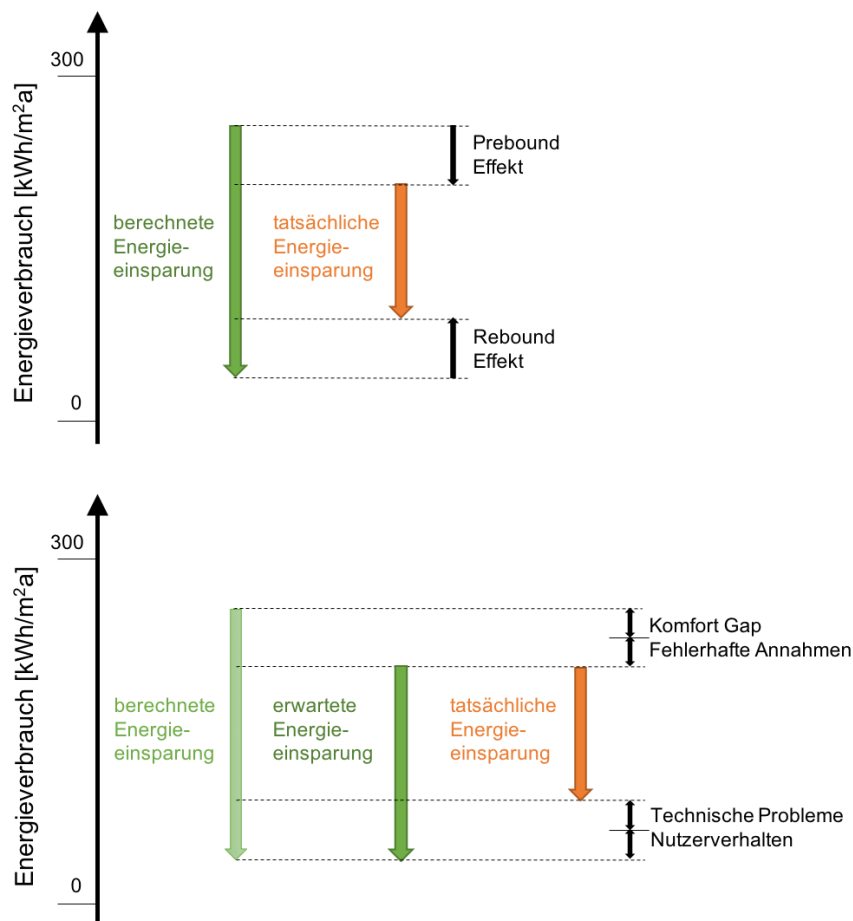


Abbildung 5: Illustration der Prebound und Rebound-Effekte im Hinblick auf den Energieverbrauch von Gebäuden. Oben: Vereinfacht nach [41]. Unten: Vereinfacht nach [6].

- Eine weitere Form von Rebound-Effekten wird von Klinke et al. [56] besprochen. Dabei liegt der Blickwinkel nicht auf dem Energieverbrauch oder auf technischen Aspekten sondern auf dem Investitionsverhalten. Ein „**Energy Efficiency Gap**“ entsteht, wenn Investitionen getätigt werden, die nicht das gesamte, technisch mögliche energetische Einsparpotential ausschöpfen. Abbildung 6 zeigt das Konzept des Energy Efficiency Gap mit Rebound-Effekt sowie dessen sozioökonomische und politische Ursachen.

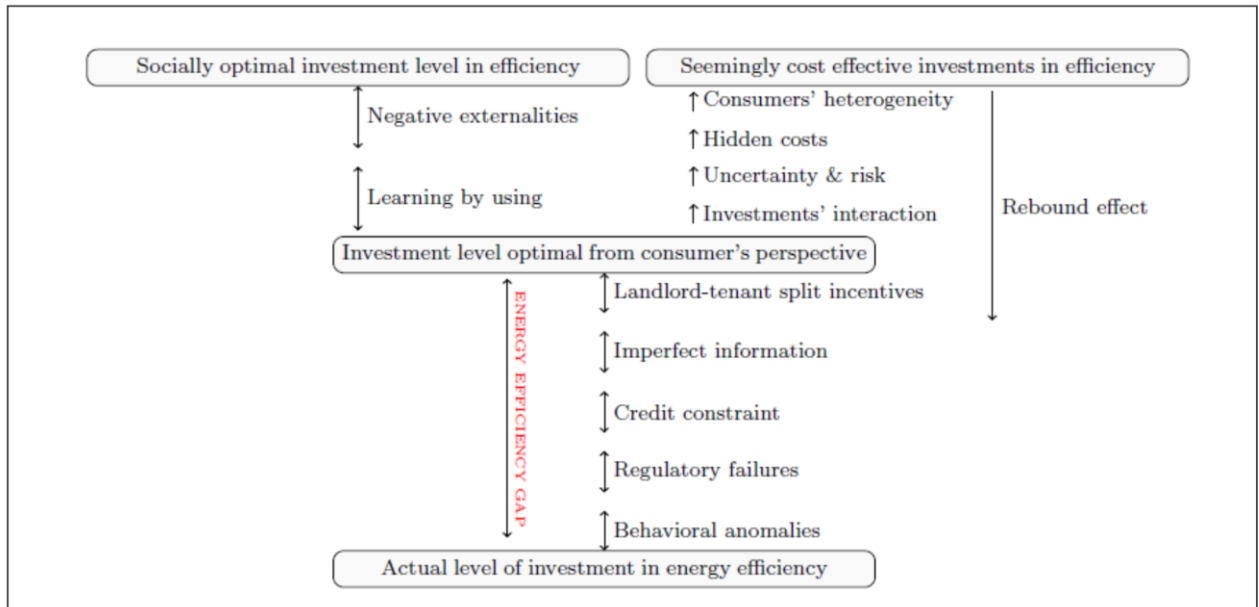


Abbildung 6: Definition und Ursachen für „Energy Efficiency Gaps“ (aus Klinke et al. [56], basierend auf Konzepten von Gillingham und Palmer [155])

- Energy Efficiency Gaps werden auch im Rahmen des SCCER CREST⁹ Projekts bearbeitet. Blasch et al. untersuchen in [116] den Einfluss von energierelevanten Bestellerkompetenzen, Bildungsprogrammen und Online-Supporttools auf die Anschaffung energieeffizienter Geräte.
- Der Einfluss von politischen und marktwirtschaftlichen Massnahmen zur Reduktion von subjektiv empfundenen Risiken bei der Investition in energieeffiziente Technologien wird von Giraudet et al. [105] untersucht und ökonomisch bewertet. Subjektive Risikoeinschätzungen können zu reduzierten Investitionen führen, wodurch die möglichen Energieeffizienzpotentiale nicht vollständig genutzt werden können.
- In der Schweiz thematisieren Hubbuch et al. [107] ebenfalls einen Energy Efficiency Gap, der sich jedoch auf energetische Aspekte bezieht und damit von den Definitionen und ökonomischen Blickwinkeln in [56, 105, 116] abweicht.

⁹ SCCER Competence Center for Research in Energy, Society and Transition. <https://www.sccer-crest.ch>
32/129



- Eine Analyse aktueller schweizerischer Studien zum Energy Performance Gap zeigt, dass verschiedene Gap-Definitionen zur Anwendung kommen (Tabelle 8). Während der Prozess der Datenerhebung in den Studien ähnlich ist, unterscheiden sich die Gap-Definitionen und Methoden deutlich (vgl. auch Tabelle 4 zu den verschiedenen Bilanzgrenzen).

Studie	Gap-Definition	Methode	Prozess
Erfolgskontrolle Gebäudeenergie-standards [9]	Minergie: Grenzwert pro Nutzungskategorie	Betrachtung des Medians aller Gebäude	Messperiode min. 2 Jahre; individuelle Erhebung + Begehung
Energy Performance Gap in Building Retrofit [10]	MuKE: Grenzwert projektspezifisch	keine Angabe in Quelle [10]	keine Angabe in Quelle [10]
2000-Watt-Areale im Betrieb [46]	2000-Watt-Gesellschaft: Zielwert pro Nutzungskategorie	Betrachtung der Summe aller Gebäude	Messperiode min. 1 Jahr; individuelle Erhebung + Begehung

Tabelle 8: Vergleich der angewandten Gap-Definitionen, Methoden und Prozesse in drei schweizerischen Studien

4.4 Gap-Dimensionen

4.4.1 Übersicht

Dieser Abschnitt behandelt die Literaturquellen in Hinblick auf die in Tabelle 1 (Seite 17) aufgestellten Dimensionen von Performance Gaps.

4.4.1.1 Fokus

Wir fanden insgesamt 20 Studien, die sich methodischen Aspekten von Performance Gaps in Gebäuden widmeten. Hier werden die aus Schweizer Sicht wichtigsten kurz vorgestellt.

Nachhaltigkeitsbewertungen

Schakib-Ekbatan [73] geht auf den Zusammenhang von Nutzerkomfort und Nachhaltigkeitsbewertungssystemen ein. Sie stellt dabei verschiedene Performance-Fokusse gegenüber und erstellt ein Stakeholder-Modell. Abbildung 7 zeigt das Stakeholder-Modell zur Einbindung von Nutzerzufriedenheitsanalysen aus [73]. Die im Bericht diskutierten Performance Gaps wurden von uns den Stakeholdern zugeordnet.

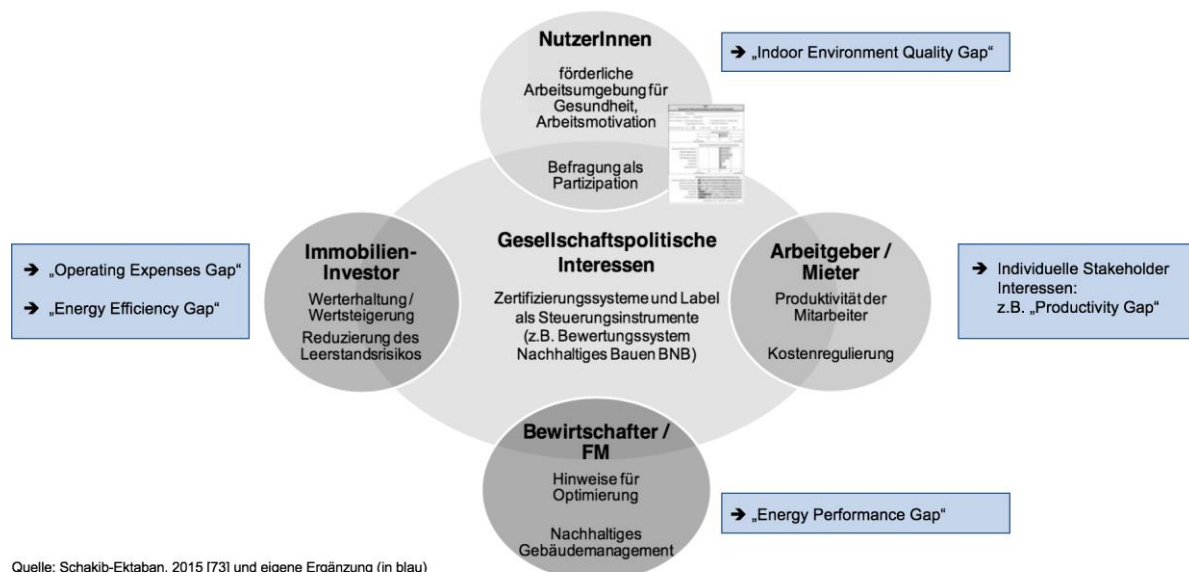


Abbildung 7: Stakeholder-Modell und verschiedene Performance Gap-Fokusse

Eine zusammenhängende Betrachtung und Bewertung von Einzelaspekten wie Energie, Behaglichkeit und ökologischen Aspekten findet in Nachhaltigkeitslabels (z.B. DGNB, SGNI, LEED...) statt. Diese Labels werden nach der Planungs- bzw. Bauphase vergeben. Überprüfungen der Zielerreichung im Betrieb werden in den einzelnen Regelwerken verschieden gehandhabt und nicht bei allen Labels gefordert.

Das DGNB-Nachhaltigkeitslabel wird auch in der Schweiz angewendet [92]. In 5 Kategorien werden Nachhaltigkeitskriterien mit Punkten bewertet. Der Anteil der berücksichtigten technischen Aspekte beträgt 22.5% an der gesamt möglichen Punktzahl. Dabei entfallen 4.3% auf den thermischen Komfort und 4.1% auf die wärme- und feuchtetechnische Qualität der Gebäudehülle.

Im Vergleich dazu betragen die höchst bewerteten Kriterien sind Lebenszykluskosten und Flexibilität/Umnutzung je 9.6% der Punkte. Hier sei angemerkt, dass die gewünschte Flexibilität durchaus im

Zielkonflikt mit Energiethemen stehen kann (Stichwort: Überdimensionierung, Dilemma Grundausbau/Mieterausbau).

Das in der Schweiz entwickelte SNBS Bewertungssystem [93] verwendet ein Notensystem, bei dem Noten für 45 Nachhaltigkeitskriterien vergeben werden. Bezüglich Energieverbrauch wird das Kriterium „Primärenergie nicht erneuerbar“ verwendet (1 von 16 Kriterien zu „Umwelt“).

Im Vergleich zu den insgesamt drei Energiekriterien (Verbrauch, Erstellung, Mobilität in Anlehnung an SIA-Effizienzpfad Energie [33]), kommen für die Bewertung von „Wohlbefinden und Gesundheit“ (d.h. Indoor Environmental Quality) sechs Kriterien zum Einsatz. Behaglichkeitskriterien für den Sommer und den Winter werden dabei unabhängig voneinander betrachtet.

Mehrdimensionale Betrachtungen

Bei der Diskussion um Energy Performance Gaps darf der Kontext nicht verloren gehen. Sowohl im privaten als auch im öffentlichen Bereich kommt es in der Regel zu Zielkonflikten, die es anzugehen gilt.

Ein Beispiel für die Analyse und Darstellung von mehreren Dimensionen in der Gebäudebewertung geben Kalz et al. [44], Abbildung 8. Sie stellen in einem Spinnendiagramm die Plan- und Zielwerte von thermischem Komfort, den spezifischen Heizenergiebezug $[\text{kWh}_{\text{therm}}/(\text{m}^2\text{a})]$, die Energieeffizienz der Wärmebereitstellung (JAZ, $[\text{kWh}_{\text{therm}}/\text{kWh}_{\text{el}}]$) und den Endenergiebezug des gesamten Gebäudes für Heizen, Kühlen und Lüften gegenüber. Ergänzend kennzeichnen die Pfeile an den Achsen das anzustrebende Optimum.

Die Erhebung und Analyse von Gaps mit dem Fokus auf Einzelaspekte ist entscheidend, um diese bewerten zu können. Eine Einordnung und Beurteilung in einem grösseren Kontext (z.B. Nachhaltigkeit Gesamtgebäude; volkswirtschaftliche Bedeutung von Effizienzmassnahmen) darf nicht vergessen werden. Dies ist besonders bei eventuellen behördlichen Sanktionierungen von Einzelaspekten zu berücksichtigen.

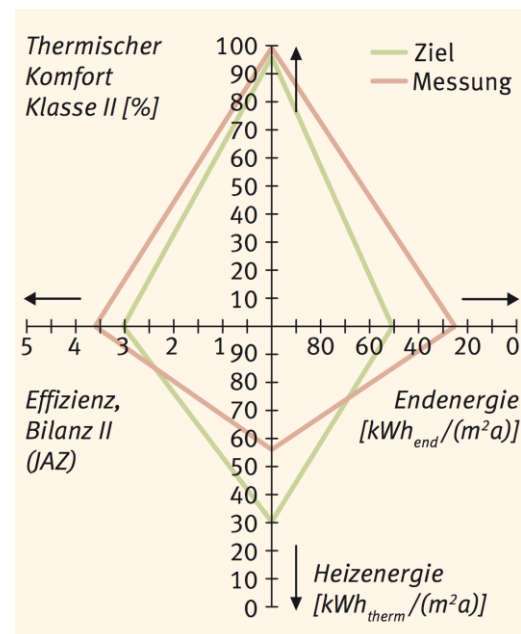


Abbildung 8: Gebäudesignatur für den Winterfall unter Betrachtung verschiedener Dimensionen; Vergleich von Planwerten (rot) und Zielwerten (grün).

Quelle: Kalz et al. 2016, © BINE

Weitere wichtige methodische Grundlagen werden im „PeBBu“-Projekt¹⁰ [16] und bei Bluysen [3] diskutiert. Sie zeigen die Komplexität von Performance-Anforderungen aus Stakeholder-Sicht auf. Da die Performance-Anforderungen je nach Stakeholder sehr unterschiedlich ausfallen, wird empfohlen, diese in einzelne, separat nachvollziehbare Teilziele mit differenzierter Zuständigkeit aufzuschlüsseln.

¹⁰ PeBBu: Performance Based Building Thematic Network: <http://cic.vtt.fi/projects/pebbu/index2.html>



Ökonomische Aspekte

Den Fokus auf ökonomische Betrachtungen zur Energieeffizienz legt die aktuelle BFE-Studie „Contracting the Gap“ von Klinke et al. [56]. Es werden die Marktentwicklung und die Rolle des Energieeinspar-Contractings für die Erhöhung der Energieeffizienz und die Reduktion des sogenannten „Energy Efficiency Gaps“ in der Schweiz untersucht (vgl. Abschnitt 4.3). Als Ergebnis werden regulatorische und politische Massnahmen genannt zur Förderung des Energieeinspar-Contractings.

Fokus beim Berichten von Evidenzen

Die gefundenen Studien zur Evidenz von Performance Gaps in Gebäuden konzentrieren sich hauptsächlich auf die Energie (43 von 54 gefundenen Arbeiten). Vier Studien belegen Evidenzen für Indoor Environmental Quality Performance Gaps. Weitere sieben Studien betrachten Performance Gaps aus mehreren Blickwinkeln (Energie und Behaglichkeit).

Neben der oben besprochenen Studie von Kalz et al. [44] sind die folgenden mehrdimensionalen Betrachtungen hervorzuheben:

- Methodische Grundlagen zur Bewertung von Energie, Innenraumklima und Komfort im Sinne einer Performance Betrachtung werden bei Guerra-Santin et al. [75] diskutiert. Es wird ein „Categorization Framework“ entworfen, das Indikatoren für verschiedene Bilanzgrössen in unterschiedlichen Detailtiefen definiert. Mit ansteigendem Detaillierungsgrad werden „indikative“, „diagnostische“ und „investigative“ Untersuchungen unterschieden.
- Lawrence et al. [74] berichten über eine Fallstudie, in der Nutzerbefragungen und Energieverbrauch korreliert werden. Als wichtige Kenngrösse für die kombinierte Betrachtung von Energie und Komfort wird der Energieverbrauch pro Person vorgeschlagen.
- Fallstudien zu verschiedenen Teilaspekten der Gebäudeperformance werden bei Voss et al. [15] zusammengetragen. Zu den betrachteten Teilaspekten zählen u.a. die ökonomische Performance, die Energie- und Umweltperformance sowie die Performance der Gebäudehülle und der technischen Anlagen.
- Analysen zur Nutzerzufriedenheit finden sich bei Wagner et al. [17]. Im Besonderen wird auf die Beurteilung von Komfortaspekten im Kontext der Gesamtbetrachtung von Gebäuden, v.a. Nachhaltigkeitsbetrachtungen, eingegangen.

Zwei Arten von Studien konnten in der vorliegenden Arbeit nur am Rande recherchiert und analysiert werden:

- Studien ausschliesslich zur Nutzerzufriedenheit (z.B. Post-Occupancy Evaluationen). Hier sei auf [17] (siehe oben) und auf Janser et al. [109] hingewiesen. Janser et al. geben u.a. Empfehlungen für aussagekräftige Messungen und die Einbindung der Nutzer in die Messstudien.
- Wirtschaftlichkeitsanalysen von Gebäuden und Gebäudeportfolios. Hier sei exemplarisch auf eine aktuelle, prägnante und beispielhaft transparent dokumentierte Anwendung von Monte-Carlo Simulationen zwecks Evaluation der Wirtschaftlichkeit energieoptimierter Gebäude [67] hingewiesen.

4.4.1.2 Art des Vergleichs

In Studien, die sich auf methodische Aspekte von Energy Performance Gaps beziehen, werden verschiedene Arten des Vergleichs von Ziel- und Messgrössen diskutiert, wobei zwischen den Studien kein Konsens in der Definition von Vergleichen feststellbar ist.

De Wilde [14] unterscheidet vier Arten von Vergleichen in Abhängigkeit der eingesetzten Berechnungsmethoden:

- Vergleich zwischen physikalischen Modellen und Messungen
- Vergleich zwischen Black-Box Modellen¹¹ und Messungen
- Vergleich zwischen verschiedenen normativen Modellen zur Regulierung (UK spezifische Compliance und Energiezertifikate)
- Vergleich zwischen normativen Modellen und Messungen

Van Dronkelaar et al. [5] unterscheiden zwischen verschiedenen Gap-Definitionen, die vom Zeitpunkt der Modellerstellung bzw. Durchführung der Messung abhängen (zeitliche Abhängigkeit).

Borgstein et al. [4] zeigen auf, wie Bezugsgrössen (Baseline) definiert und festgelegt werden können. Für die Energy Performance werden die folgenden Bezugsgrössen unterschieden:

- Historische Messwerte
- Durchschnittliche Verbräuche in Vergleichsgebäuden
- Simulierter Energieverbrauch aus gebäudespezifischen Modellrechnungen während der Planung
- Geschätzter Energieverbrauch nach durchgeführter Betriebsoptimierung
- Standardisierte Ziel- oder Grenzwerte (Compliance)

In den Studien mit Evidenzen zu Energy Performance Gaps werden verschiedene Arten des Vergleichs der Ziel- und Bilanzgrössen angewandt. Eine explizite Abstimmung der Methoden bei der Bewertung von Einzelgebäuden versus Gebäudeparks, wie von uns vorgeschlagen (vgl. Abschnitt 3.2), wird dabei nicht gemacht.

4.4.1.3 Weitere Dimensionen

In Tabelle 9 werden die in unserer Literaturstudie gefundenen Ausprägungen der in Abschnitt 3.2 besprochenen Performance Gap-Dimensionen zusammengefasst. Die Tabelle berücksichtigt 17 ausgewählte Studien zu Energy Performance Gaps, geordnet nach der Stichprobengrösse, sowie die folgenden Dimensionen:

- **Aggregationsebene:** Vereinfacht berücksichtigt über die Grösse der verwendeten Stichprobe (Anzahl Gebäude)
- **Systemgrenze:** Nutz-, End-, Primärenergie
- **Bezugsgrösse:** Planungsstandard (Richtlinie), Statistik aus Messung (Benchmark basierend auf empirisch erhobene Daten), oder Simulation (mit projektspezifischen Modellen)
- **Lebenszyklusphase:** Bestandsbauten, Neubau, Sanierung (Vergleich Vorher/Nachher)

Zusätzlich werden in Tabelle 9 die Nutzungsart und der Fokus der Studie dokumentiert.

Auffällig ist, dass eine sehr grosse Spannweite im Stichprobenumfang besteht, wobei keine grösseren Studien aus der Schweiz vorliegen. Die untersuchten Studien zeigen ein buntes Bild aus verschiedensten Kombinationen von Lebenszyklusphasen, Gebäudenutzungen und untersuchten Systemgrenzen. Als Bezugsgrösse dienen vor allem Planungsstandards. Nur zwei Studien erweitern die Betrachtungen über Energieaspekte hinaus.

¹¹ Definition siehe [https://de.m.wikipedia.org/wiki/Black_Box_\(Systemtheorie\)](https://de.m.wikipedia.org/wiki/Black_Box_(Systemtheorie))



Quelle	Kurzbeschreibung	Anzahl Gebäude	Fokus	Systemgrenze	Bezugsgrösse	Nutzung	Lebenszyklus-phase	Land	Jahr
[38]	Auswertung Energieausweise: Vergleich von theoretischem und tatsächlichem Gasverbrauch	> 200'000	Energie	Endenergie	Planungsstandard	Wohnen: EFH	Bestand	NL	2013
[39]	Endenergieverbrauch von Wohngebäuden: Vergleich mit Erhebungen aus Vorjahren	37'000	Energie	Endenergie	Messung	Wohnen: MFH	Bestand	D	2017
[41]	Vergleich berechneter Energiebedarf und gemessener Energieverbrauch	3'400	Energie	Nutzenergie	Planungsstandard	Wohnen	Bestand	D	2012
[12]	Vergleich berechneter Energiebedarf und gemessener Energieverbrauch für Passivhaus-Gebäude	2'100	Energie	Nutzenergie	Planungsstandard	Wohnen	Bestand	D	2016
[47]	Vergleich des Energieverbrauchs von LEED-zertifizierten Gebäuden mit nicht zertifizierten Gebäuden	953	Energie	End-, Primärenergie	Messung	Verwaltung	Bestand	USA	2013
[13]	Vergleich von Simulationsergebnissen und Messungen	>300	Energie	Endenergie	Simulation	Wohnen	Bestand	USA	2017
[9]	Vergleich gemessener Energiekennzahlen mit Minergiegrenzwerten bzw. SIA 380/1	214	Energie	Primärenergie	Planungsstandard	Verwaltung Wohnen	Neubau, Sanierung	CH	2016
[42]	Vergleich gemessener Energiekennzahlen mit SIA 2024 und SIA 380/1	160	Energie	Endenergie	Planungsstandard	Verwaltung	Bestand	CH	2010
[11]	Vergleich berechneter Energiebedarf und gemessener Energieverbrauch energieeffizienter Wohngebäude	121	Energie	End-, Primärenergie	Planungsstandard	Wohnen	Neubau, Sanierung	D	2016
[43]	Vergleich der gemessenen Energiekennzahlen von LEED-zertifizierten Gebäuden mit Planung und US-Durchschnitt	100	Energie	Endenergie	Planungsstandard	Verwaltung	Bestand	USA	2009
[39]	Vergleich berechneter Energiebedarf und gemessener Energieverbrauch	> 70	Energie	Endenergie	Planungsstandard	Wohnen: MFH	Bestand	D	2017
[61]	Vergleich berechneter Energiebedarf nach SIA 380/1 und gemessener Energieverbrauch	33	Energie	Nutzenergie	Planungsstandard	Wohnen	Bestand	CH	2017
[44]	Detaillierter Vergleich von Plan- und Ist-Werten für Heiz-, Endenergie, JAZ und Komfort für drei Gebäude	> 12	multi ¹²	Nutz-, Endenergie	Planungsstandard	Verwaltung	Neubau, Bestand	D	2016
[10]	Vergleich berechneter Energiebedarf und gemessener Energieverbrauch nach Sanierung	10	Energie	Nutzenergie	Planungsstandard	Wohnen: MFH	Sanierung	CH	2016
[36]	Vergleich berechneter Energiebedarf und gemessener Energieverbrauch für Neubauten	7	Energie	Nutzenergie	Planungsstandard	Wohnen	Neubau	CH	2015
[45]	Vergleich von Planungs-, Verbrauchs, und Zielwerten (SIA 2040)	5	multi ¹³	Primärenergie,	Planungsstandard	Wohnen: MFH	Neubau	CH	2014
[6]	Vergleich 3-baugleicher Gebäude vor/nach Sanierung	3	Energie	Nutz-,	Planungsstandard	Wohnen: MFH	Sanierung	D	2016

Tabelle 9: Dimensionen von Performance Gaps in 17 verschiedenen Studien, geordnet nach Anzahl Gebäude

¹² Mehrdimensionale Betrachtung: Heiz- und Endenergie, Jahresarbeitszahl Wärmepumpe, thermischer Komfort¹³ Mehrdimensionale Betrachtung: Erstellung, Betrieb, Mobilität

4.4.2 Fokus: Energy Performance Gap

Der am häufigsten besprochene und am intensivsten untersuchte Gap in Gebäuden ist der Energy Performance Gap, im Besonderen die Differenzen zwischen regulativen Vorgaben für die Planung und späteren Betriebsmessungen (Performance Gap „Planungsstandard“, vgl. Abschnitt 3.1).

Ein Grund für die zahlreichen Energy Performance Gap-Analysen liegt sicherlich im Vorliegen vergleichsweise umfangreicher Unterlagen. Dies sind einerseits Planungsdaten (in Form obligatorischer Nachweise) als auch Betriebsdaten, da der Energieverbrauch in den meisten Fällen für die Verbrauchsabrechnung in hinreichender Genauigkeit gemessen werden muss.

Ein anderer Grund für die zahlreichen Untersuchungen zum Energy Performance Gap liegt in dessen Bedeutung zur Erreichung von Zielen der Energiepolitik. Indirekt kann dieser Gap auch zum Indoor Environmental Quality Gap und dem Operating Expenses Gap beitragen. Des Weiteren ist der Energy Performance Gap unmittelbar mit monetären Kosten (sowohl laufende Energiekosten, als auch einmalige Investitionskosten) verbunden, wodurch das Interesse vieler Stakeholder gegeben ist.

Am Beispiel der Daten¹⁴ aus der Erfolgskontrolle Gebäudeenergiestandards [9] sind im Folgenden zwei verschiedene Dimensionen in der Betrachtung des Energieverbrauchs gegenübergestellt: die Energiekennzahl nach Minergie auf der X-Achse (Systemgrenze Primärenergie) und der gemessene Endenergieverbrauch (Systemgrenze Endenergie) auf der Y-Achse.

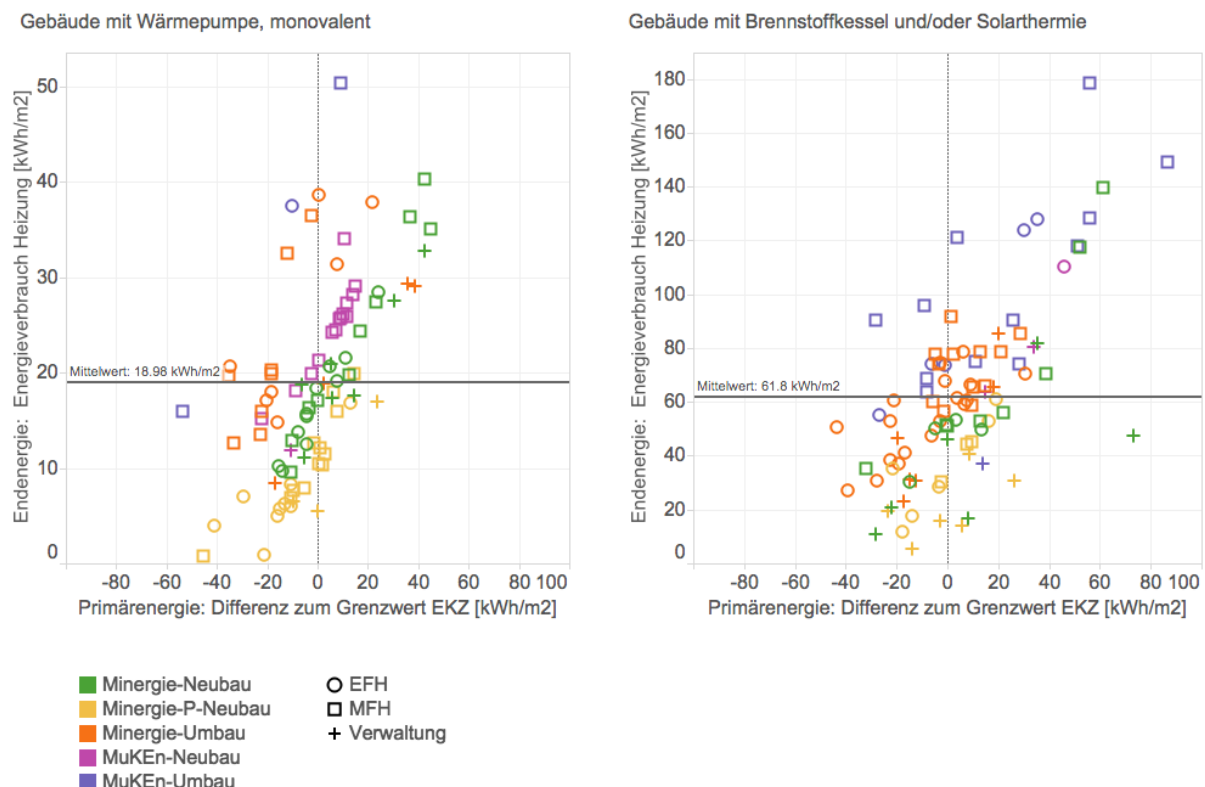


Abbildung 9: Gegenüberstellung der Energiekennzahlen (EKZ) wie in der Erfolgskontrolle Gebäudeenergiestandards untersucht (Systemgrenze Primärenergie, x-Achse) mit den gemessenen Endenergieverbräuchen für die Heizung (Systemgrenze Endenergie, y-Achse). Links: Endenergie Elektro für Gebäude mit Wärmepumpe; rechts: Endenergie Wärme für Gebäude mit Brennstoffversorgung und/oder Solarthermie; (Neuauswertung der Datengrundlage von [9]).

¹⁴ Der Original-Datensatz wurde uns freundlicherweise vom BFE zur Verfügung gestellt. Vgl. Abschnitt 4.5 und 5.

Wir unterscheiden in Abbildung 9 zwischen Gebäuden, die rein elektrisch versorgt werden (links) und Gebäuden, die mit Brennstoffen beheizt werden (rechts)¹⁵. Gebäude mit bivalenter Versorgung (Wärmepumpe + Brennstoffe) wurden in dieser Auswertung nicht berücksichtigt.

Aus Abbildung 9 kann man ersehen, dass die Energieverbräuche für die zwei unterschiedlichen Systemgrenzen keine besonders hohe Korrelation aufweisen. Gebäude, die den Grenzwert der Energiekennzahl (Primärenergie) einhalten – und damit in dieser Hinsicht als „gut“ bewertet werden –, können weit mehr Endenergie pro Quadratmeter verbrauchen als Gebäude, die diesen Grenzwert nicht erreichen.

Im IEA-Projekt Annex 53 [118] werden Einflussgrößen aufgelistet, die berichtet werden müssen, um verschiedene Performance-Betrachtungen bewerten, unterscheiden und ggf. vergleichen zu können (Abbildung 10). Für Wohn- und Verwaltungsgebäude werden jeder Einflussgrösse die entsprechenden Messgrößen zugewiesen und die zeitliche Auflösung definiert, in der diese zu erheben sind.

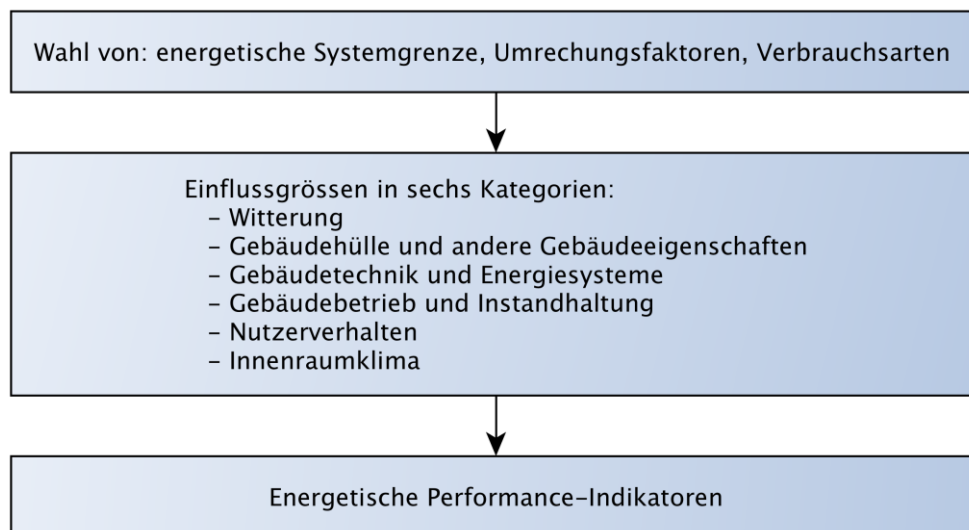


Abbildung 10: Grundlagen für die Definition von Performance-Indices nach IEA Annex 53 [118] (übersetzt)

Neben dem Energy Performance Gap gibt es weitere Gaps, die ebenfalls auf dem Energieverbrauch basieren. So berichten Thaler und Kellenberger [104] **Performance Gaps bezüglich der Treibhausgasemissionen** für die Zürcher 2000-Watt Überbauung Sihlbogen. Angegeben wird eine Überschreitung der Treibhausgasemissionen aus dem Betrieb im Vergleich zur Planung um 54% (Figure 1 in [104]; allerdings wurde, ebenfalls in einer Publikation aus dem Jahr 2017, für das gleiche Areal in [48] eine *Unterschreitung* des Zielwerts der Treibhausgasemissionen berichtet).

Hier ist anzumerken, dass die Grenzwerte für „2000-Watt-Gebäude“ auf fix vorgegebenen Belegungsdichten beruhen (SIA 2040 [33]). Anders als bei den meisten Energiestandards ist somit für die Bewertung von „2000-Watt“ Studien die *tatsächlich* vorliegende Belegungsdichte von entscheidender Bedeutung. Dieser alternative Fokus ist beim Vergleich mit anderen Performance Gap-Studien unbedingt zu berücksichtigen.

Die hier aufgeführten Beispiele sollen illustrieren, dass eine genügende (Energie-) Performance im Hinblick auf eine bestimmte Gap-Definition nicht zwingend eine genügende Performance im Hinblick auf alternative Gap-Definitionen impliziert; siehe auch Abbildung 2.

¹⁵ Diese Unterscheidung ist eine der Schlüsselempfehlungen des IEA-Projekts Annex 53 „Total energy use in buildings – Analysis and evaluation methods“ [118].



4.4.3 Fokus: Indoor Environmental Quality Gap

Die Qualität des Innenraumklimas hat bekanntlich grossen Einfluss auf das Wohlbefinden der Nutzer und die Produktivität der Mitarbeitenden. Verschiedenste Richtlinien, Initiativen und Vereine (z.B. eco-bau¹⁶) bieten Informationen und Planungsgrundlagen zu diesem Thema. Auch in der internationalen Literatur finden sich zahlreiche Studien, welche die Nutzerzufriedenheit, den Nutzerkomfort und die Behaglichkeit mittels sogenannter „Post Occupancy Evaluation“ (POE) Verfahren untersuchen.

Unsere Recherche zeigte jedoch, dass die Qualität des Innenraumklimas kaum im Sinne einer eigenständigen Performance Gap-Diskussion oder im Zusammenhang mit anderen Performance Gaps behandelt wird.

In einigen wenigen gefundenen Studien wurden Komfort und Energie kombiniert betrachtet. Erwähnt seien hier Plessner et al. [94] und Kalz et al. [44]. Im Rahmen eines Qualitätsmanagements werden im EU-Projekt QUANTUM Prozesse und Werkzeuge für die Überwachung von Energie- und Behaglichkeitsanforderungen erarbeitet und getestet [20].

Bei den kombinierten Betrachtungen von Energy Performance Gaps und des Innenraumklimas, stellten wir fest, dass die Nutzer abwechselnd als Akteure („Verursacher“) und als Betroffene in Erscheinung traten. Dies hängt damit zusammen, dass vor allem in Wohngebäuden die Nutzer durch ihr Verhalten und Eingriffe in die technischen Systeme den Energieverbrauch und somit auch eventuelle Energy Performance Gaps aktiv beeinflussen können. In Nicht-Wohngebäuden hingegen haben Nutzer häufig weniger Eingriffsmöglichkeiten, so dass sie sich verstärkt als Betroffene wahrnehmen.

4.4.4 Fokus: Operating Expenses Gap

Nebst der Energie und der Behaglichkeit können auch die finanziellen Aufwände für den Betrieb von den ursprünglich anvisierten Zielen abweichen. Für diese ökonomischen Zielabweichungen verwenden wir den Begriff Operating Expenses Gap (vgl. Abschnitt 3.2). Die betrachteten Aspekte der Betriebskosten liegen im Ermessen der Stakeholder und ihrer Ziele. Möller dokumentiert in [153] (ihre Tabelle 31) Beispiele für verschiedene Gruppen von Betriebskosten mit den zugehörigen Risiken bei der Kostenkalkulation.

Zu den Studien, die sich auf wirtschaftliche Aspekte des Gebäudebetriebs konzentrieren, gehören z.B. Klinke et al. [56], Alcott et al. [57] und Backlund et al. [58] (vgl. Abschnitt 4.3). Diese Arbeiten stammen aus dem volks- bzw. betriebswirtschaftlichen Umfeld und beschäftigen sich u.a. mit der Marktsituation des Energy Contractings.

In diesem Zusammenhang sei die Bedeutung der vorliegenden technischen Grundlagen für ökonomische Entscheidungen erwähnt: Im BFE-Projekt „Feldmessungen von U-Werten zur Überprüfung der im Gebäudeenergieausweis (GEAK) hinterlegten U-Werte (UFELD)“ [64] konnte eine Ursache für den Energy Performance Gap bei älteren Bestandsbauten ermittelt werden. Die im GEAK-Tool [32] verwendeten U-Werte sind gemäss BFE-Projekt 50 bis 60% höher als die gemessenen U-Werte. Bei unvollständiger Datenlage wird damit das Sanierungspotenzial bei Anwendung des GEAK-Tools systematisch überschätzt (vgl. Prebound-Effekt, Abschnitt 4.3). Die prognostizierten Einsparungen können trotz der getätigten Investitionen daher nicht erreicht werden.

In Fachkreisen werden verschiedentlich Diskussionen um die Zusammenhänge zwischen dem Energieverbrauch, den Energiekosten und dem Investitionsverhalten geführt. Fachübergreifende Analysen und Initiativen, welche die technischen und ökonomischen Performance-Aspekte miteinander verbinden, sind jedoch unseres Wissens in der Schweiz noch nicht verfügbar¹⁷.

¹⁶ eco-bau: Plattform öffentlicher Bauherrschaften von Bund, Kantonen und Städten mit Empfehlungen zum nachhaltigen Planen, Bauen und Bewirtschaften von Gebäuden und Anlagen; <https://www.eco-bau.ch/>.

