

**Forschungsprogramm
Umgebungs- und Abwärme,
Wärme-Kraft-Kopplung (UAW)**

Kostengünstige Wärmepumpenheizung für Niedrigenergiehäuser

**Technisches Handbuch:
Grundlagen, Planungsvorgehen und Praxisbeispiele**

ausgearbeitet durch

Thomas Afjei	FHBB Muttenz, Fachhochschule beider Basel
Andreas Bühring	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Markus Dürig	HTA Luzern, Fachhochschule Zentralschweiz
Arthur Huber	Huber Energietechnik, Zürich
Patrick Keller	HTA Luzern, Fachhochschule Zentralschweiz
Esfandiar Shafai	Institut für Mess- und Regeltechnik, ETH Zürich
Petra Widmer	Huber Energietechnik, Zürich
Gerhard Zweifel	HTA Luzern, Fachhochschule Zentralschweiz

im Auftrag des
Bundesamtes für Energie

Impressum

Auftraggeber:	Bundesamt für Energie (BFE) Prof. Dr. M. Zogg Leiter Forschungsprogramm UAW Kirchstutz 3 CH - 3414 Oberburg	Projektbegleiter BFE Email: martin.zogg@bluewin.ch Tel/Fax: +41-34-4226911 / 4226910
Projektleitung:	Fachhochschule beider Basel (FHBB), Muttenz Departement Bau, Institut für Energie Dr. Thomas Afjei St. Jakobs-Strasse 84 CH – 4132 Muttenz	Projektleitung Email: t.afjei@fhbb.ch Tel/Fax: +41-61-4674349 / 4674543
Redaktion:	Huber Energietechnik, Ingenieur- und Planungsbüro SIA Arthur Huber Petra Widmer Jupiterstrasse 26 CH - 8032 Zürich	stv. Projektleitung Ökologie Email: huber@igjzh.com Tel/Fax: +41-1-4227978 / 4227953
Projektgruppe:	HTA Luzern, Fachhochschule Zentralschweiz, Abteilung HLK Prof. Werner Betschart Prof. Gerhard Zweifel Patrick Keller Markus Dürig Technikumstrasse 21 CH - 6048 Horw	Planungsvorgehen Simulation mit TRNSYS Messungen / Planungsvorgehen Simulationen / Planungsvorgehen Email: wbetschart@ztl.ch Tel/Fax: +41-41-3493307 / 3493955
	ETH-Zürich, Institut für Mess.- und Regeltechnik Dr. Esfandiar Shafai Dr. Simon Ginsburg ETH-Zentrum CH - 8092 Zürich	Regelung Regelung Email: shafai@imrt.mavt.ethz.ch Tel/Fax: +41-1-6322467 / 6321139
	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE Andreas Bühring Oltmannsstrasse 5 D - 79100 Freiburg Beitrag mit finanzieller Unterstützung von Energie Baden-Württemberg EnBW	Passivhaus Email: buehring@ise.fhg.de Tel/Fax: +49-761-4588288 / 4588132
Fachbeiträge:	Bircher + Keller AG Rudolf Bircher Weidenbodenweg 2 4450 Sissach	Auslegung, Planungsvorgehen Email: bircherkeller@bluewin.ch Tel/Fax: +41-61-9716080 / 9716116
	Ingenieurschule Wallis EIV Prof. M. Bonvin Route du Rawyl 1950 Sion 2	Kompaktgeräte / Haustechnikmodule Email: michel.bonvin@eiv.ch Tel/Fax: +41-27-6068751 / 6068515
	WinMarkt Dieter Wittwer Seefeldstrasse 5a 8008 Zürich	Ökonomie Email: mail@winmarkt.com Tel/Fax: +41-1-2508826 / 2508835

Zusammenfassung

Zukünftige Niedrigenergiehäuser mit weniger als 160 MJ/m²a Endenergie oder Passivhäuser, welche nur mit einer Luftheizung auskommen, stellen neue Anforderungen an die Wärmeerzeugung und erfordern eine Lufterneuerungsanlage. Der schweizerische MINERGIE-Standard und die kommende, deutsche Energieeinsparverordnung EnEV zielen in diese Richtung. Es ist daher wichtig, dass Architekten, Hersteller und Installateure auf diesen neuen Markt und dessen Erfordernisse optimal vorbereitet sind.

Gebäude mit einem tiefen Heizenergiebedarf sind prädestiniert für den Einsatz von Niedrigtemperaturheizungen und die Nutzung von Umgebungswärme. Im Forschungsprojekt "Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe" des Bundesamtes für Energie wurden seit 1996 verschiedene Aspekte von Niedrigenergie- und Passivhäusern untersucht, worin Gebäude und Haustechnik als Einheit aufgefasst werden. Um einer unübersehbaren Anhäufung von Einzelresultaten entgegenzuwirken, wurde dieses technische Planungshandbuch ausgearbeitet, welches die wesentlichen Erkenntnisse strukturiert und im Feld erprobte Praxisbeispiele zeigt. Dieses Handbuch richtet sich primär an den technisch vorgebildeten Leser, wie Planer, Ingenieure, Energieberater (Energiefachstellen, Elektrizitätswerke etc.), Gerätehersteller und Architekten.

Inhalt des Handbuchs

Das Handbuch gliedert sich in drei Teile und soll die wesentlichen Zusammenhänge und Erfahrungen mit den drei gemessenen Pilotanlagen zusammenfassend erklären. Aussagekräftige Kennzahlen, vollständige Energiebilanzen, die ökologische Beurteilung und moderne Regelkonzepte bilden den Schwerpunkt im Grundlagenteil. Integrale Planung, Machbarkeitsabklärungen, Projektierung und Gerätetechnik werden im Teil Planungsvorgehen vertieft. Drei realisierte Beispiele von Minergie- und Passivhäusern werden im dritten Teil in den Blöcken "Systembeschreibung", "Energiebilanzierung" und "Kosten" strukturiert und praxisnah beschrieben.