¹⁷ Im Rahmen des SCCER-CREST werden an der Universität Genf aktuell Studien zum Thema „Techno-economic Model of Built Environment in CH“ durchgeführt; <https://www.sccer-crest.ch/>

4.5 Gaps in Gebäudeparks

In diesem Abschnitt untersuchen wir die summarische Performance grösserer Gebäudebestände.

In Abschnitt 4.5.1 erörtern wir einige theoretische Grundlagen zur Betrachtung von Gebäudeparks. Abschnitt 4.5.2 fasst Erkenntnisse aus empirischen Studien zusammen. Im letzten Abschnitt 4.5.3 gehen wir auf den Zusammenhang zwischen Performance Gap-Analysen und Energiebilanzierungsmodellen für Gebäudeparks ein.

4.5.1 Theoretische Grundlagen

Im Rahmen des Energiemanagements werden in der GEFMA-Richtlinie 124-1 [69] verschiedene Aggregationsstufen bei der Betrachtung von Gebäuden unterschieden. Sogenannte „**Makroanalysen**“ kommen bei der energetischen Analyse grösserer Gebäudebestände zum Einsatz. Die wichtigsten Elemente einer Makroanalyse nach GEFMA 124-1 sind die Ermittlung und der Vergleich von geeigneten statistischen Kennzahlen (Benchmarking nach VDI 3807 [66]).

Einzelne Gebäude, die aufgrund der Ergebnisse einer Makroanalyse hohe Einsparpotentiale vermuten lassen, sollen vertieft untersucht werden („**Mikroanalyse**“). Die Mikroanalyse kann u.a. Prozessanalysen für jeden Energieträger, Begehungen vor Ort, die Aufnahme von Ist-Werten und die betriebswirtschaftliche Bewertung von Einsparpotentialen beinhalten.

Im Rahmen des Energiemanagements nach GEFMA 124-1 sind Makro- und Mikroanalysen Teil eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses (vgl. Abschnitt 4.7.2).

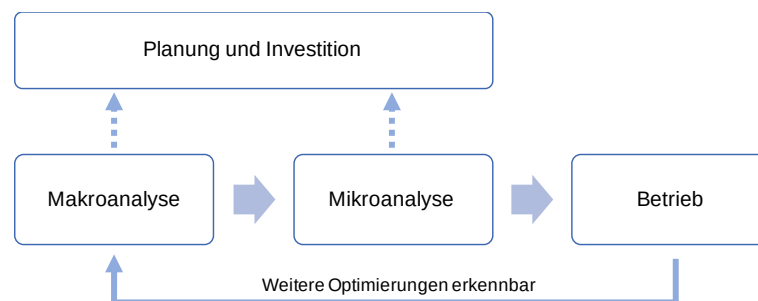


Abbildung 11: Makro- und Mikroanalysen als Teil des Energiemanagements (nach GEFMA 124-1: Ausschnitt aus Abbildung 6-1 in [69])

Das IEA-Projekt Annex 53 untersuchte Methoden zur Analyse und Beurteilung des Gesamtenergieverbrauchs von Gebäuden [118-120] (vgl. Abschnitt 4.4.2). Für drei verschiedene Aggregationsebenen wurden in diesem Projekt drei Stufen von Performance-Analysen mit abnehmender Detailtiefe unterschieden:

- „Energy Diagnosis“: Performance-Analyse von Einzelgebäuden
- „Energy Benchmarking“: Performance-Analyse von Gebäudeportfolios
- „Energy Planning“: Performance-Analyse von nationalen Gebäudeparks

In Anhang 5 des Schlussberichts des IEA-Projekts Annex 53 [119] wurden auch verschiedene statistische Methoden und Modelle analysiert und verglichen, sowie theoretische Grundlagen und Beispiele energetischer Performance-Analysen von Einzelgebäuden und Gebäudeparks dokumentiert.



4.5.2 Erfahrungen aus der Literatur

Die gefundenen Studien mit Evidenz zu Energy Performance Gaps in Gebäudeparks wurden in Abschnitt 4.1 und Tabelle 9 (Seite 38) vorgestellt.

Hier gehen wir vertieft auf einige dieser Studien ein und stellen kurz einige weitere relevante Arbeiten für Gebäudeparks vor. Die Auswahl erfolgte zwecks Vorstellung der stark unterschiedlichen Bewertungsmethoden und, im Fall von [9], auch aufgrund des direkten Bezugs zur Schweiz.

4.5.2.1 Analyse von Energieausweisen für die Niederlande

Die unseres Wissens umfangreichste und detaillierteste nationale Studie über die Differenzen zwischen in der Planung berechneten Energieausweisen und gemessenen Energieverbräuchen ist diejenige von Majcen et al. [38] für die Niederlande.

Die Studie dokumentiert ausführlich die Datenerhebung, Datenbereinigung und Auswahl der Stichprobe von rund 200'000 renovierten niederländischen Wohngebäuden. Ebenfalls werden die angewandten statistischen Methoden für die Einordnung und Bewertung der Gebäude in Kategorien (Effizienzklassen A bis G) besprochen. Dabei wird zwischen dem Gasverbrauch und dem Elektrizitätsverbrauch unterschieden.

In einer Reihe von Fachartikeln widmet sich das gleiche Autorenteam zudem der Analyse und Überprüfung des niederländischen Energiestandards für Wohngebäude [83, 85, 86, 87]. Mit Blick auf den energetischen Performance Gap werden in diesen Arbeiten der Einfluss des Nutzerverhaltens, der Gebäude- und Haushaltseigenschaften sowie der Berechnungsmethoden diskutiert. Darauf aufbauend werden Energieeinsparpotentiale im Gebäudepark und das Reduktionspotential durch Sanierungsmassnahmen bewertet.

Für Gebäude in den schlechteren Effizienzklassen lag gemäss [38] der gemessene Gasverbrauch deutlich tiefer, für Gebäude in den besten Effizienzklassen hingegen höher als im Rahmen der Planung berechnet worden war. Die gefundene Streubreite war in beiden Fällen gross [83]. Mittels einer Sensitivitätsanalyse wurde gezeigt, dass die mittlere Raumtemperatur, die Lüftungsraten und die U-Werte der Gebäudehülle einen grossen Einfluss auf den Energieverbrauch haben. Die Anzahl der Bewohner und die inneren Wärmelasten erwiesen sich als im Vergleich weniger wichtig.

Majcen et al. zogen betreffend den Wohnbau die folgenden Schlussfolgerungen für die niederländische Energiepolitik [87]:

- Die aktuell in den Niederlanden verwendete Berechnungsmethode kann im Vergleich mit dem gemessenen Verbrauch nicht als korrekt betrachtet werden.
- Die derzeit in den Modellen verwendeten Standardwerte für die Raumtemperatur, die Lüftungsraten, die Infiltrationsverluste und die inneren Wärmelasten sind in Frage gestellt.
- Das gleiche gilt für die derzeit in den Modellen verwendeten Standardwerte für die Effizienz von Heizungsanlagen. Möglicherweise wurden aus Unwissen und/oder fehlender umfangreicher messtechnischer Überprüfung besonders tiefe Nutzungsgrade für ineffiziente Systeme angesetzt.
- Entweder sollten die verwendeten Standardwerte korrigiert, oder der tatsächlich gemessene Energieverbrauch für Schätzmodelle des Energiebedarfs verwendet werden.
- Der Ersatz von alten Gaskesseln durch neue, effizientere Modelle zeigt die grössten Energieeinspareffekte. In zweiter Priorität sollte die Qualität der Fenster verbessert werden.
- Im Vergleich mit anderen Massnahmen ist der Ersatz von Lüftungsanlagen weniger effizient (wenn auch effizienter als theoretisch erwartet).



- Weitere Studien sollten die ökonomischen Aspekte von Sanierungsmassnahmen mit berücksichtigen.

Weiters weist das Autorenteam in [87] auf grundlegende Voraussetzungen für Untersuchungen von Gebäudeparks hin, um zuverlässige und belastbare Ergebnisse zu ermöglichen:

- Eine zuverlässige Ausgangsbasis („Baseline“) für den Energieverbrauch des Wohnbau-Portfolios würde eine realistische Zielsetzung zur Reduktion des Energieverbrauchs durch die Energiepolitik ermöglichen.
- Die Verfügbarkeit, hohe Qualität und Vertrauenswürdigkeit von Datensätzen zum Energieverbrauch ist von höchster Bedeutung. Entsprechende Datenbanken („energy performance registers“) sollten öffentlich zugänglich sein. Möglichkeiten zur Gewährleistung des Datenschutzes sind vorhanden.
- Bisher gibt es wenig Erfahrung aus der Analyse von sehr grossen Datenmengen zu Gebäuden. Verwendete Methoden und Erfahrungen im Umgang mit grossen Datensätzen sollten öffentlich zugänglich gemacht und diskutiert werden.

4.5.2.2 Langfristmonitoring des Heiz- und Warmwasserwärmebedarfs in Deutschland

Eine ebenfalls sehr umfangreiche Studie zur Entwicklung des Energieverbrauchs in Wohnbauten legt die Techem Energy Services GmbH aus Deutschland vor [39, 95] (Details siehe Anhang C).

Die Studie basiert auf regelmässig aktualisierten Daten und geht bis auf die Heizperiode 1998/99 zurück. Sie basiert auf Verbrauchsabrechnungen für die Heizung und das Warmwasser von über 115'000 Mehrfamilienhäusern in Deutschland.

Folgende Punkte fallen bei Betrachtung dieser Studie unter dem Blickwinkel der Performance von Gebäudeparks auf:

- Die Auswahl der Gebäude sowie die Berechnungsgrundlagen und allfällige Annahmen sind nachvollziehbar dokumentiert.
- Die Daten wurden in regelmässigen Zeitabständen erhoben, vergleichbar ausgewertet und dokumentiert. Auf einem Zeitstrahl ist die langfristige Entwicklung des Verbrauchs nachvollziehbar dargestellt (vgl. Abschnitt 3.1: Performance Gap „Entwicklungspfad“).
- Die erhobenen Messdaten wurden in verschiedenen Detaillierungsstufen (z.B. nach Energieträger, Verbrauchergruppen, Verwaltungskreis) ausgewertet.
- Die Darstellung der Ergebnisse erfolgte sowohl tabellarisch als auch grafisch (Balken-, Häufigkeitsdiagramme, Deutschlandkarte).
- Die Auswertung der Messdaten wurde durch Benutzerbefragungen ergänzt.
- Die Erhebung, Analyse, Dokumentation und Bewertung der Messdaten erfolgte aus einer Hand. Eine Überprüfung durch unabhängige Dritte ist nach unserem Wissensstand allerdings nicht erfolgt.

4.5.2.3 Vergleich von berechneten und gemessenen Energieverbräuchen in Deutschland

Im Gebäudereport 2015 der deutschen Energie-Agentur (dena) [55] wird die Entwicklung des deutschen Gebäudeparks hinsichtlich Energiepolitik, Energieverbrauch, Volkswirtschaft, Nutzung und Baubestand betrachtet.

Der Bericht basiert auf verschiedenen öffentlichen Statistiken aus Deutschland und der EU sowie auf Daten der dena-Energieausweisdatenbank, die über 50'000 Energieausweise enthält.



Obwohl die dena-Studie den Energieverbrauch nicht im Hinblick auf Performance Gaps in Gebäudeparks auswertet, enthält sie zwei in unserem Zusammenhang erwähnenswerte Resultate:

- Bei den *berechneten* Ausweisen („Energiebedarfsausweis“) entfallen 2% aller Gebäude auf die beste Effizienzklasse A und 25% auf die schlechteste Effizienzklasse H. Wird hingegen die Häufigkeitsverteilung gemessener Energieverbräuche („Energieverbrauchsausweis“) verwendet, entfallen weiterhin 2% aller Gebäude auf die Effizienzklasse A, aber nur noch 7% auf die Effizienzklasse H. Die Ursache wird darin vermutet dass die Gebäude der Effizienzklasse H in Realität häufig nur teilbeheizt werden, während in den Berechnungsmodellen von einer konstanten Gebäudetemperatur von 20°C ausgegangen wird.
- Die Differenz zwischen den berechneten Energiebedarfskennwerten und den gemessenen Energieverbrauchskennwerten von Wohngebäuden liegt bei Gebäuden, die vor 1949 errichtet wurden bei ca. 30% und nimmt dann für jüngere Gebäude kontinuierlich ab (siehe auch Abschnitt 4.3 zu Prebound-Effekten).

4.5.2.4 Studien zu Gebäudeparks in den USA

Scofield untersuchte in [47] den Energieverbrauch, die Treibhausgasemissionen und die Energieeffizienz von 953 New Yorker Bürogebäuden, darunter 21 LEED zertifizierten Gebäuden. Neben Durchschnittswerten wurden auch die Häufigkeitsverteilungen des Energieverbrauchs und der Gebäudeflächen gegenübergestellt. Die Studie konnte keine signifikanten Unterschiede zwischen den regulären Bürogebäuden und den LEED zertifizierten Gebäuden feststellen.

In [49] diskutierte Scofield verschiedene in den USA übliche Methoden zum Vergleich des Energieverbrauchs von Gebäuden. Die Arbeit präsentiert statistische Auswertungen von grösseren Gebäudeparks und illustriert und diskutiert die Auswirkungen von Ausreissern auf ein Portfolio, wobei nicht nur der Energieverbrauch sondern auch die Gebäudegrösse berücksichtigt werden. Ebenfalls werden die Vor- und Nachteile der Bewertung nach End- und Primärenergie diskutiert.

4.5.2.5 Erfolgskontrolle von Gebäudeenergiestandards in der Schweiz

Wie anspruchsvoll und aufwändig die Datenerhebung, Datenbereinigung und Plausibilisierung für die Analyse von Gebäudeportfolios sein kann, zeigte die BFE-Erfolgskontrolle der Gebäudeenergiestandards [9] (vgl. auch Abschnitte 4.1 und 4.4.2).

In dieser Studie wurde erheblicher Aufwand darin investiert, eine möglichst grosse und repräsentative Zufallsstichprobe zu erhalten. Letztlich konnten Messdaten für 214 Gebäude erhoben werden, die mit Vor-Ort-Begehungen und Nutzerbefragungen sorgfältig ergänzt wurden.

Das Resultat der Vergleiche der gemessenen Energiekennzahlen mit den jeweiligen Grenzwerten wurde in einer zentralen Abbildung zusammengefasst, welche die erhaltenen Medianwerte wie auch die zugehörigen Streubreiten übersichtlich dokumentiert (Abbildung 12).

Auf Grund der vergleichsweise kleinen Anzahl Objekte, für die schlussendlich Energieverbrauchskennzahlen vorlagen, sind diese Ergebnisse kaum als repräsentativ für die gesamte Schweiz zu achten.

Zudem musste die Studie mit einer sehr heterogenen Datenbasis arbeiten, was beispielsweise die Vergleichbarkeit zwischen den Gebäuden, die den Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKE [30]) folgen und denen, die nach den Minergie-Standards gebaut wurden, einschränkt. Der Grund ist, dass die MuKE-Grenzwerte gebäude-individuell auf Ebene Nutzenergie sind (weswegen in den verwendeten Grenzwerten ein zeitlich und über alle Gebäude hinweg konstanter Nutzungsgrad von 85% einbezogen wurde), während dies bei den Minergie-Gebäuden nicht der Fall ist.

Die Studie [9] beinhaltetete auch eine detaillierte Ausreisseranalyse und Ursachenforschung zu den gefundenen Abweichungen. Für eine Stichprobe von 82 Einfamilienhäusern wurde mittels multivariater Regressionsanalyse ermittelt, dass bei Neubauten, und/oder beim Vorhandensein einer Gasheizung

und/oder der Möglichkeit zum Lüften mit Kippfenstern die jeweiligen Grenzwerte tendenziell eher überschritten wurden. Das Einhalten oder Unterschreiten des jeweiligen Grenzwerts hingegen korrelierte mit dem Vorhandensein einer thermischen Solaranlage, und/oder einer Photovoltaik-Anlage (die oftmals indikativ ist für eine erhöhte Sensibilisierung der Nutzer/Eigentümer für energetische Themen), und/oder einer Wärmepumpe als Hauptwärmelieferant.

Alle Gebäude (n = 214)

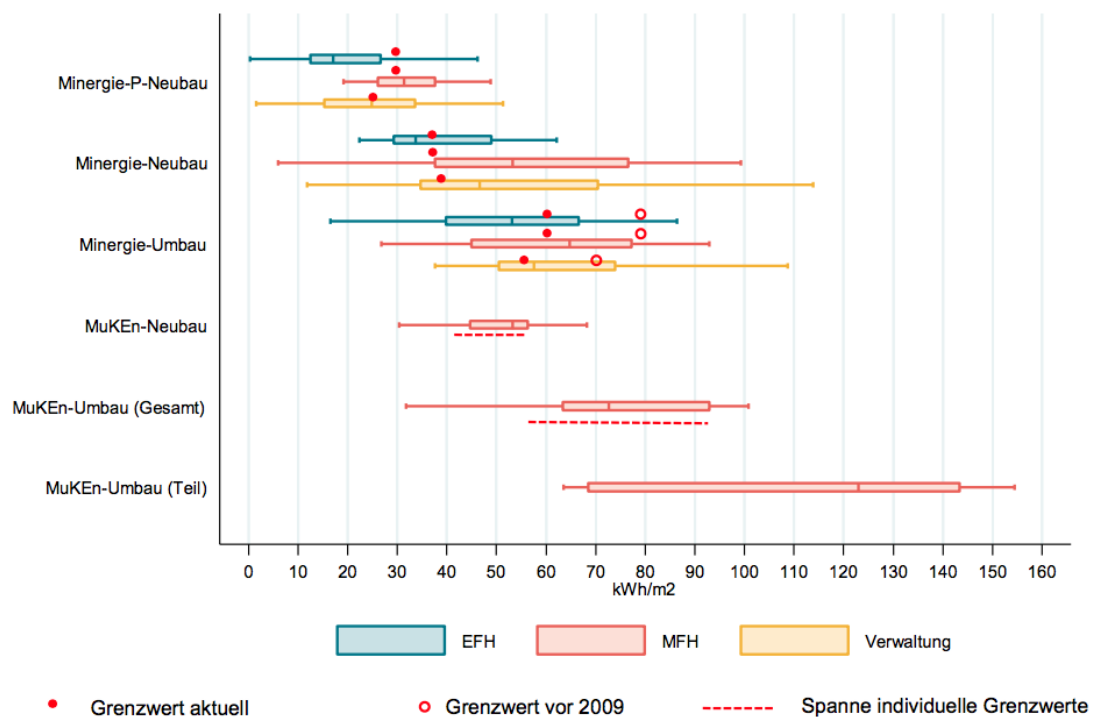


Abbildung 12: Abbildung 1 aus [9]: Gewichtete EKZ¹⁸ [kWh/m²]. Die Boxen werden nur dargestellt, wenn mindestens fünf Gebäude in der jeweiligen Untergruppe vorhanden sind. Die vertikale Linie im Inneren einer Box markiert den Median. Die Boxen erstrecken sich vom 25. bis zum 75. Perzentil. Die Linien ausserhalb der Boxen zeigen die Lage weiterer Datenpunkte, bis zu einer maximalen Länge, die durch das 1.5-fache des Interquartilsabstands ($Q0.75 - Q0.25$) gegeben ist. Ausreisser werden nicht dargestellt.

Der Originaldatensatz von [9] wurde uns dankenswerter Weise vom BFE für eine Re-Analyse zur Verfügung gestellt. Wir verwendeten ihn um unseren Vorschlag zu illustrieren, wie Performance Gap Analysen für Gebäudeparks kompakt und aussagekräftig dokumentiert werden können (Abschnitt 5.1.3).

4.5.3 Energiebilanzierungsmodelle

4.5.3.1 Überblick

Energiebilanzierungsmodelle dienen dazu, den Energiebedarf und -verbrauch von Einzelgebäuden oder ganzen Gebäudeparks zu berechnen. Hier geben wir einen Überblick über die gängigsten Modelle und berichten ihre bisherige Verwendung im Zusammenhang mit energetischen Performance Gap-Analysen.

¹⁸ EKZ: Energiekennzahl

Eine umfangreiche Review zu verschiedenen Modellierungsansätzen für den Energieverbrauch von Gebäudeparks findet sich bei Lim und Zhai [121]. Die Autoren unterscheiden *Top-Down* und *Bottom-Up* Modelle.

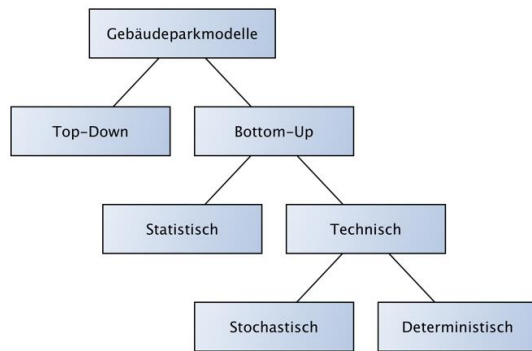


Abbildung 13: Methoden zur Modellierung des Energieverbrauchs von Gebäudeparks (übersetzt nach [121])

Mit Hilfe von Top-Down Modellen kann der aggregierte Gesamtenergieverbrauch auf einzelne Verbrauchergruppen des Gebäudeportfolios aufgeteilt werden. Die Gruppenbildung kann u.a. vom Nutzungstyp, Gebäudealter und der räumlichen Anordnung abhängig sein. Top-Down Modelle basieren meist auf vergangenen statistischen Erhebungen und kommen bei makroökonomischen Fragestellungen zum Einsatz.

Bei Bottom-Up Modellen wird der Gesamtenergieverbrauch ausgehend von einzelnen Gebäuden aggregiert. Bottom-Up Modelle können in statistische, deterministische und stochastische Modelle unterteilt werden.

Statistische Bottom-Up Modelle sind vielfach Regressionsmodelle, die beispielsweise auf Analysen von Verbrauchsabrechnungen und Befragungen basieren.

Physikalische Modelle, d.h. die meisten gängigen Gebäude- und Anlagensimulationsmodelle, gehören zur Gruppe der deterministischen Bottom-Up Modelle. Die Analyse von Gebäudeparks mittels deterministischer Modelle erfolgt meist über die Hochrechnung und Gewichtung repräsentativer Einzelgebäude [121]. Deterministische Modelle ermöglichen es auch, Fragestellungen für die keine ausreichende statistische Datenbasis zur Verfügung steht (z.B. neue Technologien) zu untersuchen.

Eine Schwäche dieser Modelle ist der grosse Bedarf an detaillierten technischen und nutzungsspezifischen Eingabedaten. Unsicherheiten in Parametern und sonstigen Eingangsdaten können jedoch mit dem Einsatz stochastischer Simulation adressiert und abgeschätzt werden (vgl. Monte-Carlo-Simulation in Abschnitt 4.6.2).

Lim und Zhai beobachten ein verstärktes Interesse an der thermisch-energetischen Simulation von Gebäudeparks. Unsicherheitsanalysen mit Hilfe stochastischer Simulation kommen jedoch erst in wenigen Gebäudeparkstudien zum Einsatz. Zu den Hauptgründen zählen Lim und Zhai den hohen Rechenaufwand, die oft mangelhafte Datengrundlage und eine fehlende Transparenz in der Dokumentation der Modellkalibrierung.

Ein zunehmendes Interesse an der Modellierung grösserer Gebäudebestände nehmen auch Reinhart und Davila wahr. Sie führen in [134] in das Thema der städtischen Energiebilanzierung für Gebäude ein und geben einen Überblick über den Stand der Arbeiten per 2016.

Statistisch fundierte, thermisch-energetische Analysen von Gebäudeparks sind der Schwerpunkt verschiedener aktueller Forschungsprojekte. Tabelle 10 zeigt die von uns gefundenen, seit 2016 dokumentierten Initiativen für die Modellierung und Simulation von Gebäudeparks (vergleiche auch Lim und Zhai [121]).

Eine ausführliche Analyse der Forschungsschwerpunkte und Resultate der hier genannten Projekte würde den Rahmen der vorliegenden Arbeit sprengen. Auffällig ist jedoch, dass die meisten neu entwickelten Simulationsumgebungen für die weitere Forschung und Anwendung durch Dritte als quelloffene Software zur Verfügung stehen.



Projekt	Kurzbeschreibung	Land	Verfügbarkeit	Status
CityBES	City Building Energy Saver (CityBES) ist eine web-basierte Plattform zur thermisch-energetischen Modellierung und Analyse von städtischen Gebäudebeständen basierend auf CityGML, 3D Städtmodellen und EnergyPlus https://citybes.lbl.gov	USA	Web-Service (frei verfügbar, mit Login)	Web-Service in Betrieb
TEASER	Quelloffene Software für die thermisch-energetische Simulation von grossen Gebäudebeständen auf Basis von statistisch ermittelten, archetypischen Gebäuden (Modelica-Bibliothek) http://www.ebc.eonerc.rwth-aachen.de/cms/E-ON-ERC-EBC/Das-Institut/Aktuelle-Meldungen-Center/~gips/Modelica-Bibliothek-AixLib-veroeffentlic/	D	Sourcecode auf Github verfügbar	Beta-Version verfügbar
HUES	Holistic Urban Energy Simulation (HUES) Plattform: Modelle, Datengrundlagen und Werkzeuge für die Simulation und Optimierung von dezentralen Energiesystemen und Energy Hubs https://hues-platform.github.io	CH / CAN	Sourcecode auf Github verfügbar	Beta-Version verfügbar
ResStock	Quelloffene Plattform zur Simulation nationaler Gebäudeparks basierend auf OpenStudio und EnergyPlus, Anwendungsbeispiel: thermisch-energetische und ökonomische Simulation und statistische Analyse von US-Wohngebäuden (350'000 Gebäude in 216 Klimaregionen) https://resstock.nrel.gov	USA	Sourcecode auf Github verfügbar	Verfügbar

Tabelle 10: Auswahl verschiedener Initiativen für die Modellierung und Simulation von Gebäudeparks

EnergieSchweiz beauftragte 2016 eine Review der aktuell in der Schweiz verwendeten Energiebilanzierungsmethoden für Gebäudeparks (Moret et al. [122]). Die Studie berücksichtigte neben der Betriebsenergie auch die Mobilität und die Graue Energie. Tabelle 11 fasst die neun untersuchten Bilanzierungsmethoden (beziehungsweise -modelle) in Hinblick auf die Betriebsenergie zusammen.



Modell	Fokus	Ansatz	Methode	Verfügbarkeit	Bemerkung
Gebäudeparkmodell TEP	Wärme, Lüftung, Klima, Prozesse, Beleuchtung/Geräte, allg. Gebäudetechnik	Bottom-Up	Hochrechnung Energiekennzahlen, modellgestützte Bilanzierung	kommerziell (TEP Energy GmbH)	Analyse von Szenarien und Prognosen möglich
Wärmebedarfskataster Kanton Bern	Wärme	Bottom-Up	Hochrechnung Energiekennzahlen, modellgestützte Bilanzierung	frei verfügbar (Kt. BE, AUE)	mit Georeferenzierung, teilw. GEAK-Daten
Wärmebedarfskataster Kanton Luzern	Wärme, Beleuchtung/Geräte	Bottom-Up	Hochrechnung Energiekennzahlen	frei verfügbar (Kt. LU)	mit Georeferenzierung, nur Wohngebäude
EnergyGIS Kanton St. Gallen	Wärme	Bottom-Up	Hochrechnung Energiekennzahlen	frei verfügbar (Kt. SG), Detaillierungsgrad Einzelgebäude nur für Gemeinden verfügbar	mit Georeferenzierung
Wärmebedarfs- und Angebotskataster VFS	Wärme	Bottom-Up	Hochrechnung Energiekennzahlen	kommerziell (VFS)	mit Georeferenzierung
SIA-Effizienzpfad 2000-Watt-Areale	Wärme, Lüftung, Klima, Prozesse, Beleuchtung/Geräte, allg. Gebäudetechnik	Bottom-Up	Hochrechnung Energiekennzahlen	kommerziell (Einzelgebäude), frei verfügbar (für Areale)	Rechenhilfe 2000-Watt-Gesellschaft
Bilanzierungstool ECOSPEED Region	Wärme, Beleuchtung/Geräte, Prozesse	Top-Down	Top-Down Ansatz wird durch Bottom-Up Daten ergänzt	kommerziell (ECOSPEED AG)	Szenarienbildung möglich
Bilanzierungstool ECOSPEED Business	Wärme, Lüftung, Klima, Prozesse, Beleuchtung/Geräte, allg. Gebäudetechnik	Bottom-Up	Vollerhebung	kommerziell (ECOSPEED AG)	
Bilanzierungs-Tool für Gemeinden + Regionen	Wärme, Lüftung, Klima, Prozesse, Beleuchtung/Geräte, allg. Gebäudetechnik	Bottom-Up	Vollerhebung oder Hochrechnung Energiekennzahlen	frei verfügbar (2000-Watt-Gesellschaft)	

Tabelle 11: Vergleich schweizerischer Energiebilanzierungsmethoden (basierend auf Moret et al. [122])



Das Gebäudeparkmodell TEP und die Wärmebedarfskataster der Kantone Bern und Luzern sowie das EnergyGIS St. Gallen verwenden das eidgenössische Gebäude- und Wohnungsregister (GWR) als eine wichtige Datengrundlage. In [122] wird darauf hingewiesen, dass die Datenqualität des GWR je nach Gemeinde variiert.

Kulawik und Bucher [65] kommen in ihrer Studie zur Schätzung des Heizenergiebedarfs für Wohngebäude mittels des kantonalen Gebäude- und Wohnungsregisters des Kanton Luzerns ebenfalls zu diesem Schluss (Einzelfehler der im GWR angegebenen Wohnfläche: bis zu $\pm 100\%$).

Nach [65] bietet das GWR die ergiebigste Datenquelle für Gebäude. Dessen Anwendung in Kombination mit Stichprobenerhebungen stelle die vielversprechendste Methode zur Schätzung des Energiebedarfs dar. Kulawik und Bucher betonen die Notwendigkeit der Verbesserung der Datenqualität. Bisherige Studien zum Energieverbrauch und CO₂-Ausstoss von Gebäudeheizungen dürften nur als sehr grobe Schätzungen betrachtet werden. Um eine repräsentative Stichprobe des Gebäudebestands zu erheben, müssten unter Berücksichtigung von Gebäudealter, Bauqualität und Energieträger ca. 3-6% aller Gebäude des Kantons Luzern (das heisst, ca. 2'000-4'000 Gebäude) periodisch detaillierter erhoben werden.

Das GWR wird auch als Datenquelle des im Rahmen des SCCER FEEB&D entwickelten Bottom-Up Modells zur Schätzung des Wärme- und Elektrizitätsbedarfs des gesamten schweizerischen Gebäudebestands verwendet [133]. Die in [65] aufgeworfenen Fragen zur Datenqualität im GWR werden bei Schneider et al. [133] nicht adressiert.

Der Vollständigkeit halber sei hier auf die Gesamtenergiestatistik des Bundes [24] sowie auf die regelmässig durchgeführte Studie des schweizerischen Energieverbrauchs nach Verwendungszweck [29] hingewiesen, welche insbesondere die Entwicklung des landesweiten Heizwärme- und Warmwasser-Energieverbrauchs ausweist. In der neuesten Studie [29] wird für die Periode 2000-2016 nebst einer Senkung des durchschnittlichen Heizwärmebedarfs um 17% eine Erhöhung des durchschnittlichen Nutzungsgrades von Heizsystemen um 8% berichtet (siehe auch Abschnitt 4.6.3).

4.5.3.2 Performance Gaps und Energiebilanzierungen

Hier stellen wir drei Studien vor, die Performance Gaps im schweizerischen Gebäudepark in Verbindung mit bestimmten Energiebilanzierungshochrechnungen oder -modellen thematisieren.

Gebäudeparkmodell TEP

Das Gebäudeparkmodell TEP¹⁹ wurde 2016 im Rahmen des BFE-Projekts „Erweiterung des Gebäudeparkmodells gemäss SIA-Effizienzpfad Energie“ [76] überarbeitet und basiert auf der Verwendung von repräsentativen Einzelgebäuden (vgl. Tabelle 11). Die Modellierung stützt sich u.a. auf die schweizerischen Richtlinien SIA 2024 [99], SIA 380/4 [100], SIA 380/1 [27] und SIA 2032 [137]. Das Gebäudeparkmodell TEP und die zugehörigen Datenbanken können beispielsweise für die Bewertung energipolitischer Massnahmen mittels Szenarienrechnungen eingesetzt werden.

Jakob et al. berichten in [76], dass im Rahmen der Entwicklung des Gebäudeparkmodells Hinweise auf Differenzen zwischen energetischen Berechnungen und empirisch erhobenen Messdaten – sowohl auf Ebene der Einzelgebäude als auch auf aggregierter Ebene – aufgetreten sind. Die Autoren bezeichnen diese Differenz als Energy Performance Gap und empfehlen die Durchführung diesbezüglicher Forschungsprojekte.

Aus der Studie geht nicht hervor, welche Modellierungs- und/oder Messgrössen auf das Vorliegen eines Energy Performance Gap schliessen liessen und wie gross dieser Gap gemäss den Modellrechnungen ausfällt.

¹⁹ Weitere Informationen:

http://www.tep-energy.ch/index.php?option=com_content&task=view&id=138&Itemid=58



Genfer Gebäudepark

In einer Studie der Universität Genf [10] (vgl. Abschnitt 4.1) wurde das nicht genutzte energetische Sanierungspotenzial für Mehrfamilienhäuser aufgrund des Auftretens eines energetischen Performance Gaps untersucht. Die Studie betrachtete die Sanierung von ca. 10 Wohnblöcken (mit insgesamt 50 Eingängen) im Kanton Genf.

Den Berechnungen und Vergleichen mit Messdaten lag das thermisch-energetische Modell der SIA 380/1 [27] für den Heizwärmebedarf zugrunde. Die Ergebnisse wurden für alle Mehrfamilienhäuser im Kanton Genf mit Baujahr 1946-1980 hochgerechnet.

In seinen Schlussfolgerungen wirft das Autorenteam in [10] die Fragen auf, ob die Verwendung des SIA 380/1 Modells (i) für die Schätzung real erreichbarer Einsparungen auf Ebene Einzelgebäude und (ii) für die Entwicklung von Sanierungsstrategien und entsprechenden politischen Massnahmen auf Ebene Gebäudepark angemessen sei. Diese Fragen wurden in den Folgestudien des Autorenteam, die ebenfalls auf SIA 380/1 basieren, nicht weiterverfolgt [51, 133].

SCCER FEEB&D Bottom-Up Modell des schweizerischen Gebäudeparks

Schneider et al. stellen in [133] zwei statistische Bottom-Up Modelle zur Schätzung des nationalen Wärme- und Elektrizitätsbedarfs vor. Die Modelle basieren u.a. auf dem nationalen GWR, der SITG IDC Datenbank²⁰ des Kantons Genf und Messdaten der nationalen GEAK Datenbank. Ihre Ergebnisse liefern die Grundlage für eine geo-referenzierte Datenbank zum Wärme- und Elektrizitätsbedarf des gesamten schweizerischen Gebäudebestands.

Für den Heizwärmebedarf wird ein Einsparpotential durch Sanierungsmassnahmen an der Gebäudehülle für den gesamten nationalen Gebäudepark abgeschätzt. Unter Berücksichtigung eines Performance Gaps wird das ausgewiesene Einsparpotential mit den Energieperspektiven 2050 [138] verglichen.

Folgende Aspekte fallen in [133] bei den Berechnungen des (Heiz-)Wärmebedarfs für den schweizerischen Gebäudepark auf:

- Den Berechnungen lag das Modell der SIA 380/1 für den Heizwärme-Nutzenergiebedarf von Einzelgebäuden zugrunde. Die Kalibrierung des Bottom-Up Modells erfolgte anhand von Messdaten aus der SITG IDC Datenbank (16'000 Gebäude Kanton Genf) und der GEAK Datenbank (11'500 Gebäude schweizweit). Diese Messdaten beziehen sich auf die Endenergie und wurden mittels konstanter Nutzungsgrade gemäss Khoury [23] auf Nutzenergie umgerechnet. Die Unsicherheiten in diesen Schlüsselparametern werden nicht thematisiert.
- Das ermittelte energetische Einsparpotential aufgrund von Sanierungen der Gebäudehülle wird um das – aufgrund von Performance Gaps – nicht ausschöpfbare Potenzial reduziert. Diese Reduktion erfolgt u.a. anhand der von Khoury et al. [10] ermittelten Korrelation zwischen theoretischen und tatsächlichen Einsparungen (Grundlage: Sanierung von ca. 10 Wohnblöcken im Kanton Genf). Die genaue Herleitung und die Repräsentativität der verwendeten Korrelationen für den schweizerischen Gebäudepark sowie allfällige daraus entstehende Unsicherheiten werden nicht ausgewiesen.
- Für den Vergleich mit den Szenarienrechnungen aus [138] wird das ermittelte energetische Sanierungspotential (Einsparung Nutzenergie) mittels Nutzungsgraden auf Endenergie umgerechnet. Die für diese Umrechnung verwendeten Nutzungsgrade sind nicht dokumentiert.

Bis zur Klärung der obigen Punkte müssen die Resultate dieses Modells als sehr vorläufig betrachtet werden.

²⁰ Weitere Informationen: http://ge.ch/sitg/sitg_catalog/sitg_donnees/i?keyword=IDC



4.6 Unsicherheiten

In diesem Kapitel weisen wir auf verfügbare und von uns eingesetzte Werkzeuge zur Unsicherheitsanalyse hin. Wir benennen mit den Unsicherheiten von Energiebilanzmodellen und von Nutzungsgraden zwei wichtige Einflussfaktoren bei der Energy Performance Gap Betrachtung von Einzelgebäuden und Gebäudeparks. Wir zeigen auf, wie heute in der Praxis mit Unsicherheiten umgegangen wird. Die dringend erforderliche Fach- und Sachkompetenz, um mögliche Fehlschlüsse und unzutreffende Vereinfachungen zu vermeiden, wird von uns am Schluss des Kapitels thematisiert.

4.6.1 Werkzeuge

Für die Abschätzung von Mess- und Berechnungsunsicherheiten stehen verschiedene Softwarewerkzeuge zur Verfügung. Nach unserer Erfahrung ist der Einsatz dieser Werkzeuge zur Erstellung von sogenannten Unsicherheitsbudgets für Messungen und Berechnungen sehr empfehlenswert. Die Anwender können durch eine Systemanalyse und die Modellierung des Unsicherheitsbudgets ein besseres Verständnis für Einflussgrößen und deren Auswirkung auf das Ergebnis entwickeln.

GUM-Workbench von Metrodata²¹

Die GUM-Workbench ist eine Softwareanwendung für die GUM-Methode und Monte-Carlo-Simulationen. Damit wird dem Anwender ermöglicht, Mess- und Berechnungsergebnisse belastbar und vergleichbar anzugeben.

Uncertainty Machine von NIST²²

Das National Institute of Standards and Technology (NIST) in den USA unternimmt grosse Anstrengungen, um Mess- und Berechnungsunsicherheiten nach der GUM-Methode und mittels Monte-Carlo-Simulationen möglichst anwenderfreundlich realisierbar zu machen. Hierzu wurde eine frei verfügbare, webbasierte Softwarelösung namens **NIST Uncertainty machine** entwickelt.

Die Durchführung von Unsicherheitsanalysen wurde ausführlich im IEA-Projekt Annex 53 [118, 120] besprochen. In [120] finden sich Erläuterungen u.a. zu Sensitivitätsanalysen, die Monte-Carlo-Simulationen und Regressionsmodelle kombinieren sowie für die Kalibrierung von Modellen mit Hilfe von Messdaten und Sensitivitätsanalysen.

Ein praktisches Anwendungsbeispiel und ein Leitfaden für Monte-Carlo Simulationen im Baubereich finden sich bei Lützkendorf und Enseling [67].

4.6.2 Unsicherheiten von Energiebilanzierungen

Zur vollständigen Darstellung von Berechnungs- und Messergebnissen gehört eine Unsicherheitsanalyse. Die Angabe von Vertrauensbereichen dient dazu, die Belastbarkeit der Ergebnisse zu dokumentieren, ihre korrekte Verwendung in anschliessenden Berechnungen zu unterstützen, und aussagekräftige Vergleiche zu ermöglichen.

Unsicherheitsanalysen sind insbesondere bei der Berechnung (beziehungsweise Modellierung) des Heizwärme- oder Kühlbedarfs von Gebäuden von vorrangiger Bedeutung. Dies, weil relativ kleine Unsicherheiten bei den Eingangsgrößen und den resultierenden Bilanzgewinnen oder -verlusten über längere Zeiträume grosse Unsicherheiten beim kumulierten Heizwärme- oder Kühlbedarf zur Folge haben. Dies kann rasch zu Fehlinterpretationen bezüglich des Vorliegens vermeintlicher Energy Performance Gaps führen.

²¹ <http://metrodata.de>

²² <https://uncertainty.nist.gov>



4.6.2.1 Internationale Standards

Hierzu sei auf den Annex des ISO/TR 52016-2:2017 [98] verwiesen. Dort werden die Unsicherheitsanalyse und die Validierung für die Bilanzmodelle des Standards ISO 52016-1:2017 [54] durchgeführt. Im Annex des ISO/TR 52016-2:2017 [98] werden

- die Fehlerfortpflanzung,
- der Vergleich von Planung und Betrieb,
- der Vergleich von Entwurfsvarianten,
- und der Vergleich zwischen Anwendern des Standards

behandelt. Die Ausführungen zur Unsicherheitsanalyse lassen sich auch in den Vorgängern des Standards finden.

4.6.2.2 Nationale Standards

Der internationale Standard ISO 52016-1:2017 [54] ist die Grundlage aller nationalen Standards zur Berechnung des Heizwärmebedarfs von Gebäuden. Bezeichnend ist, dass der Umfang der Unsicherheitsbetrachtungen in der nationalen Norm SIA 380/1 [27] seit 10 Jahren mit jeder Revision abgenommen hat. Die gleiche Entwicklung lässt sich beim Merkblatt SIA 2031 Energieausweis für Gebäude [31] für Gebäude beobachten.

In der früheren Version des Merkblatts SIA 2031 von 2009 [126] wurde ausführlich auf die Validierung von Eingabedaten eines Gebäudemodells eingegangen. Folgende Hinweise aus Abschnitt 7 in [126] sind bezüglich Performance Gaps relevant:

- Eine Abweichung zwischen Messdaten und dem berechneten Energieverbrauch von 20% des grösseren Werts gilt als zulässig.
- Als Erfahrungswert für die Schwankungsbreite des Heizwärmebedarfs von gleichen, benachbarten Einfamilienhäusern wird ein Bereich von -50% bis +50% vom Mittelwert angegeben.
- Die vorgenannte relative Schwankungsbreite nimmt mit abnehmendem Energiebedarf eines Gebäudes zu.

Betreffend Behandlung von Unsicherheiten enthält die Revision von 2016 weniger Handlungsempfehlungen als die Vorgängerin 2009. Der oben zitierte Abschnitt 7 entfällt in der Revision. Ergänzt wurden einfache, theoretische Grundlagen für die Berechnung von Unsicherheiten und Anhaltswerte für die relative Unsicherheit von Energieverbrauchsmessungen verschiedener Energieträger. Auf ein Anwendungsbeispiel wurde verzichtet. In der, dem Merkblatt zugrundeliegenden, noch immer gültigen SN EN 15603:2008 [115] wäre die Vorgehensweise für die Behandlung von Unsicherheiten mit Monte-Carlo-Simulationen bereits enthalten.

Die Behandlungstiefe von Unsicherheiten in Merkblättern und Normen der SIA hat somit abgenommen, während gleichzeitig die Thematisierung von Energy Performance Gaps wie auch die Bemühungen, die Vorhersagekraft der Norm SIA 380/1 und des Energieausweises für den Heizwärmeverbrauch zu stärken, zunehmen.

4.6.2.3 Studien aus der Schweiz

Aiulfi et al. [42] erhoben in einer BFE-Studie von 2010 den Energieverbrauch in Bürogebäuden und Grossverteilern. Die gemessenen Daten von Wärme und Elektro wurden mit SIA 2024:2006 [99], SIA 380/1 (Ausgaben von 1988, 2001 und 2009 [27]) und SIA 380/4:2006 [100] verglichen. Dabei wurden Mittelwerte und Streubreiten angegeben, die aufgrund von Sondernutzungen (Server) teilweise sehr hoch sind. Am Beispiel dieser Erhebung zeigt sich wie variabel Berechnungsgrundlagen in Nicht-Wohngebäuden sein können und welche Bedeutung Unsicherheitsanalysen haben.



Khoury et. al analysieren in [51] Ursachen für Energy Performance Gaps nach Gebäudesanierungen. Durch Sensitivitätsanalyse quantifizieren sie die Einflüsse von Raumtemperatur, Luftwechselraten, Nutzungszeiten u.a. auf die Berechnung des Heizwärmebedarfs (vgl. Abschnitt 4.6.3).

Hoffmann et al. [53, 61] führen eine systematische Sensitivitätsanalyse für das SIA 380/1 Modell zur Berechnung des Heizwärmebedarfs durch und zeigen einen Vergleich deutscher und schweizerischer Berechnungsverfahren. Zusätzlich differenzieren sie das Berechnungsverfahren der SIA 380/1 nach dem Ausgabejahr (vgl. Abschnitt 4.6.3).

4.6.3 Unsicherheiten im Nutzungsgrad

Die Unsicherheitsbetrachtung von Messungen bezieht sich auf zufällige Fehler. Zusätzlich können jedoch auch systematische Fehler vorliegen, zum Beispiel aufgrund von Einschränkungen des Messkonzepts oder von Mängeln der verwendeten Modelle und Berechnungsmethoden.

Ein grosses Potential für systematische Fehler liegt in der Berechnung des Nutzenergiebedarfs von Heizanlagen mithilfe des sogenannten Nutzungsgrades. Dieser ist gegeben durch das Verhältnis von Nutzenergie zu Endenergie unter Berücksichtigung der Wärmeverluste der Wärmeerzeugung, Wärmespeicherung und Wärmeverteilung (nach SIA 380/1:2009 [27]). Der Nutzungsgrad wird häufig herangezogen, da in den meisten Fällen eine direkte Messung der Nutzenergie als unwirtschaftlich erachtet wird.

Der Nutzungsgrad ist anlagenspezifisch und unter anderem abhängig von der Betriebsdauer in Teillast, den Heizmitteltemperaturen, der Durchführung oder nicht eines hydraulischen Abgleichs, sowie der Abstimmung zwischen dem Komponentendesign und dem Aufbau und Betrieb des Gesamtsystems.

Da der Nutzungsgrad nicht theoretisch hergeleitet werden kann, wird er meist als zeitlich konstant angenommen. Dies kann zu grossen Fehlern bei der Abschätzung des Nutzenergiebedarfs und der Untersuchung möglicher energetischer Performance Gaps führen.

Diese Problematik ist auch in den uns vorliegenden schweizerischen Studien häufig gegeben:

So werden in der Erfolgskontrolle der Gebäudeenergiestandards die MuKEN-Gebäude mit einem einheitlichen Nutzungsgrad nach Minergie-Reglement bewertet [9] (siehe Abschnitt 4.5.2.5).

Für Vergleiche mit der SIA 380/1 werden im BFE-Projekt PRO380 [61] konstante Nutzungsgrade verwendet. Die Autoren dieser Studie weisen denn auch darauf hin, dass aufgrund dieser und weiterer Unsicherheiten für die Nutzenergie eine Übereinstimmung von $\pm 15\%$ zwischen den gemessenen und den berechneten Werten gemäss SIA 380/1 als zufriedenstellend einzustufen sei.

Ein drittes Beispiel stellt die Studie von Khoury et al. [10] dar. Auch hier werden Schätzungen des Nutzenergiebedarfs verwendet. Diese basieren auf den von Khoury in [23] ermittelten durchschnittlichen Anlagennutzungsgraden für Wohnbauten im Kanton Genf. In [10] werden die entsprechenden Berechnungen nach SIA 380/1 für 10 Gebäudekomplexe mit Messungen verglichen und ein Performance Gap festgestellt. Das Resultat dieser Performance Gap-Analyse wird auf den Genfer Gebäudepark hochgerechnet, ohne die involvierten Unsicherheiten in der Berechnung der Nutzenergie zu thematisieren.

In einer Folgestudie [51] für drei Gebäude wird ein kleinerer Performance Gap für die Nutzenergie festgestellt, was unter anderem auf verschiedene Optimierungsmassnahmen der gebäudetechnischen Anlagen zurückgeführt wird. Die Bilanzgrenze in der SIA 380/1 (siehe dort die Figur 1) ist jedoch der Raum, so dass eine Änderung des Nutzenergiebedarfs nur aus Änderungen der Nutzung, der Gebäudehülle oder der Lüftungswärmeverluste resultieren kann. Eine Optimierung der gebäudetechnischen Anlagen zielt darauf, den Endenergieverbrauch zu senken, kann aber den Nutzenergieverbrauch, so wie er in der Norm definiert wird, schlichtweg nicht beeinflussen. Für die festgestellte Abnahme des

Nutzenergiebedarfs – und die gefundene Reduktion des Performance Gaps – müssen demnach andere Gründe vorliegen.

In einer weiteren Studie des Autorenteam Khoury et al. [136] wird ebenfalls auf die in [23] ermittelten durchschnittlichen Anlagennutzungsgrade für Wohnbauten im Kanton Genf zurückgegriffen. Die Studie untersucht die energetische Sanierung von 26 Mehrfamilienhäusern in Genf hinsichtlich energetischer, wirtschaftlicher und ökologischer Aspekte. Aus den dokumentierten Berechnungen geht nicht hervor, ob die Sanierung der Gebäudehülle und der technischen Anlagen Einfluss auf die angenommenen Anlagennutzungsgrade – und damit auf die ausgewiesenen Performance Gaps – hat.

Zu berücksichtigen ist, dass Effizienzwerte, die in der Planung angesetzt werden, für die Umrechnung von Betriebswerten nicht zwingend sinnvoll sind (vgl. Abschnitt 5.2.2). Hier sei auch auf die Erkenntnisse der Studien der Techem Energy Services GmbH [39, 95] hingewiesen: die gemessenen Jahresnutzungsgrade von gasbetriebenen Anlagen können tiefer liegen, besonders wenn die Warmwassererzeugung mit berücksichtigt ist.

Drei ausgewählte Beispiele zur empirischen Erhebung von Nutzungsgraden lassen auf Differenzen zwischen den Standardwerten und den in der Praxis erreichten Nutzungsgraden schliessen. In den Studien zu Energiekennwerten 2016 und 2017 der Techem Energy Services GmbH [39, 95] und dem dena Gebäudereport 2015 [55] werden Differenzen zwischen 10 bis 15% Prozentpunkten berichtet (Detailanalyse siehe Anhang C).

Aufgrund der Unsicherheiten in der Annahme von Nutzungsgraden verwendete das Zürcher Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) in seiner Untersuchung zu Wärmeverbrauchsdaten von Neubauten ausdrücklich Messungen des Nutzenergiebedarfs [36]. Die Autoren weisen darauf hin, dass die Nutzenergie nur sehr aufwändig zu erfassen sei und daher oft nicht zur Verfügung stehe. In ihrem Fall lagen jedoch die benötigten Messwerte auf Grund von Energie-Contracting vor, das auf Messungen der Nutzenergie (= gelieferte Dienstleistung) angewiesen ist.

4.6.4 Umgang mit Unsicherheiten in der Praxis

Ungewissheiten über die Nutzung von Gebäuden oder Sicherheitszuschläge zur Abdeckung aller möglichen Betriebszustände führen zwangsläufig zu einer Überdimensionierung der technischen Anlagen. Weiters können bereits eingetretene, aber durch die Planung oder die Normung noch nicht antizipierte Klimaänderungen zur Über- oder Underdimensionierung von Anlagen führen. In diesem Kapitel berichten wir über recherchierte Ansätze und Vorhaben zum Umgang mit Unsicherheiten in der Praxis.

4.6.4.1 Über- und Underdimensionierung

Sun et al. [8] erläutern, dass das Sicherheitsdenken („defensive design“) zu markanter Überdimensionierung von HVAC-Anlagen führt. Im Betrieb können diese Leistungsreserven durch Nutzer- und Betreiberbeeinflüsse die Gebäudeperformance reduzieren. Ein Framework für eine Risiko-orientierte Anlagendimensionierung auf Basis thermischer Gebäudesimulationen mit kombinierten Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen wurde entwickelt.

Feustel [62] stellt bei der Bestimmung des sommerlichen Aussenluft-Auslegungszustandes für die Komfortklimatetechnik exemplarisch fest, dass es deutliche Hinweise für den Klimawandel gibt. Steigende Aussenlufttemperaturen haben höhere Aussenluftfeuchten mit entsprechend höheren Aussenluftenthalpien zur Folge als in den Dimensionierungsvorschriften für Luftkühler vorgesehen. Dadurch ist ein systematischer Indoor Environmental Quality Gap in luftgekühlten Gebäuden in den Sommermonaten möglich.

Das BFE-Projekt ROGEEK [63] untersuchte die Robustheit von Kühlszenarien hinsichtlich der thermischen Behaglichkeit und des Energieverbrauchs in Bürogebäuden. Die Robustheit von unterschiedlichen Kälteabgabesystemen wurde für vier verschiedene Klimaszenarien (historische und prognosti-

zierte) und bezüglich drei verschiedener Varianten des Nutzerverhaltens ermittelt. Aufgrund der Ergebnisse wird im Bericht vorgeschlagen, dass die Kälteabgabesysteme zum Zeitpunkt der Erstellung bis zu einem gewissen Grad überdimensioniert werden sollten, um den zunehmenden Klimakältebedarf in der Zukunft abzudecken. Die Kälteproduktion wurde dabei nicht berücksichtigt. Eine risikoorientierte Anlagendimensionierung mit kombinierten Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen, wie von Sun et al. [8] vorgeschlagen, wurde nicht durchgeführt.

4.6.4.2 Moderne Werkzeuge für die robuste Dimensionierung und Optimierung

Boxer et al. [26] stellen ein modellbasiertes Entscheidungs- und Unterstützungstool für Gebäudeportfolios unter Unsicherheiten vor. Es identifiziert energetische Schwachstellen und quantifiziert ihren Schweregrad. Methoden des parametrischen Samplings und der Unsicherheitsanalyse wurden durch detaillierte Charakterisierungen der Unsicherheit von Parametern erweitert. Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen wurden verwendet, um Schwellwerte für Risikotoleranzen für jeden Endkunden festzulegen. Mittels grafischer Ampelsysteme wird der Endkunde über Prioritäten und Kostenabweichungen informiert.

Maderspacher [79] entwickelte in seiner Dissertation eine Methode zur robusten Optimierung der energetischen Sanierung von Gebäuden unter Berücksichtigung unsicherer Randbedingungen. Diese Methode ermöglicht die gleichzeitige Optimierung energetischer, ökologischer und ökonomischer Zielgrößen mit verbesserter Robustheit gegenüber unsicheren Randbedingungen wie klimatischen Veränderungen, Nutzerverhalten oder Energiepreisschwankungen. Diese Methode ermöglicht die Analyse von multikausalen Vorgängen, wie sie für eine robuste Bewertung der Gebäudeperformance erforderlich sind.

Killian et. [80] beschreiben Model Predictive Controls (MPC) in einem Review-Artikel. Sie sehen den Hauptvorteil von Model Predictive Controls in der Integration von Vorhersagen zukünftiger Störungen in die verwendeten Regelungs- und Optimierungsalgorithmen. Grundsätzlich kann eine MPC-Regelung aufgrund der dynamischen, adaptiven Reaktion auf Störgrößen als eine Möglichkeit zur Reduktion von Energy Performance Gaps angesehen werden. Als nachteilig wird die immer noch geringe Zahl an Experten genannt, die MPC-Systeme in Betrieb setzen und optimieren können.

4.6.5 Fach- und Systemkompetenz

Jones et al. [7] untersuchen in ihrer Studie sechs identische Wohnungen im gleichen Gebäude. Die Diskrepanzen der Ergebnisse zwischen statischer Berechnung und Simulation einerseits und Messung andererseits werden auf limitierte Berechnungsmethoden, unterschiedliche Kompetenz der Modellierer und das Benutzerverhalten zurückgeführt.

Zur Bewertung von Berechnungsmethoden ist auch das Wissen um die Einsatzbereiche und –grenzen von Gebäude- und Anlagenmodellen notwendig. Hoffmann et al. [61] geben eine Übersicht über Berechnungsmethoden mit verschiedener Modellierungstiefe. Der Detaillierungsgrad unterscheidet sich bei ausführlichen Simulationsverfahren (z. B. thermisch-dynamische Gebäudesimulation), vereinfachten Stundenverfahren (z.B. SIA 382/2 [101]) und quasi-stationären Monatsbilanzverfahren (z.B. SIA 380/1 [27], DIN V 18599 [102]).

Im Zusammenhang mit fehlendem Wissen und mangelnder Erfahrung von Modellierern und Ingenieuren, sei auf die Bedeutung einer Fehlerkultur (vgl. Fedoruk et al. [59]) und des Verständnisses für Unsicherheiten und deren Beachtung hingewiesen.



Folgende Schlüsselerkenntnisse aus einer Fallstudie wurden von Fedoruk et al. [59] festgehalten:

- Integrierter Designprozess (IDP): IDP Prinzipien müssen über die Planungsphase hinaus auf den gesamten Projektlebenszyklus erweitert werden, IDP muss neben Einzelgebäuden auch Areale umfassen
- Systemgrenzen: Systemgrenzen und Implikationen des Netzwerkdesigns müssen von Anfang an berücksichtigt werden, einschliesslich aller Stakeholder-Verantwortlichkeiten für das System
- Einsatzgrenzen: Einschränkungen vereinfachter Modelle und Werkzeuge müssen in der Entwurfsphase vollständig verstanden werden. Die individuelle Optimierung kleiner Komponenten wird sich nicht in signifikanten Einsparungen niederschlagen, wenn die zugrundeliegenden Systeme falsch sind.
- Feedback: Feedback ist in allen Phasen erforderlich: insbesondere von wichtiger Bedeutung sind Feedbacks von der Inbetriebnahme zurück zur Planung und vom Betrieb zurück zur Planung. Überwachung und Bewertung sind Schlüsselmechanismen, um sicherzustellen, dass die Systeme wie vorgesehen arbeiten.
- Institutionelle Kapazitäten: Ohne institutionelle oder betriebliche Unterstützung, Ressourcen und Möglichkeiten, gefundene Lösungen umzusetzen oder erkannte Probleme zu kommunizieren, werden Gebäude nicht mit der gewünschten Performance funktionieren.
- Performance: Grosse Chancen für die wirksame Inbetriebnahme und Betriebsoptimierung hin zur gewünschten Energieeffizienz sind vorhanden, auch in nachhaltigen Gebäuden.
- Fehlerkultur: Eine Kultur des Lernens und des Umgangs mit Misserfolgen ist notwendig, um den Erfolg einer umfassenden Gebäudeperformance sicherzustellen.

In [59] wird schliesslich darauf hingewiesen, dass der immer häufigere Gebrauch von Begriffen wie „smart“ und „intelligent“ zur Beschreibung von Gebäuden und deren Infrastruktur davon ablenkt, dass die wahre Intelligenz eines Gebäudes von seiner geplanten Fähigkeit definierte Funktionen wirksam und nützlich bereitzustellen, herrührt (eine Zusammenfassung von [59] findet sich auch im Anhang C).

4.7 Regelkreise

Hier verwenden wir den Begriff „Regelkreise“ für kontinuierliche Korrektur- und Verbesserungsprozesse in sozio-technischen Systemen. Sie entsprechen etablierten Vorgehensweisen im Qualitäts- und Risikomanagement (vgl. Abschnitt 3.5). Umsetzungshilfen werden in der einschlägigen Literatur ausführlich behandelt, siehe zum Beispiel [110, 111, 123].

Die verschiedenen Arten von Rückkopplungsschleifen aus dem Qualitäts- und Risikomanagement wurden bisher in mehreren Arbeiten zur Gebäudeperformance aufgegriffen und adaptiert. Im nachfolgenden Abschnitt 4.7.1 berichten wir ausgewählte Beispiele für Regelkreise auf Stufe Einzelgebäude. In Abschnitt 4.7.2 wird die Anwendung von Regelkreisen auf Stufe Gebäudepark besprochen.

4.7.1 Regelkreise für Einzelgebäude

Die in der Literatur gefundenen Performance-Regelkreise für individuelle Gebäude können in drei Gruppen unterteilt werden:

- Rückkopplungen zwischen den Lebenszyklusphasen eines Gebäudes
- Rückkopplungen im Planungsprozess
- Rückkopplungen in der Betriebsphase

4.7.1.1 Rückkopplungen zwischen den Lebenszyklusphasen eines Gebäudes

Die Wichtigkeit des Informationsaustausches über die Grenzen der Lebenszyklusphasen eines Gebäudes hinweg wird in verschiedenen Studien zum Performance Gap betont [15, 20, 37, 124, 127].

Die britische Initiative „The Green Construction Board“ bezeichnet in [37] Rückkopplungsschleifen im Gebäudelebenszyklus als „**Closing the Loop**“. Die Autoren identifizieren zwei Rückkopplungsformen, die notwendig sind, um Informationslücken zwischen den Phasen schliessen zu können: Rückmeldungen aus der Inbetriebnahme an den Betrieb und die Gebäudenutzer, sowie Rückmeldungen aus dem Betrieb an die Planung.

Im deutschsprachigen Raum wird der Begriff des „**Qualitätsregelkreises**“ im Gebäudelebenszyklus verwendet [15, 20, 127, 128, 129]. Regelmässige Soll-Ist-Vergleiche im Betrieb ermöglichen eine kontinuierliche Optimierung. Rückmeldungen an Akteure aus der Planungsphase sichern den Informationsgewinn aus dem Gebäudebetrieb für zukünftige Planungen. Neben der Wahl einer geeigneten Prüfmethode wird auch auf die Festlegung eines angemessenen Qualitätslevels, d.h. auf den zu berücksichtigenden Toleranzbereich für die Soll-Ist-Vergleiche, hingewiesen (Abbildung 14).

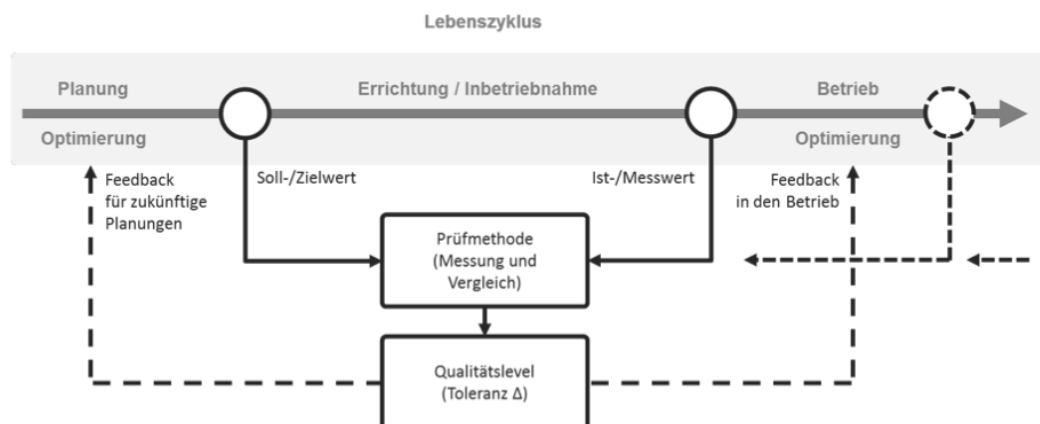


Abbildung 14: Qualitätsregelkreise für Gebäudeperformance (aus Plesser et al. [127])

4.7.1.2 Rückkopplungen in der Planungsphase

Die zweite Gruppe der Performance-Regelkreise für Einzelgebäude bezieht sich auf die einzelnen Schritte der Planung. Es werden Rückkopplungsschleifen zwischen den Akteuren (Besteller, Nutzer, Planer) im Planungsprozess vorgeschlagen.

Das „Performance Based Building Design“ [16] ist eine iterative Methode der Gebäudeplanung. Im vorgeschlagenen Planungsprozess [130] wird das Augenmerk zunächst auf die Erwartungen der zukünftigen Nutzer gelegt („User Requirements“ – Was ist das Ziel?). In mehreren, iterativen Schritten wird daraus – unter Einbezug der betroffenen Stakeholder – eine technische Spezifikation abgeleitet („Performance Requirements“ – Wie kann das Ziel erreicht werden?), siehe Abbildung 15.

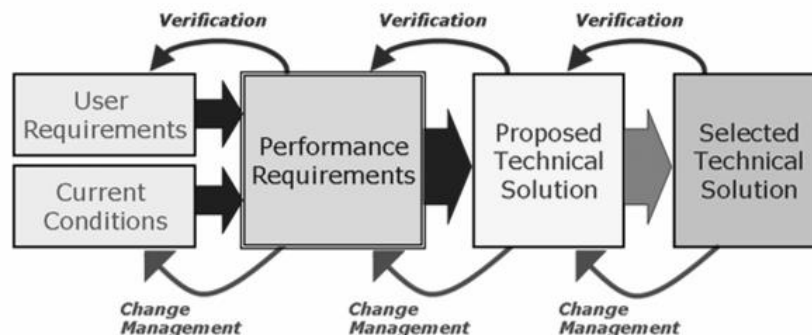


Abbildung 15: „Performance Based Building Design“: Übersetzung der Nutzerbedürfnisse und Anforderungen in technische Lösungen in einem iterativen Planungsprozess (aus Porkka und Huovila [130])

Zwei Prinzipien bilden die Grundlage dieses Planungsansatzes:

- Die Erwartungen der Nutzenden werden in einer anderen „Sprache“ (Begriffsverständnis, Detaillierung) formuliert als technische Spezifikationen. Die richtige „Übersetzung“ zwischen der funktionalen Sprache der Gebäudenutzenden und der technischen Sprache der Planenden ist entscheidend für die Erfüllung der Erwartungen.
- Quantitative Performance-Ziele müssen so gewählt und beschrieben werden, dass sie validiert und verifiziert werden können. Die Definition von Teilzielen und die anzuwendenden Überprüfungsverfahren sind integraler Bestandteil des Planungsprozesses.

Die Grundlagen zur praktischen Anwendung des „Performance Based Building Design“ wurden im Rahmen des EU-Projekts „PeBBu“ (2001-2005) ausführlich erarbeitet und in mehreren Fallstudien getestet [16, 130, 131, 132]. Die Definition von Teilzielen und die Wahl der passenden Evaluationsmethoden werden bei Bluyssen [3] erörtert.

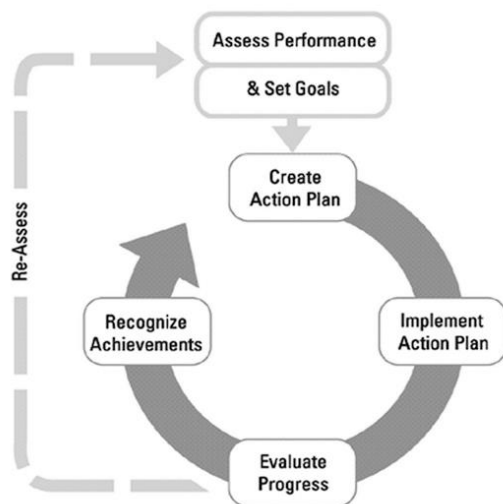
Hier sei der erwähnt, dass die Performance-basierte Planung und Umsetzung keine Erfindung der Neuzeit darstellt – sie wurde erstmals vor gut 3'800 Jahren dokumentiert²³.

Das Prinzip des „Performance Based Building Design“ weicht von einer Normierung der Erwartungen mit Hilfe vorgeschriebener technischer Lösungen ab, in dem es Normen und Richtlinien vielmehr als Leitlinien für die Erstellung individueller Performance-Anforderungen einzelner Projekte versteht.

²³ Im Codex Hammurabi ist die Performance-Anforderung eines Gebäudes festgeschrieben: „If a builder builds a house for anyone and does not complete it firmly, and the house that he has built collapses and kills the owner, then the builder shall be put to death.“ Wie die Performance erreicht wird, liegt dabei im Ermessen des Bauherrn. (Codex Hammurabi, 229, https://en.wikisource.org/wiki/The_Laws_of_Hammurabi,_King_of_Babylonia). Hinweis aus [16].

Eine Möglichkeit der Anwendung des „Performance Based Building Design“ in phasenübergreifenden Planungs- und Bauprozessen bildet das „Integrated Project Delivery“ [25]. Bei dieser Form der Zusammenarbeit werden bereits in der Planungsphase Stakeholder der Ausführung und Inbetriebnahme eingebunden. Wie im „Performance Based Building Design“ vorgeschlagen, werden zu erreichende Ziele („Was?“) und Methoden („Wie?“) frühzeitig iterativ von allen Beteiligten gemeinsam entwickelt und vertraglich festgehalten. Dadurch entstehen Arbeitsgemeinschaften, die Erfolg und Risiko über die gesamte Planungs- und Bauphase teilen.

4.7.1.3 Rückkopplungen im Betrieb



Rückkopplungsschleifen im Betrieb als Teil der Performance-Analyse und -Überwachung, werden in [125] und [70] besprochen.

Der im IEA-Projekt Annex 46 [125] entwickelte Rückkopplungsprozess lehnt sich an den im Energiemanagement eingesetzten PDCA-Zyklus („Plan-Do-Check-Act“) nach ISO 50001 [71] an.

Zusätzlich zu den Phasen *Plan* („Create Action Plan“), *Do* („Implement Action Plan“), *Check* („Evaluate Progress“) und *Act* („Recognize Achievements“) sind das Festlegen von Zielen und die regelmässige Überprüfung der energetischen Performance integrierter Teil des kontinuierlichen Verbesserungsprozess (Abbildung 16, oben).

Abbildung 16: Kontinuierlicher Verbesserungsprozess für die Energy Performance von Gebäuden (aus [125])

Der deutsche AMEV²⁴ empfiehlt in [70] das technische Monitoring von Gebäuden und Anlagen als Instrument zur Sicherung der Gebäudeperformance. Im Rahmen eines „**Performance Regelkreises**“ wird das technische Monitoring dem betrieblichen und dem anlagentechnischen Regelkreis übergeordnet (Abbildung 17).

Ziel des Performance Regelkreises ist das Sicherstellen der im Betrieb zu erreichenden Qualitäten. Als Bezugsgrössen dienen die ursprünglich geplanten Projektziele. Für die Grundlagen des technischen Monitorings wird auf die 2017 erschienene VDI-Richtlinie 6041 [68] verwiesen²⁵.

²⁴ Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen

²⁵ Eine Übernahme der VDI-Richtlinie 6041 für die Schweiz ist durch die SWKI Arbeitsgruppe prSWKI BT105-01 unter Mitwirkung des Autorenteam in Vorbereitung.

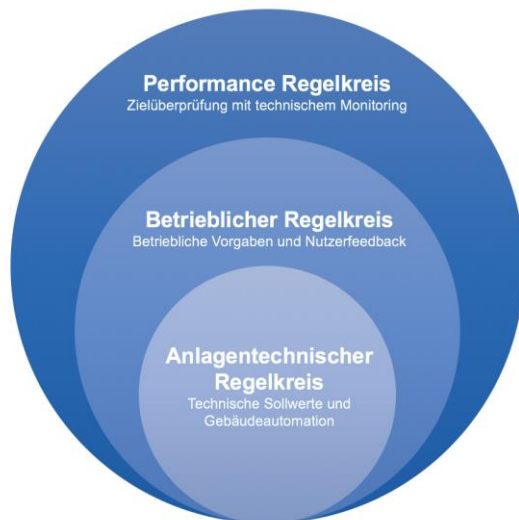


Abbildung 17: Technisches Monitoring als Teil des übergeordneten Performance Regelkreises im Gebäudebetrieb (vereinfacht nach AMEV [70])

Hierarchie der Regelkreise im Gebäudebetrieb nach AMEV [70]

(Abbildung 17, von innen nach aussen):

1. **Anlagentechnischer Regelkreis:**
Betrieb und Überprüfung der technischen Anlagen (Gebäudeautomation)
2. **Betrieblicher Regelkreis:**
Umsetzung und Überprüfung betrieblicher Vorgaben unter Einbezug der Nutzer
3. **Performance Regelkreis:**
Überprüfung der zu erreichenden Zielwerte mittels technischen Monitorings

4.7.2 Regelkreise für Gebäudeparks

In der GEFMA-Richtlinie 124-1 [69] werden Gebäudeanalysen auf verschiedenen Aggregationsstufen im Rahmen eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses miteinander kombiniert. Dabei werden sogenannte Mikro- und Makroanalysen mit unterschiedlicher Detailtiefe unterschieden (eine detaillierte Erläuterung ist in Abschnitt 4.5.1 dieses Berichts zu finden).

Eine Studie des schweizerischen Bundesamts für Energiewirtschaft (heute: Bundesamt für Energie) aus dem Jahr 1991 verknüpft ebenfalls Gebäudeanalysen auf verschiedenen Aggregationsstufen [78].

Die Autoren analysieren Strategien zur CO₂-Reduktion im Gebäudepark der Schweiz und empfehlen als politische Massnahme die Einführung eines mehrstufigen Energie-Monitorings als Beobachtungs- und Informationsinstrument (Abbildung 18).

Durch die Kombination von „**Mikro-Energie-Monitoring**“ auf der Stufe von Einzelgebäuden und „**Makro-Energie-Monitoring**“ auf der Stufe des schweizerischen Gebäudeparks könnten gemäss [78] fundierte empirische Grundlagen für die Energiepolitik geschaffen werden. Der kontinuierlich realisierte Informationsfluss gewährleiste dabei stets aktuelle Entscheidungsgrundlagen für die Anpassung an politische, gesellschaftliche und technische Entwicklungen.

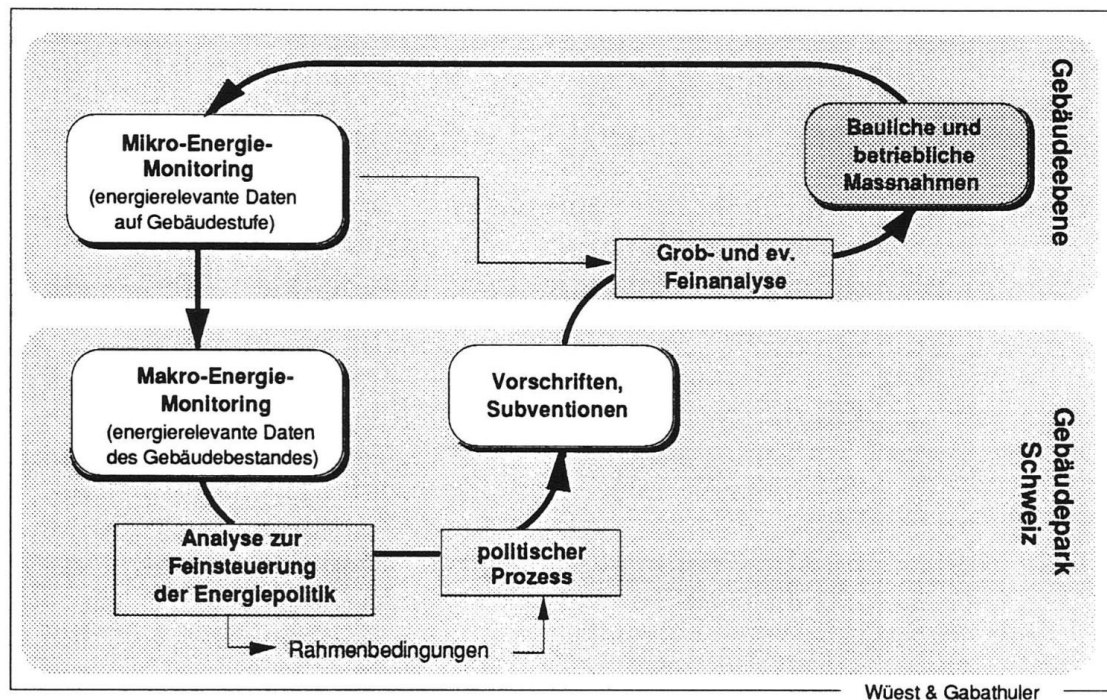


Abbildung 18: Energie-Monitoring für Einzelgebäude und den schweizerischen Gebäudepark als Beobachtungs- und Informationsinstrument in der Energiepolitik (aus Wüest und Gabathuler [78])

An dieser Stelle seien untenstehend einige ausgewählte, unseres Erachtens heute nach wie vor hochaktuelle Zitate aus [78] wiedergegeben (eigene Hervorhebungen):

„Grundvoraussetzung für eine wirkungsvolle Energiepolitik im Gebäudebereich ist eine **zuverlässige Lagebeurteilung bezüglich des energetischen Zustand des Gebädeparks**, der energierelevanten Veränderungen sowie die laufende Kontrolle der eingesetzten Mittel.“ (p. 14)

„Informationen auf der Stufe des gesamten Gebäudebestandes sind **unabdingbar für die** Ausgestaltung und **laufende Erfolgskontrolle** eines effizienten Subventionsprogramms.“ (p. 26)

„Durch die Ergänzung der unmittelbar energiebezogenen Informationen, die im Verlaufe der Zeit bei der Erfassung der Energiedaten auf Gebäudeebene anfällt, durch weitere Datenquellen zur Bautätigkeit (BfS, Verbände, Analyse Baubewilligungen etc.) und zur Energiestatistik, entsteht **ein System von sich ergänzenden Instrumenten das einen permanenten Fluss von aktuellen und direkt abrufbaren Informationen generiert**: Informationen über den aktuellen energetischen Gesamtzustand, Veränderungen und Trends im Gebäudepark der Schweiz, **über Vollzug, Wirksamkeit und Effizienz erlassener Vorschriften und ausgerichteter Subventionen** und damit Hinweise zur periodischen Optimierung der eingesetzten Mittel und Anpassung an die aktuellen Erfordernisse.“ (p. 14f)

„Das standardisierte Erfassen der energierelevanten Daten (Mikro-Energie-Monitoring) ist für alle Neubauten obligatorisch zu erklären. Diese können im Verlaufe der Projektierungs- und Ausführungsarbeiten bei Neu- und Ersatzneubauten ohne grösseren Aufwand auf eine Vorlage (Formular, EDV, Energiebuch etc.) übertragen werden.“ (p. 17)

„Für eine langfristig erfolgversprechende Ausrichtung des Mitteleinsatzes gilt es, dem Instrumentarium für ein gebäudespezifisches wie auch gesamtschweizerisches Energie-Monitoring Priorität einzuräumen vor einem kurzfristig erreichbaren, jedoch ineffizienten CO₂-Einspareffekt durch Einzelmassnahmen-Förderung.“ (p. 23)



4.8 Experteninterviews

Ergänzend zur Literaturrecherche führten wir eine Online-Umfrage unter 30 Expertinnen und Experten aus der Deutsch-Schweiz durch. 19 Teilnehmende füllten unseren Fragebogen (siehe Anhang B) aus und beantworteten je 13 Fragen. Die Umfrage wurde im November 2017 durchgeführt. Hier berichten wir die anonymisierte Auswertung der Antworten.

Teilnehmende:

- Adrian Altenburger, Hochschule Luzern Technik & Architektur
- Roman Arpagaus, Bundesamt für Bauten und Logistik BBL
- Philippe Brügger, Jobst Willers Engineering AG
- Steffen Büchner, Gruner Roschi AG
- Christoph Gmür, Kanton Zürich, AWEL
- Joël Maire, Righetti Partner Group AG
- Urs-Peter Menti, Hochschule Luzern Technik & Architektur
- Thomas Peter, Arlewo AG
- Hans-Peter Schärer, ETH Zürich
- Franz Sprecher, Stadt Zürich, Amt für Hochbauten
- Patrick Stähler, fluidminds GmbH
- Hans Rudolf Sturzenegger, Sigren Engineering AG
- Stefan Waldhauser, Waldhauser+Hermann AG
- Joachim Wilhelm, BKW Energy Monitoring
- Volker Wouters, HKG Engineering AG Pratteln

sowie 4 anonyme Teilnehmer/innen

Abbildung 19 gibt einen Überblick über die Tätigkeitsbereiche der Teilnehmenden.



Abbildung 19: Anzahl der Teilnehmenden nach Tätigkeitsbereich



Die Umfrage enthielt Frageblöcke zu folgenden Themenbereichen:

- Praxiserfahrungen in Hinblick auf Performance Gaps
- Definition von Performance Gaps
- Einschätzung der Relevanz verschiedener Gap-Dimensionen
- Einschätzung der Relevanz verschiedener Massnahmen

Abbildung 20 fasst die Erfahrungen der Umfrageteilnehmenden zusammen. Die überwiegende Mehrheit kommt in ihrer täglichen Projektpraxis mit Performance Gaps – unabhängig der genauen Definition – in Berührung. Ressourcen zur Erhebung und Analyse von Performance Gaps stehen nur einem Teil der Teilnehmenden zur Verfügung (8 von 19 Antworten).

Drei Viertel der Teilnehmenden massen Betriebsoptimierungen eine höhere Bedeutung als Performance Gap-Analysen bei (15 von 19 Antworten, Abbildung 20). Im Rahmen des Projekts konnten leider keine vertiefenden Interviews durchgeführt werden, warum dies der Fall ist.

	Ja	eher Ja	eher Nein	Nein
Haben Sie in Ihrer täglichen Projektpraxis mit Performance Gaps zu tun?	13	1	5	
Stehen Ihnen Ressourcen zur Erhebung und Analyse von Performance Gaps zur Verfügung?	7	1	10	1
Finden Sie Betriebsoptimierung wichtiger als Performance Gap Analysen?	6	9	3	1

Abbildung 20: Auswertung Experteninterviews – Umgang mit Performance Gaps

Unter den Teilnehmenden konnte ein Bedürfnis nach einer präzisen Definition von Performance Gaps festgestellt werden. Die Unterscheidung zwischen der Performance von Einzelgebäuden und Gebäudeparks sowie individualisierbare Performance-Anforderungen fanden dabei Zustimmung (Abbildung 21).

	Ja	eher Ja	eher Nein	Nein
"Performance sollte je nach Gebäude und Nutzerbedürfnissen individuell definiert werden."	10	7	1	1
Definitionen: Gap 1. Art: "Zielabweichung eines Einzelgebäudes", Gap 2. Art: "Zielabweichung des Durchschnittswerts eines Gebäudeparks"	7	7	3	2

Abbildung 21: Auswertung Experteninterviews – Stimmen sie diesen Performance Definitionen zu?

Die Befragung ergab keine klare Unterscheidung bezüglich des Ausmasses der Betroffenheit der verschiedenen Stakeholder (Planer, Ausführende, Betreiber, Nutzer; Abbildung 22).

	Ja	eher Ja	eher Nein	Nein
"Planer sind weniger von Performance Gaps betroffen als Ausführende, Betreiber oder Nutzer."	1	8	3	7

Abbildung 22: Auswertung Experteninterviews – Betroffenheit der Stakeholder: Stimmen sie dieser Aussage zu?



Im Hinblick auf den Performance-Fokus wiesen rund 90% der Antworten den drei Performance Dimensionen Energie, Behaglichkeit und Betriebsaufwände eine hohe bis sehr hohe Relevanz zu (Abbildung 23, oben).

Der Betrachtung von Einzelgebäuden wie auch von Gebäudeparks wurde ebenfalls eine sehr hohe Bedeutung zugeordnet, wobei Einzelgebäude insgesamt als relevanter eingestuft wurden (Abbildung 23, Mitte).

Bezüglich der Energiebilanzgrenze war die Priorisierung nicht eindeutig (Abbildung 23, unten). Endenergie wurde durchwegs eine hohe bis sehr hohe Relevanz bescheinigt (17 von 19 Antworten). Nutz- und Primärenergie wurden als etwas weniger wichtig eingeschätzt (sehr hohe bis hohe Relevanz: lediglich 13 von 19 bzw. 12 von 19 Antworten).