Damit ein tiefer Heizenergiebedarf realisierbar ist, müssen Gebäude und Haustechnik optimiert werden. Das bedeutet für die Organisation (Integrale Planung in Anlehnung an das SIA Leistungsmodell 95):

- Einbezug von Planer zur energetischen Beurteilung bereits in der Konzeptphase
- Energiekonzept in früher Planungsphase ausarbeiten
- Planer, Architekt, Bauherr und Fachspezialist erarbeiten ein Gesamtkonzept im Team

Das Verhalten von Niedrigenergiehäusern mit Wärmepumpensystemen wird anhand dominierender Mechanismen aufgezeigt:

- Die Behaglichkeit wird bestimmt von der Gebäudestruktur (Masse, Aussenfläche, Anordnung und Grösse der Fensterflächen), der Heizanlage (Wärmepumpen-Schaltzyklen, Temperatur in den verschiedenen Heizkreisen) und der Lüftungsanlage (WRG, Volumenstrom, Schall).
- Selbstregelleffekt der Bodenheizung (bei tiefen Vorlauftemperaturen besonders ausgeprägt)
- Vor- und Nachteile von ein- und zweistufigen Wärmepumpen
- Pumpendimensionierung und Auswahl
- Umweltbelastung durch Gebäudebau und Haustechnik in Abhängigkeit verschiedener Strommixe

Wichtige Werkzeuge sind:

- Wärmeerzeugungs- und Systemnutzungsgrad als Kennzahlen für die Systemwahl
- Einfache Handrechenmethode zur Ermittlung der Wärmepumpen-Jahresarbeitszahl
- Excel-Programm EWSDRUCK zur Auslegung der Sondenpumpe
- Simulationsprogramm (z.B. TRNSYS, MATLAB/SIMULINK) für die dynamische Berechnung Gebäudedynamik. Einflussfaktoren sind solare Wärmegegewinne, Masse, Dämmstandard. Daraus ergeben sich Energiebedarf und Temperaturschwankungen im Gebäude (Überwärmung).

Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichtes verantwortlich.
--

Abstract

Future low-energy houses with less than 160 MJ/m²a energy consumption, or passive houses, which only need an air-heating, make high demands on heating production and require an installation for an air-renewal-system. The Swiss MINERGIE-standard and the coming German prescription for energy-savings (EnEV) aim in this direction. Therefore it is important that planners, architects and producers are optimally prepared for this new market and its requirements.

Buildings with low energy consumption are predestined for the use of low temperature heating systems. Since 1996, several aspects of low-energy and passive houses were examined in the research project called "Cost-Effective Low-Temperature-Heating with Heat Pumps", launched by the Swiss Federal Office of Energy. This technical manual was worked out to take steps against the accumulation of single results. It structures the essential findings and shows numerous examples. It is addressed to technical trained readers like planners, engineers, energy-consultants (professional associations for energy, power stations etc.), manufacturers and architects.

The manual consists of three parts and it shall explain the essential coherences and experiences with all three pilot-systems. Evident values, complete energy balances, the ecological assessment and modern concepts of regulation set up priorities in the basic part. Integral planning, the determination of feasibility, engineering and manufacturing techniques are dealt with in the part of engineering. In the third part there are three examples of MINERGIE and passive houses that have been built. They are structured in a description of the system, the records of energy and the costs.

Buildings and domestic engineering have to be optimised so that a lower consumption of heating energy can be realised. For the organisation it means:

- an integration of qualified specialists for the energy assessment in the concept phase
- to develop a concept of energy in an earlier phase of planning
- a team of engineers, architects, building owner and experts work out a complete system concept

The behaviour of low-energy houses with a heat-pump-system is to be shown. Some very important mechanisms are:

- the comfort is determined by the structure of the building (mass, outside surface, order and size of window-surface), the heating system (heat-pump cycles, temperature within several heating-circuits) and the ventilation system (heat recovery, flow volume, sound)
- self-regulation of the floor heating (especially with low supply temperatures)
- advantages and disadvantages of single and double stage heat-pumps
- selection and dimensioning of the circulation pumps

There are several important tools:

- efficiency of heat-production and complete system efficiency are characteristic values for the complete system of heating, hot water and ventilation
- simple calculation method for the determination of the heat-pumps seasonal performance factor
- Excel program "EWSDRUCK" for the borehole circulation pump's sizing
- simulation program (e. g. TRNSYS, MATLAB/SIMULINK) for the dynamic calculation of gained solar energy, of the need for energy and of the temperature variations within the building (overheating due to passive solar gains)

This work arose under contract to the Swiss Federal Office of Energy. The authors of this report are solely responsible for its contents and their conclusions.
--

Inhaltsverzeichnis

1 EINLEITUNG	1	3.5 Bauprojekt	49
1.1 Motivation und Projektablauf	1	3.5.1 Auslegung Wärmeabgabesystem	49
2 GRUNDLAGEN	2	3.5.2 Raumlufttemperaturen	49
2.1 Begriffe	2	3.5.3 Massenstrom Fussbodenheizung	49
2.1.1 Energiestandards	2	3.5.4 Auslegung der Wärmepumpe	49
2.1.2 Niedrigtemperaturheizung	5	3.6 Inbetriebsetzung	50
2.1.3 Behaglichkeit	5	3.6.1 Schaltdifferenz Wärmepumpe	50
2.1.4 Energie	7	3.6.2 Rücklauftemperaturfühler	50
2.1.5 Grenzwerte	9	4 BEISPIELE NIEDRIGENERGIE- UND PASSIVHAUS	51
2.2 Energetische Kennzahlen	10	4.1 Auswahl von drei Beispielen	51
2.2.1 Systemgrenzen	10	4.2 Luft - Wasser - Wärmepumpe mit Abluft - Wärmepumpenwassererwärmung	52
2.2.2 Kennzahlen	10	4.2.1 Systembeschreibung	52
2.3 Ökonomie	13	4.2.2 Energiebilanzierung	53
2.3.1 Kostensituation 1999	13	4.2.3 Kosten	55
2.3.2 Kostensituation von morgen	13	4.3 Erdwärmesonden - Wärmepumpe mit Beistellboiler	56
2.3.3 Ökonomie des Passivhauses	14	4.3.1 Systembeschreibung	56
2.4 Ökologie	15	4.3.2 Energiebilanzierung	57
2.4.1 Ziele einer ökologischen Beurteilung	15	4.3.3 Kosten	59
2.4.2 Methodik einer ökologischen Beurteilung	15	4.4 Passivhauskonzept	60
2.5 Gebäudeoptimierung	18	4.4.1 Systembeschreibung	60
2.5.1 Optimale Fenstergrösse	18	4.4.2 Energiebilanzierung	61
2.5.2 Optimierung der Wärmedämmung	19	4.4.3 Messresultate	62
2.5.3 Leichtbau oder Massivbau?	19	4.4.4 Kosten	63
2.5.4 Dynamisches Gebäudeverhalten	20	4.5 Schlussfolgerungen	64
2.6 Optimierung der Haustechnik	22	5 ANHANG	65
2.6.1 Wärmeverteilung	22	5.1 Fallbeispiel Ökologie: Situation heute	65
2.6.2 Wärmequellen	25	5.2 Ökologie: Einfluss des Strommixes	67
2.6.3 Abluft als Wärmequelle – Systemsimulationen und Messungen Passivhaus	29	5.3 Regelkonzepte	69
2.6.4 Warmwasser	31	5.3.1 Schlussfolgerung aus den Messungen	73
2.7 Regelung	32	5.4 Handrechenmethode zur Bestimmung des Wärmeerzeugungsnutzungsgrades	74
2.7.1 Hydraulische Schaltungen	32	5.5 Sprungantworten von Erdwärmesonden	81
2.7.2 Regelkonzepte mit Pulsbreitenmodulation	34	5.5.1 Einzelsonden	81
3 PLANUNGSVORGEHEN	35	5.5.2 Sondenfelder	81
3.1 Integrale Planung	35	5.6 Wärmeübergangskoeffizient Sonde-Sole	82
3.1.1 Was man darunter versteht	35	5.7 Stoffwerte der Erde	83
3.1.2 Beispiel einer integralen Planungsüberlegung	36	5.8 Verlegeabstände von Fussbodenheizrohren bei verschiedenen Bodenbelägen	84
3.1.3 Gebäudesimulation	37	6 SYMBOLVERZEICHNIS	85
3.1.4 Ökologische Beurteilung	37	7 LITERATURVERZEICHNIS	86
3.1.5 Das Leistungsmodell 95 (LM'95)	38	8 PROGRAMME & INFORMATIONEN	89
3.2 Strategische Planung	39		
3.2.1 Anforderungen und Zielsetzung	39		
3.3 Vorstudien	39		
3.3.1 Machbarkeit einer Niedrigtemperaturheizung überprüfen	40		
3.4 Vorprojekt	45		
3.4.1 Varianten- und Systemwahl	45		