		Sehr hohe Relevanz	Hohe Relevanz	Geringe Relevanz	Sehr geringe Relevanz
Welche Art von Performance?	Energie	8	10		1
	Behaglichkeit	7	10	1	1
	Betriebsaufwand (Kosten, Material...)	8	10		1
Welcher Fokus?	Einzelgebäude	7	11		1
	Gebäudeparks	9	5	2	3
Welche Bilanzgrenze für Energie?	Nutzenergie (z.B. SIA 380/1, GEAK)	3	10	4	2
	Endenergie (z.B. Energieabrechnungen, Gesamtenergiestatistik Bund)	11	6	1	1
	Primärenergie (z.B. Minergie, GEAK, 2000-Watt-Gesellschaft)	5	7	6	1

Abbildung 23: Auswertung Experteninterviews – Performance Dimensionen

Eine grundsätzliche Überprüfung der Performance von Gebäuden wurde von einer Mehrheit der Teilnehmenden befürwortet (14 von 19 Antworten; Abbildung 24). Wenn Betriebsversprechen nicht eingehalten werden, seien verbindliche Konsequenzen zu ziehen. Diese Bewertung ist als allgemeine Tendenz der Teilnehmenden zu verstehen, da keine vertiefende Befragung über (i) die Art der Performance-Versprechen, (ii) den Vollzug der Performance-Überprüfung und (iii) mögliche Konsequenzen bei Nichteinhalten der Performance-Ziele durchgeführt werden konnten.

	Ja	eher Ja	eher Nein	Nein
"Performance sollte durchgesetzt werden. Betriebsversprechen und Zertifikate sind periodisch zu überprüfen. Dann sind verbindliche Konsequenzen zu ziehen."	9	5	1	4

Abbildung 24: Auswertung Experteninterviews – Überprüfung von Gebäude Performance: Stimmen sie dieser Aussage zu?

Abbildung 25 zeigt die Bewertung von vorgeschlagenen Massnahmen hinsichtlich ihrer Relevanz für die Reduktion von Performance Gaps. Hier ist anzumerken, dass in der Beantwortung dieser Frage keine Angaben zur Priorisierung von Massnahmen möglich waren. Die Teilnehmenden wurden nach einer allgemeinen Einschätzung – unabhängig von einer genauen Definition des Performance Gaps – gefragt.

Betriebsoptimierung und Monitoring wurden eine sehr hohe bis hohe Relevanz zugewiesen (18 bzw. 16 von 19 Antworten; Abbildung 25, oben). Das Energiemanagement wurde als wichtiges Instrument



für die Reduktion von Performance Gaps gesehen (hohe bis sehr hohe Relevanz: 13 Antworten), während Prüfregime mehrheitlich eine geringe bis sehr geringe Relevanz attestiert wurde (11 von 19 Antworten).

Im Einsatz alternativer Bauprozesse sahen die Teilnehmenden mehrheitlich eine hohe bis sehr hohe Relevanz (Abbildung 25, Mitte). Vertraglich vereinbarte Performance-Ziele mit solidarischer Haftung sowie der Einsatz eines Risikomanagements erfuhren dabei weniger Zustimmung (7 bzw. 6 der 19 Antworten attestierten eine geringe bis sehr geringe Relevanz).

Den Themen rund um eine Datenkultur im Bauwesen wurde mehrheitlich eine hohe bis sehr hohe Relevanz zugeordnet (16 von 19 Antworten; Abbildung 25, unten).

Während das technische Monitoring und, in etwas geringerem Ausmass, der Einsatz von Building Information Models, mehrheitlich als relevant angesehen wurden, herrschte keine Einigkeit über die Notwendigkeit eines repräsentativen Messnetzes für den Schweizer Gebäudepark: 10 von 19 Antworten attestierten eine hohe Relevanz, 8 von 19 hingegen eine geringe bis sehr geringe Relevanz (Abbildung 25, unten).

Eine geringe bis sehr geringe Relevanz in Hinblick auf die Reduktion von Performance Gaps wird der Blockchain-Technologie zugewiesen (12 von 18 Antworten; Abbildung 25, unten).

		Sehr hohe Relevanz	Hohe Relevanz	Geringe Relevanz	Sehr geringe Relevanz
Welche Instrumente?	Betriebsoptimierung (fachkundige Begutachtung von Gebäuden)	14	4	1	
	Gebäude- und Anlagenmonitoring (automatisierte Beobachtung)	10	6	3	
	Energiemanagement (institutionalisierte Prozesse)	4	9	6	
	Prüfregime (z.B. streng einzuhaltende Grenzwerte, analog Fahrzeugkontrolle)	2	6	8	3
Neue Wege im Bauprozess	Definieren der Leistungen des Gebäudes kommt vor der technischen Spezifikation ("Performance Based Building Design")	7	8	2	2
	Vertraglich vereinbarte Performance-Ziele mit solidarischer Haftung mindestens bis und mit der Inbetriebnahme („Integrated Project Delivery“)	6	6	4	3
	Risikomanagement auch für Performance Risiken	6	7	5	1
Digitalisierung im Bauwesen	Datenkultur: Thematisieren von Qualität, Transparenz, Interpretation, Schutz, Pflege, Sicherheit, Eigentum, Nutzung und Verwertung von Daten	7	9	3	
	Building Information Modeling (BIM)	3	9	3	3
	Technisches Monitoring von Gebäuden (TMon)	7	9	2	
	Gezieltes Monitoring des Schweizerischen Gebäudeparks (repräsentatives Messnetz)	1	10	5	3
	Blockchain-Technologie (effizientes Sicherstellen einer nicht fälschbaren, vertraulichen Datenbasis und von automatisch durchsetzbaren Verträgen)	2	4	6	6

Abbildung 25: Auswertung Experteninterviews – Massnahmen zur Reduktion von Performance Gaps



Am Ende der Umfrage stand es den Teilnehmenden frei, ergänzende Kommentare anzubringen. Nachfolgend werden alle sieben eingegangenen Kommentare wiedergegeben:

- „Der Begriff Performance Gap ist nicht klar genug definiert. [...]“
- „[...] Die Berechnungen sind lediglich dazu da, dass Gebäude mit den gleichen Spielregeln gebaut werden. Sie sind keine Vorhersage von Verbräuchen!“
- „CO₂-Emissionen und nicht-erneuerbare Endenergie wären die Hauptzielgrößen. Primärenergie ist insbesondere bei der Elektrizität dynamisch und somit schwer zu fassen.“
- „Für mich ist wichtig, dass der Performance Gap in fürs Klima relevanten, absoluten Zahlen kommuniziert wird und nicht als prozentuale Abweichung. [...] Es sind Systeme gefragt, welche immer noch effizient, günstig im Unterhalt, hygienisch und komfortabel sind, auch wenn der Nutzer sich nicht zu 100% an die Vorgaben hält.“
- „Mir fehlt leider bei den Instrumenten die Nutzersicht. Für mich erklärt sich ein Teil des Performance Gaps mit dem mangelnden Interface, mit dem Nutzer ihr Energieverhalten regeln können. [...]“
- „[...] BIM ist eine Methode, optimiert alleinstehend jedoch genau nichts, da immer der Mensch dahinter steht, welcher wiederum nur an Zielen und Softfacts messbar ist.“
- „[...] Regelwerke bzw. Vorschriften werden das Problem nicht vereinfachen, es braucht vermehrt Pflichtbewusstsein auf Planerseite und „Berufsstolz“ der Betreiber die Probleme gemeinsam lösen zu wollen!“



5 „GapNavi“: Handlungsempfehlungen

Der vorliegende Abschnitt präsentiert eine Synthese der Erkenntnisse aus den vorherigen Abschnitten in Form von Handlungsempfehlungen für den Umgang mit Performance Gaps im schweizerischen Gebäudepark.

Der Schwerpunkt liegt auf dem energetischen Performance Gap. Jedoch können unsere Handlungsempfehlungen auch auf die Performance-Aspekte Behaglichkeit und Betriebskosten angewendet werden.

Wie sich dies bei anderen komplexen Sachverhalten bewährt hat, orientierten wir uns bei der Ausarbeitung unserer Handlungsempfehlungen an den drei Aspekten „Verstehen“, „Erfassen“ und „Lenken“. Die sich daraus ergebenden Handlungsempfehlungen deckten in unterschiedlichem Mass diese drei Aspekte ab. Wir präsentieren sie im Rahmen von drei Schwerpunktthemen: „Gemeinsames Verständnis“, „Open Source Software“ und „Schweizerisches Gebäudeparkmessnetz“.

In den nachfolgenden Unterabschnitten gehen wir der Reihe nach auf die drei Schwerpunktthemen ein. Wir legen jeweils zuerst die Motivation für die Auswahl eines jeden Schwerpunktthemas dar, gefolgt von der Vorstellung der zugehörigen Handlungsempfehlungen. Letztere werden ebenfalls diskutiert und verschiedentlich mit Beispielen vertieft.

In Anbetracht des sehr umfangreichen Materials haben wir uns vielerorts nur auf die wesentlichsten Aussagen beschränkt. Der Abschnitt soll als Wegweiser und als Diskussionsgrundlage und Startpunkt für weitere Projekte dienen.

5.1 Gemeinsames Verständnis

5.1.1 Motivation

Das Schaffen eines gemeinsamen Verständnisses zu den Themen Gebäudeperformance und Performance Gaps beinhaltet, zu allererst, die Klärung der Begriffe. Wir denken, mit den vorangehenden zwei Abschnitten die Grundlage dafür geliefert zu haben.

Die gemeinsame Sprache vorausgesetzt, kann in einem zweiten Schritt über die Inhalte diskutiert werden. Wie nachfolgend dargelegt, erachten wir diesen Schritt als wesentlich anspruchsvoller:

- In einem kürzlich publizierten Visionspapier des BFE [117] sollen einerseits klare Zielvorgaben für die Endenergie gesetzt, andererseits gleichzeitig die Labels SNBS, Minergie und 2000-Watt-Areal gefördert und koordiniert werden, die sich an der Primärenergie orientieren. Dies birgt unserer Meinung nach Potential für Zielkonflikte. Mit welcher Gewichtung oder Priorität sind die beiden Zielgrössen Endenergie versus Primärenergie im schweizerischen Gebäudepark zu verfolgen?
- Zweitens wird ein „Effizienzpfad“ gefördert/gefordert [33, 34], und es werden entsprechende Massnahmen für die Gebäudetechnik vorgeschlagen [22, 84]. Wie soll der Erfolg dieser Massnahmen am besten überprüft werden?
- Ein dritter Diskussionspunkt ist die Wahl von Energiegrenzwerten und Energiebilanzgrenzen in Performance Gap-Analysen.

Wie weiter oben (Abschnitt 3) gezeigt wurde, ist, erstens, die Gebäudeperformance, eine mehrdimensionale Grösse. Zweitens gibt es keinen Grund, warum nicht auch bei Performance Gap-Analysen für jedes Gebäude, innerhalb gewisser Leitplanken, je nach Nutzung und gemäss den Prioritäten und Risikopräferenzen der Stakeholder, individuelle Performance-Ziele definiert werden könnten.



Was bedeutet diese in unseren Augen begrüßenswerte Möglichkeit für die Vergleichbarkeit von Gebäudeperformance? Sollten fixe Grenzwerte (aus der Planung?) oberste Priorität genießen, etwa analog dem maximal zulässigen Schadstoffausstoss von Fahrzeugen, und dann auch entsprechend durchgesetzt werden?

- Ein weiterer zu berücksichtigender Punkt ist die Eigendynamik des Begriffes Performance Gap. So wird in der Roadmap des Swiss Competence Center for Energy Research on Future Energy Efficient Buildings & Districts (SCCER FEEB&D [139]) die Reduktion des Performance Gaps in Gebäuden als ein Forschungsschwerpunkt genannt, der in den verschiedenen uns vorliegenden Studien des SCCER FEEB&D denn auch intensiv bearbeitet wird [10, 51, 52, 133, 136]. Keine dieser Studien gibt jedoch eine *exakte* Definition des jeweils betrachteten Performance Gaps, und vor allem nicht, warum ausgerechnet dieser Gap im Zentrum des Interesses zu stehen kommt.

Insgesamt scheint sich jedoch das folgende Vorgehen etabliert zu haben: Der Fokus liegt auf dem Performance Gap „Planungsstandard“ (siehe Abschnitt 3.1); als Vergleichsgrösse dienen die Berechnungen zum Heizwärmebedarf (= Nutzenergie) nach SIA 380/1; für die Bewertung grösserer Gebäudebestände werden entweder Mittelwerte oder Mediane verwendet; die verschiedenen Unsicherheiten werden kaum thematisiert; die Umrechnung zwischen End- und Nutzenergie erfolgt unter Verwendung zeitlich konstanter Nutzungsgrade.

Hier seien weder die Notwendigkeit für ein facettenreiches, breit angelegtes und teilweise auch lenkendes Vorgehen seitens der Behörden und des Regulators, noch die Wahrung der wissenschaftlichen Freiheit in Frage gestellt. Eine zielgerichtete Diskussion tut unserer Ansicht nach jedoch Not.

5.1.2 Diskussionsrahmen

Wie in Abschnitt 3.2 dargestellt, ist es schlichtweg unmöglich, die Anliegen der verschiedenen Stakeholder im Hinblick auf Performance Gaps zu priorisieren. Der vorhandene Zielpluralismus verlangt unseres Erachtens nach einem absichtsvollen Umgang mit Zielkonflikten und der Kompromissfindung im Rahmen eines sozialen Prozesses.

Durch eine breitere Diskussion können Begriffsdefinitionen gefestigt, die bisherigen Studienresultate eingeordnet, und das Thema „Performance des schweizerischen Gebäudeparks“ frisch angegangen werden, was langfristig sicherlich im Interesse der Allgemeinheit liegt:

Empfehlung 1

Eine breite Diskussion über Performance-Ziele, Performance Gap-Definitionen und die daraus folgenden Massnahmen für den schweizerischen Gebäudepark führen

Die Interessen der Stakeholder lassen sich heute in die miteinander zusammenhängenden Kategorien „kompetitiver Vorteil“, „Kosten“, „Qualität“, und „Zeit“ einordnen. Um in Zukunft eine differenzierte Betrachtung und Behandlung von Performance Gaps zu ermöglichen, schlagen wir vor:

Empfehlung 2

Die reale Gebäudeperformance als eigenständige Bewertungskategorie für Gebäude und Gebäudeparks etablieren



Heute wird die erwartete (energetische) Gebäudeperformance meist durch den SIA 380/1-Nachweis oder durch die Vergabe von Labels kommuniziert. Unseres Erachtens sind der Nachweis wie auch die gängigen schweizerischen Gebäudelabels als Qualitätsversprechen und Umsetzungsvorgaben anzusehen, die bei der Planung und Erstellung/Renovierung eines Gebäudes einzuhalten sind.

Im Betrieb soll aber ein Gebäude unserer Meinung grundsätzlich vom idealtypischen „Arbeitspunkt“ (gemäss SIA 380/1 oder einem bestimmten Label) abweichen dürfen. Das Vorliegen solcher Abweichungen ist ja auch Realität (Abbildung 12; [9, 10, 50]). Nur können diese Abweichungen heute, wegen eines noch fehlenden, allgemein akzeptierten Rahmens zur Handhabung von Gebäudeperformance, Performance Gaps und Unsicherheiten, nicht gut eingeordnet werden.

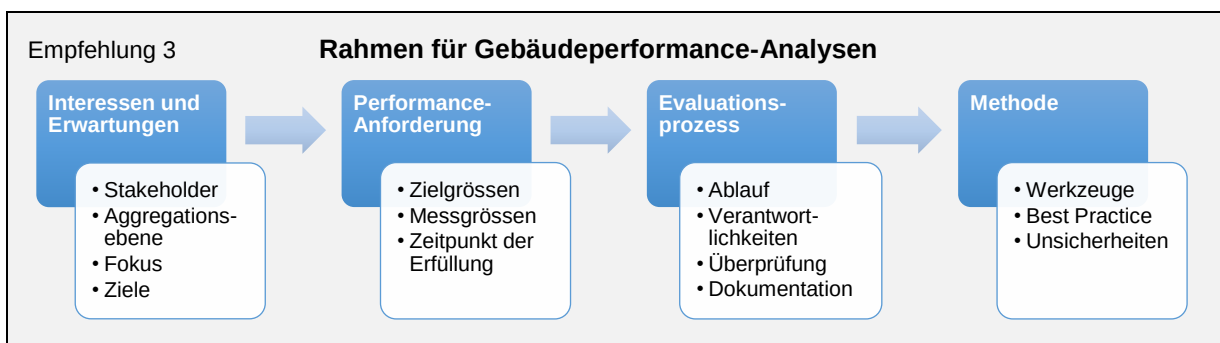
Mit dem Vorschlag, die reale Gebäudeperformance als eigenständige Grösse zu betrachten, sollen planerische Nachweise und Labels nicht ersetzt, sondern sinnvoll ergänzt werden. Die bereits vorhandenen Vorgaben sollen in individuell abzumachende Performance-Ziele einfließen können. Diese Ziele sind aber unbedingt als von einem Nachweis oder einem Label separate Grössen anzusehen.

Dieses Vorgehen wird zusätzliche Flexibilität für Bauherren, Gebäudebesitzer und Nutzer bringen und stellt unseres Erachtens eine wichtige Voraussetzung für die differenzierte und effiziente Lenkung des schweizerischen Gebäudeparks dar. Die Kriterien für die noch tolerierbaren Abweichungen wie auch das Vorgehen zu ihrer Überprüfung sind dabei wie erwähnt, explizit auszuhandeln (Empfehlung 1).

Idealerweise wird die Diskussion in eine Bündelung der Kräfte und die effiziente Bearbeitung der schliesslich ausgewählten Schwerpunkte münden. Die Auseinandersetzung mit energetischen Performance Gaps kann dabei auch mit Vorteil über das heute dominierende Thema „Planungsstandards“ hinaus auf die mindestens so wichtigen Aspekte „Bauprojektziel“ und „Entwicklungspfad“ (siehe Abschnitt 3.1) ausgeweitet werden.

5.1.3 Methodische Aspekte

Die vorgeschlagene „Verselbständigung“ des Themas Gebäudeperformance verlangt nach entsprechenden Werkzeugen und Methoden für die praktische Umsetzung. Unabhängig von der spezifischen Fragestellung kann ein allgemeines Vorgehen für die Definition und Überprüfung von Performance aufgestellt werden, das in Zukunft mit Vorteil konsequent angewendet werden sollte (vgl. [3]):



Bezeichnend ist, dass am Anfang (i) die Interessen und Erwartungen der involvierten Akteure stehen. Daraus werden (ii) die konkreten Performance-Anforderungen definiert, und (iii) ein Evaluationsprozess für die Einhaltung und Überprüfung dieser Anforderungen festgelegt. In einem letzten Schritt (iv) werden, je nach Performance-Aspekt, passende Erhebungs- und Bewertungsmethoden definiert.

Wie in Abschnitt 4.7 dargelegt kann jede Gebäudeperformance-Analyse als Teil eines Regelkreises verstanden werden, wobei verschiedene Rückkopplungsschleifen, über die Lebenszyklusphasen hinweg oder im Gebäudebetrieb, unterschieden werden können. Die Performance-Analyse dient in allen



Fällen der Erhebung eines Ist-Zustands. Ausgehend von diesem wird der Performance Gap als Abweichung „Soll minus Ist“ ermittelt und als Ausgangspunkt für eventuelle Korrekturmassnahmen verwendet.

Orientierungshilfen und wichtige Begriffsdefinitionen für das präzise Festlegen von Performance-Anforderungen, wie sie in Empfehlung 3 vorkommen, finden sich in den Abschnitten 3.1 bis 3.3. Orientierungshilfen zur Definition von Performance Gap-Indikatoren finden sich in Tabelle 1.

Bei der Zielformulierung gilt es, die richtigen Fragen zu stellen. Für die drei Performance-Aspekte Energie, Behaglichkeit und Betriebskosten sollte von den folgenden Fragestellungen ausgegangen werden:

Empfehlung 4	Fragestellungen für Performance Gaps in Gebäudeparks		
<u>Performance-Aspekt</u>	<u>Systemstatus</u>	<u>Erfüllungsgrad</u>	<u>Ausprägungsgrad</u>
<i>Energie</i>	Wie ist der durchschnittliche Energieverbrauch? Wie gross ist die durchschnittliche Abweichung vom Grenzwert?	Wie viele Gebäude überschreiten den Grenzwert?	Wenn der Grenzwert überschritten wird, wie gross ist die Überschreitung?
<i>Behaglichkeit</i>	Wie hoch ist die durchschnittliche Zufriedenheit?	Wie viele Nutzer sind unzufrieden?	Wie unzufrieden sind die Unzufriedenen?
<i>Betriebskosten</i>	Wie hoch sind die durchschnittlichen Kosten?	Wie viele Gebäude überschreiten den Grenzwert?	Wenn der Grenzwert überschritten wird, wie gross ist die Überschreitung?

Der Systemstatus erfasst die „mittlere Performance“ und wird durch den (gewichteten) Durchschnittswert oder auch den Median der Gesamtperformance oder Performance-Abweichung aller Gebäude erfasst. Bei der Energie ist diese Grösse wichtig für die Überprüfung der Einhaltung des Effizienzpfads eines Gebäudeparks.

Der Erfüllungsgrad („Compliance Level“) dokumentiert den Anteil an Gebäuden, welche die vorgeschriebene Performance nicht erreichen. In der Praxis kann ein Erfüllungsgrad von 100% ausser bei extrem grosszügigen Vorgaben kaum je erreicht werden. Ein hoher Erfüllungsgrad ist ein Hinweis darauf, dass eine Verbesserung des Systemstatus nur noch durch sehr gezielte Massnahmen erreicht werden kann.

Der Ausprägungsgrad (Überschreitungskostenindex, „Severity Index“) quantifiziert die Grösse des noch brachliegenden Einsparpotentials (Treibhausgasemissionen, Kosten etc.) und gibt somit einen Hinweis auf die Wirtschaftlichkeit/Ergiebigkeit eventueller Korrekturmassnahmen.

Aufgrund der Bedeutung aber auch der besonderen Komplexität energetischer Performance-Analysen (Tabelle 4, Tabelle 8, Abschnitt 4.5.2) fassen wir untenstehend noch einige zusätzliche, spezifische Empfehlungen für die Definition energetischer Performance Gaps zusammen:



Empfehlung 5

Checkliste für die Definition energetischer Performance Gaps auf Performance Gap-Analysen anwenden

Aspekt

Beschreibung

Gap 1. vs. 2. Art

Unterscheidung Betrachtungsebene „Einzelgebäude“ versus „Gebäudepark“

Vergleichstyp

„Planungsstandard“, „Bauprojektziel“ oder „Entwicklungspfad“ (siehe Abschnitt 3.1). Die verwendeten Grenz-, Projekt- oder Referenzwerte sind klar auszuweisen

Systemgrenze

„Nutzenergie“, „Endenergie“ oder „Primärenergie“ (siehe Abbildung 1, Tabelle 4). Die Parameterwerte zur Berechnung von Primär- oder Nutzenergie sind klar auszuweisen

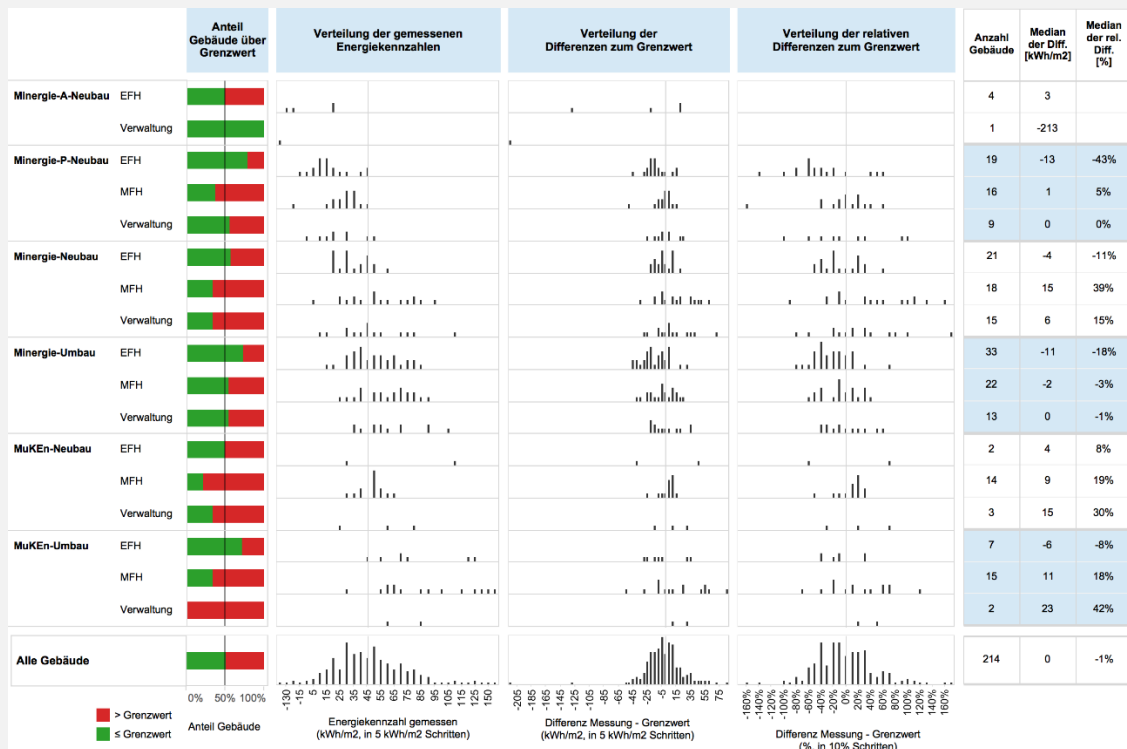
Quervergleiche

Direkte Quervergleiche von Primär- und Nutzenergie-Gaps sind nur möglich, wenn die verwendeten Parameterwerte für die Primärenergiefaktoren und die Nutzungsgrade wie auch die Gap-Definitionen konsistent sind

Wegen der vielen Freiheitsgrade bei der Definition eines Performance Gaps ist es bei Performance Gap-Studien zudem wichtig, nicht nur die Definition, sondern auch die verwendete Datenbasis und die Analysemethoden transparent und nachvollziehbar zu dokumentieren.

Empfehlung 6

Datenbasis bei Gebäudeparkanalysen nachvollziehbar visualisieren



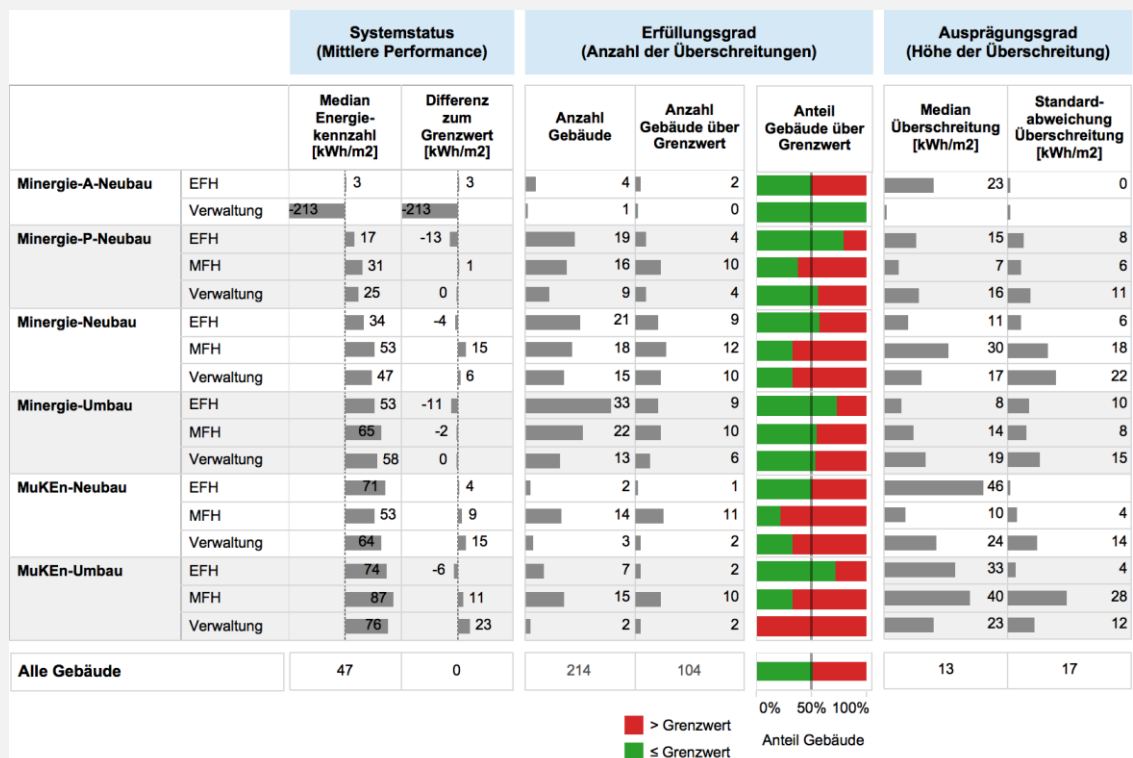


Unsere Empfehlung 6 zeigt anhand einer Neuauswertung der Datenbasis aus der schweizerischen „Erfolgskontrolle Gebäudestandards 2014-2015“ [9] ²⁶ eine übersichtliche, kompakte und gleichzeitig detailreiche Darstellung des Ist-Zustandes und der Abweichungen „Soll minus Ist“ bei der Performance Gap-Analyse von Gebäudeparks.

Der Vorschlag beinhaltet die folgenden Informationen: Für jeden Gebäudestandard und jede Nutzungskategorie wird auf der linken Seite der Grafik als erstes der Anteil der Gebäude dargestellt, die den Grenzwert einhalten (grün-rote Balken). Verwendet wird in diesem Beispiel eine einfache Zählung, ob die gemessene Energiekennzahl über oder unter dem Grenzwert liegt. In der Mitte finden sich Histogramme (zwecks besserer Übersicht ohne y-Achse für die Balkenhöhe), welche die Verteilungen der Originaldaten, sowie der absoluten und der relativen Abweichungen von den jeweiligen Grenzwerten anzeigen. Die senkrechte Linie zeigt den Median des Performance-Indikators (in diesem Fall: Energiekennzahl) für den gesamten Gebäudepark. Auf der rechten Seite werden tabellarisch der Stichprobenumfang sowie die Mediane der absoluten und relativen Abweichungen vom jeweiligen Grenzwert pro Gebäudestandard und Nutzungskategorie angegeben.

Der untere Teil der Grafik zu Empfehlung 6 enthält schliesslich eine Gesamtbetrachtung über alle 214 Gebäude der Stichprobe. Man beachte, dass diese aus methodischen Gründen nicht als repräsentativ für den schweizerischen Gebäudepark angesehen werden kann.

Empfehlung 7 Hauptresultate bei Gebäudeparkanalysen transparent ausweisen



²⁶ Es werden die wichtigsten Ergebnisse aus Tabelle 52 (S. 92), Tabelle 61 (S. 108) und Tabelle 64 (S. 112) aus [9] reproduziert. Die Gebäudekategorie „MuKEN-Umbau“ haben wir in unserer Darstellung nicht in Unterkategorien aufgespalten. Der Originaldatensatz wurde uns freundlicherweise vom BFE zur Verfügung gestellt.



Empfehlung 7 zeigt eine kompakte und umfassende Darstellung einer systematisch aufgebauten energetischen Performance Gap-Analyse gemäss Empfehlung 4 („Fragestellungen für Performance Gaps in Gebäudeparks“). Verwendet wird der gleiche Datensatz wie für Empfehlung 6.

Die Grafik zu Empfehlung 7 reproduziert einige der Resultate, die auch unter Empfehlung 6 rapportiert werden, enthält jedoch noch die folgenden zusätzlichen Informationen: „Systemstatus“: Median der Energiekennzahl pro Gebäudestandard und Nutzungskategorie; „Erfüllungsgrad“: Anzahl Gebäude über dem jeweiligen Grenzwert; „Ausprägungsgrad“: Median und Standardabweichung der jeweiligen Überschreitung.

Insgesamt zeigen die beiden Beispielgrafiken zu den Empfehlungen 6 und 7, dass in der „Erfolgskontrolle“ die Abweichungen von den Grenzwerten je nach Gebäudestandard, Nutzungskategorie und Gebäude (Performance Gap 1. Art) zwar stark variieren, dass aber für die verwendeten Gap-Definitionen bei der gesamten Stichprobe aller 214 Gebäude kein Performance Gap 2. Art (Betrachtungsebene Gebäudepark) auszumachen ist. Auf die statistische Signifikanz von Performance Gaps 1. Art wird noch im nachfolgenden Unterabschnitt eingegangen.

5.1.4 Abschliessende Bemerkungen

Unserer Ansicht nach ist es dringend notwendig, für die zukünftige Forschung, wie auch für die Umsetzung der schweizerischen Gebäudepark- und Energiestrategie Klarheit darüber zu erlangen, welche Performance Gaps und Performance-Ziele im schweizerischen Gebäudepark, und auch auf welche Weise, besonders aktiv angegangen werden sollten. Mit den Empfehlungen 3-7 scheint uns dafür eine gute Grundlage gegeben zu sein.

5.2 Open Source Software

5.2.1 Motivation

Performance Gap-Studien basieren auf Computerprogrammen, deren Funktionalität von einfachen Berechnungen bis hin zu komplexen Datenabfragen, statistischen Auswertungen und dynamischen Simulationen reicht. Alle diese Programme stellen Abstraktionen von realen oder mathematischen Sachverhalten dar, weswegen wir sie hier der Einfachheit halber unter dem Oberbegriff (Computer-) „Modelle“ zusammenfassen.

Im Internet existieren bereits verschiedene grosse Ablagen von frei zugänglichen Modellen (Tabelle 10). Im „Annex 60“-Projekt des „Energy in Buildings and Communities Programme“ der Internationalen Energieagentur [103], das als „Project 1“ der International Building Performance Simulation Association (IBPSA) [108] fortgesetzt wird, werden von einem internationalen, vielseitig zusammengesetzten Konsortium Open Source Software-Bibliotheken und Modelle für Gebäude- und dezentrale Energiesysteme entwickelt und getestet.

Hier plädieren wir nicht für eine weitere Ablage von Computern Modellen oder für die Entwicklung allgemeiner Software, sondern für *eine gezielte Evaluation bestehender Modelle, Programme und Komponenten zwecks Erstellen eines kleinen Satzes ausgewählter Softwarebausteine, die spezifisch an die schweizerischen Bedingungen angepasst sind und praxisnah zur Verfügung gestellt werden:*

Empfehlung 8

Eine Auswahl von praxisnahen Open Source Softwarebausteinen für Performance Gap-Analysen aufbauen und aktiv bewirtschaften

So sollte zum Beispiel nach und nach zu jeder komplexeren Norm und Richtlinie (z.B. SIA 380/1, SIA 2044, SIA 380/4, SIA 2031, GEAK) qualitätsgeprüfte Open Source Softwarebausteine oder auch ganze Modelle zum Gebrauch in Gebäudeperformance-Studien zur Verfügung gestellt werden.

Diese frei zugänglichen Softwareprodukte könnten denn auch als Referenz für kommerzielle Softwareprogramme, wie sie zum Beispiel für die Planung und den Vollzug verwendet werden, dienen.

Unser Vorschlag ist im Detail wie folgt motiviert:

- *Transparenz:* Wie aus unserer Literatur-Review (Abschnitt 4) klar hervorging, hängt die Beurteilung von Performance Gaps entscheidend von den eingesetzten Auswerteverfahren (= Modellen) und den darin getroffenen Annahmen (= Parameterwerten und Eingangsdaten) ab. Dies ist umso mehr der Fall auf der Gebäudeparkebene, wo im Vergleich zur Betrachtung von Einzelgebäuden zusätzliche Annahmen und Komplexität auf den Plan treten. Indem die verwendeten Verfahren und Annahmen transparent dargelegt werden, wird die Dokumentation der Resultate nachvollziehbar und überprüfbar, was eine kritische Diskussion überhaupt erst ermöglicht. Ein genau in diese Richtung zielendes „Transparenzgebot“ für Analysen und Gutachten zur Wirtschaftlichkeit energieoptimierter Gebäude findet sich bei Lützkendorf und Ensling [67].
- *Flexibilität:* Die modernen Informations- und Kommunikationstechnologien ermöglichen hochgradig individualisierte Produkte und Dienstleistungen. Die meisten Gebäude im schweizerischen Gebäudepark sind bereits Unikate, und es ist denkbar, dass die Unterschiede in Planung, Bau, Betrieb und Nutzung in Zukunft weiter zunehmen. Das Lenken und Überprüfen von stark individualisierten Portfolios verlangt eher nach Prozessrichtlinien als nach fixen Randbedingungen, womit Modellrechnungen an Bedeutung gewinnen.

- *Effizienz*: Normen, technische Berichte und wissenschaftliche Publikationen dokumentieren Vorgehensweisen und mathematische Modelle (Formeln), während für die Praxis die zugehörigen Softwarebausteine und Computermodelle vorrangig sind. Die theoretischen Grundlagen und die Softwareprodukte konsistent zu halten, benötigt erheblichen Aufwand und Organisation. Durch eine Bündelung der Kräfte kann die Effizienz in der Umsetzung von Normen und „Good Practice“-Vorgehen in Forschung und Praxis verbessert werden. So stehen in den USA seit vielen Jahren kostenlose, ständig weiterentwickelte Open Source Softwareprodukte für Compliance-Prüfungen zur Verfügung [45, 81].
- *Korrektheit*: Bei der Umsetzung eines an sich korrekten mathematischen Modells in ein Computermodell oder auch beim Betreiben des Computermodells können sich schnell Fehler einschleichen. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn ein Modell eine hohe Komplexität und viele Freiheitsgrade aufweist, was es erschwert, alle auftretenden Fälle zu testen oder falsche Resultate als solche zu erkennen. Nur mit vollständiger Kenntnis des Modells können Fehler richtig erkannt und verstanden werden, weswegen der Quellcode möglichst offenzulegen ist.
- *Präzision*: Hohe Planungsreserven wie auch Unterdimensionierungen (z.B. aufgrund einer Fehleinschätzung der lokalklimatischen Rahmenbedingungen) können eine wichtige Ursache für Performance Gaps darstellen (Sun et al. [8], Feustel [62]). Ein heute weit verbreitetes Vorgehen bei der Dimensionierung gebäudetechnischer Anlagen besteht darin, die normierten Standardnutzungsdaten zu verwenden und das Resultat situativ mit Sicherheitszuschlägen zu ergänzen. Die Verwendung besserer Schätzverfahren basierend auf projektspezifischen Szenarien- und Sensitivitätsanalysen ermöglicht eine viel präzisere und robustere Dimensionierung. Entsprechende, einfach in der Praxis einzusetzende Werkzeuge wären hier hilfreich (vgl. Boxer et al. [26] und Maderspacher [79]).
- *Schutz vor Fehlentscheiden*: Die zunehmende Verwendung automatisierter Mess-, Auswerte- und Entscheidungsverfahren birgt – nebst vielen Vorteilen – auch in der Baubranche ein steigendes Potential für Verzerrungen, Fehlentscheide oder auch Missbräuche. Unsere Empfehlung 8 ist daher im Einklang mit den Empfehlungen nach Transparenz und Rechenschaftspflicht algorithmischer Entscheide, wie sie kürzlich von der Association for Computing Machinery der USA [40] und, innerhalb eines weiter gesteckten Rahmens, Europas [43] formuliert wurden.

Im Weiteren gehen wir auf zwei Aspekte ein, die in der schweizerischen Performance Gap-Diskussion bisher kaum diskutiert wurden. Dies sind der Umgang mit Unsicherheiten, und die Entwicklung von Modellen für Gebäudeparks.

5.2.2 Unsicherheitsanalysen

Empfehlung 9

Die Belastbarkeit und Repräsentativität von Performance Gap-Analysen mittels Unsicherheitsanalysen überprüfen

Es folgen zwei Beispiele für die Wichtigkeit von Unsicherheitsanalysen. Sie illustrieren jeweils die Effekte systematischer und zufälliger Fehler auf der Ebene Einzelgebäude.

Im ersten Beispiel betrachten wir den Performance Gap „Planungsstandard“ bei zwei bau- und nutzungsgleichen Gebäuden mit zwei unterschiedlichen Wärmeerzeugern („Wärmepumpe“ und „Gaskessel“). Bei beiden Gebäuden wird der gemessene Endenergieverbrauch der Heizungsanlage auf die Nutzenergie zurückgerechnet. Diese Rückrechnung kann basierend auf (i) den für die Planung vorgeschriebenen oder (ii) den empirisch erhobenen Werten für die Jahresarbeitszahl (JAZ) der Wärmepumpe, beziehungsweise für den Jahresnutzungsgrad (JNG) des Gaskessels, erfolgen.



Wenn der JAZ-Wert gemäss Planungsvorgabe des Minergie-Produktreglements verwendet wird, zeigt das Gebäude mit der Wärmepumpe für den Nutzenergieverbrauch keinen Performance Gap, während beim Einsetzen des empirisch erhobenen JAZ-Wertes ein Gap vorliegt. Das Gebäude mit dem Gaskessel hingegen weist bei Verwendung des JNG-Planungswertes einen Gap auf, während beim Einsetzen des empirisch erhobenen JNG-Wertes dies nicht der Fall ist (Tabelle 12).

Wärme- erzeugung	Zielwert Nutzenergie kWh/m ²	Messwert Endenergie kWh/m ²	Annahme Nutzungsgrad		Nutzenergie berechnet	Zielwert Nutzenergie eingehalten?
			Quelle	JAZ bzw. JNG [-]		
Wärmepumpe	100	30	Planung	3.1 ²⁷	93	Ja
			empirisch	3.88 ²⁸	116	Nein
Gaskessel	100	110	Planung	0.95 ²⁹	105	Nein
			empirisch	0.86 ³⁰	95	Ja

Tabelle 12: Beispiel für den Effekt systematischer Fehler bei der Evaluation des Performance Gap „Planungsstandard“: Das Verwenden vorgeschriebener Jahresnutzungsgrade („Planung“) zieht Fehlschlüsse in der Bewertung des Betriebs nach sich.