1 EINLEITUNG

1.1 Motivation und Projektablauf

Besonderheiten von Niedrigenergiehäusern

Die Konsequenzen, welche sich durch den Übergang von einem Grenzwerthaus 2000 zu einem Niedrigenergie- bzw. MINERGIE-Haus ergeben, sehen etwa wie folgt aus: Der Transmissionswärmebedarf wird etwa um 2/3 und die Lüftungswärmeverluste auf das hygienisch erforderliche Mass um ca. 1/3 reduziert. Die absoluten Wärmegewinne aus Sonnenstrahlung und Wärmeabgabe von Personen etc. sind im Niedrigenergiehaus zwar geringer. Weil in der Übergangszeit nur noch ein kleiner Teil zur Raumheizung genutzt werden kann, nimmt ihre relative Bedeutung jedoch zu. Die Heizanlage selbst deckt nur noch 1/3 der gesamten Wärmeverluste.

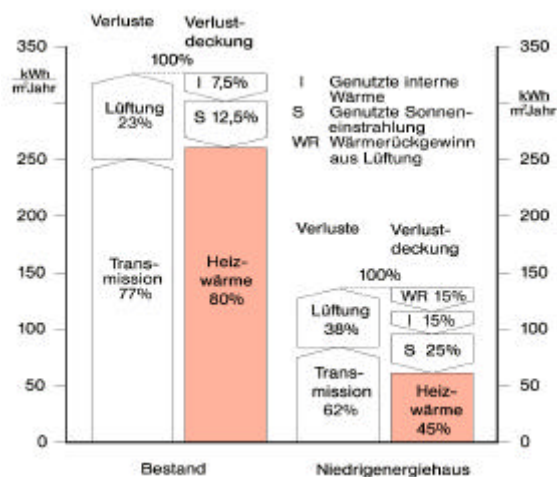


Abb. 1-1: Entwicklung des Jahresheizwärmebedarfs eines EFH [RWE 99].

Das eigentlich Neue am Projekt "Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpen" ist der integrale Systemansatz (cf. Abb. 1-1). Anders ausgedrückt: Ein behagliches Innenklima (→ Komfort) soll auf möglichst umweltverträgliche Weise (→ Ökologie) erreicht werden und für jedermann erschwinglich sein (→ Ökonomie).

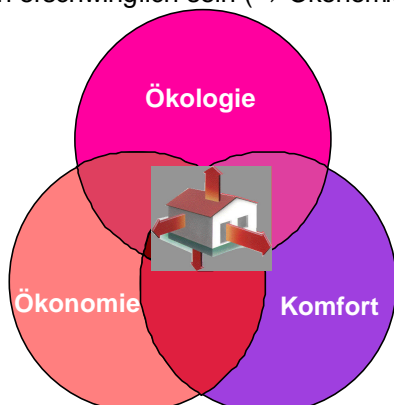


Abb. 1-2: Gesamtheitliche Betrachtung von Gebäude und Wärmeherzeugung.

Typische Fragenkomplexe sind:

- Wie gross sollen die Fenster sein, damit der Heizenergiebedarf möglichst klein wird und die solaren Gewinne in der Übergangszeit optimal genutzt werden können, ohne das Gebäude zu überhitzen?
- Kann der durch die Zusatzisolation "SIA-Grenzwert – MINERGIE" verursachte Umweltschaden durch die daraus resultierende Energieeinsparung kompensiert werden?
- Wie wirkt sich die erhöhte Speicherkapazität beim Massivbau im Vergleich zum Leichtbau auf den Heizenergieverbrauch aus?
- Welchen Anteil haben die Hilfsaggregate (Pumpen, Ventilatoren) in der Energiebilanz?

Projektablauf

Das BFE-Projekt "Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe" startete 1996 und wurde im Herbst 2000 abgeschlossen. Es gliedert sich in die folgenden Phasen:

- I. **1/96-12/96**
Machbarkeitsanalyse, Problemanalyse und Vorbereitung zum Bau eines Funktionsmodells [Afjei 96]
- II. **4/97-12/98**
Ökologischer und ökonomischer Vergleich, Systemoptimierung, intelligente Regelung und Versuche mit Testanlagen [Afjei 98a und Afjei 98b]
- III. **7/98-6/00**
Messungen an drei Funktionsmodellen, Benutzereinfluss, Vergleich verschiedener Heiz- und Regelkonzepte, Basisgrundlagen für ein Planungshandbuch [Afjei 00a]
- IV. **9/98-10/00**
 - a) Technisches Planungshandbuch für Niedrigenergie- und Passivhäuser
 - b) Bauherrenbroschüre der Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz [Wittwer 99]

Die Arbeiten wurden innerhalb einer Arbeitsgemeinschaft durchgeführt, bestehend aus der Fachhochschule beider Basel¹, der Fachhochschule Zentralschweiz, der Fachhochschule Wallis, dem Institut für Mess- und Regeltechnik der ETH-Zürich, den Ingenieurbüros Huber Energietechnik, Bircher + Keller AG sowie dem Büro Doka. Das Projektteam wird von einer Begleitgruppe unterstützt.

Die Resultate der Messungen sind in [Ginsburg 99] zu finden.

¹ Per 1.2.2000 wechselte die Projektleitung von der Informationsstelle für Elektrizitätsanwendung INFEL an das Institut für Energie der Fachhochschule beider Basel FHBB.

2 GRUNDLAGEN

2.1 Begriffe

In diesem Handbuch werden spezifisch Heizsysteme mit Wärmepumpen und Niedrigtemperaturheizungen vorgestellt. Das Niedrigtemperaturheizsystem begünstigt eine sinnvolle und energiesparende Anwendung der Wärmepumpe: Eine Senkung der Heiztemperatur ergibt eine hohe Leistungszahl der Wärmepumpe.

Ein Niedrigtemperaturheizsystem ist jedoch nicht Voraussetzung für ein Niedrigenergiehaus. Um ein Niedrigenergiehaus zu realisieren, können zwei Konzepte unterschieden werden: Das erste Konzept sieht eine maximale Wärmedämmung vor, während das zweite Konzept maximale Energiegewinne anstrebt.

Zur Einführung in dieses Handbuch werden im Folgenden häufig angewandte Begriffe kurz vorgestellt.

2.1.1 Energiestandards

Eine Voraussetzung für die Realisierung der in diesem Handbuch beschriebenen Heizsysteme ist ein genügend tiefer Energie- und Leistungsbedarf des Gebäudes. Dazu wurden verschiedenenorts Standards definiert. Gebäude, die die nachfolgend erwähnten Standards erfüllen, sind dafür geeignet.

Wesentliche Merkmale solcher Gebäude sind:

- Gut gedämmte Gebäudehülle
- Gutes Haustechniksystem: Wenn möglich sind erneuerbare Energiequellen für die Heizenergie auszunutzen. Eine Lüftungsanlage kann dazu beitragen den Wärmeenergieverbrauch zu senken und ist wegen der hohen Gebäudedichtheit für eine komfortable Luftqualität erforderlich.
- Nutzung passiver Sonnenenergiegewinne
- Thermische Speichermasse im Gebäude zur kurzfristigen Speicherung der freien Wärme

Der SIA hat als Vision und Richtschnur für die zukünftige Entwicklung den Absenkpfad definiert (Abb. 2-1).

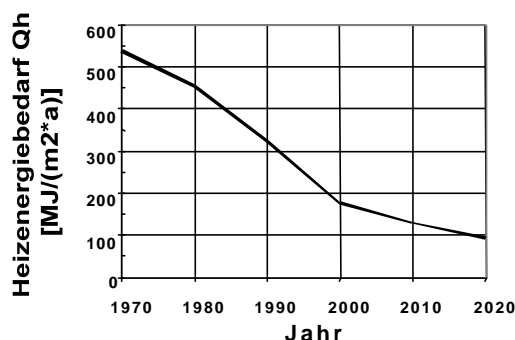


Abb. 2-1: SIA Absenkpfad für den Zielwert Heizenergiebedarf [Stulz 96].

Minergie

MINERGIE ist eine eingetragene Qualitätsmarke (www.minergie.ch). Die Trägerschaft setzt sich aus den Eigentümern (Kantone BE und ZH) und der Konferenz der kantonalen Energiefachstellen zusammen. Der Name MINERGIE darf nur verwendet werden, wenn ein gültiges Label beantragt und vergeben wurde oder die Konformität gewährleistet ist. Die Umsetzung erfolgt über die Agentur AME.

Damit ein Gebäude den MINERGIE-Standard erfüllt, dürfen die folgenden Energiekennzahlen Wärme nicht überschritten werden [Fraefel 98]:

Gewichtete Energiekennzahl E_w für Neubauten			
E_w	< 160 MJ/(m²·a)	=	45 kWh/(m²·a)
Gewichtete Energiekennzahl für Baujahr vor 1990			
E_w	< 320 MJ/(m²·a)	=	90 kWh/(m²·a)

Berechnungsgrundlagen:

- Stromanteil mit Faktor 2 gewichtet
- Energiekennzahl Wärme bezogen auf die Energiebezugsfläche EBF² nach SIA 380/1
- Heizung und Warmwasseraufbereitung berücksichtigt

Es wird nur die dem Gebäude zugeführte hochwertige Energie (Brennstoffe, direkt nutzbare Fernwärme) eingerechnet. Zugeführte Elektrizität für die Wärmeerzeugung und Belüftung wird doppelt gerechnet. Damit wird dem Strommix der Schweiz Rechnung getragen.

Der MINERGIE-Standard für Wohnbauten umfasst zudem Zielsetzungen in den Bereichen Luft- und Oberflächentemperaturen, Luftfeuchtigkeit, Luftschadstoffe im Innenraum, Bedienungsaufwand sowie Wirtschaftlichkeit und Ästhetik.

Der MINERGIE-Standard stellt somit nicht nur Anforderungen an den Energiebedarf sondern auch an die Wohnqualität. Aus diesem Grund ist zum Beispiel eine Lüftungsstrategie (meistens eine mechanische Lüftungsanlage) zum Einhalten des MINERGIE-Standards zwingend erforderlich.

² Die Energiebezugsfläche EBF ist auf den Aussendämmperimeter bezogen.

Passivhaus

Der Nachweis des Passivhaus-Standards ist nach EN 832 zu erbringen. Das Passivhaus-Institut in Darmstadt stellt ein Projektierungspaket zur Verfügung, welches die erforderlichen Berechnungen erleichtert (www.passivhaus-institut.de). In Deutschland wird als Pendant zur SIA 380/1 die EN 832 verwendet. Infolge der Angleichung der SIA Normen an das europäische Normenwerk kann das vom Passivhaus-Institut zur Verfügung gestellte Projektierungspaket auch in der Schweiz verwendet werden. Eine vereinfachte Version für die Vorprojektphase kann gratis über das Internet bezogen werden.

Die folgenden Kennzahlen müssen eingehalten werden [Feist 99]:

Primärenergiekennwert			
E	<	432 MJ/(m ² ·a)	= 120 kWh/(m ² ·a)
Raumheizung (Nutzenergie)			
Q _h	<	54 MJ/(m ² ·a)	= 15 kWh/(m ² ·a)

Berechnungsgrundlagen:

- Stromanteil mit Faktor 3 gewichtet (Deutschland)
- Kennzahlen bezogen auf Nettowohnfläche
- Nutzenergie beinhaltet nur die Bereitstellung der Heizung (d. h. ohne Warmwasser)
- Im Primärenergiekennwert ist der gesamte Primärenergieeinsatz für Heizung, Warmwasser, Lüftung und Haushaltsstrom enthalten

Der niedrige Energiebedarf für die Heizung kann, eine richtige Abstimmung von Gebäude und Haustechnik vorausgesetzt, ohne aufwendige aktive Systeme erbracht werden.