Das Beispiel illustriert, dass die Verwendung von Standardwerten, die für die Planung festgelegt wurden und absichtsvoll gewisse Reserven enthalten können, nicht zwingend sinnvoll für eine Bewertung des Betriebs sind. So bedeutet bei der JAZ das Einbauen von Planungsreserven eine Herabsetzung des JAZ-Werts, damit der Primärenergiebedarf nicht unterschätzt wird.

Im gezeigten Beispiel ergeben sich gravierende Fehlschlüsse für die Bewertung des Betriebs, weil die jeweils eingesetzten planerischen Vorgaben für die JAZ und den JNG über bzw. unter den jeweiligen empirisch erhobenen Werten zu liegen kommen.

Hier haben wir die unvermeidbaren Messungenauigkeiten wie auch die Unsicherheiten und die zeitliche Variabilität der Nutzungsgrade nicht weiter berücksichtigt. Der Einbezug weiterer Unsicherheiten würde es erlauben, Fehlerintervalle zu quantifizieren. Dies würde aber nichts an der grundlegenden, hier aufgezeigten Problematik ändern. Das gleiche gilt für das Zusammenfassen mehrerer Gebäude auf Ebene Gebäudepark, da die in diesem Beispiel gezeigten systematischen Fehler durch Aggregation oder Mittelung nicht reduziert werden können.

In unserem zweiten Beispiel untersuchen wir den Effekt zufälliger Fehler auf die Detektion des Performance Gaps im Heizwärmeverbrauch eines kleinen Gebäudeparks bestehend aus neun Gebäuden, wie am Gebäudetechnik Kongress 2017 [89] vorgestellt. Für die Unsicherheitsanalyse trafen wir die folgenden konservativen Annahmen: Unsicherheit von 15% für den berechneten Projektwert aus der Planung und von 5% Messungenauigkeit für den gemessenen Wert.

Abbildung 26 zeigt oben die Originaldaten und unten das Resultat unserer Unsicherheitsanalyse. Die gezeigten 95% Vertrauensintervalle deuten darauf hin, dass für vier der neun Objekte keine statistisch signifikanten Abweichungen von Null, also kein Performance Gap 1. Art vorliegt (Berechnung und Sensitivitätsanalyse siehe Anhang E).

²⁷ Wärmepumpe Erdsonden; Minergie Produktreglement 2017, Anhang F

²⁸ Miara et al, 2011: Wärmepumpen Effizienz, p. 26: mittlere Arbeitszahl von 56 Erdreich-Wärmepumpen

²⁹ Gasfeuerung kondensierend; Minergie Produktreglement 2017, Anhang F

³⁰ Wolff et al, 2004, Betriebsverhalten von Heizungsanlagen mit Gas-Brennwertkesseln, p.39: mittlerer Jahresnutzungsgrad von 60 Anlagen



Das rote Band in Abbildung 26 (unten) zeigt den Durchschnittswert der Abweichungen aller neun Gebäude ($12.1 \text{ kWh/m}^2\text{a}$) und dessen 95% Vertrauensintervall. Dieses beträgt unter der Annahme von voneinander unabhängigen Unsicherheiten für alle betrachteten Projektwerte und Messfehler $3.6 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Das Unsicherheitsintervall liegt über der Nulllinie, was klar darauf hindeutet, dass für den Gebäudepark als Ganzes ein Performance Gap 2. Art vorliegt.

Dieses zweite Beispiel illustriert die Wichtigkeit einer Unsicherheitsanalyse für die differenzierte Betrachtung eines Gebäudeparks, sowie dass innerhalb eines Gebäudeparks je nach Aggregation mit sehr unterschiedlichen Resultaten zu rechnen ist (siehe auch die Grafik zu Empfehlung 7).

Performance Gap

Heizwärmeverbrauch von Wohnsiedlungen

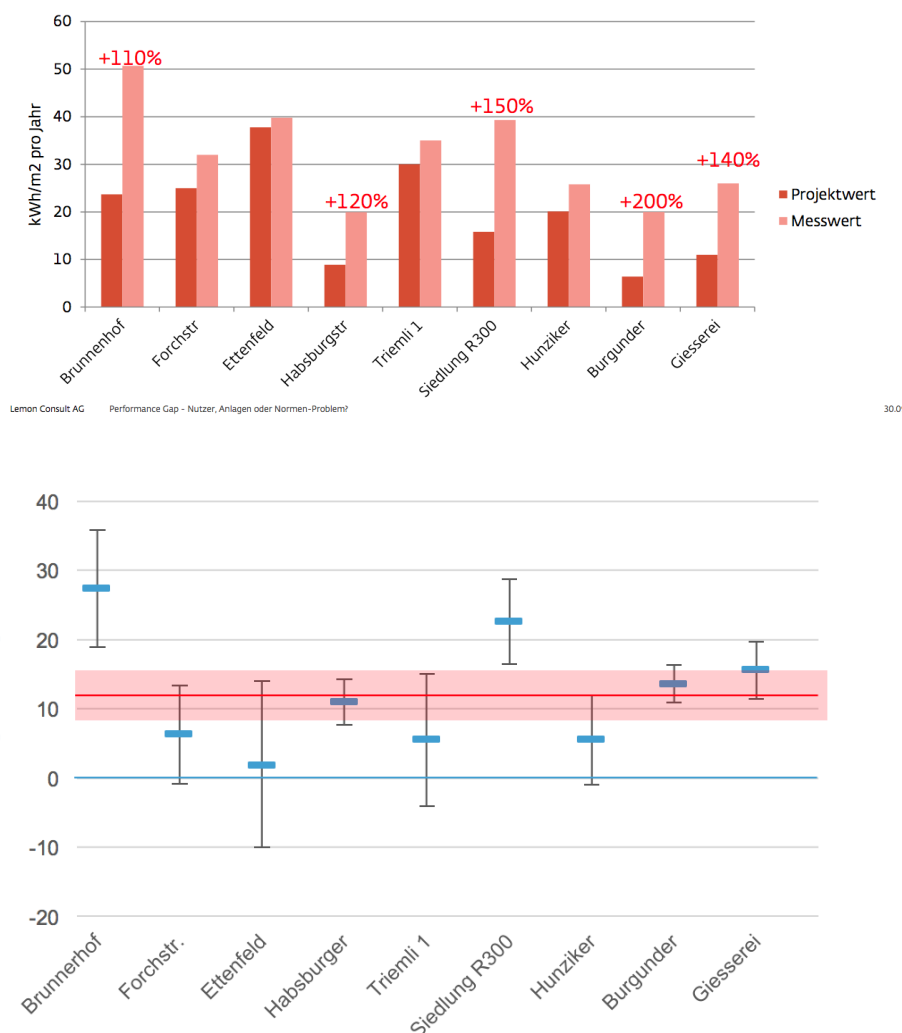


Abbildung 26: Beispiel für die Berücksichtigung von Unsicherheiten bei Performance Gap-Analysen. Oben: Datengrundlage, [89]. Unten: Berechnete Differenzen (blaue Querbalken) und Unsicherheitsintervalle (schwarze Linien) unter Berücksichtigung einer 15%-igen Unsicherheit des Projektwerts aus der Planung und einer Unsicherheit von 5% bei den Messwerten. Die Unsicherheitsintervalle wurden mittels Monte-Carlo Simulation (Konfidenzintervall 95%, Sampling Size 1'000'000, Details siehe Anhang E) bestimmt. Das rote Band in der Grafik unten zeigt die Unsicherheit der durchschnittlichen Abweichung von den Projektwerten.



Die beiden hier gezeigten Beispiele können im Prinzip in einem Tabellenkalkulator berechnet werden. Das Problem mit offenen, komplexen Systemen ist allerdings, dass eine Vielzahl von externen Einflüssen und internen Faktoren korrekt zu berücksichtigen und miteinander zu verknüpfen sind, so dass ein einziger „dummer“ Fehler genügt, um das gesamte Resultat in Frage zu stellen.³¹

In Performance Gap-Studien für Gebäudeparks sind eine Vielzahl, vielleicht zehntausende, von Gebäuden mit vielen unterschiedlichen Nutzungsgraden sowie systematischen und zufälligen, möglicherweise untereinander korrelierten Messfehlern zu berücksichtigen. Hier nehmen unseres Erachtens die Fehlerquellen und die Anforderungen an die Programmierer und Nutzer eines Modells (oder Softwarebausteins) zur Durchführung einer Unsicherheitsanalyse massiv zu, was für die Verfügbarkeit einer gut getesteten, robusten Open Source Software spricht.

Eine solche Software müsste eine wachsende Datenbasis nützlicher Parameterwerte (wie die JAZ und JNG in Tabelle 12) aus der Literatur zur Verfügung stellen, verschiedene Benutzereingaben auf ihre Plausibilität und Konsistenz hin überprüfen, Parametervarianten für kombinierte „Wenn-Dann“ und stochastischen Szenarien- und Sensitivitätsanalysen verwalten und generieren, die Propagierung der verschiedenen Unsicherheiten mittels Anwendung statistischer Formeln oder einer Vielzahl von Simulationen berechnen, und die Resultate auf verschiedenen Aggregationsebenen des Gebäudeparks korrekt zusammenfassen. Selbstverständlich müsste eine solche – bereits bestehende oder erst noch zu erstellende – Software vor ihrer Freigabe und nach jeder Anpassung mithilfe anderer Programme und spezifischer Testprozeduren gründlich getestet werden.

5.2.3 Schweizerisches Gebäudeparkmodell

Unsere nächste Empfehlung betrifft die energetische Modellierung des schweizerischen Gebäudeparks. Unserer Ansicht nach ist ein schweizweites Energiebilanzierungsmodell ein essentielles Werkzeug, um den Energieverbrauch, die Energieeffizienz und den CO₂-Ausstoss des Gebäudeparks zuverlässig evaluieren und gezielt lenken zu können.

Empfehlung 10

Ein Open Source Modell für die Modellierung und Simulation der Performance des schweizerischen Gebäudeparks entwickeln

Wie in Abschnitt 4.5.3 dargelegt existieren mehrere internationale Initiativen für die Modellierung von Gebäudeparks (Tabelle 10), wie auch etliche relevante schweizerische Arbeiten (Tabelle 11). Die Modellierung und Simulation des Energieverbrauchs des gesamten schweizerischen Gebäudeparks, insbesondere auch im Zusammenhang mit den verschiedenen Performance Gap-Fragestellungen (Abschnitt 3.1), steckt zwar erst in den Anfängen (Abschnitt 4.5.3.2). Wir denken jedoch, dass mit den heute vorliegenden Arbeiten eine gute Basis für die vorgeschlagene Modellentwicklung gegeben ist.

Jedes Modell stellt einen Kompromiss im Hinblick auf die drei Dimensionen „Richtigkeit“ (bzw. Allgemeingültigkeit), „Präzision“ und „Detailtreue“ dar³². In diesem Sinne ist auch ein schweizweites Energiebilanzierungsmodell sorgfältig auf den untersuchten Performance Gap-Typ und auf die jeweils eingesetzten Messkonzepte und die vorhandenen (oder noch zu erfassenden) Daten zur Schätzung der

³¹ 1996 stürzte die unbemannte Ariane 5 Rakete der ESA ab, da Software der Vorläuferrakete Ariane 4 übernommen wurde, ohne die abweichenden technischen Spezifikationen der neuen Rakete zu berücksichtigen. Neben Fehlern in der Software machen Experten auch fehlendes *Systems Engineering* (das operative Umfeld der Software) für den Absturz verantwortlich. https://de.wikipedia.org/wiki/Ariane_V88

³² „Richtigkeit“ = ein Mass für die zu erwartende systematische (mittlere) Abweichung vom wahren Wert, früher auch als „Bias“ bezeichnet; „Präzision“ = ein Mass für die zu erwartende Streubreite. Siehe auch ISO 5725 <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:5725:-1:ed-1:v1:en>. „Genauigkeit“ = Richtigkeit plus Präzision. Siehe auch <https://de.wikipedia.org/wiki/Genauigkeit>.



Modellparameter und zur Bereitstellung der Eingangsdaten zum Antreiben des Modells abzustimmen. Verschiedene Vorschläge und Empfehlungen zum Abgleich von Modellen und Daten werden beispielsweise im IEA Annex 53 [118] angegeben.

Unserer Meinung nach sollte das zu entwickelnde schweizerische Gebäudeparkmodell in erster Linie der Überprüfung der schweizerischen Energiestrategie 2050 dienen, also den Fokus auf den Performance Gap „Entwicklungspfad“ (Abschnitt 3.1) legen. Daraus ergeben sich die folgenden Spezifikationen:

- Das Modell sollte den Verbrauch von Primär -, End- und Nutzenergie, wie auch die wichtigsten Aspekte der Gebäudehülle, der Gebäudetechnik und der Nutzung abbilden. So sollte es den Elektro-, Wärme- und Kältebedarf sowie die wichtigsten Effizienzkennzahlen und Nutzungsgrade auflösen. In einer zweiten Phase wären die Behaglichkeit und, stark vereinfacht, auch die Betriebskosten zu berücksichtigen. Die Auflösung all dieser Kategorien ist nötig, um die Effekte verschiedener Lenkungsmaßnahmen, wie auch von verschiedenen Annahmen über die langfristige Technologieentwicklung und anderer dynamischer Einflüsse flexibel in den Simulationen abbilden zu können.
- Das Modell sollte eine realistische zeitliche Dynamik aufweisen. Die Dynamik von Neu-, Um- und Rückbau könnte mit einem Jahresschritt abgebildet werden, der Energieverbrauch hingegen sollte mit einem monatlichen Zeitschritt berechnet und dann auf Jahresebene aggregiert werden. Eine hohe räumliche Auflösung ist nicht mit erster Priorität anzustreben.

Der monatliche Zeitschritt würde unseres Erachtens einen guten Kompromiss zwischen der Erfordernis nach einer Darstellung des Jahreszyklus von Energiebedarf und (dezentraler) Energieerzeugung einerseits, und der Verfügbarkeit genügender Daten für die Kalibrierung, Überprüfung und Anwendung des Modells andererseits darstellen.

Die Auflösung des Jahreszyklus ist unseres Erachtens wichtig, um Energieverbrauchsszenarien getrennt nach Heiz- und Kühlsaison realitätsnah abbilden, sowie die zu erwartenden Verschiebungen im Heiz- und Kühlenergiebedarf aufgrund des Klimawandels nachvollziehen zu können. Die monatliche Auflösung dürfte auch für die Energiewirtschaft von Interesse sein.

- Die Berechnungsergebnisse sollten auf der Aggregationsebene „Schweiz“ eine hohe Richtigkeit und eine Präzision in der Grössenordnung von 5-10% der angestrebten Abnahme des gesamtschweizerischen Gebäudeenergieverbrauchs bis 2050 aufweisen. Diese Vorgabe definiert den Umfang und die Qualität der zu verwendenden Kalibrierungs- und Eingangsdaten (siehe Empfehlung 12). Auf der Ebene Einzelgebäude sollte das Modell zu Gunsten einer grösseren Allgemeingültigkeit und zwecks eines sparsamen Einsatzes von Parametern und Eingangsdaten eine um einiges tiefere Präzision aufweisen dürfen.
- Das Modell sollte ausgedehnte Szenarienrechnungen sowie Verfahren zur Unsicherheitsanalyse unterstützen.

Die Szenarienrechnungen sollten eine Vielzahl von Kombinationen möglicher Entwicklungspfade für die Entwicklung der Gebäudetechnologie, sowie der relevanten wirtschaftlichen (z.B. Energiepreise und -verfügbarkeit) und gesellschaftlichen (Gebäudelebenszyklen und Gebäudenutzungsmuster) Rahmenbedingungen unterstützen und die Auswirkungen plausibel abbilden können.

Für die Unsicherheitsanalyse sind die im Modell hinterlegten Modellparameter, Approximationen, statistischen Modelle und algorithmischen Entscheide (Entscheidungsbäume, iterative Verfahren, mathematische Optimierungsrechnungen etc.) präzise und umfassend zu dokumentieren (Begründung, Herleitung, Konfidenzintervalle etc.).

Basierend auf den obigen Spezifikationen wären in einem nächsten Schritt die Wahl des optimalen Modellierungsansatzes und dessen konkrete Umsetzung zu diskutieren.



In diesem Zusammenhang ist unserer Ansicht nach die Eignung von bestehenden *Einzelgebäudemodellen* für Hochrechnungen auf *Gebäudeparks* kritisch zu hinterfragen. In einer ersten Phase scheint es uns angebracht, ein Einzelgebäudemodell einzusetzen, das zwar auf der Ebene einzelnes Gebäude nicht sehr präzise zu sein hat, jedoch auf der Ebene Gebäudepark *nachweislich* robuste, richtige, und vergleichsweise präzise Resultate gibt (Untersuchung der Mittelungs- und Aggregationseffekte in Abhängigkeit des Stichprobenumfangs und der benötigten Eingangsdaten). Das Einzelgebäudemodell könnte dann schrittweise, je nach Bedarf, und mit zunehmender Verfügbarkeit der benötigten Eingangsdaten, verfeinert werden.

5.2.4 Abschliessende Bemerkungen`

Die Umsetzung der Empfehlungen 8–10 würde unserer Meinung nach zahlreiche Vorteile für die schweizerische Baubranche und die Umsetzung der Energiestrategie 2050 des Bundes nach sich ziehen:

Das in der Open Source Software eingebrachte und dokumentierte Wissen könnte in einem offenen Prozess überprüft, diskutiert und in koordinierter Anstrengung kontinuierlich aktualisiert werden. Neue Dienstleistungen und Geschäftsmodelle würden in einem zunehmend digitalisierten Umfeld gefördert und auf eine solide Grundlage gestellt. Die Qualität und Nachvollziehbarkeit der erhaltenen Projekt- und Forschungsergebnisse könnte verbessert werden.

Nicht zuletzt würde eine gemeinsame Basis für die transparente Auswertung und Bewertung der Performance von Einzelgebäuden und Gebäudeparks geschaffen.



5.3 Schweizerisches Gebäudeparkmessnetz

5.3.1 Messnetz: Motivation und Beschrieb

Die Bedeutung der Datenverfügbarkeit, der Datenqualität sowie der Zuverlässigkeit und Vertrauenswürdigkeit der Datenquellen für die Bewertung der Gebäude-Performance wird in einer Vielzahl nationaler und internationaler Studien betont [36, 42, 47, 49, 65, 76, 87].

Gleichzeitig hat unsere Review (Abschnitt 4) gezeigt, dass für die Schweiz nur isolierte Studien bzw. Datensätze vorhanden sind. Eine repräsentative Datenbasis ist aber Voraussetzung, um beispielsweise die Umsetzung der Energiestrategie des Bundes überprüfen und lenken zu können.

Einem „Instrumentarium für ein gebäudespezifisches wie auch gesamtschweizerisches Energie-Monitoring Priorität einzuräumen“ wurde in einer Studie des damaligen schweizerischen Bundesamts für Energiewirtschaft bereits im Jahre 1991 empfohlen ([78], siehe auch Abschnitt 4.7.2), jedoch so nie umgesetzt.

Unsere nächste Empfehlung greift diesen frühen Vorschlag in etwas erweiterter Form wieder auf. Sie geht eng mit Empfehlung 10 zusammen und lautet wie folgt:

Empfehlung 11

Ein auf das schweizerische Gebäudeparkmodell abgestimmtes, langfristiges Messnetz für die Performance des schweizerischen Gebäudeparks etablieren

Das Ziel eines solchen Messnetzes soll *nicht* die zentralisierte, flächendeckende Überwachung des Gebäudeparks der Schweiz sein, sondern eine repräsentative, kontinuierliche Erhebung seines Zustands und zugehöriger Trends über die nächsten Jahrzehnte.

Daten sollen *so wenig wie möglich, aber so viel wie nötig*, erhoben werden, um repräsentative Aussagen zur Leistungsfähigkeit des schweizerischen Gebäudeparks im Hinblick auf den Energieverbrauch, die Behaglichkeit und die Betriebskosten zu ermöglichen. Diese Informationen dürften nicht nur für die Energiepolitik, sondern auch für andere Sektoren (Gesundheit, Gebäudewirtschaft, Facility Management) von Interesse sein.

Eine flächendeckende Erfassung von Gebäudeperformance-Daten (zum Beispiel von Energieverbräuchen) ist heute technisch im Prinzip machbar und wird beispielsweise in [117, 146] gefordert. Ein solches Vorgehen erscheint uns jedoch aus den folgenden Gründen weder sinnvoll noch erstrebenswert:

Erstens gilt es, das Eindringen in die Privatsphäre der Gebäudebesitzer und -nutzer zu vermeiden. Zweitens ist zu befürchten, dass der Aufwand für eine lückenlose Datenerhebung einen grossen Teil der verfügbaren Mittel zu Lasten der mindestens so wichtigen Datenauswertung binden würde. Drittens ist die gezielte, repräsentative Erhebung von einander ergänzenden Datensätzen immer weit wertvoller als die lückenlose Erhebung einer einzelnen Variablen [147, 150].

Das vorgeschlagene Messnetz ist demnach mit den heutigen Umweltmessnetzen für das Wetter, die Luftqualität, oder den Zustand der Gewässer zu vergleichen. Nur handelt es sich hier nicht um das Monitoring eines natürlichen, sondern eines menschengemachten, aber ebenfalls nur schwer abzugrenzenden Systems. Das Messnetz ist in einem grösseren Rahmen einzuordnen: Die Notwendigkeit, die komplexen Infrastrukturen unserer modernen Gesellschaft besser verstehen, instand halten und lenken zu können. Es ist unsere Überzeugung, dass im Fall der Gebäude diese Aufgabe nicht allein von der Informations- und Bauindustrie wahrgenommen werden soll.



Wir schätzen, dass die Erhebung von Daten aus einigen Zehntausend, an der Quelle anonymisierten, nach statistischen Grundsätze zufällig ausgewählten Gebäuden aus der ganzen Schweiz genügen würde, um *mithilfe des genau auf diese Daten abgestimmten schweizerischen Gebäudeparkmodells* (Empfehlung 10) repräsentative, belastbare Aussagen der Performance-Indikatoren mindestens auf der Ebene der einzelnen Kantone zu erhalten. Daraus könnten verlässliche Angaben auch für die gesamte Schweiz hergeleitet werden.

Die zu erhebende Datenbasis würde aus jährlich aktualisierten Metadaten unter anderem zu Nutzfläche, Nutzungsart, Zustand der Gebäudehülle und der Gebäudetechnik (in einer zweiten Phase auch der Betriebskosten), sowie aus monatlich aktualisierten Daten zu Primär-, End- und Nutzenergie (in einer zweiten Phase auch der Behaglichkeitsindizes) eines jeden erfassten Gebäudes bestehen. Die monatlichen Daten würden aus kontinuierlich erhobenen Messdaten automatisiert ermittelt.

Alle erhobenen Daten würden schliesslich, nach automatisierter Qualitätsprüfung, regelmässig aktualisiert zusammen mit zugehörigen Auswertungen des Gebäudeparkmodells in anonymisierter/ verschleierter [148] Form auf den öffentlichen Internetseiten der Kantone und des Bundes unentgeltlich zur Verfügung gestellt werden.

Die Umsetzung eines solchen Messnetzes greift in die Aufgaben und Kompetenzen der Kantone ein. Daher scheint es uns sinnvoll, die Erhebungs- und Messkonzepte zentral zu koordinieren, dann aber dezentral umzusetzen.

5.3.2 Performance-Monitoring von Einzelgebäuden

Das schweizerisches Gebäudeparkmessnetz zielt zusammen mit dem schweizerischen Gebäudeparkmodell auf eine hohe Aussagekraft auf den Ebenen Kanton oder ganze Schweiz. Komplementär dazu empfehlen wir:

Empfehlung 12

Das Performance-Monitoring von Einzelgebäuden fördern

Diese Empfehlung ist, erstens, eine direkte Folge der Empfehlung 2. So man die reale Gebäudeperformance als eigenständige Bewertungskategorie etabliert, sind sinnvollerweise auch die dazu benötigten Werkzeuge zu fördern.

Zweitens kann (und soll) das vorgeschlagene Messnetz nicht das Monitoring auf der Ebene des einzelnen Gebäudes oder der einzelnen gebäudetechnischen Anlage ersetzen. Auch kann in Anbetracht des vorliegenden Zielpluralismus und der sehr unterschiedlichen Stakeholder-Interessen das schweizerweite Messnetz unmöglich alle relevanten Aspekte der Gebäudeperformance abdecken. Vielmehr kann die Erfahrung mit alternativen Fragestellungen und Monitoringlösungen dazu beitragen, das Messnetz punktuell zu ergänzen, oder auch insgesamt gezielt zu verbessern und zu erweitern.

Drittens ist die Bedeutung des Performance-Monitorings für die korrekte Inbetriebnahme und die kontinuierliche (energetische) Optimierung von Gebäuden unbestritten (IEA ECBCS Annex 46 [125], SIA 2048 [149], sowie Abschnitt 4.7). Die Instrumente dafür stehen mittlerweile bereit, siehe die Richtlinien [68, 69, 71, 142] und die verschiedenen Leitfäden [70, 91, 140, 141].

Viertens ist anzustreben, dass sich mit der Zeit einige einheitliche Konzepte für das Monitoring und die Bewertung von Einzelgebäuden und Gebäudeparks herauskristallisieren. Diese sollen es in Zukunft erlauben, repräsentative Datensätze und Referenzwerte für Vergleichs- und Benchmarkingstudien verfügbar zu machen (siehe zum Beispiel VDI 3807 [66]).



Schliesslich soll durch eine proaktive Förderung des Performance-Monitorings von Einzelgebäuden auf dessen Kompatibilität mit dem landesweiten Gebäudeparkmessnetz hingearbeitet werden. Das Ziel wäre, individuelle Gebäudemonitorings – möglicherweise unterstützt durch ein passendes Anreizsystem – auf freiwilliger Basis einfach in das Messnetz einbinden zu können.

5.3.3 Abschliessende Bemerkungen

Wie bereits erwähnt ist im Zusammenhang mit der Erhebung und Verwendung von Daten aus Gebäuden und Gebäudeparks nicht alles technisch Machbare auch sinnvoll. Erstens sind wenige, aber „gute“ Daten viel wertvoller als viele Daten. Zweitens ist nicht auszuschliessen, dass auch das Vorliegen von Performance Gaps, zusammen mit Verheissungen, solche Gaps gänzlich eliminieren zu wollen, zum Anlass genommen werden, um die Aufzeichnung von Unmengen von Daten aus Gebäuden zu rechtfertigen.

Das Eigentum an diesen Daten ist unseres Wissens nicht klar geregelt. Vor allem kann die Verwendung dieser Daten mit den heute zur Verfügung stehenden Mitteln kaum kontrolliert werden. Im besten Fall können die Daten für die personalisierte Werbung, im schlimmsten zum Überwachen, Bevormunden und Kontrollieren der Bürgerinnen und Bürger verwendet werden [143, 144, 145].

Die einzusetzenden Methoden zum Erfassen und Lenken der Gebäudeperformance müssen daher nicht nur zielführend und (kosten-)effizient, sondern auch gesellschaftlich nachhaltig sein. Zu den Schlüsselthemen zählen wir den Schutz der Privatsphäre, den fairen Umgang mit Informations- und Bildungsasymmetrien, das Akzeptieren von Unsicherheit und nicht reduzierbaren Risiken als Teil des Lebens, sowie das Aufrechterhalten der gesellschaftlichen Solidarität.

Der Bund und die Kantone können durch das vorgeschlagene, innovative Gebäudemonitoring auf Landesebene mit dem Erheben und Verwerten grosser, sensibler Datenmengen wertvolle Erfahrung sammeln. Erstens können dann die gesammelten Erfahrungen der Wirtschaft und den Konsumenten zu Gute kommen. Zweitens eröffnet sich die Möglichkeit, der gegenwärtig frei galoppierenden, globalen Datensammel- und Datenverwertungsindustrie praxistaugliche, mit demokratischen Grundsätzen vereinbare Konzepte und Richtlinien für den Umgang mit hochgranularen Daten entgegenzusetzen.

Das Ziel ist demnach, in den nächsten Jahren im Zusammenhang mit Gebäuden nicht nur Performance Gaps, sondern auch die enormen Möglichkeiten der modernen Informationstechnologien umsichtig lenken zu können.

6 Quellenverzeichnis

6.1 Literatur

- [1] Rafols I. Performance gap and its assessment methodology in Built2Spec project. Barcelona: Built2Spec; 2016.
- [2] Struck C et al. "Performance Gap" in der Schweiz – Brisanz, Ursachen und Einflüsse auf die Differenz von geplantem Energiebedarf und gemessenem Verbrauch in Gebäuden. In: 18. Statusseminar, Zürich, 4.-5.09.2014. Proceedings of 18. Statusseminar.
- [3] Bluysen PM. The Indoor Environment Handbook. New York: Earthscan; 2009.
- [4] Borgstein EH, Lamberts R and Hensen JLM. Evaluating energy performance in non-domestic buildings: A review. Energy and Buildings 2016;128:734-755.
- [5] van Dronkelaar C, Dowson M, Burman E, Spataru C and Mumovic D. A Review of the Energy Performance Gap and Its Underlying Causes in Non-Domestic Buildings. Frontiers in Mechanical Engineering 2016;1:17.
- [6] Cali D, Osterhage T, Streblow R and Müller D. Energy performance gap in refurbished German dwellings: Lesson learned from a field test. Energy and Buildings 2016;127:1146-1158.
- [7] Jones R, Fuertes A and de Wilde P. The gap between simulated and measured energy performance: a case study across six identical new-build flats in the UK. In: BS 2015, Hyderabad, 7.-9.12.2015. Proceedings of BS2015; p. 2248-2255.
- [8] Sun Y, Gu L, Wu CFJ and Augenbroe G. Exploring HVAC system sizing under uncertainty. Energy and Buildings 2014;81:243-252.
- [9] Reimann W, Lehmann M et al. Erfolgskontrolle Gebäudeenergiestandards 2014-2015, Final report. Bern: Bundesamt für Energie; 2016.
- [10] Khoury J, Hollmuller P and Lachal B. Energy performance gap in building retrofit: characterization and effect on the energy saving potential. In: 19. Statusseminar, Zürich, 8.-9.09.2016. Proceedings of 19. Statusseminar; 2016:OP-I-2-1:065.
- [11] Bigalke U, Grafe M et al. Auswertung von Verbrauchskennwerten energieeffizienter Wohngebäude, Final report. Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH dena; 2016.
- [12] Peper S, Feist W. Monitoring und Bilanzrechnung: Ganz ohne Performance Gap. In: BauSIM 2016, Dresden, 14.-16.09.2016. Proceedings of CESBP and BauSIM 2016; p.267-275.
- [13] Zhao D, McCoy A, Du J, Agee P and Lu Y. Interaction effects of building technology and resident behavior on energy consumption in residential buildings. Energy and Buildings 2017;134:223-233.
- [14] de Wilde P. The gap between predicted and measured energy performance of buildings: A framework for investigation. Automation in Construction 2014;41:40-49.
- [15] Voss K, Herkel S, Kalz D, Lützkendorf T, Maas A and Wagner A. Performance von Gebäuden. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag; 2016.
- [16] Szigeti F, Davis G. Performance Based Building: Conceptual Framework, Final report. Rotterdam: CIB; 2005.
- [17] Wagner A, Hoefker G et al. Nutzerzufriedenheit in Bürogebäuden: Empfehlungen für Planung und Betrieb. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag; 2015.
- [18] Closing the gap between design and as-built performance. Evidence review report. London: Zero Carbon Hub; 2014.



- [19] Closing the gap between design and as-built performance. End of term report. London: Zero Carbon Hub; 2014.
- [20] Quality management for building performance. Quantum 2017; <http://www.quantum-project.eu> (Zugriff 21.12.2017).
- [21] Built to Specifications – Tools for the 21st Century Construction Site. Built2Spec 2017; <http://built2spec-project.eu> (Zugriff 21.12.2017).
- [22] Jakob M, Catenazzi G et al. Potenzialabschätzung von Massnahmen im Bereich der Gebäudetechnik, Final report. Bern: Bundesamt für Energie; 2016.
- [23] Khoury J. Rénovation énergétique des bâtiments résidentiels collectifs: état des lieux, retours d'expérience et potentiels du parc genevois. Thèse de doctorat. Genf: Univ. Genève; 2014:Sc 4752.
- [24] Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2016. Bern: Bundesamt für Energie; 2016.
- [25] Integrated Project Delivery: A Guide. Washington, DC: The American Institute of Architects; 2007.
- [26] Boxer E, Henze GP, Hirsch AI. A model-based decision support tool for building portfolios under uncertainty. Automation in Construction 2017;78:34-50.
- [27] SIA 380/1:2009. Thermische Energie im Hochbau. Zürich: SIA; 2009
- [28] Reglements für Minergie-Baustandards. Basel: Verein Minergie; 2018. www.minergie.ch (Zugriff am 04.01.2018)
- [29] Kemmler A, Koziel S, Wüthrich P, Notter B, Keller M, Jakob M, Catenazzi G. Analyse des Schweizerischen Energieverbrauchs 2000 - 2016 nach Verwendungszwecken. Bern: Bundesamt für Energie; 2017.
- [30] Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKEN). Bern: Konferenz Kantonaler Energiedirektoren; 2015.
- [31] SIA 2031:2016. Energieausweis für Gebäude. Zürich: SIA; 2016.
- [32] Gebäudeenergieausweis der Kantone. Basel: Verein GEAK-CECB-CECE; 2018. www.geak.ch (Zugriff am 04.01.2017)
- [33] SIA 2040:2011. SIA-Effizienzpfad Energie. Zürich: SIA; 2011.
- [34] 2000-Watt-Gesellschaft. Zürich: Fachstelle 2000-Watt-Gesellschaft; 2018. www.2000watt.ch (Zugriff am 04.01.2017)
- [35] QUALICHeCK – Towards better quality and compliance. QUALICHeCK 2017; <http://qualicheck-platform.eu> (Zugriff am 04.01.2017)
- [36] Hässig W, Wyss S, Staubli J. Untersuchung Wärmeverbrauchsdaten von Neubauten. Final Report. Zürich: Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft; 2015.
- [37] The Performance Gap: Causes & Solutions. UK: The Green Construction Board; 2013. www.greenconstructionboard.org/index.php/resources/buildings (Zugriff am 04.01.2018)
- [38] Majcen D et al. Theoretical vs. actual energy consumption of labelled dwellings in the Netherlands: Discrepancies and policy implications. Energy Policy 2013;54:125-136.
- [39] Techem Energiekennwerte 2017. Eschborn: Techem Energy Services GmbH; 2017.
- [40] Association for Computing Machinery US Public Policy Council. Statement on Algorithmic Transparency and Accountability; 12 January 2017. https://www.acm.org/binaries/content/assets/public-policy/2017_usacm_statement_algorithms.pdf (Zugriff 22.03.2018)



- [41] Sunikka-Blank M, Galvin R. Introducing the prebound effect: the gap between performance and actual energy consumption. *Building and Research Information* 2012;40:3:260-273.
- [42] Aiulfi D, Maschio I et al. Energieverbrauch von Bürogebäuden und Grossverteilern, Final report. Bern: Bundesamt für Energie; 2010.
- [43] Informatics Europe & EUACM. When Computers Decide: European Recommendations on Machine-Learned Automated Decision Making; 2018.
<https://www.acm.org/binaries/content/assets/public-policy/ie-euacm-adm-report-2018.pdf> (Zugriff 22.03.2018)
- [44] Kalz D, Koenigsdorff R et al. Nichtwohngebäude effizient heizen + kühlen. Erfahrungen mit thermoaktiven Bauteilsystemen und Wärmepumpen. Bonn: BINE Informationsdienst 2016;Themeninfo 2.
- [45] EnergyPlus – Whole building energy simulation. U.S. Department of Energy; <https://energyplus.net> (Zugriff 22.03.2018)
- [46] Vogel U, Nübold N, Schneider S. 2000-Watt-Areale im Betrieb. Schlussbericht Pilotphase 2015/16. Liestal: EnergieSchweiz; 2017.
- [47] Scofield J. Efficacy of LEED-certification in reducing energy consumption and greenhouse gas emission for large New York City office buildings. *Energy and Buildings* 2013;67:517-524.
- [48] Vogel U. Der Betrieb läuft besser als erwartet. Zürich: TEC21 2017;39:42-44.
- [49] Scofield J. Do LEED-certified buildings save energy? Not really... *Energy and Buildings* 2009;41:1386-1390.
- [50] Mühlebach M, Ménard M, Carisch L, Müller V. mehr als wohnen - ein Leuchtturmareal in Betrieb. In: 19. Statusseminar, Zürich, 8.-9.09.2016. Proceedings of 19. Statusseminar; 2016:OP-II-2-2_001.
- [51] Khoury J, Alameddine Z, Holzmüller P. Understanding and bridging the energy performance gap in building retrofit. CISBAT 2017 6-8 September 2017, Lausanne, Switzerland. *Energy Procedia* 2017;122:217-222.
- [52] Lehmann U, Khoury J, Patel M. Actual energy performance of student housing: case study, benchmarking and performance gap analysis. CISBAT 2017 6-8 September 2017, Lausanne, Switzerland. *Energy Procedia* 2017;122:163-168.
- [53] Hoffmann C, Geissler A. Dem Prebound Effekt auf der Spur - Differenzen zwischen dem Heizwärmeverbrauch und dem rechnerisch ermittelten Heizwärmebedarf bei Bestandsgebäuden (Wohnen). *Bauphysik* 2017;39:3:159-174.
- [54] ISO 52016-1:2017. Energy performance of buildings - Energy needs for heating and cooling, internal temperatures and sensible and latent heat loads - Part 1: Calculation procedures. Genf: ISO, 2017.
- [55] Bigalke U, Zhang Y et al. Der dena-Gebäudereport 2015, Final report. Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH dena; 2015.
- [56] Klinke S, Reiter U, Farsi M, Jakob M. Contracting the Gap: Energy Efficiency Investments and Transaction Costs, Final report. Bern: Bundesamt für Energie; 2017.
- [57] Allcott H, Greenstone M. Is There an Energy Efficiency Gap? *Journal of Economic Perspectives*, 2012;26:1:3-28.
- [58] Backlund S, Thollander P. The energy-service gap: What does it mean? ECEEE Summer Study, Energy Efficiency First: The foundation of a low-carbon society, 2011:649-656.



- [59] Fedoruk LE, Cole RJ, Robinson JB, Cayuela A. Learning from failure: understanding the anticipated–achieved building energy performance gap. *Building Research & Information*, 2015;43:6:750-763.
- [60] Hong T, Yan D. Ten questions concerning occupant behavior in buildings. *Building and Environment* 2017;114:518-530.
- [61] Hoffmann C, Geissler A, Ménard M, Carisch L. PRO380: Offene Fragen beim Einsatz der SIA 380/1 als Prognoseinstrument bei Bestandsgebäuden (Wohnbauten), Final Report. Bern: Bundesamt für Energie; 2017.
- [62] Feustel HE. Bestimmung des sommerlichen Aussenluftauslegungszustands für Komfort-klimatechnik. *HLH* 2017;68:10:26-31.
- [63] Zakovorotnyi A, Jurt D et al. ROGEX - Robustheitsbewertung von integrierten gebäude-technischen Kühlkonzepten in Verwaltungsbauten hinsichtlich Klima und Nutzervariabilität, Final Report. Bern: Bundesamt für Energie; 2017.
- [64] Wyss S, Hässig W. UFELD: Feldmessungen von U-Werten zur Überprüfung der im Gebäudeenergieausweis (GEAK) hinterlegten U-Werte, Final Report. Bern: Bundesamt für Energie; 2016.
- [65] Kulawik M, Bucher P. Gebäude-Heizenergiebedarf: Methodik zur Schätzung des Heizenergiebedarfs der Wohngebäude mittels kantonalem Gebäude- und Wohnungsregister, Final Report. Luzern: Bau-, Umwelt- und Wirtschaftsdepartement; 2013.
- [66] VDI 3807, Blatt 1 bis 5. Verbrauchskennwerte für Gebäude. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure e.V.; 2013.
- [67] Lützkendorf T, Enseling A. Wirtschaftlichkeit energieoptimierter Gebäude. Bonn: BINE Informationsdienst 2017; Themeninfo 3.
- [68] VDI 6041. Technisches Monitoring von Gebäuden und gebäudetechnischen Anlagen. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure e.V.; 2017.
- [69] GEFMA 124, Blatt 1-6. Energiemanagement. Bonn: GEFMA Deutscher Verband für Facility Management e.V.; 2009-2017.
- [70] AMEV Empfehlung Nr. 135. Technisches Monitoring als Instrument zur Qualitätssicherung. Berlin: Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen (AMEV); 2017.
- [71] SN EN ISO 50001. Energiemanagementsysteme - Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung. Winterthur: SNV; 2011.
- [72] EVO 10000-1:2012(DE). IPMVP - Internationales Protokoll zur Leistungsmessung und -verifizierung. Washington: Eviciency Valuation Organisation (EVO); 2012.
- [73] Schakib-Ekbatan K. Bürogebäude auf dem Prüfstand: Zur Zufriedenheit mit Raumklima und Raum am Arbeitsplatz unter Einbindung der NutzerInnenperspektive in die Nachhaltigkeitsbewertung. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität, Fakultät Humanwissenschaft; 2015.
- [74] Lawrence R, Keime C. Bridging the gap between energy and comfort: Post-occupancy evaluation of two higher-education buildings in Sheffield. *Energy and Buildings*, 2016;130:651-666.
- [75] Guerra-Santin O, Tweed C. In-use monitoring of buildings: an overview and classification of evaluation methods. *Energy and Buildings*, 2015;86:176-189.
- [76] Jakob M, Catenazzi G et al. Erweiterung des Gebäudeparkmodells gemäss SIA-Effizienzpfad Energie, Final Report. Bern: Bundesamt für Energie; 2016.
- [77] Cali D, Andersen RK, Müller D, Olesen BW. Analysis of occupants' behaviour related to the use of windows in German households. *Building and Environment* 2016;103:54-69.