Damit im mitteleuropäischen Klima ein Gebäude mit einem solch tiefen Energiebedarf realisiert werden kann, ist eine Optimierung des Gewinn- zu Verlustverhältnisses unumgänglich. Die wichtigsten Merkmale eines Passivhauses bilden:

- Minimale Wärmeverluste
Die Wärmeverluste können minimiert werden, indem die Wärmedämmung verbessert (U -Wert < 0.15 W/(m²K), entspricht ungefähr 25 cm Steinwolle), das Oberflächen/Volumen-Verhältnis optimiert und die Ausführung der Gebäudehülle luftdicht ausgeführt wird. Im weiteren senken sehr gute Fenster mit einem kleinem Rahmenanteil und die Vermeidung von geometrischen und konstruktiven Wärmebrücken die Wärmeverluste.
- Optimale Wärmegewinne
Die Wärmegewinne können optimiert werden, indem passiv-solare Gewinne durch optimale Fensterflächenanteile und einer guten g/U-Wert-Kombination erzielt werden sowie die Gebäudeausrichtung berücksich-

tigt wird. Eine zusätzliche aktive Ausnutzung der Sonnenenergie steigert die Wärmegewinne erheblich.

- Sparsames Haustechniksystem
Ein verbrauchsarmes Haustechniksystem lässt sich durch eine Lüfterneuerungsanlage mit Wärmerückgewinnung sowie durch eine Luftansaugung über ein Lüfterregister energetisch sinnvoll realisieren. Die Deckung der Heizwärme über das Luftsystem ist möglich und kostengünstig. Dank dem geringen Wärmebedarf ist eine Luftheizung ohne Komforteinbußen realisierbar.

Durch die hervorragende Wärmedämmung liegen die Oberflächentemperaturen eines Passivhauses über denen herkömmlicher Objekte. Eine Strahlungsheizung zur Kompensation von kalten Flächen und zur Verhinderung des Kaltluftabfalls am Fenster erübrigt sich [Feist 99].

Um eine Deckung des Wärmeleistungsbedarfs durch das Luftsystem ohne Erhöhung der Luftmenge über die hygienisch notwendigen Werte hinaus zu ermöglichen, muss dieser für Wohnbauten unter 10 W/m² liegen.

Durch die sehr gute Gebäudehülle bei Passivhäuser (d. h. sehr gute Dämmung und Luftdichtigkeit) ist der verbleibende Heizwärmebedarf so klein, dass sich eine konventionelle Heizungsanlage erübrigt. Diese Aufgabe kann von der Lüftungsanlage übernommen werden, welche für eine ausreichende Frischluftzufuhr sorgt. Dank der kontrollierten Lüftung kann ein Grossteil der Wärme aus der Abluft zurückgewonnen werden. Mit Hilfe eines Erdregisters wird die Aussenluft vorgewärmt, so dass auf diese Weise die Leistungsspitzen gemindert werden. Weil der Energiebedarf für die Beheizung im Passivhaus sehr klein ist, steigt der Anteil für die Brauchwassererwärmung auf über die Hälfte des Nutzwärmebedarfs an. Ein gut gedämmter Speicher, kurze Verteilungen und wassersparende Armaturen sind Voraussetzung für einen energiesparenden Betrieb. Eine elektrische Begleitheizung ist nicht notwendig. Der energieeffizienten Deckung dieses Bedarfes kommt eine herausgehobene Bedeutung zu, weshalb thermische Solar Kollektoren eine wachsende Bedeutung erlangen. Durch die kontinuierliche Lüftung ist eine ausreichende Frischluftzufuhr garantiert. Luftverunreinigungen und Feuchtigkeit werden abtransportiert.

Haustechnik im Passivhaus

Im Passivhaus kann, wie bereits erwähnt, auf eine separate hydraulische Heizungsanlage verzichtet werden. Zentraler Teil der Haustechnik zur Sicherstellung eines behaglichen Raumklimas ist dann die Lüftungsanlage mit WRG.

Ein schematisches Beispiel für eine solche Anlage zeigt Abb. 2-2.

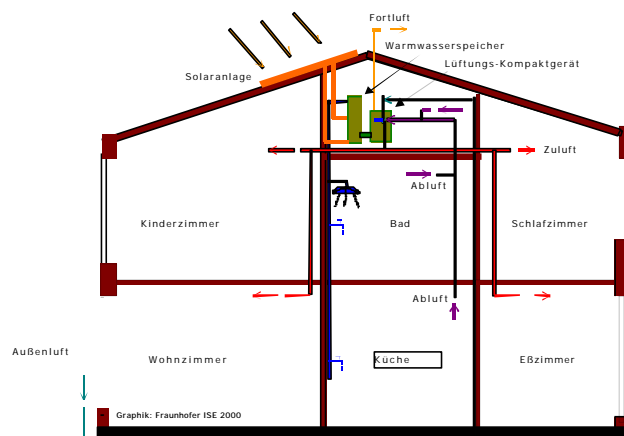


Abb. 2-2: Lüftungsanlage im Passivhaus mit integrierter Restheizung und Brauchwassererwärmung und vorge-schaltetem Erdregister [Russ 00].

Thermische Behaglichkeit

Die thermische Behaglichkeit hat in einem Passivhaus mindestens den gleichen Standard wie in einem herkömmlichen Gebäude. Durch die gute Gebäudehülle und das Lüftungssystem sind sogar Verbesserungen zu erwarten.

Wärmerückgewinnung

Die Wärme der Abluft wird mit einer Wärmerückgewinnung genutzt. Dies ist typischerweise ein Luft-Luft-Wärmeübertrager zwischen Abluft und Zuluft. Dieser sollte einen Wärmebereitstellungsgrad von mindestens 75 % aufweisen. Gute Geräte erreichen heute Wärmebereitstellungsgrade von über 90 %. Es sind mit Vorteil Wärmeübertrager auszuwählen, welche nach dem (Kreuz-) Gegenstromprinzip arbeiten. Geräte mit einfachem Kreuzstromprinzip weisen geringere Wärmebereitstellungsgrade auf [Feist 99].

Luftführung

Im Passivhaus wird kein hydraulisches Wärmeverteilungssystem, sondern eine Luftheizung eingesetzt. Deshalb ist in jedem Zimmer ein Lufteinlass notwendig. Die Kaskadenlüftung hingegen – Zuluft in Wohn-, Schlaf- und Esszimmer, Überströmzone (Treppenhaus, Korridore), Abluft aus Feuchträumen (Küche, Bäder, WC) und an anderen belasteten Orten – ist im Passivhaus nicht realisierbar.

Der minimale Zuluftvolumenstrom richtet sich nach hygienischen Gesichtspunkten: Nach SIA 382/1 wird ein minimaler Aussenluftwechsel von 25 bis 30 m³/(h·P) empfohlen. Dieser minimale Volumenstrom sollte nicht erhöht werden, weil dadurch der Energiebedarf für die Luftförderung steigt.

Um eine Staubverschmelzung zu vermeiden, sollte eine Lufttemperatur von 50 °C (55 °C Oberflächentemperatur des Nachheizregisters) nicht überschritten werden. Ein Teil der Wärme kann über die Transmissionsverluste des Kanalnetzes bereits an den Raum abgegeben werden. Die Zulufttemperatur am Luftauslass beträgt dann nur noch ca. 30 °C. Die elektrische Hilfsenergie zur Förderung der Luft muss gering bleiben ($E_{EL}/V_{geför} < 0.4 \text{ Wh/m}^3$ mit WRG, bzw. $< 0.25 \text{ Wh/m}^3$ ohne WRG).

Wärmebereitstellung für Warmwasser und Heizung

Für die Brauchwassererwärmung mit Solaranlagen sind heute auf dem Markt Standard-Produkte erhältlich, welche gut geeignet sind für einen Einsatz im Passivhaus. Allerdings werden solche Solarkollektoren meistens nur auf eine Nutzungsdauer während des Sommers bis in die Übergangszeit ausgelegt. Eine interessante Variante für die Wärmebereitstellung für das Warmwasser und – eine entsprechende Auslegung des Speichers vorausgesetzt – auch für die Raumheizung ist eine Abluftwärmepumpe: Die Fortluft am Austritt der Wärmerückgewinnung weist in vielen Betriebszuständen noch Temperaturen auf, die mit einer Wärmepumpe wirtschaftlich genutzt werden können.

Richtwerte für Passivhaus

Nach [Feist 99] müssen folgende Richtwerte bei der Planung eines Passivhauses eingehalten werden:

Gebäude			
Heizlast		< 10	W/m ²
Wärmebrücken	$\Psi_{\text{ausßen}}$	≤ 0.01	W/(m·K)
Fensterrahmen: bei	U_F	≤ 0.8	W/(m ² ·K)
Verglasung von $U_v = 0.7$			W/(m ² ·K)
Lüftung			
Wärmebereitstellungsgrad	η_{Jahr}	≥ 75	%
Luftdichtheit	n_{50}	< 0.6	h ⁻¹
elektrische Hilfsenergie	$E_{el}/V_{\text{Förd}}$	< 0.4	Wh/m ³
gerichtete Durchströmung der Wohnung			
geringe Schallemissionen (< 25 dB) über Lüftungskanäle			
Warmwasser			
Dämmung: 2 x Nennweite der Rohrdimension			
Wärmeverlust	Q_{Verl}	< 60	W
Warmwasserspeicher je Wohnung:			
Leitungen und Speicher im beheizten Raum führen.			

Tab. 2-1: Richtwerte zur Planung eines Passivhauses [Feist 99].

Niedrigenergiehaus

Der Begriff "Niedrigenergiehaus" ist durch keinen Standard definiert.

Förderung

Gewisse Kantone fördern den Bau von Gebäuden mit niedrigem Heizenergiebedarf. Als Beispiel wird ein Förderprogramm des Kantons Basel-Land vorgestellt [AUE 99]: Wird der Grenzwert für den Heizenergiebedarf mindestens zur Hälfte unterschritten, so wird ein Beitrag von 20 Fr./m² Energiebezugsfläche entrichtet. Auch vorbildliche Haustechnikanlagen (erneuerbare Energie, kontrollierte Lüftung mit WRG) werden finanziell unterstützt.

Es lohnt sich abzuklären, ob für das Bauvorhaben Förderbeiträge erhältlich sind. Eventuell lohnt es sich, mit geeigneten Massnahmen den Heizenergiebedarf zu senken, um so das Recht auf einen Beitrag zu erhalten.

2.1.2 Niedrigtemperaturheizung

Herkömmliche Systeme werden mit Vorlauftemperaturen zwischen 45 und 60 °C ausgelegt. Die maximale Vorlauftemperatur wird vom Energiegesetz vorgeschrieben. Minimale Vorlauftemperaturen für Bodenheizungen betragen heute weniger als 30 °C. Weil bei einer zeitgemässen Bauweise durch den Einsatz von verbesserten Fenstergläsern und durch die Anwendung von strengeren Wärmedämmvorschriften der Wärmeleistungsbedarf im Vergleich zu früheren Jahren deutlich gesunken ist, kann die Raumheizung mit tieferen Vorlauftemperaturen sichergestellt werden.

Die Niedrigtemperaturheizung mit ausgeprägtem Selbstregeleffekt wird nach [Afjei 96] definiert als:

$$\vartheta_{VL, \text{Auslegung}} < 30 \text{ °C}$$

Niedrigtemperaturheizungen in Einfamilienhäuser bieten die folgenden Vorteile [Afjei 96], [Afjei 98a]:

- Selbstregeleffekt: Aufwendige Regeleinrichtungen zur Verhinderung von Raumtemperaturüberschwingungen bei Fremdwärmeanfall entfallen.
- Hohe Wärmeerzeugungsnutzungsgrade mit Wärmepumpen: Weil die Vorlauftemperatur tief ist, wird die Differenz zwischen Wärmequelle und Wärmesenke kleiner. Dies bedeutet, dass weniger Antriebsenergie eingesetzt werden muss, was eine Verbesserung der Leistungszahl zur Folge hat.
- In einigen Kantonen (z. B. Kanton Zürich) darf bei Vorlauftemperaturen unter 30 °C explizit auf eine Raumregelung verzichtet werden.