- [78] Wüest & Gabathuler. Gebäudepark Schweiz – Energierelevante Grunddaten 1991, Veränderungsdynamik und Energiesparpotentiale 1990-2025, Strategien zur CO₂-Reduktion. Bern: Bundesamt für Energiewirtschaft; 1991.
- [79] Maderspacher J. Robuste Optimierung in der Gebäudesimulation. München: Technische Universität München; 2017.
- [80] Killian M, Kozek M. Ten questions concerning model predictive control for energy efficient buildings. Building and Environment 2016;105:403-412.
- [81] CBECC-Com (California Building Energy Code Compliance for Commercial Buildings); <https://sourceforge.net/projects/cbecc-com/> (Zugriff 22.03.2018)
- [82] Osterhage T, Cali D, Streblow R, Müller D. Ergebnisse einer energetischen Sanierung: Abweichung zwischen Energiebedarf und Verbrauch - ist nur der Nutzer Schuld? Bauphysik 2015;37:2:100-104.
- [83] Majcen D, Itard L, Visscher H. Actual and theoretical gas consumption in Dutch dwellings: What causes the differences? Energy Policy 2013;61:460-471.
- [84] Hammer S, Wunderlich A, Iten R, Jakob M. Instrumente zur Umsetzung von Effizienzmassnahmen in der Gebäudetechnik, Final Report. Bern: Bundesamt für Energie; 2016.
- [85] Majcen D, Itard L, Visscher H. Statistical model of the heating prediction gap in Dutch dwellings: Relative importance of building, household and behavioural characteristics. Energy and Buildings 2015;105:43-59.
- [86] Visscher H, Meijer F, Majcen D, Itard L. Improved governance for energy efficiency in housing. Building Research and Information 2016;44:5-6:552-561.
- [87] Majcen D, Itard L, Visscher H. Actual heating energy savings in thermally renovated Dutch dwellings. Energy Policy 2016;97:82-92.
- [88] Fabi V, Andersen RV, Corngati S, Olesen BW. Occupants' window opening behaviour: A literature review of factors influencing occupant behaviour and models. Building and Environment 2012;58:188-198.
- [89] Ménard M. Performance Gap - Nutzer, Anlagen oder Normen-Bug? Presentation. Luzern: Gebäudetechnik Kongress 2017; 05.10.2017.
- [90] Stempkowski R, Waldauer E (Eds). Risikomanagement Bau, Methoden und Erfahrungen bei der praktischen Umsetzung von Risiko- und Chancenmanagement bei Bauprojekten. Wien: Netzwerk - Der Verlag; 2013.
- [91] Schneider S, Vogel U. Monitoring der 2000-Watt-Kompatibilität im Gebäudebereich: Monitoring-Standard für Gebäude und Areale. Bern: Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Bundesamt für Energie; 2015.
- [92] DGNB System. Zürich: Schweizer Gesellschaft für Nachhaltige Immobilienwirtschaft SGNI; 2013.
- [93] Kriterienbeschrieb Hochbau, Version 2.0. Zürich: Standard Nachhaltiges Bauen Schweiz SNBS; 2016.
- [94] Plessner S, Kuchen E, Fisch MN. Evaluierung von Energiekonzepten für Bürogebäude und Schlussfolgerungen für die Energieeffizienz und das Raumklima. Bauphysik 2008;30:6:389-392.
- [95] Energiekennwerte 2016. Eschborn: Techem Energy Services GmbH; 2016.
- [96] Lehmann M, Ott W, Ménard M, Reimann W. Erfolgskontrolle Gebäudeenergiestandards 2014-2015. In: 19. Statusseminar, Zürich, 8.-9.09.2016. Proceedings of 19. Statusseminar; 2016:OP-II-3-2_006.
- [97] ISO/IEC Guide 98-3:2008. Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995). Genf: ISO, 2008.



- [98] ISO/TR 52016-2:2017. Energy performance of buildings - Energy needs for heating and cooling, internal temperatures and sensible and latent heat loads - Part 2: Explanation and justification of ISO 52016-1 and ISO 52017-1. Genf: ISO, 2017.
- [99] SIA 2024:2006. Standard-Nutzungsbedingungen für Energie- und Gebäudetechnik. Zürich: SIA; 2006.
- [100] SIA 380/4:2006. Elektrische Energie im Hochbau. Zürich: SIA; 2006.
- [101] SIA 382/2:2011. Klimatisierte Gebäude - Leistungs- und Energiebedarf. Zürich: SIA; 2011.
- [102] DIN V 18599-1:2016-10. Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure e.V.; 2016.
- [103] Wetter M, van Treeck C (Eds). New Generation Computational Tools for Building & Community Energy Systems. Annex 60 Final Report. IEA EBC Annex 60; 2017.
- [104] Thaler L, Kellenberger D. Addressing performance gaps: User behavior and sufficiency in the planning and operation phase of a 2000-Watt Site. CISBAT 2017 6-8 September 2017, Lausanne, Switzerland. Energy Procedia 2017;122:961-966.
- [105] Louis-Gaëtan Giraudet, Sébastien Houde, Joseph Maher. Moral Hazard and the Energy Efficiency Gap: Theory and Evidence. 2016. HAL reference no. hal-01420872.
- [106] Burman E, Mumovic D, Kimpian J. Towards measurement and verification of energy performance under the framework of the European directive of energy performance in buildings. Energy 2014;77:153-163.
- [107] Hubbuch M, Janser M. Modellentwicklung: Performance Gap. Presentation. Luzern: Gebäudetechnik Kongress 2017; 05.10.2017.
- [108] IBPSA Project 1. BIM/GIS and Modelica Framework for building and community energy system design and operation; 2017-2022. <https://ibpsa.github.io/project1/> (Zugriff 22.03.2018)
- [109] Janser M, Windlinger L, Leiblein T, Hofmann T, Wallbaum H, Feige A, Cui YY, Lange S. Leitfaden für Nachhaltige Bürogebäude. Wädenswil: ZHAW, Institut für Facility Management; 2015.
- [110] ISO 31000:2009. Risk Management - Principles and Guidelines. Genf: ISO; 2009.
- [111] ONR 49001:2014 Risikomanagement für Organisationen und Systeme, Risikomanagement, Wien: Austrian Standards; 2014.
- [112] ONR 49002-1:2014. Risikomanagement für Organisationen und Systeme - Teil 1: Leitfaden für die Einbettung des Risikomanagements ins Managementsystem. Wien: Austrian Standards; 2014.
- [113] ONR 49002-2:2014. Risikomanagement für Organisationen und Systeme - Teil 2: Leitfaden für die Methoden der Risikobeurteilung. Wien: Austrian Standards; 2014.
- [114] Morgan MG, Henrion M. Uncertainty: A Guide to Dealing with Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis. Cambridge: Cambridge University Press; 1990.
- [115] SN EN 15603:2008. Energieeffizienz von Gebäuden – Gesamtenergiebedarf und Festlegung der Energiekennwerte. Zürich: SIA; 2008.
- [116] Blasch JE, Filippini M, Kumar N, Martinez-Cruz AL. Narrowing the energy efficiency gap: The impact of educational programs, online support tools and energy-related investment literacy, Report Work Package 2: Change of Behavior. Basel: SCCER CREST, 2017.
- [117] Gebäudepark 2050 – Vision des BFE. Fact Sheet. Bern: Bundesamt für Energie; 01.01.2018.



- [118] Yoshino H et al. Total energy use in buildings – Analysis and evaluation methods. Final Report Annex 53, Main Report. IEA Annex 53 Total energy use in buildings: analysis and evaluation methods; 2013.
- [119] Corgnati S, Bednar T, Jang Y et al. Statistical analysis and prediction methods. Final Report Annex 53, Appendix Volume 5. IEA Annex 53 Total energy use in buildings: analysis and evaluation methods; 2013.
- [120] Andre P. Energy performance analysis. Final Report Annex 53, Appendix Volume 6. IEA Annex 53 Total energy use in buildings: analysis and evaluation methods; 2013.
- [121] Lim H, Zhai ZJ. Review on stochastic modeling methods for building stock energy prediction. Building Simulation 2017;10:5:607-624.
- [122] Moret F, Gnehm R, Passaglia M, Hoesli B. Vergleich verschiedener Energiebilanzierungsmethoden. Ittigen: EnergieSchweiz; 2016.
- [123] ISO 9001:2015. Quality management systems - Requirements. Genf: ISO; 2015.
- [124] Leaman A, Stevenson F, Bordass B. Building evaluation: practice and principles. Building Research & Information, 2010;38:5,564-577.
- [125] Zhivov A, Pietilainen J, Schmidt F, Reinikainen E, Woody A (Eds). Energy and Process Assessment Protocol. IEA ECBCS Annex 46 Holistic Assessment Toolkit on Energy Efficient Retrofit Measures for Government Buildings; 2009.
- [126] SIA 2031:2009. Energieausweis für Gebäude. Zürich: SIA; 2009.
- [127] Plessner S, Pinkernell C, Altendorf L, Koch M, Büchner E. EQM – Energie- und Qualitätsmanagement für nachhaltige Gebäude – Innovative Prozesssteuerung im Feldtest. Deutsche Bundesstiftung Umwelt; 2015:31099.
- [128] Kabele K, Bejček M, Frueh L. Report on state-of-the-art of quality management. Technische Universität Braunschweig. Quantum Project; 2016: Report D1.01.
- [129] Frueh L. Generic guideline and process structure for quality management. Technische Universität Braunschweig. Quantum Project; 2016: Report D1.02.
- [130] Porkka J, Huovila P. Decision Support Tools for Performance Based Building. VTT Building and Transport. PeBBu; 2004.
- [131] Szigeti F, Bourke K, Prior J. Statements of Requirements, PeBBu Compendium 2. Final report. Rotterdam: CIB; 2005.
- [132] Performance-based Building Design. https://en.wikipedia.org/wiki/Performance-based_building_design (Zugriff 15.03.2018).
- [133] Schneider S, Hollmuller P, Le Strat P, Khoury J, Patel M, Lachal B. Spatial-Temporal Analysis of the Heat and Electricity Demand of the Swiss Building Stock. Frontiers in Built Environment, 2017;3,53.
- [134] Reinhart CF, Davila CC. Urban building energy modeling – A review of a nascent field. Building and Environment, 2016;97:196-202.
- [135] Bornemann B, Schmidt S, Schubert S. Governing Uncertainties in Sustainable Energy Transitions – Insights from Locat Heat Supply in Switzerland. Urban Planning, 2016;1:3,38-54.
- [136] Khoury J, Hollmuller P, Lachal B, Schneider S, Lehmann U. COMPARE RENOVE: du catalogue de solutions à la performance réelle des rénovations énergétiques - Ecarts de performance, bonnes pratiques et enseignements tirés, Final Report. Bern: Bundesamt für Energie; 2018.
- [137] SIA 2032:2010. Graue Energie von Gebäuden. Zürich: SIA; 2010.



- [138] Kirchner et al. Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050 – Energienachfrage und Elektrizitätsangebot in der Schweiz 2000 – 2050. Bern: Bern: Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Bundesamt für Energie; 2012.
- [139] Swiss Competence Center for Energy Research Future Energy Efficient Buildings & Districts. Research and Innovation Roadmap 2017-2020. SCCER FEEB&D, 2017. <http://www.sccer-feebd.ch/wp-content/uploads/SCCER-FEEBD-Innovation-Roadmap-2017-2020-de.pdf> (Zugriff 15.03.2018)
- [140] EnOB Forschung für Energieoptimiertes Bauen. Leitfaden für das Monitoring der Demonstrationsbauten im Förderkonzept EnBau und EnSan. EnOB; 2014.
- [141] Feist W (Ed). Richtig messen in Energiesparhäusern. Arbeitskreis kostengünstiger Passivhäuser, Protokollband Nr. 45. Darmstadt: Passivhausinstitut; 2012.
- [142] prSWKI BT105-01. Technisches Monitoring von Gebäuden und gebäudetechnischen Anlagen. Urtenen-Schönbühl: Schweizerischer Verein von Gebäudetechnik-Ingenieuren; in Vorbereitung.
- [143] Kucklick C. Die granulare Gesellschaft. Berlin: Ullstein Verlag; 2014.
- [144] Weigend A. Data for the People. Wie wir die Macht über unsere Daten zurückerobern. Hamburg: Murmann Publishers GmbH; 2017.
- [145] Stalder H. Lasst uns unsere Geheimnisse! Neue Zürcher Zeitung, 23.03.2018. <https://www.nzz.ch/meinung/lasst-uns-unsere-geheimnisse-ld.1368594> (Zugriff 23.03.2018)
- [146] FAQ: GIS Gebäudeenergie – Nationale Datenbank für Energielieferungen in Gebäude. Zürich: SIA; 2015. http://www.sia.ch/fileadmin/content/bilder/Themen/Energie/150316_FAQ_GIS-Energie.pdf (Zugriff 25.03.2018)
- [147] Bloching B, Luck L, Ramge R. Smart Data – Datenstrategien, die Kunden wirklich wollen und Unternehmen wirklich nützen. München: Redline Verlag; 2015.
- [148] Cortés J, Dullerud HE, Han S, Ny JL, Mitra S, Pappas GJ. Differential privacy in control and network systems. 2016 IEEE 55th Conference on Decision and Control (CDC); Las Vegas, NV, 2016:4252-4272.
- [149] SIA 2048:2015. Energetische Betriebsoptimierung. Zürich: SIA; 2015.
- [150] Few S. Signal: Understanding What Matters in a World of Noise. Burlingame: Analytics Press; 2015.
- [151] Mobus GE and Kalton MC. Principles of Systems Science. New York: Springer; 2014.
- [152] Åström KJ and Murray RM. Feedback systems: An introduction for scientists and engineers. New Jersey, USA: Princeton University Press; 2008.
- [153] Möller S. Umgang mit Risiken bei den Nutzungskosten im Hochbau. Frankfurt am Main: Internationaler Verlag der Wissenschaften; 2011, Bd. 3369.
- [154] Heylighen F, Joslyn C. Cybernetics and Second-Order Cybernetics. In: Meyers RA (ed.). Encyclopedia of Physical Science & Technology (3rd ed.). New York: Academic Press; 2001.
- [155] Gillingham K, Palmer K. Bridging the Energy Efficiency Gap: Policy Insights from Economic Theory and Empirical Evidence. Resources for the Future; Discussion Paper 13-02; 2013.



6.2 Online Ressourcen

Die folgende Tabelle listet Online Ressourcen von Projekten, Datenbanken und Initiativen, die für Performance Gaps in Gebäuden relevant sind. Die Sortierung erfolgt nach unserer Einschätzung der Relevanz des Projekts für die Performance Gap-Diskussion in der Schweiz.

Kurzbezeichnung	Projektitel	Schwerpunkt	Laufzeit	Land (Leitung)
Quantum	Quality management for building performance	Development and application of energy management, comfort metering and electrical sub-metering	in Bearbeitung	I/D/BE
	http://www.quantum-project.eu			
Built2Spec	Built2Spec - Tools for the 21st century construction worksite	Development of quality assurance tools for construction sites	in Bearbeitung	EU
	http://built2spec-project.eu			
Zero Carbon Hub	Zero Carbon Hub	Research initiative focusing on raising build standards and reducing the risk associated with implementing the Zero Carbon Homes policy	2008-2016	UK
	http://www.zerocarbonhub.org/			
QUALICHeCK	Compliance and quality of works for improved energy performance of buildings	Compliance and quality assurance	bis 2017	F
	http://qualicheck-platform.eu/			
CarbonBuzz	CarbonBuzz	Benchmarking platform, performance gap	Platform in Betrieb	UK
	http://www.carbonbuzz.org			
Building Data Exchange	Building Data Exchange - Unlocking building performance data	Open data platform	Platform in Betrieb	UK
	https://buildingdataexchange.org.uk/			
IEA Annex 70	Building Energy Epidemiology- Analysis of Real Building Energy Use at Scale	Studying and modelling the building stock	2016-2019	UK
	https://energyepidemiology.org			
IEA Annex 46	Holistic Assessment Tool-kit on Energy Efficient Retrofit Measures for Government Buildings	Building Retrofit, building optimization basics, energy management (PDCA)	2005-2010	USA
	http://www.iea-ebc.org/projects/project?AnnexID=46			
IEA Annex 53	Total Energy Use in Buildings - Analysis and Evaluation Methods	Monitoring, Modeling, Statistical Methods	2008-2013	JPN
	http://www.iea-ebc.org/projects/project?AnnexID=53			
Hit2Gap	Highly innovative building control tools - Tackling the energy performance gap	Development of energy management platforms	2015-2019	EU
	http://www.hit2gap.eu			
HOPE	HOPE: Health Optimisation Protocol for Energy-efficient Buildings	Health Optimisation	bis 2005	EU
	https://hope.epfl.ch/project/project-intro.htm			
IEA Annex 55	Reliability of Energy Efficient Building Retrofitting- Probability Assessment of Performance and Cost	Building Retrofit	2010-2015	S
	http://www.iea-ebc.org/projects/project?AnnexID=55			
IEA Annex 58	Reliable Building Energy Performance Characterisation Based on Full Scale Dynamic Measurements	Thermal performance of the building envelope; using test buildings or scale models	2011-2016	B
	http://www.iea-ebc.org/projects/project?AnnexID=58			
IEA Annex 71	Building Energy Performance Assessment Based on In-situ Measurements	Monitoring in-use buildings; disaggregate the building energy use to its three main sources: building fabric, systems and users.	2016-2021	B
	http://www.iea-ebc.org/projects/project?AnnexID=71			
EnOB-Datenbank	EnOB-Datenbank Gebäudemonitoring im Detail	Langzeitmonitoring von Beispielprojekten	Platform in Betrieb	D
	http://enob.ise.fraunhofer.de/website/enob/EnOB-Datenbank/Willkommen.html			
EU Building Stock Observatory	EU Building Stock Observatory	Monitors the energy performance of buildings across Europe; assessment of improvements in the energy efficiency of buildings	Platform in Betrieb	EU
	https://ec.europa.eu/energy/en/eubuildings			
cibw117	Performance Measurement in Construction	Working group	in Bearbeitung	USA
	http://cibw117.com/			

Letzter Zugriff auf alle Webseiten: 21.12.2017



Anhang

Anhang A	Eigene Publikationen
Anhang B	Experteninterviews: Fragebogen
Anhang C	Literaturanalyse – Details
Anhang D	Ursachen und Massnahmen: Beispiele aus der Literatur
Anhang E	Unsicherheitsanalyse: Methoden und Beispiel
Anhang F	Ergänzende Literatur



Anhang A Eigene Publikationen

- a. Gyalistras D, Frei B, Sagerschnig C. **Performance Gap – Definitionen, Zielkonflikte und Empfehlungen**. Präsentation, Workshop: „Performance Gap im Schweizer Gebäudepark“. Luzern; 07.04.2017.

Informationen zum Workshop: <http://www.digitale-medienmappe.ch/passerelle-workshop-2017/>

- b. Frei B, Sagerschnig C, Gyalistras D. **Performance gaps in Swiss buildings: an analysis of conflicting objectives and mitigation strategies**. CISBAT 2017 6-8 September 2017, Lausanne, Switzerland. Energy Procedia 2017;122:421-426.

- c. Gyalistras D. **Brüche zwischen Entwurf und Anwendung**. Interview von P. Knüsel über das BFE-Projekt ParkGap von Frei B, Gyalistras D, Sagerschnig C. Zürich: TEC21 2017;39:45-47.

Themenschwerpunkt in TEC21 39/2017: <https://www.espazium.ch/performance-gap-koennen-haeuser-alles>

- d. Sagerschnig C, Frei B, Gyalistras D. **Gebäudeperformance lenken – Sinn und Unsinn in der Performance Gap-Diskussion**. 20. Status-Seminar Forschen für den Bau im Kontext von Energie und Umwelt, 6.-7. September 2018, Zürich (in Arbeit)



Anhang B Experteninterviews

Interviewfragebogen

Ihre Erfahrung

	Ja	Eher Ja	Eher Nein	Nein
Haben Sie in Ihrer täglichen Projektpraxis mit Performance Gaps zu tun?	☐	☐	☐	☐
Stehen Ihnen Ressourcen zur Erhebung und Analyse von Performance Gaps zur Verfügung?	☐	☐	☐	☐
Finden Sie Betriebsoptimierung wichtiger als Performance Gap Analysen?	☐	☐	☐	☐

3 Thesen und 1 Definition

	Ja	Eher Ja	Eher Nein	Nein
„Planer sind weniger von Performance Gaps betroffen als Ausführende, Betreiber oder Nutzer.“ Stimmen Sie dieser These zu?	☐	☐	☐	☐
„Performance sollte je nach Gebäude und Nutzerbedürfnisse individuell definiert werden“. Stimmen Sie dieser These zu?	☐	☐	☐	☐
„Performance sollte durchgesetzt werden. Betriebsversprechen und Zertifikate sind periodisch zu überprüfen. Dann sind verbindliche Konsequenzen zu ziehen.“ Stimmen Sie dieser These zu?	☐	☐	☐	☐
Definitionen: Gap 1. Art „Zielabweichung eines Einzelgebäudes“ Gap 2. Art „Zielabweichung des Durchschnittswerts eines Gebäudeparks“ Finden Sie diese Unterscheidung von Gaps sinnvoll?	☐	☐	☐	☐

**Was sollte verstärkt diskutiert werden?**

Welche Art von Performance?	Relevanz				
	sehr hoch	hoch	gering	sehr gering	weiss nicht
Energie	☐	☐	☐	☐	☐
Behaglichkeit	☐	☐	☐	☐	☐
Betriebsaufwand (Kosten, Material...)	☐	☐	☐	☐	☐

Welcher Fokus?

Einzelgebäude	☐	☐	☐	☐	☐
Gebäudeparks	☐	☐	☐	☐	☐

Welche Bilanzgrenze für Energie?

Nutzenergie (z.B. SIA 380/1, MuKE)	☐	☐	☐	☐	☐
Endenergie (z.B. Energieabrechnungen, Gesamtenergiestatistik Bund)	☐	☐	☐	☐	☐
Primärenergie (z.B. Minergie, GEAK, 2000-Watt-Gesellschaft)	☐	☐	☐	☐	☐

Welche Instrumente?

Betriebsoptimierung (fachkundige Begutachtung von Gebäuden)	☐	☐	☐	☐	☐
Gebäude- und Anlagenmonitoring (automatisierte Beobachtung)	☐	☐	☐	☐	☐
Energiemanagement (institutionalisierte Prozesse)	☐	☐	☐	☐	☐
Prüfregime (z.B. streng einzuhaltende Grenzwerte, analog Fahrzeugkontrolle)	☐	☐	☐	☐	☐

Neue Wege im Bauprozess

Definieren der Leistungen des Gebäudes kommt vor der technischen Spezifikation ("Performance Based Building Design")	☐	☐	☐	☐	☐
Vertraglich vereinbarte Performance-Ziele mit solidarischer Haftung mindestens bis und mit der Inbetriebnahme („Integrated Project Delivery")	☐	☐	☐	☐	☐
Risikomanagement auch für Performance Risiken	☐	☐	☐	☐	☐

Digitalisierung im Bauwesen

Datenkultur: Thematisieren von Qualität, Transparenz, Interpretation, Schutz, Pflege, Sicherheit, Eigentum, Nutzung und Verwertung von Daten	☐	☐	☐	☐	☐
Building Information Modeling (BIM)	☐	☐	☐	☐	☐
Technisches Monitoring von Gebäuden (TMon)	☐	☐	☐	☐	☐
Gezieltes Monitoring des schweizerischen Gebäudeparks (repräsentatives Messnetz)	☐	☐	☐	☐	☐
Blockchain-Technologie (effizientes Sicherstellen einer nicht fälschbaren, vertraulichen Datenbasis und von automatisch durchsetzbaren Verträgen)	☐	☐	☐	☐	☐



Anhang C Literaturanalyse – Detail

Evidenzen für Performance Gaps

Van Dronkelaar et al. [5] erarbeiten eine **umfangreiche, strukturierte Übersicht von Evidenzen, Ursachen und Gegenmassnahmen** für den Energy Performance Gap in Nicht-Wohngebäuden auf Basis einer umfangreichen Literaturrecherche. Sie klassifizieren den Energy Performance Gap und analysieren seine Grösse und zugrundeliegende Ursachen.

Es werden drei Arten Performance Gap unterschieden:

- (i) Regulativer Performance Gap,
- (ii) Statischer Performance Gap und
- (iii) Dynamischer Performance Gap.

Der regulative Performance Gap wird bei 62 Fallstudien mit $(34\pm 55)\%$ angegeben. Als Hauptursachen werden (a) Unsicherheiten bei der Spezifikation, (b) das Benutzerverhalten und (c) der ineffiziente Betrieb bezeichnet. Diese Hauptursachen tragen zu 10 bis 80% zum Performance Gap bei.

Folgende Ursachen werden für den Energy Performance Gap aufgelistet:

- Begrenztes Verständnis der Auswirkungen von frühen Planungsentscheidungen
- Komplexität des Designs
- Unsicherheit in der Gebäudemodellierung
 - Unsicherheiten bei der Spezifikation (Geometrie, Material, Komponenten), Unsicherheit bei der Vereinfachung
 - Unsicherheit bei Szenarien (Wetterdaten, Fahrplänen, Betriebsmodus), Unsicherheiten bei der Numerik (Diskretisierung), Unsicherheiten bedingt durch begrenztes Wissen, Zeitmangel und persönliche Präferenzen
- Variabilität der verwendeten Berechnungsmodelle und Simulationswerkzeuge
- Qualität der Bauausführung
- Inkonsistenz der Komponentenauswahl zwischen Planung und Ausführung
- Minderwertige Inbetriebnahme
- Ungenügender Betrieb und schlecht funktionierende Gebäudetechnik
- Benutzerverhalten
- Einsatzgrenzen Validierung des Messequipments
- Langzeitvariabilität des Energieverbrauchs im Betrieb

Zur Vermeidung von Energy Performance Gaps werden (i) die Verbesserung der Planung, (ii) Ausbau der Datenerfassung und Verfügbarkeit der Messdaten, (iii) Stärkung der Ausbildung und Weiterbildung und (iv) operative und strategische Stärkung des Facility Managements vorgeschlagen.

Fedoruk et al. [59] beschreiben umfassend die Erfahrungen, die bei der **Identifizierung von Performance Gaps** in einem Universitätsgebäude in British Columbia, Kanada gemacht wurden. Für ausgewählte, im Betrieb evident gewordene Performance Gaps wird beschrieben, wie sie erkannt und behoben werden konnten. Die Hindernisse zur Behebung waren weder ökonomischer noch technischer Art. Die Hindernisse waren primär institutioneller Art, namentlich wie verschiedene Lebenszyklusphasen spezifiziert, beauftragt und umgesetzt wurden. Die wichtigsten Fragen betonen die Bedeutung eines aussagekräftigen und effektiven Gebäudeenergie-Monitorings, das Verständnis der Grenzen von Energiesystemen in Design und Analyse, die Lücken zwischen verschiedenen Stadien eines Gebäudelebenszyklus und Feedbackprozesse während des gesamten Entwurfs und Betriebs. Die Offenle-



gung von "Versagen und Fehlern" und der Lessons-Learned werden als wertvoller Beitrag zur Weiterentwicklung für die Baubeteiligten (Stakeholders) und die Berufs- und Forschungsgemeinschaften bezeichnet.

Folgende **Hindernisse** haben zu den beobachteten Performance Gaps geführt:

- Design: schlechte Definition der Randbedingungen und Entwurfsannahmen
- Inbetriebnahme: Überprüfung von Einzelkomponenten anstelle von Gesamtsystemen
- Betrieb / Steuerung: Betreiber, die nicht frühzeitig in den Prozess eingebunden worden sind, nicht auf die Planungsabsichten abgestimmte Betriebssequenzen, Planungsinformationen weder zugänglich, noch interpretierbar oder umsetzbar
- Fehlerbehebungen: während Ausführung und Inbetriebnahme vorgenommen, haben die Ursache der Performance Gaps nicht berücksichtigt.
- Institutionelle Normen: Fehlanreize, Schwierigkeiten bei der Kommunikation, fehlende Feedback-Prozesse, Grenzen der Verantwortung nicht definiert

Folgende **Schlüsselerkenntnisse** wurden festgehalten:

- Integrierter Designprozess (IDP): IDP Prinzipien müssen über die Planungsphase hinaus auf den gesamten Projektlebenszyklus erweitert werden, IDP muss neben Einzelgebäuden auch Areale umfassen
- Systemgrenzen: Systemgrenzen und Implikationen des Netzwerkdesigns müssen von Anfang an berücksichtigt werden, einschliesslich aller Stakeholder-Verantwortlichkeiten für das System
- Einsatzgrenzen: Einschränkungen vereinfachter Modelle und Werkzeuge müssen in der Entwurfsphase vollständig verstanden werden. Die individuelle Optimierung kleiner Komponenten wird sich nicht in signifikanten Einsparungen niederschlagen, wenn die zugrundeliegenden Systeme falsch sind.
- Feedback: Feedback ist in allen Phasen erforderlich: insbesondere von wichtiger Bedeutung sind Feedbacks von der Inbetriebnahme zurück zur Planung und vom Betrieb zurück zur Planung. Überwachung und Bewertung sind Schlüsselmechanismen, um sicherzustellen, dass die Systeme wie vorgesehen arbeiten
- Institutionelle Kapazitäten: Ohne institutionelle oder betriebliche Unterstützung, Ressourcen und Möglichkeiten, gefundene Lösungen umzusetzen oder erkannte Probleme zu kommunizieren, werden Gebäude nicht mit der gewünschten Performance funktionieren.
- Performance: Grosse Chancen für die wirksame Inbetriebnahme und Betriebsoptimierung hin zur gewünschten Energieeffizienz sind vorhanden, auch in nachhaltigen Gebäuden
- Fehlerkultur: Eine Kultur des Lernens und des Umgangs mit Misserfolgen ist notwendig, um den Erfolg einer umfassenden Gebäudeperformance sicherzustellen.

Es wird darauf hingewiesen, dass der immer häufigere Gebrauch von Begriffen wie „smart“ und „intelligent“ zur Beschreibung von Gebäuden und deren Infrastruktur davon ablenkt, dass die wahre Intelligenz eines Gebäudes von seiner geplanten Fähigkeit definierte Funktionen wirksam und nützlich bereitzustellen, herrührt.



Performance Gaps in Gebäudeparks

Jährlich veröffentlicht der internationale Energiemanagement-Dienstleister Techem Energy Services GmbH³³ eine Studie zum Wärme- und Warmwasserverbrauch in 130'000 Mehrfamilienhäusern mit rund 1.5 Millionen Wohneinheiten in Deutschland, Österreich und der Schweiz und weist darin auf statistisch gut gesicherte Erkenntnisse hin [39,95].

In der Studie „**Energiekennwerte 2016**“ [95] werden die Verbrauchsdaten 2015 von rund 130'000 Mehrfamilienhäusern ausgewertet und analysiert. Es werden 12 Monate ausgewertet, Stichtag ist jeweils der 31. Dezember. Der spezifische Energieverbrauch für Raumheizung liegt zwischen 30 und 350 kWh/m²a. Die Wohnungsgrösse liegt unter 200 m², die Gesamtfläche eines Gebäudes muss mindestens 30 m² betragen. Die Angaben zur Endenergie sind für Heizöl in Liter, für Erdgas in Kubikmeter oder Kilowattstunden und für Fernwärme in Kilowattstunden verfügbar. Die Nutzwärme für Raumheizung und Warmwasser wird über Wärmezähler erfasst. Somit lassen sich die Jahresnutzungsgrade eindeutig bestimmen.

Der durchschnittliche witterungsbereinigte Verbrauch für Raumwärme pro Quadratmeter Wohnfläche beträgt für Erdgas 134 kWh/m², für Heizöl 132 kWh/m² und für Fernwärme 109 kWh/m².

Der durchschnittliche Verbrauch für die Warmwassererwärmung beträgt zwischen 28 kWh/m² (Heizöl und Fernwärme) und 31 kWh/m² (Erdgas). Es wird eine enorme Streubreite von 5 bis 65 kWh/m² festgestellt. Gemessene Energieverbräuche für die Warmwassererwärmung weisen bei vergleichbarer Warmwassertemperatur von 60°C auf Bereitstellungs- und Verteilverluste von 52% (Fernwärme und Erdgas) bis 58% (Heizöl) hin.

Der spezifische witterungsbereinigte Energieverbrauch pro Wohnfläche beträgt bei Gebäuden unter 200 m² Wohnfläche 158 kWh/m², bei Gebäuden über 3000 m² 119 kWh/m².

Bezüglich berechnetem Energiebedarf und tatsächlichem Energieverbrauch besteht auch in dieser Studie ein Energy Performance Gap (Auswertung von ca. 70 Gebäuden). Oberhalb eines mittleren Verbrauchsniveaus von 120 kWh/m²a wird der Heizwärmeverbrauch gegenüber dem Heizwärmebedarf überschätzt. Es wird in der Studie festgehalten, dass die tatsächliche Güte der Bedarfsberechnung von entscheidender Bedeutung für die technische und wirtschaftliche Bewertung von investiven Massnahmen zur Energieeinsparung ist. Aus den Ergebnissen lässt sich folgern, dass bei älteren, wenig bis nichtgedämmten Gebäuden die Ermittlung des Einsparpotenzials und somit der Wirtschaftlichkeit einer geplanten Sanierungsmassnahme anhand von Bedarfswerten das Risiko beinhaltet, dass die mögliche Einsparung überschätzt und die Amortisationszeit unterschätzt wird.

Der überwiegende Teil der Niedrigenergie- und Passivhäuser weist einen höheren Verbrauch aus als berechnet. Es wird ein hohes relatives Verschwendungspotenzial durch Nutzer und nicht angepasste Anlagentechnik angegeben. Verbrauchsabhängige Abrechnungen werden auch hier nahegelegt. Hinzukommen sollten Instrumente zur gezielten Beeinflussung des Nutzerverhaltens (beispielsweise Verbrauchsanalysen) und zur Verbesserung des Betriebs der Anlagentechnik (beispielsweise technisches Monitoring).

In den „**Techem Energiekennwerten 2017**“ [39] (Auswertung von 115'000 Mehrfamilienhäusern) wird darauf hingewiesen, dass der witterungsbereinigte Endenergieverbrauch erstmals seit 2005 wieder merklich angestiegen ist. Ebenso sind die CO₂-Emissionen im untersuchten Bestand merklich angestiegen und liegen auf einem ähnlichen Niveau wie vor 10 Jahren. Die Autoren vermuten verminderte innere Wärmegewinne infolge reduzierter Sonneneinstrahlung (nicht witterungsbereinigt) oder ein kurzfristig verändertes Nutzerverhalten infolge gesunkener Energiepreise. Der Mittelwert der Raumtemperaturen aller beheizten Räume liegt in Mehrfamilienhäusern bei 19.6°C. Die Schlafzimmer waren dabei mit 18.5°C am kältesten. Die Wohnzimmer und die Badzimmer waren mit 20.2 °C beziehungsweise 20.2°C am wärmsten. Alle Angaben basieren auf einer anonymisierten Auswertung von Daten aus dem Jahr 2014.

³³ <http://www.techem.de/>



Die **dena-Studie „Auswertung von Verbrauchskennwerten energieeffizienter Wohngebäude“** [11] ergab folgende Kernaussagen:

Im Mittel stimmt der vorab berechnete End- und Primärenergiebedarf sehr gut mit dem tatsächlich gemessenen End- und Primärenergieverbrauch überein. Im Einzelfall kann es durch vielfältige Einflussfaktoren (insbesondere Anlagentechnik, Solarthermie, Photovoltaik, Nutzerverhalten etc.) jedoch grössere Abweichungen. Ein deutlicher verbrauchserhöhender „Rebound-Effekt“ durch weniger achtsames Nutzerverhalten konnte nicht beobachtet werden.

- Um vorab ein realistisches Ergebnis zu erhalten, müssen bei der Energiebedarfsberechnung individuelle Parameter einbezogen werden – insbesondere zur genauen Nutzung der Räume, der Anzahl der im Haus lebenden Personen etc. Nur auf Basis dieses sogenannten Bedarfs-Verbrauchsabgleichs können belastbare Aussagen zum Einsparpotenzial einzelner Gebäude getroffen werden.
- Bei der Analyse von 10 „Ausreissern“, bei denen Endenergiebedarf und Endenergieverbrauch in der ersten Berechnung nicht gut übereinstimmten, wurde ein solcher Abgleich nach einer Vor-Ort Begehung, einem Gespräch mit dem Eigentümer/Nutzer sowie einer erneuten Berechnung durchgeführt. Durch eine schrittweise Anpassung der Bedarfsberechnung an die tatsächliche Nutzung konnte in allen Fällen eine weitgehende Übereinstimmung zwischen Energiebedarf und -verbrauch erreicht werden. Verwendet wurde das Berechnungsverfahren aus EnEV unter Nutzung der Algorithmen nach DIN 4108-6 und FIN V 4107-10 und -12. Grosse Abweichungen zwischen den beiden Werten konnten durch die Berücksichtigung u. a. von Teilnutzung bzw. -beheizung, den Einfluss des lokalen Klimas und die tatsächlichen Deckungsanteile der Energieträger weitestgehend aufgelöst werden. Auch Fehler oder eine fehlende Aktualisierung der vom Bauherrn veranlassten Energiebedarfsrechnung oder der Flächenangaben können erhebliche Abweichungen verursachen.

Die prozentuale Verbrauchsminderung vor/nach der Sanierung beträgt in der Stichprobe (n= 33 von 121) minus 89%. Nicht angegeben wird die theoretische Verbrauchsminderung.

In Gebäuden, in denen eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung zum Einsatz kommt, sinkt einerseits der Endenergiebedarf durch die verringerten Lüftungswärmeverluste, andererseits steigt der Hilfsenergiebedarf durch die Lüftungsanlage deutlich an. Ist als Hauptwärmeerzeuger gleichzeitig eine Wärmepumpe in Betrieb, ergeben sich insbesondere in gut gedämmten Gebäuden Endenergiekennwerte für Heizung und Hilfsenergie in gleicher Grössenordnung. Bei der Verbrauchserhebung ist es dann von hoher Bedeutung, genaue Informationen zur Zählerstruktur zur Verfügung zu haben. Hier ist genau zwischen Wärmepumpenzähler, Haushaltsstrom und Allgemeinstrom (in Mehrfamilienhäusern) abzugrenzen. Derzeit stellt diese Abgrenzung gemäss dena-Studie in vielen Gebäuden noch ein Problem dar.

Peper und Feist [12] legen dar, dass der **Einfluss des Nutzers auf den Energieverbrauch unabhängig vom betrachteten Energiestandard mit $\pm 50\%$ beziffert** werden kann. Sie postulieren, dass bei korrektem Rechengang, realitätsnahen Eingaben und angemessener Qualitätssicherung kein Performance Gap auftritt. Ihre Aussagen stützen sie auf die Auswertungen von über 2'100 Wohnungen im Passivhaus-Standard (Neubau und Sanierung).

Das Bilanz-Planungstool PHPP erweise sich als zuverlässig bei der Vorhersage des durchschnittlichen Heizwärmebedarfs bereits in der Planungsphase. Der Planungswert für die Raumtemperatur beträgt 20°C, das Passivhaus-Institut nennt aber einen Erfahrungswert von 21.5°C. Der Heizwärmeverbrauch vieler Überbauungen wurde witterungsbereinigt und raumtemperaturkorrigiert mit den Berechnungswerten aus dem Bilanz-Planungstool PHPP verglichen. Aufgrund der hohen Qualitätsanforderungen, der standardisierte Abläufe, der Luftdichtheitsuntersuchung mit BlowerDoor sowie grundsätzlich interessiert-informierter Bewohner können Abweichungen zwischen Heizwärmebedarf und Heiz-



wärmeverbrauch überwiegend auf die Raumtemperatur und das Benutzerverhalten zurückgeführt werden. Dies gilt für den Neubau wie auch für die Sanierung. Eine Vielzahl baugleicher Gebäude ermöglicht den Autoren statistisch belastbare Aussagen machen zu können.

Die Autoren weisen darauf hin, dass Vergleiche von berechneten Heizwärmebedarfswerten mit Verbrauchssummen „Heizung plus Warmwasser“ für keinerlei direkten Vergleich geeignet sind. Es sei streng genommen zwischen der Summe der gesamten Endenergie, Verlusten (nutzbar und nicht nutzbar) und der tatsächlich benötigten Heizwärme zu unterscheiden.

Das **BFE-Projekt „Erfolgskontrolle Gebäudeenergiestandards 2014-2015“** [9] untersuchte für 214 Gebäude, ob die Grenzwerte des jeweiligen Energiestandards bezüglich des gewichteten Energiebedarfs eingehalten werden. Die Energieverbrauchsanalyse wurde ergänzt durch eine breit angelegte Online-Befragung verschiedener Zielgruppen und Anlagebegehungen durch Expertenteams. Die Energieverbrauchsdaten stammen aus den Unterlagen, die von den Studienteilnehmern zur Verfügung gestellt wurden. Für die Berechnung der gewichteten Gebäudeenergiekennzahl standen im Idealfall die Daten zum Endenergieverbrauch pro Jahr für Heizung, Warmwasser und gegebenenfalls Kühlung aufgeschlüsselt nach Energieträger zur Verfügung. Die Angaben basierten auf Rechnungen oder Ablesewerten über den Zeitraum von mindestens zwei Jahren. Zudem wurde der Jahresstromertrag der Photovoltaikanlagen erfasst. Der Endenergieverbrauch wurde mit den nationalen Gewichtungsfaktoren pro Energieträger zur Ermittlung der gewichteten Energiekennzahl pro Quadratmeter Energiebezugsfläche verrechnet. Bei sämtlichen Objekten fand eine Begehung statt. An der Begehung wurden die Verbrauchsangaben plausibilisiert. Zudem konnte vor Ort der Energiebedarf zusätzlich zu berücksichtigender Verbraucher wie Lüftungsanlagen, Hilfsbetriebe oder Kühleinrichtungen erfasst werden. Der Heizwärmeverbrauch für MuKEN Gebäude wurde aus dem Endenergieverbrauch und dem angenommenen Jahresnutzungsgrad der Wärmeerzeugung ermittelt.