2.1.3 Behaglichkeit

Die Behaglichkeit (aus dem Englischen oft mit Komfort übersetzt) wird von vielen Faktoren beeinflusst. Dazu gehören [Fanger 70], [Trawnika 96]:

- | | |
|--|--------------------------|
| • Lufttemperatur | • Luftgeschwindigkeit |
| • Luftqualität | • Strahlung |
| • Licht | • Infraschall |
| • Lärm | • Statische Elektrizität |
| • Feuchtigkeit | • Vibrationen |
| • Temperatur der Umschliessungsflächen | |

Thermische Behaglichkeit

Die Sicherstellung der thermischen Behaglichkeit und die Vermeidung von Bauschäden wird in der Norm [SIA 180] geregelt. Diese Norm wurde 1999 vollständig überarbeitet und den neuesten Erkenntnissen angepasst. Eine Norm definiert grundsätzlich den Stand der Technik. Überall dort, wo der Stand der Technik vertraglich oder gesetzlich gefordert ist, kann die Einhaltung dieser Bestimmungen auch juristisch durchgesetzt werden. Die Nichteinhaltung von Normen bildet deshalb auch den wichtigsten Haftungsgrund für Planer bei Schadenersatzforderungen und sollte deshalb von diesen nicht auf die leichte Schulter genommen werden.

Damit die thermische Behaglichkeit für eine Person in einem Raum gewährleistet werden kann, darf deren Wärmeabgabe weder zu hoch noch zu tief sein. Demzufolge müssen verschiedene Parameter in Einklang gebracht werden (siehe dazu Abb. 2-3).

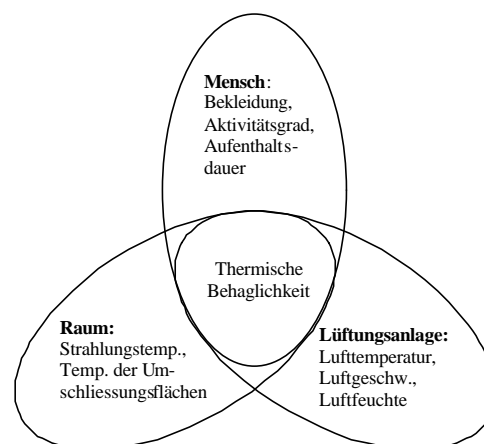


Abb. 2-3: Einflussgrössen auf die thermische Behaglichkeit nach [DIN 1946].

PMV-Index und PPD-Index

PMV: Predicted Mean Vote

Voraussehbare mittlere Beurteilung des Raumklimas wie sie durch eine grosse Anzahl Personen vorgenommen würde. Die Skala reicht von +3 (heiss) bis -3 (kalt), wobei 0 ein optimales Raumklima darstellt [Fanger 70].

Folgende Parameter werden für die PMV-Berechnung berücksichtigt:

- Aktivitätspegel
- Wärmedurchgangswiderstand der Bekleidung
- Lufttemperatur
- Mittlere Strahlungstemperatur
- Luftgeschwindigkeit
- Luftfeuchtigkeit

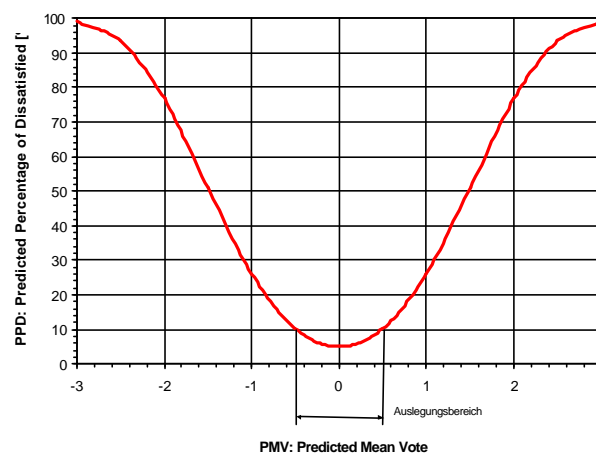


Abb. 2-4: Umrechnung von PMV- auf PPD-Index [HDK1 89] / [Trawnika 96].

PPD: Predicted Percentage of Dissatisfied

Anteil Personen in %, welche ein gegebenes Raumklima voraussichtlich als nicht akzeptabel empfinden. Als Unzufriedene werden Personen eingestuft, welche das Raumklima mit den PMV-Werten +3/+2/-3/-2 beurteilen. Abb. 2-4 zeigt, dass im Mittel immer mindestens 5 % Unzufriedene vorhanden sind [Fanger 70].

Raumtemperatur

Die Raumtemperatur entspricht dem Temperaturempfinden des Menschen. Sie ist das Mittel aus der Raumlufthtemperatur und der mittleren Temperatur der Raumumschliessungsflächen.

Die behagliche Raumlufthtemperatur ist von der Bekleidung und der körperlichen Aktivität abhängig. Der Wärmedämmwert der Bekleidung kann in der Einheit $[m^2K/W]$ angegeben werden. Anschaulicher ist die Einheit clothes [clo], wobei gilt

$$1 [clo] = 0.155 [m^2K/W] \quad \text{Gl. 2-1}$$

Art der Bekleidung	Wärmedämmwert	
	clo	m^2K/W
Nackt, stehend	0.0	0.0
Leichte Sommerbekleidung	0.5	0.08
Hausbekleidung, Winter	1.0	0.155
Warme Winterbekleidung	3.0	0.45

Im Winter ist für Wohnungen und Büros auf 1 clo zu dimensionieren.

Die körperliche Aktivität kann durch die Wärmeabgabe des Körpers in der Einheit $[W/m^2]$ angegeben werden. Anschaulicher ist die Einheit metabolism [met], wobei gilt

$$1 [met] = 58 [W/m^2] \quad \text{Gl. 2-2}$$

Tätigkeit	Wärmeabgabe	
	met	W/m^2
Schlafend	0.8	46
Ruhig sitzend	1.0	58
Stehend	1.2	70
Leichte Tätigkeit (z.B. Verkauf)	1.6	93
Mittelschwere Tätigkeit	2.0	116
Gehen (4 km/h)	2.8	162
Schwere Werkstattarbeit	3.0	174

Abgeleitet aus der Tätigkeit und der Bekleidung kann mit Abb. 2-5 die optimale Raumtemperatur bestimmt werden. Gültig ist die Beziehung bei Luftgeschwindigkeiten von weniger als 0.1 m/s und einer relativen Luftfeuchte von 30 % bis 70 %.

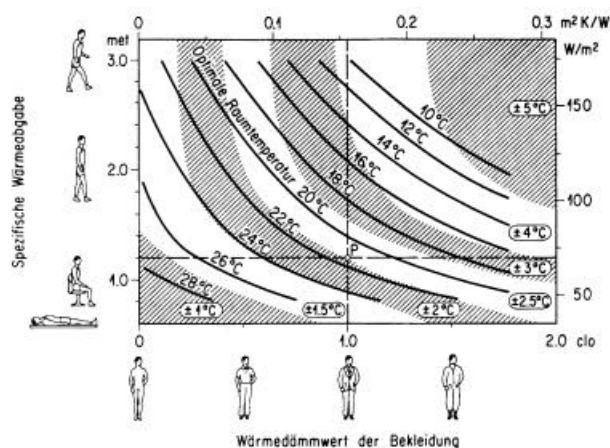


Abb. 2-5: Optimale Raumtemperatur [SIA 180].