Lehmann et al. [96] berichten in einem Tagungsbeitrag über das vorgenannte BFE-Projekt. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass in 7 der 11 betrachteten Label-Kategorien der Median aller Energieverbräuche bei oder unter dem aktuellen Grenzwert. In zwei Fällen liegt der Median klar innerhalb der Spannbreite des Grenzwerts und in weiteren zwei Fällen oberhalb des jeweiligen Grenzwerts. Die Streubreiten der gemessenen Energieverbräuche sind dabei grösser als die Unterschiede zwischen den Grenzwerten der verschiedenen Label-Kategorien.

Mühlebach et al. [50] zeigen in der Zürcher 2000-Watt Überbauung Hunziker-Areal, dass Gebäude mit Komfortlüftung einen erhöhten Heizwärmebedarf aufweisen. Die Gebäude auf dem Areal mit Komfortlüftung schneiden schlechter ab als Gebäude mit Abluftsystemen kombiniert mit Aussenluftdurchlässen. Die tatsächlichen Verbrauchswerte für Heizwärme liegen hier um den Faktor 2 bis 2.5 über den Planungswerten für Heizwärme. Erklärungsansätze weisen auf die erhöhte Raumtemperatur, die Konstruktionsweise, die unterschiedlichen Wohnungsformen und das Lüftungssystem hin. Es werden keine Aussagen über die Betriebs- und Funktionsweise der Wärmerückgewinnung oder interne Wärme- und Luftleckagen gemacht. Der Arealgrenzwert der gewichteten Energiekennzahl von 30 kWh/m² wird in allen Gebäuden im Wesentlichen eingehalten. Es kommt eine prädiktive Heizungsregelung zum Einsatz. Der spezifische Wärmeverbrauch für Warmwasser liegt bei elf von zwölf Gebäuden unter dem Planungswert. Die Raumluftqualität liegt im Median bei 450 bis 1000 ppm. Es wird darauf hingewiesen, dass bei zentralen Abluftanlagen einige Nutzer die Aussenluftdurchlässe aus Komfortgründen abgeklebt haben. Die Volumenströme wurden gegenüber den Normvorgaben um 30% reduziert.

Nutzerverhalten

Die Analyse des Nutzerverhaltens bietet eine Möglichkeit, die Qualität des Innenraumklimas zu bewerten. Dabei sind ausgewählte Aspekte des Nutzerverhaltens als geeignete Indikatoren auszuwählen und zu interpretieren. Gleichzeitig hat das Nutzerverhalten einen signifikanten Einfluss auf die Gebäudeenergieperformance.

Zhao et al. [13] beschäftigten sich in einer amerikanischen Studie mit **Interaktionseffekten zwischen der theoretisch zu erwartenden Gebäudeenergieperformance und dem Nutzerverhalten**. Sie hoben hervor, dass ein hoher technologischer Stand eines Gebäudes alleine keine hohe energetische Performance garantieren kann, sondern dass der effektive Energieverbrauch auch stark vom Wissensstand und Verhalten der Nutzer abhängt. Die Autoren identifizieren vier direkte und zwei indirekte Korrelationen:

- (i) Temperatur-Sollwert (Winter/Sommer),
- (ii) Gebrauch der Waschmaschine und des Tumblers,
- (iii) Wissen über das Gebäudesystem, sowie
- (iv) Temperatur-Sollwert im Winter Wissen über das Gebäudesystem.

Sie heben hervor, dass Effekte aufgrund technologischer Fortschritte in der Gebäudetechnik nur zu 42% durch die Nutzer ausgeschöpft werden können, um die Energieeffizienz von Niedrigenergiebauten zu verbessern. Das Benutzerverhalten kann also weit über 50% des theoretischen Potenzials der Energieeffizienz der Niedrigenergiebauten nicht beeinflussen. Das erklärt teilweise, wieso Energieeffizienzsteigerungen zu keinen grösseren Einspareffekten geführt haben (vgl. auch Abschnitt 4.3 zu Prebound-/Rebound Effekten).

Aus einer Systemperspektive ist ein Gebäude ein sehr kleines soziotechnisches System, in dem Effizienzsteigerungen einen gemeinsamen Effort der Bewohner, der Technologien, des Gebäudemanagements und der Umgebung bedingen. Konsequenterweise beinhalten technologische Fortschritte und Verhaltensformbarkeit erreichbare Auswirkungen auf die Gebäudeenergieeffizienz.

Die Autoren merken an, dass ihre Arbeit die Interaktionseffekte identifiziert hat, welche eine bessere Interpretation der zugrundeliegenden Beziehungen zwischen Bewohnern, Technologien und Energieverwendung ermöglichen. In wissenschaftlichen Studien ist das Konzept der Interaktionseffekte oft einfach zu verstehen, aber die Bedeutung ist anscheinend schwer festzustellen. In dieser Studie deuten die Interaktionseffekte auf eine gemeinsame Anstrengung von Menschen und Technologien auf den Energieeinsatz hin. Der Effekt des gleichen Technologielevels variiert stark für verschiedene Benutzer und umgekehrt. Es ist offensichtlich, dass ein höheres Mass von Gebäudetechnologie zu weniger Energieverbrauch führt.

Es bleibt aber festzuhalten, dass unter Berücksichtigung der Interaktionseffekte die am weitesten fortgeschrittene Gebäudetechnologie nicht zwingendermassen zu optimalen Energieeffizienz führt. Das Benutzerverhalten beeinflusst die Gebäudetechnik und vice-versa. Es lassen sich drei Schlussfolgerungen ziehen:

- Immobilienbesitzer als Stakeholder müssen die Benutzer mit klarer und verlässlicher Information über den Gebrauch der Gebäudetechnik und Energieeffizienz beliefern.
- Energiesparprogramme wie Steuererleichterungen sollten gemeinsam geteilte Energiemonitoring-Informationen beinhalten.
- Energieeffizienzcontrolling-Tools und -Praxis sollten die Verhaltensmuster der Benutzer beinhalten, um eine bessere Genauigkeit und Wirkungsweise zu ermöglichen.



Fabi et al. [88] erstellten 2012 im Rahmen des IEA ECBCS Projekt Annex 53 (siehe Abschnitt 6.2) eine **Literaturreview zum Fensteröffnungsverhalten** von Nutzern. Die Möglichkeit, Fenster öffnen zu können beeinflusst das Komfortempfinden des Nutzers elementar. Auch diese Autoren heben hervor, dass der Zusammenhang zwischen Innenraumklima, Nutzerverhalten und Energieverbrauch wesentlich besser verstanden werden muss (vergleiche auch **Cali et al.** [77]). Hier sei der Hinweis gegeben, dass der Gebäudepark der Schweiz zum Grossteil aus Bauten besteht, die über manuelle Fensterlüftung eine gewünschte Innenraumluftqualität sicherstellen.

Hong et al. [60] entwarfen eine **Gesamtübersicht zum Nutzerverhalten** in Gebäuden und zeigten den Stand der Forschung diesbezüglich auf. Laut dieser Arbeit wird das Nutzerverhalten noch zu wenig gut verstanden und im Gebäudelebenszyklus zu vereinfacht berücksichtigt. Die Annahme eines zu statischen Nutzerverhaltens könne daher zu Energy Performance Gaps zwischen Planung und Betrieb führen.

Die Integration des Benutzerverhaltens in die Entwurfs-, Betriebs- und Sanierungsphase ist kritisch für Niedrig- oder Nullenergie-Gebäude. Unterschiedliche Stakeholder mit verschiedenen Rollen über den Gebäude-Lebenszyklus sind involviert im Forschungsthema. Es sind dies Bewohner, Architekten, HLK Ingenieure, Facility Manager, Immobilienhändler, Immobilienbesitzer, Gebäudetechnikanbieter und -Praktiker, Gebäudesimulations-Softwareentwickler wie auch Forscher und Strategieentwickler im Bereich der Energie- und Sozialwissenschaften.

Der Einfluss des Benutzerverhaltens auf die Gebäudeenergieperformance wurde über den gesamten Prozess des Gebäudebetriebs zu stark vereinfacht oder gar ignoriert. Um den Einfluss des Benutzerverhaltens auf die Gebäudeenergieperformance studieren zu können, müssen umfangreiche objektive und subjektive Messmethoden angewendet werden.

Aktuell herrscht ein Mangel an Übereinstimmung in der Forschungsgemeinschaft betreffend Validierung und Anwendbarkeit von Benutzerverhaltensmodellen und Simulationsansätzen. Modelle müssen das Benutzerverhalten deterministisch umfassen und sich in ein Feld bewegen, wo Handlungen statistisch relevant oder stochastisch beschrieben werden können. Nichtsdestotrotz werden vereinfachte statische und deterministische Benutzerfahrpläne und Benutzerprofile typischerweise als direkter Input in den meist verbreitetsten Gebäude-Simulationsprogrammen eingesetzt. Allerdings werden nun auch vermehrt Simulationstechniken, Simulationsmodelle und Fallstudien für Gebäudeperformance-Simulationswerkzeuge entwickelt, welche der Diversität und Komplexität des Benutzerverhaltens besser gerecht werden.

Quantitative Forschungsmethoden der Sozialwissenschaften, wie die Umfragemethodik, repräsentieren einen wachsenden Trend, um Einsicht in das Benutzerverhalten in Gebäuden zu gewinnen. Zusätzlich kann das volle Verständnis der physischen soziopsychischen Faktoren des Benutzerverhaltens die Effektivität von Energieeffizienzmassnahmen deutlich erhöhen. Eine Verbesserung der Energieeffizienz um 5 bis 20% kann durch Verhaltensänderung bewirkt werden, welche durch gezielte Verhaltensintervention ausgelöst wurde.

Eine ausführliche Übersicht zu Grundlagen, Simulationsmethoden sowie eine Literaturreview (Stand 2013) zum Einfluss des Nutzerverhaltens auf den Energiehaushalt eines Gebäudes findet sich im Schlussbericht des **IEA-Projekts Annex 53** [118].



Unsicherheiten: Kompetenz

Jones et al. [7] untersuchen in ihrer Studie sechs identische Wohnungen im gleichen Gebäude. Die Diskrepanzen der Ergebnisse zwischen statischer Berechnung und Simulation einerseits und Messung andererseits werden auf limitierte Berechnungsmethoden, **unterschiedliche Kompetenz der Modellierer** und das Benutzerverhalten zurückgeführt.

Hinzu kommen die Unsicherheiten betreffend dem Nutzungsgrad der Wärmeerzeugung. Die kombinierte Wärme- und Warmwassererzeugung soll einen theoretischen Nutzungsgrad von 91% aufweisen. Alle Angaben werden auf den Endenergieverbrauch gemacht. Gemessene Endenergiedaten werden mit berechnetem oder simuliertem Nutzwärmebedarf verglichen – dies unter Annahme des Nutzungsgrades der Wärme- und Warmwassererzeugung. Höhere eingestellte Warmwasser- und Raumlufttemperaturen sowie Verteil- und Speicherverluste können den Nutzungsgrad des Heizsystems merklich beeinflussen. Bei den sechs identischen Wohnungen wird der gemessene und der berechnete Endenergieverbrauch leider nicht wohnungsweise miteinander verglichen. Bezüglich der Mittelwerte aus normativer und dynamischer Berechnung beträgt die Differenz 11 bis 13%, was in einer Unsicherheitsbetrachtung mit den gegebenen Einzelunsicherheiten noch keinen Performance Gap darstellen muss.

Auffällig ist, dass hier in der Literatur erstmalig ein vorteilhafter Energy Performance Gap festgestellt wird. Es wird weniger verbraucht als berechnet wurde. Dies gilt aber nur für die Wärme. Bei der Elektrizität tritt gerade der umgekehrte Fall ein. Zur Belegung und Nutzungsdauer machen die Autoren keine Aussage.

Unsicherheiten: Nutzungsgrad

In der Studie der **Techem Energy Services GmbH** zu den **Energiekennwerten 2016** [95] beträgt der mittlere auf den Heizwert bezogene Jahresnutzungsgrad für die Raumheizwärme bei Heizölkessel 81.6% und bei Erdgaskessel 90.0%. Der mittlere auf den Heizwert bezogene Jahresnutzungsgrad bei Anlagen mit Warmwassererwärmung beträgt bei Heizölkessel 74% und bei Erdgaskessel 82.1%. Somit ergeben sich für den gesamten bestehenden Anlagenmix heizwertbezogene Jahresnutzungsgrade von 76.1% (Heizölkessel) respektive 83.7% (Erdgaskessel).

Bezüglich Erdgas erzielen Anlagen im Eigenbetrieb niedrigere Jahresnutzungsgrade (83.7%) als Anlagen im Contracting (90.9%). Bezüglich Heizöl betragen die Jahresnutzungsgrade heizwertbezogen 76.1% respektive 86.8%. Die Spanne reicht von jeweils 55% bis 110%.

Schweizerische Standard-Jahresnutzungsgrade werden gemäss Minergie-Reglement 2017 [28] heizwertbezogen für Raumwärme mit 91% (Heizöl) respektive 95% (Erdgas) angegeben. Bei Warmwassererwärmung betragen sie 88% (Heizöl) respektive 92% (Erdgas).

Die Ergebnisse der Studie von 2016 wurden im Folgebericht 2017 bestätigt [39].



dena Gebäudereport 2015 [55]: Der Heizwärmebedarf stellt die Energieeffizienz der Gebäudehülle dar, während der Endenergiebedarf die Gesamtenergieeffizienz (Gebäudehülle und Heizsystem) beinhaltet.

Das Verhältnis des Heizwärmebedarfs zum Endenergiebedarf weist folgende Durchschnittswerte auf:

	Einfamilienhaus	Mehrfamilienhaus
Heizöl	0.70	0.72
Strom direkt	0.83	0.81
Gas	0.72	0.72
Holz inkl. Pellets	0.58	0.59
Fernwärme	0.76	0.71
Wärmepumpe	2.39	2.67

Tabelle 13: Verhältnis des Heizwärmebedarfs zum Endenergiebedarfs (Nutzungsgrad) [55]

Die Energiekennwerte 2016 von Techem Energy Services GmbH [95] und der dena Gebäudereport [55] weisen im Anlagebetrieb Jahresnutzungsgrade aus, die deutlich von den Standardwerten abweichen. Dies ist ein Hinweis darauf, dass in Untersuchungen, die auf standardisierte Nutzungsgrade aus der Planung zurückgreifen, eine signifikante systematische Unsicherheit auftritt, da tatsächlich realisierte Jahresnutzungsgrade von Standardnutzungsgraden abweichen.

Unsicherheiten: Robuste Dimensionierung und Optimierung

Maderspacher [79] entwickelte in seiner Dissertation eine Methode zur robusten Optimierung der energetischen Sanierung von Gebäuden unter Berücksichtigung unsicherer Randbedingungen. Diese Methode ermöglicht die gleichzeitige Optimierung von energetischen, ökologischen und ökonomischen Zielgrößen mit verbesserter Robustheit gegenüber unsicheren Randbedingungen. Mit Hilfe der thermischen Gebäudesimulation wurde ein detailliertes Modell eines Wohngebäudes als Basis für die Analysen erstellt. Die robuste Optimierung wurde mit Hilfe eines Ersatzmodells auf Basis des detaillierten Gebäudemodells durchgeführt. Für die Auswahl eines geeigneten Ersatzmodells wurden zwei Methoden aus des statistischen Lernens - Neuronale Netze und Support Vector Regression - miteinander verglichen. Die Unsicherheitsanalyse wird mit Hilfe einer Monte-Carlo-Simulation in die robuste Optimierung integriert. Für die Optimierung wird eine populationsbasierte Metaheuristik - „Particle Swarm Optimization (PSO)“ - verwendet.

Eine erste Anwendung dieser Methode zeigt im Vergleich zu einer Sanierung nach der deutschen Energieeinsparverordnung (EnEV), dass für die Zielgrößen „Treibhausgas-Emissionen“ und „Kapitalwert“ eine deutliche Minimierung bzw. Maximierung möglich ist. Dies kann bei gleichzeitiger Erhöhung der Robustheit der genannten Zielgrößen gegenüber klimatischen Veränderungen und Energiepreisschwankungen erreicht werden. Die im Rahmen dieser Dissertation entwickelte Methode kann für weitere Gebäudetypen adaptiert und/oder durch weitere unsichere Randbedingungen, wie das Nutzerverhalten, ergänzt werden. Eine Erweiterung für die Anwendung zur Planung von Neubauten oder in frühen Entwurfsphasen ist ebenfalls möglich.

Killian et al. [80] beschreiben 4 Elemente eines Model Predictive Control Systems: (1) ein real-time fähiges dynamisches Gebäudemodell, (2) Voraussagen von wesentlichen Störgrößen, (3) ein Performance-Kriterium, welches im Konflikt stehende Ziel integriert und (4) ein real-time Optimierungsalgorithmus. Der Hauptvorteil des Model Predictive Control ist die Berücksichtigung von verfügbaren Vorhersagen zu zukünftigen Störungen in einem Optimierungsalgorithmus. Killian et al. sehen beim Thema „Model Predictive Control“ (MPC) folgende Herausforderungen: (i) die bedachte Wahl eines



passenden und effizienten Modellierungsansatzes zur Etablierung einer ökonomisch erfolgreichen MPC-Implementation, (ii) den erforderlichen akademischen Bildungshintergrund der Gebäudeautomations-Spezialisten (iii) die Risikoverminderung von MPC-Implementierungen (iv) die Zurückhaltung der Gebäudeautomations-Industrie bei der Adaption von Innovationen. Grundsätzlich ist ein Model-Predictive-Control System in seiner dynamischen, adaptiven Art mit Störgrössen umgehen zu können, ein Energy Performance Gap-Ver minderer. Das MPC-System ist zudem gut geeignet für ein Zusammenwirken in Smart Grids mit erneuerbaren Energieträgern. Nachteilig ist die immer noch geringe Zahl an Experten, die MPC-Systeme auf Anlagen in Betrieb setzen und optimieren können.

Boxer et al. [26] führen ein modellbasiertes Entscheidungs- und Unterstützungstool für Gebäudeportfolios unter Unsicherheiten ein. Obwohl heutzutage grosse Datenmengen in Gebäuden erfasst werden, fehlen Facility Managern die Benchmarks, um die Gebäudeenergieperformance verfolgen zu können. Das Self-Benchmarking der Gebäudeenergie ist ein effektives Mittel, um Performance und Erwartungen zu vergleichen. Im Beitrag wird eine verbesserte Theorie für ein Entscheidungs- und Unterstützungstool vorgestellt, welches das Self-Benchmarking der Gebäudeenergieperformance beherrscht. Es identifiziert selbständig energetische Schwachstellen und quantifiziert ihren Schweregrad. Methoden des parametrischen Samplings und der Unsicherheitsanalyse wurden erweitert durch detaillierte Charakterisierung der Unsicherheit von Parametern. Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen wurden verwendet, um Schwellwerte für Risikotoleranzen für jeden Endkunden festzulegen. Eine dynamische Kostenfunktion erlaubt der Nutzentheorie unter Multikriterien zu erwartende Kosten zu berechnen. Die verbesserte Theorie für das Entscheidungs- und Unterstützungstool wurde in 10 fehlerbehafteten Modellszenarien in drei Klimazonen getestet. Schlussendlich zeigen die Autoren die Priorisierung von Fehlermeldungen auf. Mittels grafischen Ampelsystemen wird der Endkunde über Prioritäten und Kostenabweichungen informiert.

Sun et al. [8] erläutern, dass Sicherheitsdenken („defensive design“) zu markanter Überdimensionierung von Gebäudetechnikanlagen führen kann. Im Betrieb können diese Leistungsreserven durch Nutzer- und Betreibereinflüsse die Gebäudeperformance reduzieren. Ein Framework für eine Risiko-orientierte Anlagendimensionierung auf Basis thermischer Gebäudesimulationen mit kombinierten Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen wird entwickelt.

Folgende Schritte sind im Framework enthalten:

- (i) Datenerfassung und Kategorisierung,
- (ii) Unsicherheitsquantifizierung,
- (iii) dynamische Gebäudesimulation,
- (iv) Unsicherheitsanalyse für Zielwerte mit der Monte-Carlo Methode,
- (v) Sensitivitätsanalyse und probabilistische Sensitivitätsanalyse im speziellen,
- (vi) Quantifizierung von Leistungsreserven basierend auf definierten Performance-Garantien des Systems.

Existierende Auslegungsmethoden basierend auf Standardnutzungsdaten offerieren keine Transparenz der Garantien, dass die System-Auslegung die erforderliche Performance erfüllen wird. Die erforderliche Performance (z.B. Lastspitzen in 99.6% aller Stunden gedeckt) wird nur implizit garantiert durch die Wahl der Auslegungsmethode und die Wahl von Sicherheitszuschlägen. Dies führt zur unerwünschten Praxis der Überdimensionierung.



Eine neue Auslegungsmethodik basierend auf Gebäudesimulation mit integrierten quantifizierten Unsicherheiten wird in [8] vorgeschlagen. Die vorgeschlagene Auslegungsmethodik hat vier signifikante Vorteile:

1. Gebrauch von realen Wetterdaten,
2. explizites Tracking der Wahrscheinlichkeit, dass das System die gewünschte 99.6 Perzentil (oder jedes andere Ziel) erreicht,
3. Möglichkeit zur Unterstützung risikobasierter Dimensionierung, damit Stakeholder-spezifizierte Garantien erfüllt werden können,
4. Unterstützung von Sensitivitätsanalysen zur Steuerung von System-Redimensionierungen durch Verbesserung der Gebäudeenergieeffizienz bei gleichbleibender Garantie der Betriebsbedingungen.

Feustel [62] stellt bei der Bestimmung des **sommerlichen Aussenluft-Auslegungszustandes für die Komfortklimatechnik** exemplarisch fest, dass es deutliche Hinweise für den Klimawandel gibt. Steigende Aussenlufttemperaturen haben höhere Aussenluftfeuchten mit entsprechend höheren Aussenluftenthalpien zur Folge als in den Dimensionierungsvorschriften für Luftkühler vorgesehen. Dadurch ist ein systematischer Indoor Environmental Quality Gap in luftgekühlten Gebäuden in den Sommermonaten möglich.

Die Analyse der Karlsruher Wetterdaten von 2001 bis 2016 zeigt einen deutlichen Anstieg der Stunden mit hoher Aussenluftenthalpie. Er vergleicht verschiedene Literaturquellen bezüglich Auslegungszustände für Karlsruhe miteinander. Bei der Verwendung tatsächlich gemessener Klimadaten zur Festlegung des erforderlichen Aussenluftzustandes (t,x-Korrelation) wird die Kühlerauslegung je nach Randbedingungen eine Leistungssteigerung um 26 bis 35% erforderlich machen.

Dieser Umstand kann zu einem systematischen Beitrag zum Energy Performance Gap führen, wenn die Wetterdaten, die den Berechnungen zugrunde liegen nicht aktualisiert werden. Weiter kann im Betrieb auch ein Indoor Environmental Quality Gap entstehen, da die Komfortbedingungen nicht mehr eingehalten werden können. Es ist unabdingbar, dass der gewählte Auslegungszustand mit Hinweis auf den Klimawandel mit dem Auftraggeber abgesprochen wird. Eine Anpassung der Dimensionierungsgrundlagen für Luftkühler (SIA 2028) wird empfohlen.

Das **BFE-Projekt „ROGEK“** untersuchte die **Robustheit von Kühlszenarien** hinsichtlich der thermischen Behaglichkeit und des Energieverbrauchs in Bürogebäuden [63]. Zu diesem Zweck wurden drei Kälteabgabesysteme ausgewählt: Umluftkühlung, Kühldecke und Betonkernaktivierung. Die genannten Systeme wurden für ursprünglich vier typische Bürobauten mit unterschiedlicher thermischer Trägheit und unterschiedlichen Fensterflächenanteilen simuliert. Aufgrund von typologischen Ähnlichkeiten und vergleichbarem Nutzenergiebedarf des Büroneubaus und des Referenzgebäudes wurde die Variante Büroneubau nicht mehr weiterverfolgt. Somit wurden drei Gebäudemodelle weiter untersucht: Referenzgebäude, Altbau und Firmenhauptsitz.

Alle Simulationen erfolgten mit aus Betriebsdaten kalibrierten Gebäudemodellen. Zusätzlich wurde der Einfluss unterschiedlicher Lüftungssysteme (mechanisch oder natürlich, mit oder ohne Nachtbetrieb) ohne Kälteabgabesystem untersucht. Die Robustheit der unterschiedlichen Kühlszenarien wurde für vier verschiedene Klimaszenarien (historische und prognostizierte) und bezüglich drei verschiedener Varianten von Nutzerverhalten ermittelt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Kälteabgabesysteme zum Zeitpunkt der Erstellung bis zu einem gewissen Grad überdimensioniert werden sollten, um den zunehmenden Klimakältebedarf in der Zukunft abzudecken.

Es wurde gezeigt, dass die Kühldecke und Betonkernaktivierung bei der prognostizierten Klimaänderung grundsätzlich robuster sind als andere untersuchte Kühlszenarien. Die Nachtauskühlung durch



mechanische Lüftung ist eine zusätzliche robuste Option für Gebäude mit grosser thermischer Trägheit; bzw. die Umluftkühlung für Gebäude mit hohem Fensteranteil. Zudem zeigt diese Studie, dass Kühldecke und Umluftkühlung bezüglich der Variabilität des Nutzerverhaltens robuster sind als andere Kühltrendszenarien.

Gemäss BFE-Schlussbericht hat die Simulation mit den prognostizierten 30 Jahre Klimaänderungsszenarien folgendes gezeigt:

- „Altbau“: deutliche Zunahme des Klimakältebedarfs sowie der Überhitzungsstunden im Vergleich zur „Referenzperiode“ (Klima). Der Klimakältebedarf steigt durchschnittlich von 1.5 bis auf 2.7 kWh/m² (Zunahme von 80%);
- „Referenzgebäude“: mittlere Zunahme des Klimakältebedarfs sowie der Überhitzungsstunden zur „Referenzperiode“ (Klima). Der Klimakältebedarf steigt durchschnittlich von 7.9 bis auf 11.3 kWh/m² (Zunahme von 43%);
- „Firmenhauptsitz“ (komplett verglasten Bürogebäude): geringe Zunahme des Klimakältebedarfs aber relevante Zunahme der Überhitzungsstunden zur „Referenzperiode“ (Klima). Der Klimakältebedarf steigt durchschnittlich von 26.8 bis auf 32.2 kWh/m² (Zunahme von 20%).

Es wird darauf hingewiesen, dass nur reine Kälteabgabesysteme untersucht wurden (Nutzenergie), ohne die darauf passende Kälteerzeugung zu betrachten. Alle Aussagen dieser Studie wurden aus der Optik der bisherigen Planungsmethodik mit impliziten Sicherheitsreserven gemacht. Die Randbedingungen wurden durch 5 Interviews mit Planern und Betreibern festgelegt, deren Hauptziele (i) die Gewährleistung des geplanten Energiebedarfs über die Lebensdauer des Gebäudes und (ii) die Anpassungsfähigkeit während der Nutzungsphase waren.

Im Rahmen der Simulationsstudie wurden keine Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalysen durchgeführt. Hier wäre das vorgeschlagene Framework von Sun et al. [8] für eine risikoorientierte Anlagendimensionierung mit kombinierten Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen ein sehr interessanter Ansatz gewesen.

Die vorgeschlagene Überdimensionierung zur Deckung des zukünftigen Kühlleistungsbedarfs ist aus der Perspektive des Energy Performance Gaps kritisch zu bewerten. Zu oft führen Leistungsreserven durch Betreiber- und Nutzereinflüsse zu einem ineffizienten Anlagebetrieb. In [63] wird zudem lediglich die Änderung der Aussenlufttemperatur thematisiert. Für die Anlagendimensionierung und den späteren Betrieb sind aber die Aussenluftfeuchte und die Aussenluftenthalpie sehr entscheidende Grössen. Diese Werte werden bei steigenden Aussenlufttemperaturen ebenfalls merklich ansteigen, da wärmere Aussenluft eine höhere Enthalpie aufweist. Feustel [62] zeigt, dass bereits heute bei der Berücksichtigung konkreter (t,x)-Werte Paare deutlich grössere Luftkühler zu dimensionieren sind.

Im **BFE-Projekt „Feldmessungen von U-Werten zur Überprüfung der im Gebäude-energieausweis (GEAK) hinterlegten U-Werte (UFELD)“** [64] konnte eine Ursache für den Energy Performance Gap bei älteren Bestandsbauten ermittelt werden.

Messtechnisch konnten reale U-Werte in-situ ohne Beeinträchtigung der Wand bestimmt werden. Die Messunsicherheit der Messmethode während der dreitägigen Messdauer beträgt $\pm 20\%$. Eine frühere auf Infrarot-Thermografie basierende Hypothese wurde damit bestätigt.

Die im GEAK-Tool verwendeten U-Werte sind gemäss BFE-Projekt 50 bis 60% höher als die gemessenen U-Werte. Bei unvollständiger Datenlage wird damit das Sanierungspotenzial bei Anwendung des GEAK-Tools systematisch überschätzt. Sanierte Bestandsbauten weisen vernachlässigbare Unterschiede zwischen berechnetem und gemessenem U-Wert auf.



Anhang D Literatur zu Ursachen und Massnahmen

Ursachen von Performance Gaps

Themenbereich ³⁴	Ursachen (Aussagen aus der Literatur)	Quelle ³⁵
Interesse	cost cutting (value engineering changes)	[37]
	no control of concordance between operation budget and energy performance desired	[1]
	government doesn't lead the way to try to improve as-built energy performance	[1]
	inappropriate substitution of one material (or supplier) without due regard for performance criteria	[1]
	change orders and value engineering	[14]
	regulatory pressure to make buildings more energy efficient might lead to over-optimistic predictions	[14]
	design changes during the execution phase	[10]
	changes in design (value engineering)	[5]
Erwartung	changes to BMS and controls	[37]
	building used differently than assumed	[37]
	BMS controls not working as intended	[37]
	unregulated energy not accounted for in predictions	[37]
	bad definition about energy performance	[1]
	inaccurate assumptions which will create unrealistic baselines for expected performance	[1]
	poor communication to the client how best to operate their new building	[1]
	mis-communication about performance targets between client and design team	[14]
	future use of the building cannot fully be predicted (requirements and conditions are subject to significant change)	[14]
	over-optimism on system acceptance by intended users	[14]
	occupant behavior is different from the assumptions made in the design stage	[14]
	IT-related loads are higher than anticipated	[14]
	the actual operation of the building is typically different from the idealized assumptions made in the design stage, both in terms of actual control settings as well as the broader scope of facility management	[14]
	modeling assumptions for domestic hot water do not reflect actual usage well	[36]
	occupant behaviour regarding ventilation and window opening	[36]
	malfunctioning / maladjustment of technical systems	[10]
	occupant behaviour (building usage)	[10]
	occupant behaviour (use)	[12]
	Nutzerverhalten: sparsame Bewohner	[9]
	Nutzerverhalten: Lüftungsverhalten	[9]
	Nutzerverhalten: Raumtemperatur	[9]

³⁴ siehe Abschnitt 2.2

³⁵ siehe Abschnitt 4.1



Themenbereich ³⁴	Ursachen (Aussagen aus der Literatur)	Quelle ³⁵
Erwartung	von der Planung abweichende Nutzung des Gebäudes und der Anlagentechnik	[2]
	abweichende Anzahl der Gebäudenutzer	[2]
	nicht-bedarfsgerechte Anlagensteuerung	[2]
	Installation von anderen bzw. zusätzlichen Verbrauchern	[2]
	occupant behaviour (usage)	[5]
	specification uncertainty	[5]
	scenario uncertainty	[5]
	longitudinal variability in operation	[5]
	poor practice and malfunctioning equipment	[5]
Detektion	changes in design are not followed through to revise energy predictions	[37]
	inadequate understanding and poor knowledge within design team (buildability, thermal detailing, Psi-values, tolerances, construction systems and materials, site conditions, SAP and energy issues, performance)	[1]
	incorrect specification of building materials in design (poor specification); incorrect data used in design	[1]
	design weaknesses not recognized by compliance model	[1]
	the unregulated energy is not included e.g. servers, lifts, etc.	[1]
	concerns about accuracy of aspects energy calculation model and assumptions, e.g. thermal mass, hot water, ventilation, cooling, lighting, thermal bridging	[1]
	issues surrounding use of calculation procedures related to U-values and Psi-values	[1]
	limited ability to include new technologies in standard calculation methodologies	[1]
	lack of robust verification of planning requirements and standards at completion.	[1]
	lack of robust energy-performance related verification	[1]
	bad Metering strategy	[1]
	all predictions remain subject to fundamental uncertainties	[14]
	lack of formal error and accuracy testing of detailed design calculations	[14]
	present approaches do not take system performance deterioration into account	[14]
	some problems will be evident from measurement but in many cases visual inspections are needed to establish actual issues	[14]
	issues concerning proper tests to assess the performance of new constructions once a building is complete	[14]
	uncertainty in experimental data (it is a challenging task to ensure that all sensors operate properly and that data is registered in the correct manner)	[14]
	suspected modeling mismatch for window heat gains (SIA 380/1)	[36]
	inaccuracies due to the use of standard values according to SIA 380/1 (inputs related to conditions of use)	[10]
	uncertainties in the input data used and model limitations (e.g. weather data, controls, shading, insulation)	[10]
	measurement limitations	[10]
	uncertainties regarding the estimated DHW demand and the efficiency of heat production system	[10]
	theoretisch ermittelte Bezugsfläche grösser als tatsächlich beheizte Fläche (EnEV)	[12]



Themenbereich ³⁴	Ursachen (Aussagen aus der Literatur)	Quelle ³⁵
Detektion	Messungenauigkeiten einer umfangreichen Untersuchung lassen Genauigkeiten von +/- 3 kWh/m ² a erwarten	[12]
	Annahmen zum Verbrauch von Begleitbandheizungen, Heizstäben mit Unsicherheiten behaftet	[9]
	unpassender Detaillierungsgrad des Simulationsmodells	[2]
	nicht nutzbare Messdaten in Folge zu hoher Messungenauigkeit bzw. fehlerhafter Installation	[2]
	modeling uncertainty	[5]
	numerical uncertainty	[5]
	heuristic uncertainty	[5]
	inter-model variability	[5]
	measurement system limitations	[5]
Attribution	unmanageable complexity	[37]
	quality of construction	[37]
	commissioning rushed or incomplete	[37]
	design modeling naive	[37]
	contractor designed elements	[37]
	poor energy management	[37]
	poor briefing	[1]
	lack of concept design team understanding of the impacts of their decisions on energy performance or their potential to contribute to the Performance Gap	[1]
	limited understanding by funders of the impact of aesthetics requirements on energy performances targets	[1]
	limited understanding by concept design team of impact of early decisions of energy performance targets	[1]
	absences of SAP specialists in this stage, indicating a possible lack of consideration for the energy performance of the sites	[1]
	complex design with difficult buildability makes energy performance gap arising	[1]
	lack of communication regarding critical energy performance criteria of components from design team to procurement team	[1]
	construction details inadequately specified in design, or not well enough communicated to site	[1]
	lack integrated design, e.g.: services designed by the supplier	[1]
	procurement and construction team lack of understanding of critical energy-performance related criteria	[1]
	full design information or installation guidance produced but not available on site	[1]
	lack of designer input available to site if issues arise	[1]
	construction teams not sufficiently involved at the design stage	[1]
	tender documentation not containing up-to-date requirements or trade specifications	[1]
	building materials not conforming to specification or not performing in situ as expected	[1]
	construction responsibilities for energy performance unclear, lack of collaborative working	[1]
	on-site construction not conforming to design	[1]
	poor installation or commissioning of services, short term fixes and improvisations on site without understanding of long-term impact	[1]
	lack of adequate quality assurance on site and responsibility for QA	[1]



Themenbereich ³⁴	Ursachen (Aussagen aus der Literatur)	Quelle ³⁵
Attribution	existing quality checks were limited and did not focus strongly enough on energy-related performance	[1]
	handover should be on guides, manuals, walkthroughs, support, etc. but sometimes is rushed and incomplete	[1]
	poor training of building users	[1]
	no widespread culture of reviewing what has been constructed and then using that knowledge to inform future projects	[1]
	inadequate design through poor thermal concept, overspecification/oversizing or lack of appropriate detail	[14]
	buildability, simplicity, sequencing of construction process not taken into account	[14]
	overly complex systems and control of these systems	[14]
	the quality of the building is often not in accordance with the specification, with insufficient attention to both insulation and airtightness	[14]
	traditional construction processes are hard to change	[14]
	poor client knowledge	[14]
	poor labour skills	[14]
	lack of routine Post Occupancy Evaluation (POE)	[14]
	poor quality of execution	[10]
	poor commissioning	[10]
	Funktions- und Einstellprobleme an der Haustechnik	[9]
	tiefer Wirkungsgrad der Heizungsanlage	[9]
	Nutzerverhalten: geringerer Verbrauch bei fachlichem Hintergrund im Energiebereich	[9]
	Gasheizungen überschreiten Grenzwerte mit höherer Wahrscheinlichkeit als Wärmepumpe oder therm. Solaranlage	[9]
	Neubauten mit tiefem Energieverbrauch weisen eine höhere Wahrscheinlichkeit der Überschreitung der Grenzwerte auf	[9]
	limited understanding of impact of early design decisions	[5]
	complexity of design	[5]
	on-site workmanship	[5]
	poor commissioning process	[5]

Tabelle 14: Ursachen von Performance Gaps aus der Literatur



Lösungsvorschläge zur Reduktion von Performance Gaps

Themenbereich ³⁶	Lösungsvorschläge (Aussagen aus der Literatur)	Quelle ³⁷
Interesse	better engagement between landlord and tenants	[37]
	regulatory frameworks to boost motivation and accountability of building operators and users	[37]
	define your design and operational targets for the project prior to the site being chosen and the design team being appointed	[1]
	define the building's energy consumption targets based on national building regulations and investor's needs	[1]
	ensure that the contractors are legally obliged to deliver a building that meets the design intent	[1]
	allow for materials or equipment substitutions only if the impacts on the building performance and operating costs are fully modelled	[1]
	consider writing the air tightness target into the main contractor's contract, with penalties if it is not achieved	[1]
	ensure that the building to be delivered meets its design intent (it is a legal obligation)	[1]
	Bauherrschaften (als Entscheidungsträger) von der Minergie-Idee überzeugen	[9]
	Investitionen in energiesparendes Bauen sollen sich ökonomisch bezahlt machen	[9]
	energy performance contracts	[5]
	legislative frameworks (stakeholder interests)	[5]
Erwartung	consider total energy use	[37]
	BMS and control audits	[37]
	propose your needs to the design team, in terms of the building design, building energy performance, indoor comfort (e.g. thermal, acoustic, visual, etc.), air quality and available resources	[1]
	engage in the project design to ensure it meets your requirements	[1]
	engage in the project design to ensure it meets your requirements whenever any major design changes are proposed	[1]
	engage in the building construction process to ensure it meets your views	[1]
	remember that building energy rating certificates are good indicators of the potential energy performance of a building, but they cannot take into account changes in the design, or any aspects of operation and occupants' behaviour	[1]
	propose the building design concept based on the investor's brief	[1]
	communicate well, with the investor, how the design choices may impact the energy performance of the building and the overall cost of construction and operation	[1]
	provide the whole-life costing, which includes all aspects of project design, construction, commissioning, operation, decommissioning and disposal	[1]
	design a building to be partially future proofed, e.g. taking into account the climatic change, with sufficient space for additional services, possibility of extension, etc.	[1]
	make sure that multiple systems installed are not 'fighting each other', e.g. cooling against heating	[1]

³⁶ siehe Abschnitt 2.2

³⁷ siehe Abschnitt 4.1



Themenbereich ³⁶	Lösungsvorschläge (Aussagen aus der Literatur)	Quelle ³⁷
Erwartung	make sure the controls for various systems, such as heating/cooling, ventilation, renewable energy, lighting, etc. are not overcomplicated for use by occupants	[1]
	make sure that multiple systems installed are not 'fighting each other'	[1]
	ensure that ambitions, design intent and responsibilities are clearly communicated	[14]
	introduce more strict regulation for design (e.g. making the passivehaus standard mandatory)	[14]
	more rigorous completion testing	[14]
	nur der Mittelwert ausreichend vieler baugleicher Häuser und eine zeitgleiche Erfassung ermöglicht Aussagen zum Gebäudestandard	[12]
	disclosure of design stage calculations	[5]
	legislative frameworks for operational management in buildings	[5]
	stringent energy performance in-use target	[5]
	introduce well-defined uncertainties in design	[5]
	improving the robustness of the building design	[5]
	frequent re-commissioning exercises	[5]
	extended aftercare: monitoring, performance reviews, feedback	[5]
Detektion	validation of the metering system	[37]
	more realistic energy models	[37]
	in the case of a refurbishment, arrange a condition survey (thermographic and air tightness) of the building to be done, in order to identify heat and air leakage points	[1]
	ensure there is an effective metering and monitoring strategy proposed for the building, which allows you and other building users to understand the breakdown of energy used in the building and take action to improve outcomes	[1]
	use dynamic energy simulation to estimate the energy consumption of the designed building (particularly useful in comparing a variety of design options)	[1]
	ensure the building management systems are installed with sufficient thought put into how occupants need to use them	[1]
	perform validated energy analysis of the building and provide a provisional building energy rating certificate	[1]
	perform validated energy analysis of the building and provide a final building energy rating certificate	[1]
	provide any necessary documentation and technical specifications of the materials and equipment used on site; if required, commission any additional testing in a certified laboratory	[1]
	ensure the building management systems are installed with sufficient thought put into how occupants need to use them	[1]
	utilise thermography, as a useful tool to identify issues in building design, including air infiltration and leakage, thermal bridging and underfloor heating	[1]
	utilise air tightness test to demonstrate compliance with the current national building regulations	[1]
	building management system calibration and data quality should be checked after handover	[1]
	feedback loop from measurement to prediction to identify common mistaken assumptions	[14]
	develop best-practice modelling procedures	[14]
	link prediction and measurement in integrated building information systems	[14]



Themenbereich ³⁶	Lösungsvorschläge (Aussagen aus der Literatur)	Quelle ³⁷
Detektion	separate metering approaches for the building fabric, building services, and occupants	[14]
	measurements should be spread out over time, taking a longitudinal approach and covering various seasons	[14]
	standard POE methodology	[14]
	include confidence factors that reflect the amount of control over the performance in building regulations	[14]
	develop tools and methods in order to improve energy performance certificates	[14]
	Berechnungen aus der Planungsphase an alle relevanten Veränderungen während der Bauphase anpassen	[12]
	den absoluten Energieverbrauchswert auf die tatsächlich beheizte Fläche beziehen	[12]
	Heizstäbe und Begleitbandheizungen in Wärmepumpeneffizienz berücksichtigen	[9]
	Betrachtung der Variabilität in der Gebäudenutzung, Spezifikation und Bauqualität schon während der Planungsphase	[2]
	kontinuierliches Betriebsmonitoring während der Gebäudenutzung	[2]
	erweiterbares Modell des Gebäudes und der Gebäudetechnik	[2]
	collection of operational performance data	[5]
	legislative frameworks (detection)	[5]
	accessible meter data	[5]
	sub-metering	[5]
	clarification what the data represents	[5]
	tools for intuitive visualisation for different time granularity	[5]
	improving the reliability of energy simulation	[5]
	use of calibrated energy models when building is in-use	[5]
Attribution	seasonal commissioning	[37]
	retro-commissioning	[37]
	feedback to early design	[37]
	introduce a culture in design/contractor team to impacts of decisions made in construction	[37]
	energy management	[37]
	make sure that the design team have experience in designing energy efficient buildings	[1]
	make sure that contractors installing innovative systems have a first-hand experience with those systems	[1]
	follow the BSRIA Soft Landings process, i.e. appoint designers and constructors to stay involved with the new building beyond practical completion and into the critical initial period of occupation	[1]
	ensure the commissioning of systems takes place at some specific point in the year	[1]
	recommission weather-sensitive systems in the opposite season of the year and perhaps even during every season of the year	[1]
	appoint the facilities manager responsible for optimal building operation	[1]
	ensure there is training provided for building occupants on the use of systems installed	[1]
	comply with the national building regulations and relevant international standards, as well as quality management systems	[1]
	ensure the design team is sufficiently trained in designing energy efficient systems in buildings	[1]



Themenbereich ³⁶	Lösungsvorschläge (Aussagen aus der Literatur)	Quelle ³⁷
Attribution	provide all design details and material specifications to avoid any mistakes at the construction stage that may lead to poor building performance	[1]
	complying with the national building regulations and relevant international standards, as well as quality management systems	[1]
	make sure that contractors installing innovative systems have a first-hand experience with those systems	[1]
	brief site staff on the importance of checking the continuity of insulation and air barrier at all stages of construction	[1]
	appoint an air tightness champion on site with authority to intervene if any work risks undermining air tightness	[1]
	appoint an individual responsible for coordinating different sub-contractors working on the building management system	[1]
	provide a detailed Operation and Maintenance (O&M) manual explaining the operation of the building and the logic behind the systems installed	[1]
	additional to the O&M manual, provide a building logbook: this is a simple, easily-accessible summary of a building's services, controls strategy, predicted energy performance and the means to monitor it	[1]
	comply with the national building regulations and relevant international standards	[1]
	comply with the national building regulations and relevant international standards	[1]
	comply with the national building regulations and relevant international standards, as well as quality management systems	[1]
	ensure the site workers are trained, follow the project design and specifications to ensure a high quality construction and building energy performance as designed	[1]
	comply with the national building regulations and relevant international standards, as well as quality management systems.	[1]
	comply with the national building regulations and relevant international standards, as well as quality management systems	[1]
	make sure the controls for various systems, such as heating/cooling, ventilation, renewable energy, lighting, etc. are not overcomplicated for use by occupants	[1]
	provide training for facilities manager and building occupants on the use of systems installed	[1]
	ensure there is training provided for building occupants on the use of systems installed.	[1]
	find out the data capacity of the building management system and ensure that data is stored and backed up as needed.	[1]
	recommission weather-sensitive systems in the opposite season of the year and perhaps even during every season of the year	[1]
	raise awareness amongst clients and design teams	[14]
	develop design details that are thermally robust and leave no room for error during construction	[14]
	prevent complex technological solutions and controls	[14]
	design stage should prepare the ground for extended contractor involvement, beyond construction	[14]
	design stage should prepare the ground for independent commissioning, monitoring and POE	[14]
	increase the quality of the delivery process through a combination of incentives and penalties	[14]
	off-site production	[14]



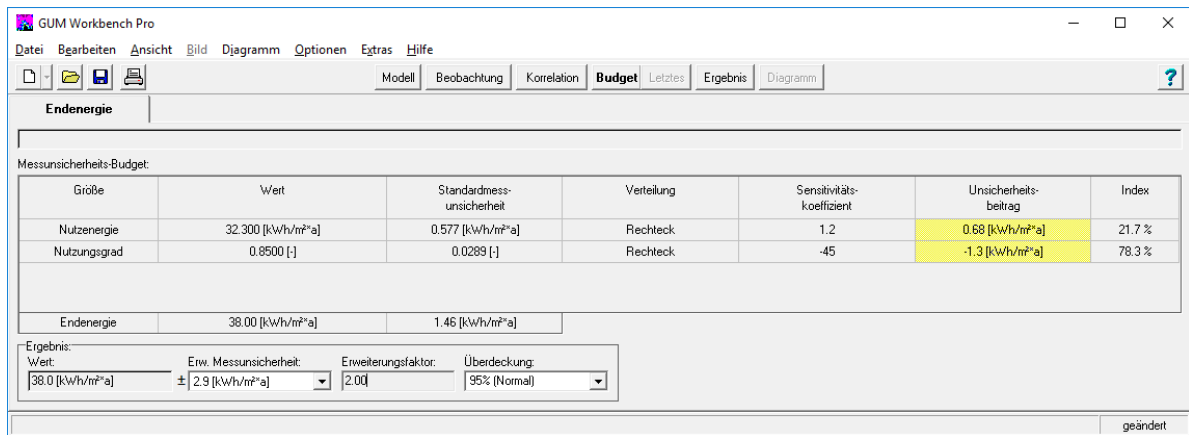
Themenbereich ³⁶	Lösungsvorschläge (Aussagen aus der Literatur)	Quelle ³⁷
Attribution	Soft Landings' approach for commissioning and aftercare	[14]
	audit arrangements	[14]
	Kontakte zu Personen vermitteln, die bereits Erfahrungen mit Minergie gemacht haben	[9]
	Zertifizierungsprozess so einfach wie möglich gestalten	[9]
	unter Umständen auch alternative (energetisch ebenso sinnvolle) Lösungen zulassen	[9]
	konkrete und unkomplizierte Hilfestellungen (z.B. Beratungsangebote) für Fachplaner	[9]
	Handwerker auf spezifische Anforderungen für Minergie schulen und sensibilisieren	[9]
	Verschärfung der Anforderungen an die Inbetriebsetzung und Übergabe von Minergie-Gebäuden	[9]
	Anpassung von Planungsnormen bezüglich elektrischem Legionellenschutz mittels Heizstäben	[9]
	Betreibende und Haustechnikdienste für periodische Betriebsoptimierung sensibilisieren	[9]
	Nutzende periodisch über Gebäudeeigenschaften und das richtige Verhalten informieren	[9]
	segmentation of disciplines → introduce feedback mechanisms	[5]
	enable design decision support (e.g. sensitivity analysis)	[5]
	training and education: guidance on thermal bridging	[5]
	training and education: better communication	[5]
	training and education: strict maintenance	[5]
	create awareness for energy performance discrepancy to energy modelers	[5]

Tabelle 15: Massnahmen zur Reduktion von Performance Gaps aus der Literatur

Anhang E Unsicherheitsanalyse: Methoden und Beispiel

Für Unsicherheitsanalysen stehen verschiedene kommerzielle Produkte zur Verfügung. An dieser Stelle sei beispielhaft auf folgende Software hingewiesen:

GUM-Workbench von Metrodata³⁸



Größe	Wert	Standardmessunsicherheit	Verteilung	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag	Index
Nutzenergie	32.300 [kWh/m²·a]	0.577 [kWh/m²·a]	Rechteck	1.2	0.68 [kWh/m²·a]	21.7 %
Nutzungsgrad	0.8500 [-]	0.0289 [-]	Rechteck	-45	-1.3 [kWh/m²·a]	78.3 %
Endenergie	38.00 [kWh/m²·a]	1.46 [kWh/m²·a]				

Ergebnis:
Wert: 38.0 [kWh/m²·a]
Erw. Messunsicherheit: ± 2.9 [kWh/m²·a]
Erweiterungsfaktor: 2.00
Überdeckung: 95% (Normal)

Abbildung 27: Benutzeroberfläche der GUM-Workbench.

Enthalten sind Werkzeuge für die GUM-Methode und die Monte-Carlo-Methode. Damit wird dem Anwender ermöglicht, Mess- und Berechnungsergebnisse belastbar und vergleichbar anzugeben.

Uncertainty Machine von NIST³⁹

Das National Institute of Standards and Technology (NIST) in den USA unternimmt grosse Anstrengungen, um Mess- und Berechnungsunsicherheiten nach der GUM-Methode und mittels Monte-Carlo-Simulationen möglichst anwenderfreundlich realisierbar zu machen. Hierzu wurde eine frei verfügbare, webbasierte Softwarelösung namens NIST Uncertainty Machine entwickelt. Wir verweisen für weitere Abklärungen auf die angegebene Literatur.

Aufgrund der freien Verfügbarkeit und der zunehmenden Bedeutung von Unsicherheitsanalysen haben wir unsere eigenen Berechnungen mit der NIST Uncertainty Machine durchgeführt.

Die Berechnungen finden auf einem NIST-Server statt. Die Berechnungsergebnisse werden über den Webbrowser zurückgegeben, lassen sich lokal speichern und werden für die Monte-Carlo-Simulationen und die GUM-Methode tabellarisch aufgelistet.

³⁸ <http://metrodata.de>

³⁹ <https://uncertainty.nist.gov>



Beispiel 1: Fortpflanzung von Unsicherheiten – Anwendung der NIST Uncertainty Machine

NIST Uncertainty Machine

User's manual available [here](#).
[Load examples](#)

Instructions :

- Select the number of input quantities.
- Change the quantity names if necessary.
- For each input quantity choose its distribution and its parameters.
- Choose the number of realizations.
- Write the definition of the output quantity in a valid R expression.
- Choose and set the correlations if necessary.
- Run the computation.

Random number generator seed: **67**

Number of input quantities: **2**

Names of input quantities:

Heizwaermebedarf	Heizwaermeverbrauch
-------------------------	----------------------------

Heizwaermebedarf	Rectangular (Mean, StdDev)	30	4.5
Heizwaermeverbrauch	Rectangular (Mean, StdDev)	35.5	1.8

Number of realizations of the output quantity: **1000000**

Definition of output quantity (R expression): **Heizwaermeverbrauch-Heizwaermebedarf**

☒ Symmetrical coverage intervals
☐ Correlations

Run the computation

This software was developed at NIST. This software is not subject to copyright protection and is in the public domain. This software is an experimental system. NIST assumes no responsibility whatsoever for its use by other parties, and makes no guarantees, expressed or implied, about its quality, reliability, or any other characteristic. We would appreciate acknowledgement if the software is used.
Version 1.3.4

Abbildung 28: Anwendung der Uncertainty Machine am Beispiel der Berechnung des Energy Performance Gaps unter Berücksichtigung von Unsicherheiten der Eingangsgrößen: Beispieldaten Wohngebäude „Triemli“, vgl. Abbildung 31 und nachfolgendes Beispiel

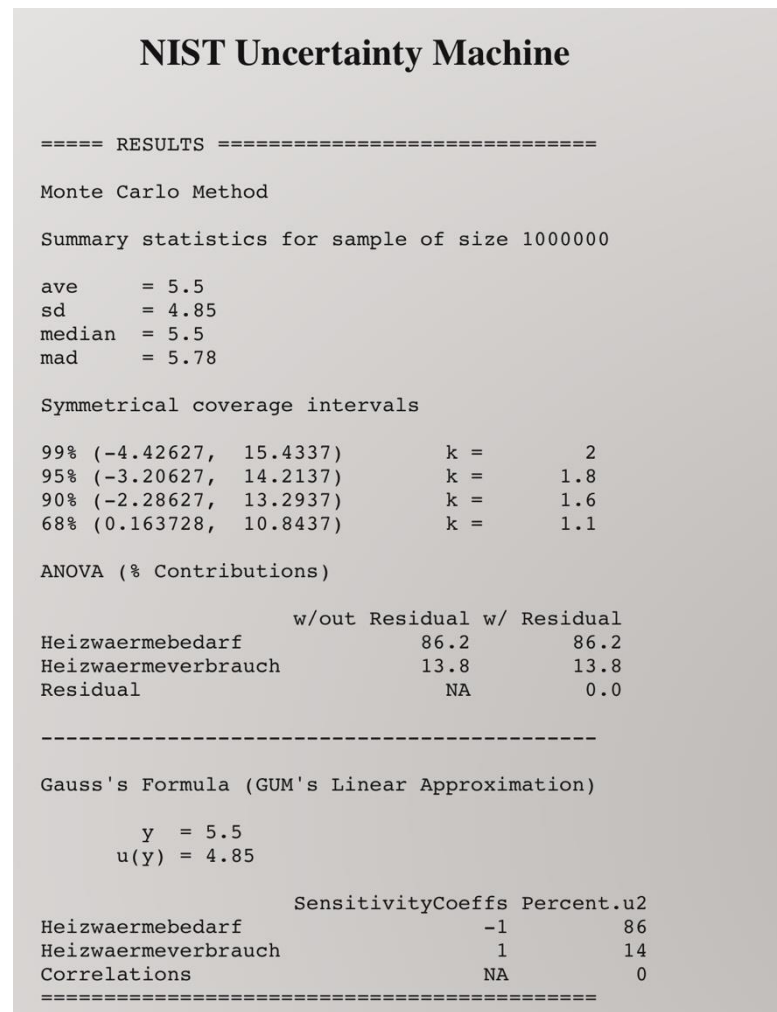


Abbildung 29: Ergebnisse der Monte-Carlo Simulation mit der NIST Uncertainty Machine: Performance Gap Schätzwert $y=5.5 \text{ kWh/m}^2\text{a}$; Erweiterte Unsicherheit nach GUM (95% CI: $2 \cdot u(y)$): Performance Gap = $(5.5 \pm 9.7) \text{ kWh/m}^2\text{a}$

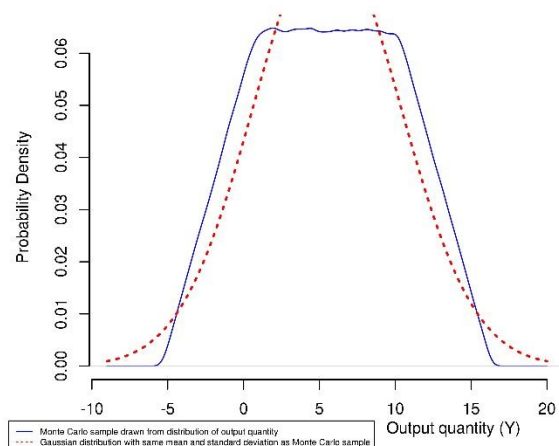


Abbildung 30: Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung (Ergebnis der NIST Uncertainty Machine)

Sämtliche Ausgabedaten lassen sich speichern und weiterverarbeiten.

Die Grafik der Wahrscheinlichkeitsdichte-Verteilung für beide Methoden wird ausgegeben und kann lokal gespeichert werden kann.

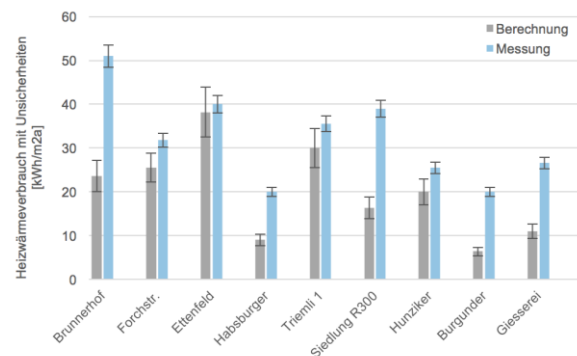
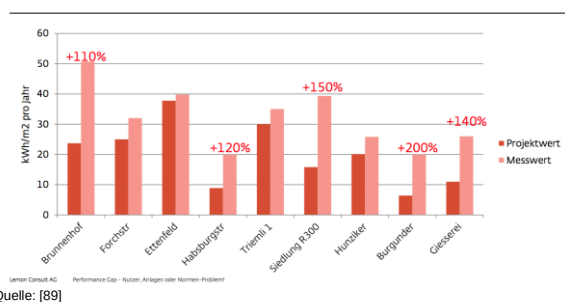


Beispiel 2: Unsicherheitsanalyse für Einzelgebäude

In diesem Berechnungsbeispiel untersuchten wir die Fortpflanzung von Unsicherheiten anhand von am Gebäudetechnik Kongress 2017 präsentierten Mess- und Projektwerten von Wohnsiedlungen [89]. Hierzu haben wir mit den beiden zuvor vorgestellten Werkzeugen GUM-Workbench und NIST Uncertainty Machine Unsicherheitsintervalle für Energy Performance Gaps berechnet.

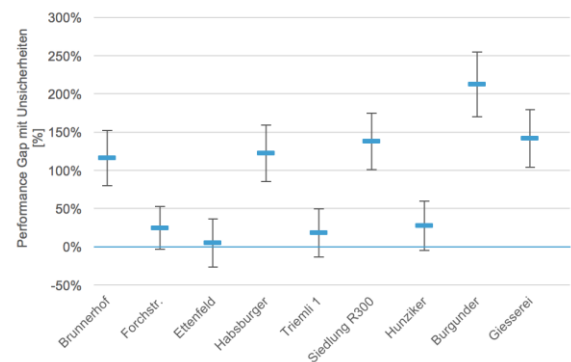
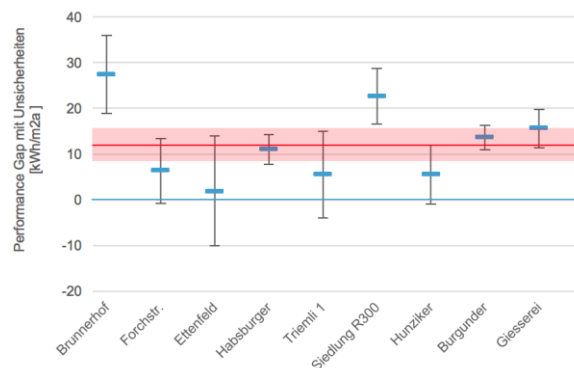
Performance Gap

Heizwärmeverbrauch von Wohnsiedlungen



(1) Originaldaten

(2) Originaldaten mit Unsicherheiten



(3) Performance Gap mit Vertrauensintervall

(4) Relativer Performance Gap

Abbildung 31: Beispiel Vergleich Einzelgebäude: Ermittlung des Performance Gaps auf der Datengrundlage von Ménard [89] unter Berücksichtigung einer angenommenen 15%-igen Unsicherheit des Projektwerts und einer Unsicherheit von 5% des Messwerts. Die Unsicherheitsintervalle des Performance Gaps wurden mittels Monte-Carlo Simulation (Konfidenzintervall 95%, Sampling Size 1'000'000,) bestimmt.

(1) Geplanter und gemessener Heizwärmeverbrauch Schweizer Wohnsiedlungen (vorgestellt am Gebäudetechnik Kongress 2017 [89]).

(2) entspricht der Grafik (1) oben links mit Ergänzung der angenommenen Unsicherheitsintervalle.

(3) Differenz zwischen Projekt- und Messwert unter Berücksichtigung der Unsicherheit (= Performance Gap); die rote Linie entspricht dem mittleren Performance Gap und dessen 95% Vertrauensintervall.

(4) relativer Performance Gap pro Objekt.

Abbildung 31 illustriert die Berechnungswerte aus der nachfolgenden Tabelle 16. Mit den von uns angenommenen Unsicherheiten der Mess- und Projektwerte können die resultierenden Unsicherheiten für den berechneten Performance Gap ermittelt werden.



Die Berechnungen zeigen, dass in 4 von 9 untersuchten Objekten nicht mit Sicherheit von einem Performance Gap gesprochen werden kann. Der Mittelwert des Performance Gaps des untersuchten Gebäudeparks mit 9 Standorten beträgt (12.1 ± 3.6) kWh/m²a. Nur die beiden Überbauungen Brunnerhof und Siedlung R300 liegen eindeutig über dem Mittelwert.

In Tabelle 16 sind die Projekt- und Messwerte zusammengefasst, die aus der am Gebäudetechnik Kongress 2017 publizierten Grafik [89] herausgemessen werden konnten. Für unsere Berechnungen nehmen wir eine Messgenauigkeit von $\pm 5\%$ (Variante 1) und $\pm 15\%$ (Variante 2) an. Für die Unsicherheiten der berechneten Projektwerte nehmen wir $\pm 15\%$ an.

Mit den Unsicherheiten der Eingangsgrössen konnten wir die Unsicherheit des Performance Gaps berechnen. Der Performance Gap wird hier als Differenz des Heizwärmeverbrauchs (Messwert) und des Heizwärmebedarfs (Projektwert) definiert.

Bei der GUM-Methode wird die erweiterte Unsicherheit des Performance Gaps mit dem Erweiterungsfaktor 2 angegeben, um eine 95% Überdeckung zu erreichen. Die Vertrauensintervalle wurden mittels Monte-Carlo-Simulationen und einer Überdeckung von ebenfalls 95% berechnet. Abweichungen zwischen den Resultaten nach GUM und den Monte-Carlo Simulationen entstehen, da die GUM-Methode vereinfachend eine lineare Approximation darstellt.

	Siedlung		Brunnerhof	Forchstr.	Ettenfeld	Habsburger	Triemli 1	Siedlung R300	Hunziker	Burgunder	Gliesserei
Ausgangsdaten	Projektwert ¹	[kWh/a*m²]	23.6	25.5	38.2	9	30	16.4	20	6.4	11
	Messwert ²	[kWh/a*m²]	51	31.8	40	20	35.5	39	25.5	20	26.6
Unsicherheit Variante 1	Unsicherheit										
	Projektwert $\Delta \pm 15\%$	[kWh/a*m²]	±3.54	±3.28	±5.73	±1.35	±4.5	±2.46	±3.0	±0.96	±1.65
	Messwert $\Delta \pm 5\%$	[kWh/a*m²]	±2.55	±1.59	±2	±1	±1.78	±1.95	±1.28	±1	±1.33
	Performance Gap										
	nach GUM ³	[kWh/a*m²]	(27.4±4.36)	(6.3±3.65)	(1.8±6.07)	(11±1.68)	(5.5±4.85)	(22.6±3.14)	(5.5±3.26)	(13.6±1.39)	(15.6±2.12)
		[%]	(+116±18) %	(+25±14) %	(+5±16) %	(+122±19) %	(+18±16) %	(+138±19) %	(+28±16) %	(+213±22) %	(+142±20) %
	Vertrauensintervall ⁴	[kWh/a*m²]	19.2, 35.6	-0.35, 13.0	-9, 12.6	7.8, 14.2	-3.2, 14.2	16.7, 28.5	-0.4, 11.4	11.0, 16.2	11.5, 19.6
	Befund	[-]	Perf. Gap	kein Gap	kein Gap	Perf. Gap	kein Gap	Perf. Gap	kein Gap	Perf. Gap	Perf. Gap
Unsicherheit Variante 2	Unsicherheit										
	Projektwert $\Delta \pm 15\%$	[kWh/a*m²]	±3.54	±3.28	±5.73	±1.35	±4.5	±2.46	±3	±0.96	±1.65
	Messwert $\Delta \pm 15\%$	[kWh/a*m²]	±7.65	±4.77	±6	±3	±5.33	±5.85	±3.83	±3	±3.99
	Performance Gap										
	nach GUM ³	[kWh/a*m²]	(27.4±9.7)	(6.3±6.7)	(1.8±9.6)	(11±3.8)	(5.5±8.1)	(22.6±7.4)	(5.5±5.6)	(13.6±3.6)	(15.6±5)
		[%]	(+116±41) %	(+25±26) %	(+5±25) %	(+122±42) %	(+18±27) %	(+138±45) %	(+28±28) %	(+213±56) %	(+142±45) %
	Vertrauensintervall ⁴	[kWh/a*m²]	12.1, 42.7	-4.6, 17.2	-14, 17.6	5.0, 17.0	-7.7, 18.7	11.1, 34.1	-3.7, 14.7	8.1, 19.2	7.8, 23.4
	Befund	[-]	Perf. Gap	kein Gap	kein Gap	Perf. Gap	kein Gap	Perf. Gap	kein Gap	Perf. Gap	Perf. Gap

Tabelle 16: Ermittlung der Differenzen zwischen Messwert und Projektwert (= Performance Gap) für die Objekte aus Abbildung 31 unter Berücksichtigung einer angenommenen Unsicherheit von Projekt- und Messwert

Erläuterungen zur Tabelle:

- 1 Projektwert: berechneter Heizwärmeverbrauch aus Abbildung 31 (aus [89])
- 2 Messwert aus Abbildung 31 (aus [89])
- 3 Berechnung der Differenz zwischen Mess- und Projektwert und Berücksichtigung der Unsicherheit nach der GUM-Methode
- 4 Ermittlung des Vertrauensintervalls mittels Monte-Carlo-Simulation (Coverage Intervall=95%, Sample Size = 1'000'000)



Anhang F Ergänzende Literatur

Dieser Abschnitt enthält weitere berichtenswerte Quellen aus unserer Recherche, die von uns bearbeitet, jedoch nicht detailliert im Bericht besprochen wurden. Die Reihung erfolgt alphabetisch.

Fachbeiträge (peer reviewed)

- Ahmad MW et al. Building energy metering and environmental monitoring – A state-of-the-art review and directions for future research. *Energy and Buildings* 2016;120:85-102.
- Alaloul W et al. Identification of coordination factors affecting building projects performance. *Alexandria Engineering Journal* 2016;55:2689-2698.
- Attia S et al. Assessing gaps and needs for integrating building performance optimization tools in net zero energy buildings design. *Energy and Buildings* 2013;60:110-124.
- Azar E et al. Integrating and optimizing metrics of sustainable building performance using human-focused agent-based modeling. *Applied Energy* 2016;183:926-937.
- Baborska M, Stevenson F. Continuous mechanical ventilation in housing - Understanding the gap between intended and actual Performance and use. *Energy Procedia* 2015;83:167-176.
- Belleri A et al. Natural ventilation design: An analysis of predicted and measured performance. *Building and Environment* 2014; 81:123-138.
- Bony J et al. Etude détaillée d'une rénovation à haute performance énergétique d'un bâtiment multifamilial. In: 19. Statusseminar, Zürich, 8.-9.09.2016. *Proceedings of 19. Statusseminar*; 2016: OP-I-2-4_047.
- Bordass B et al. Energy Performance of Non-Domestic Buildings: Closing the credibility gap. *International conference on improving energy efficiency in commercial buildings*. Frankfurt, Germany; 2004.
- Chen Z. Facilities intelligence and evaluation: A multi-criteria assessment approach. *Energy and Buildings* 2010;42:728-734.
- Cheng Q et al. Probabilistic approach for uncertainty-based optimal design of chiller plants in buildings. *Applied Energy* 2017;185:1613-1624.
- Cheng Q et al. Robust optimal design of chiller plants based on cooling load distribution. *Energy Procedia* 2015;75:1354-1359.
- Coakley D, Raftery P, Keane M. A review of methods to match building energy simulation models to measured data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2014;37:123-141.
- Daniel L et al. Comfort-based performance assessment methodology for low energy residential buildings in Australia. *Building and Environment* 2016;111:169-179.
- de Wilde P, Jones R. The building performance gap up close and personal. Dublin, Ireland: CIBSE ASHRAE Technical Symposium, 3-4 April 2014.
- Demanuele C. et al. Bridging the gap between predicted and actual energy performance in schools. Abu Dhabi, UAE: *World Renewable Energy Congress XI* 2010.
- Djunaedy E et al. Oversizing of HVAC system: Signatures and penalties. *Energy and Buildings* 2011;43:468-475.



- Dominguez-Munoz F et al. Uncertainty in peak cooling load calculations. *Energy and Buildings* 2010;42:1010-1018.
- Donn M et al. The building performance sketch. *Building Research and Information* 2012;40:2:186-208.
- Galvin R. Making the rebound effect more useful for performance evaluation of thermal retrofits of existing homes: Defining the 'energy savings deficit' and the 'energy performance gap'. *Energy and Buildings* 2014;69:515-524.
- Gang W et al. Robust optimal design of building cooling systems considering cooling load uncertainty and equipment reliability. *Applied Energy* 2015;159:265-275.
- Gang W et al. Impacts of cooling load calculation uncertainties on the design optimization of buildings cooling systems. *Energy and Buildings* 2015;94:1-9.
- Gorse C et al. Building Simulation and Models: Closing the Performance Gap. *Building Sustainable Futures* 2016;209-226.
- Guerra-Santin O, Tweed CA. In-use monitoring of buildings: An overview of data collection methods. *Energy and Buildings* 2015;93:189-207.
- Gupta R, Gregg M. Empirical evaluation of the energy and environmental performance of sustainably-designed but under-utilised institutional building in the UK. *Energy and Buildings* 2016;128:68-80.
- Herrando M et al. Energy Performance Certification of Faculty Buildings in Spain: The gap between estimated and real energy consumption. *Energy Conversion and Management* 2016;125:141-153.
- Hong T, et al. Advances in research and applications of energy-related occupant behavior in buildings. *Energy and Buildings* 2016;116:694-702.
- Huang J, Gurney KR. Impact of climate change on US building energy demand: Financial implications for consumers and energy suppliers. *Energy and Buildings* 2017;139:747-754.
- Huang P, Huang G, Wang Y. HVAC system design under peak load prediction uncertainty using multiple-criterion decision making technique. *Energy and Buildings* 2015;91:26-36.
- Menezes AC et al. Predicted vs. actual energy performance of non-domestic buildings: Using post-occupancy evaluation data to reduce the performance gap. *Applied Energy* 2012;97:355-364.
- Min Z, Morgenstern P, Marjanovic-Halburd L. Facilities management added value in closing the energy performance gap. *International Journal of Sustainable Built Environment* 2016;5:197-209.
- Mortensen A, Heiselberg P, Knudstrup M. Identification of key parameters determining Danish homeowners' willingness and motivation for energy renovations. *International Journal of Sustainable Built Environment* 2016;5: 246-268.
- Newsham G, Mancini S, Birt BJ. Do LEED-certified buildings save energy? Yes, but... *Energy and Buildings* 2009;41:897-905.
- Niu M, Leicht RM. Information exchange requirements for building walk through energy audits. *Science and Technology for the Built Environment* 2016;22:3:328-336.
- Niu S, Pan W, Zhao Y. A virtual reality supported approach to occupancy engagement in building energy design for closing the energy performance gap. *Procedia Engineering* 2015;118:573-580.
- O'Brien W, Gunary HB. Occupant behaviour diversity modelling and its applications. Hamilton, ON: Proceedings of eSim 2016;76-92.



- Palmer K, Walls M. Using information to close the energy efficiency gap: a review of benchmarking and disclosure ordinances. *Energy Efficiency* 2017;10:673-691.
- Papadopoulos S, Azar E. Integrating building performance simulation in agent-based modeling using regression surrogate models: A novel human-in-the-loop energy modeling approach. *Energy and Buildings* 2016;128:214-223.
- Perez-Lombard L, Ortiz J, Pout C. A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings* 2008;40:394-398.
- Salehi M et al. A case study: The energy performance gap of the Center for Interactive Research on Sustainability at the University of British Columbia. *Journal of Building Engineering* 2015;4:127-139.
- Shen P. Impacts of climate change on U.S. building energy use by using downscaled hourly future weather data. *Energy and Buildings* 2017;134:61-70.
- Stoppel CM, Leite F. Evaluating building energy model performance of LEED buildings: Identifying potential sources of error through aggregate analysis. *Energy and Buildings* 2013;65:185-196.
- Struck C et al. Towards compensating HVAC system degradation phenomena with adaptable building elements. Geneva: 13th International Conference on Sustainable Energy Technologies, 25.-28. August 2014.
- Tuohy P, Murphy G. Closing the Gap in Building Performance: Learning from other BIM Benchmark industries. *Architectural Science Review* 2015;58.
- Verbruggen A, Marchohi MA, Janssens B. The anatomy of investing in energy efficient buildings. *Energy and Buildings* 2011;43:905-914.
- Woradehjumroen D et al. Analysis of HVAC system oversizing in commercial buildings through field measurements. *Energy and Buildings* 2014;69:131-143.
- Zhang S, Huang P, Sun Y. A multi-criterion renewable energy system design optimization for net zero energy buildings under certainties. *Energy* 2016;94:654-665.

Projektberichte und Dissertationen

- Barbosa F et al. Reinventing Construction: A route to higher productivity. McKinsey Global Institute; 2017.
- Baumgartner A, Artho J, Vogel U. Benutzergerechte Assistenz- und Motivationssysteme (BAM). Forschungsprojekt FP-2.6, Bericht Nr. 33. Final Report. Zürich: Energieforschung Stadt Zürich; 2016.
- Cao G, Pietiläinen J. Data collection systems for the management of building energy system. Final Report Annex 53, Appendix Volume 4. IEA Annex 53 Total energy use in buildings: analysis and evaluation methods; 2013.
- Custodio CY et al. Data Preparation Process for the Buildings Performance Database. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory; 2015. LBNL-6724E.
- Energieverbrauch von Gebäuden, Final Report. Bern: Konferenz Kantonalen Energiedirektoren EnDK; 2014.
- Grütter M et al. Evaluation Kalkbreite. Forschungsprojekt FP-2.5.1, Bericht Nr. 29. Final Report. Zürich: Energieforschung Stadt Zürich; 2016.



- Henger R, Deschermeier P et al. Energieeffizienz bei Büroimmobilien. Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH dena; 2016.
- Hörner M et al. Teilenergiekennwerte von Nicht-Wohngebäuden – Methodische Grundlagen, empirische Erhebungen und systematische Analyse: Querschnittsanalyse der Ergebnisse der Feldphase. Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt; 2014.
- Jenny A. Das subjektiv genügende Mass – Empirische Erhebung zu Psychologischen Grundlagen der Suffizienz. Forschungsprojekt FP-1.7, Bericht Nr. 31. Final Report. Zürich: Energieforschung Stadt Zürich; 2016.
- Leitfaden für das Monitoring der Demonstrationsbauten im Förderkonzept EnBau und EnSan. Karlsruhe: EnOB; 2014.
- Leitfaden Nachhaltiges Bauen. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit; 2014.
- Minder S, Marti B, Weisskopf T. Betriebsoptimierung bei kleineren und mittleren Unternehmen in der Stadt Zürich. Forschungsprojekt FP-2.4, Bericht Nr. 20. Final Report. Zürich: Energieforschung Stadt Zürich; 2015.
- Neumann C, Jakob D (Hrsg.). Guidelines for the Evaluation of Building Performance. Building EQ. Freiburg: Fraunhofer ISE; 2008.
- Ott W, Frischknecht R et al. Erfolgskontrolle 2000-Watt-Gebäude. Forschungsprojekt FP-2.5, Bericht Nr. 14. Final Report. Zürich: Energieforschung Stadt Zürich; 2014.
- Pfnür A (Hrsg.). Nachhaltiges Management von Stakeholderbeziehungen kommunaler Wohnungsunternehmen. Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis, Band Nr. 27. Darmstadt: TU Darmstadt; 2012.
- Seguro F. Building Performance Evaluation Analysis: Insights from Social Housing Projects. Milton Keynes: National Energy Foundation; 2015.
- Sun Y. Closing the building energy performance gap by improving our predictions. Dissertation. Georgia: Georgia Institute of Technology; 2014.
- Rieder S, Arnold T, Gärtner S. Externe Synthese im Themenbereich Gebäude. Final Report. Zürich: Energieforschung Stadt Zürich; 2014.

Fachbücher

- Apel D, Behme W, Eberlein R, Merighi C. Datenqualität erfolgreich steuern. Heidelberg: dpunkt-Verlag; 2015.
- de Weck O, Roos D, Magee CL. Engineering Systems: Meeting Human Needs in a Complex Technological World. Cambridge: The MIT Press; 2011.
- EBP Schweiz AG (Eds). Energiewende. Zürich: vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich; 2017.
- Friedman H, Crowe E, Sibley E, Effinger M. The Building Performance Tracking Handbook. California: California Commissioning Collaborative; 2011.
- Gaines Robinson D, Robinson JC, Phillips JJ, Pulliam Phillips P. Performance Consulting: A Strategic Process to Improve, Measure, and Sustain Organizational Results. Oakland: Berrett-Koehler Publishers, Inc.; 2015.



- Gerum J. Stakeholder-Management bei Projektentwicklungsunternehmen im Bauwesen. Zürich: vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich; 2008.
- Granderson J, Piette MA, Rosenblum B, Hu L, et al. Energy Information Handbook: Applications for Energy-Efficient Building Operations. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL-5272E; 2011.
- Menz S (Hrsg.). Drei Bücher über den Bauprozess. Zürich: vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich; 2014.
- Plagaro Cowee N, Schwehr P. Die Typologie der Flexibilität im Hochbau. Luzern: interact Luzern, Hochschule Luzern; 2008.
- Portman J. Building Services Design Management. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd; 2014.
- Trogisch A, Mai R. Energetische Inspektion in der Technischen Gebäudeausrüstung. Augsburg: ITM InnoTech Medien GmbH; 2016.
- Wiegand J. Erfolgreich planen im Bau- und Immobilienwesen: Von Menschen für Menschen. Zürich: vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich; 2013.
- Wilhelm E, Sturm U (Hrsg.). Gebäude als System. Luzern: interact Luzern, Hochschule Luzern; 2012.

Online Beiträge und Ressourcen

- Building Performance Database. <https://bpd.lbl.gov/>; 2018.
- Build Up: The European Portal for Energy Efficiency in Buildings. <http://www.buildup.eu/en>; 2018.
- Concerted Action Energy Performance of Buildings. <https://www.epbd-ca.eu/>; 2017.
- Digital Catapult: Building Data Exchange. <http://buildingdataexchange.org.uk/>; 2016.
- Hermes J. EnMS and EMIS: What's the Difference? <https://www.energymanagertoday.com/enms-and-emis-whats-the-difference-087680/>; 2012.
- Farrell M. 10 reasons green leases create value for tenants and landlords. <https://www.greenbiz.com/blog/2013/05/29/10-reasons-why-green-leases-create-value-tenants-and-landlords>; 2013.
- Green Leases Library. <http://www.greenleaselibrary.com/>; 2018.
- Recknagel Online. Fehlerkosten am Bau verschlangen 2016 über 13 Milliarden Euro. <https://www.recknagel-online.de/aktuell/publikationen/05-10-2017-fehlerkosten-am-bau-verschlangen-2016-ueber-13-milliarden-euro/>; 2017.
- SCCER Future Energy Efficient Buildings and Districts: <http://www.sccer-feebd.ch>; 2018.
- SCCER Competence Center for Research in Energy, Society and Transition: <https://www.sccer-crest.ch>; 2018.
- (Letzter Zugriff auf alle Online-Ressourcen: 30.01.2018)



Andere Veröffentlichungen

- Aeberli O. „Beim Bauen fehlt eine Lernkultur“, Interview mit Patrick Stähler. Aarau: Haustech 2017;7-8:18-21.
- Eberhard S. Den Sprung wagen. Aarau: Haustech 2017;12:50-52.
- Egger N, Knüsel P. „Wichtig ist die Verantwortlichkeit“, Interview mit M. Ménard. Zürich: TEC21 2015;49:31-32.
- Entwurf einer Verordnung zur Schaffung eines rechtlichen Rahmens zur Sammlung von Erfahrungen im Förderprogramm „Schaufenster intelligente Energie – Digitale Agenda für die Energiewende“ (SINTEG-Verordnung). Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie; 2017.
- Friedrich U. Betriebsdiagnose von Gebäuden. Bonn: BINE Informationsdienst 2009; Projektinfo 11/09.
- IBPSA-CH Working Group. Was ist der „Performance Gap“? Zürich: TEC21 2015;49:22-24.
- Int-Hout D. Comfort vs. Energy. ASHRAE Journal 2013;55:7:134.
- Jakob M. Nutzung einer nationalen Gebäudeenergiedatenbank – und Hindernisse auf dem Weg dazu. Basel: Präsentation an der Swissbau Fokus, 13. Januar 2016.
- John V. Störfaktor Mensch. Zürich: TEC21 2017;51-52:26-29.
- Knüsel P. Einfahren, justieren und optimieren. Zürich: TEC21 2015;49:24-30.
- Knüsel P. In der Planung zu hoch gegriffen. Zürich: TEC21 2017;39:38-42.
- Opan E, Robra J. Eine Gebäudeenergie-Datenbank für alle. Zürich: TEC21 2016;1-2:4-5.
- Pirovino L. Der Nutzer im Mittelpunkt. Zürich: TEC21 2016;38-39:29.
- Special Edition: Design for Human Performance. The Arup Journal; 1/2010.
- Strengers Y. Plugging the gap? Understanding households and everyday life. Kopenhagen: Präsentation am Workshop Minimizing Performance Gap. DTU Denmark; 2016.
- Willers J. Qualitätssicherung in der Gebäudetechnik. Zürich: TEC21 2017;13:18.
- Willers J. Unwort „Planungsfehler“. Zürich: TEC21 2016;35:24.