Zugluft

Bei Luftgeschwindigkeiten von mehr als 0.1 m/s im Aufenthaltsbereich ist grundsätzlich mit Zugerscheinungen zu rechnen. Der Prozentsatz Unzufriedener kann mit der folgenden Formel berechnet werden:

$$PPD = (v - 0.05)^{0.6} \cdot (3 + 37 v T_U) \cdot (34 - J_a) [\%] \quad \text{Gl. 2-3}$$

v	Luftgeschwindigkeit	[m/s]
T_U	Turbulenzgrad	[-]
J_a	Lufttemperatur	[°C]

Nach SIA 180 sind PPD-Werte für die Zugluft bis 20 % zulässig, sofern die optimale Raumlufthtemperatur eingehalten ist.

Asymmetrie der Strahlungstemperatur

Die reine Betrachtung der mittleren Oberflächentemperatur allein ist ungenügend, wenn grosse Temperaturunterschiede zwischen den einzelnen Umschliessungsflächen bestehen.

Diese Strahlungsasymmetrie verursacht ein thermisches Unbehagen durch einseitigen Wärmeentzug [HDK1 89]. Die einzuhaltenden Werte sind in [SIA 180] geregelt. Im Winter sind die folgenden Werte zulässig (Bekleidung 0.5 clo, Tätigkeit 1.2 met):

Fussbodentemperatur	von 19 °C	bis 26 °C
Temp.-Diff. 0.1 m bis 1.1 m ab Boden	Max. 3 K	
Temp.-Diff. bei Heizdecken	Max. 4 K	
Temp.-Diff. bei kalten Wänden	Max. 10 K	

Raumlufthqualität

An die Qualität der Raumlufth werden die folgenden Anforderungen gestellt:

- Sie soll als frisch empfunden werden
- Keine Anreicherung von Schadstoffen
- Keine Schäden an Materialien infolge zu hoher Luftfeuchtigkeit.

Ist der Mensch die massgebende Quelle für Luftverunreinigungen, so kann der Kohlendioxid-Gehalt der Raumlufth als Indikator für die Raumlufthqualität dienen. Akzeptiert man 20 % unzufriedene Besucher, so darf der CO₂-Gehalt 1000 ppm nicht übersteigen. Personen, die sich bereits längere Zeit in einem Raum befinden, akzeptieren eine grössere Geruchsbelastung als solche, die den Raum unmittelbar betreten haben (Besucher) [Widder 94]. Je nach Schadstoffquelle sollten folgende minimale Aussenluftvolumenströme eingehalten werden:

Empfohlene minimale Aussenluft rate pro Person:		
Räume mit Rauchverbot	15 m ³ /(h·P)	SIA 180
Bei Grenzwert 1000 ppm CO ₂	25-30 m ³ /(h·P)	SIA V382/1
Bei Grenzwert 1500 ppm CO ₂	12-15 m ³ /(h·P)	SIA V382/1
In Räumen, wo Rauchen gestattet ist (pro Person):		
Räume, wo Rauchen gestattet	30-70 m ³ /(h·P)	SIA V382/1 SIA 180

Die oben aufgeführten Zahlen beziehen sich auf Mischlüftungskonzepte (vollständige Mischung von Verunreinigung und Frischluft). Lüftungskonzepte mit höherer Lüftungseffizienz (erfassen der Verunreinigungen direkt an der Quelle) erlauben tiefere Luftwechselsraten.

Lüftungsanlagen für Schlafzimmer werden heute in der Regel auf eine Belegung von 2 Personen ausgelegt. Daraus ergibt sich eine minimale Aussenluft rate von:

Minimale Aussenluft rate für Schlafzimmer:	30 m ³ /h
--	----------------------

2.1.4 Energie

Damit Energie genutzt werden kann, muss sie in die gewünschte Form umgewandelt werden. Abb. 2-6 zeigt verschiedene Stufen von Energie in diesem Prozess. Eine Umwandlung von einer Stufe auf die nächst tiefere ist immer mit einem 'Verlust' (d. h. mit aus Sicht des Verbrauchers nicht mehr nutzbarer Energie) verbunden.

Primärenergie

Unter Primärenergie versteht man die Energie, die aus natürlichen Quellen in Form von Wasserkraft, Rohöl, Erdgas, Steinkohle, Uran usw. gewonnen werden kann [SIA380/1].

Endenergie

Die Endenergie bezeichnet diejenige Energie, welche dem Gebäude unmittelbar zugeführt wird in Form von Elektrizität, Öl oder Gas [SIA380/1].

Nutzenergie

Die Nutzenergie ist die genutzte Energie in Form von Licht, Kraft, Wärme und Prozessen [SIA380/1].

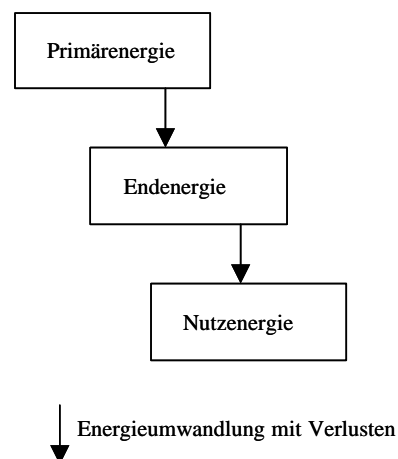


Abb. 2-6: Energieumwandlung.

Hilfsenergie

Die Hilfsenergie bezeichnet die in einem Energieumwandlungsprozess benötigte Energie zur Förderung von Medien und zur Regelung. Beispielsweise benötigt eine Luft-Wasser-Wärmepumpe folgende Hilfsenergien:

- Ventilator für Aussenluft
- Umwälzpumpe wasserseitig
- Stellantriebe, Regelung

Transmissionswärmeverlust

Der Transmissionswärmeverlust bezeichnet die Wärmeenergie oder Wärmeleistung, welche infolge einer Temperaturdifferenz (z. B. Innentemperatur / Aussentemperatur) durch die Gebäudehülle fliesst.

Lüftungsverlust

Der Lüftungsverlust ist die Energie, welche im Winter zur Erwärmung der Frischluft aufgewendet werden muss. Falls ein Lüftungssystem mit einer Wärmerückgewinnung eingesetzt wird (kontrollierte Wohnungslüftung), verringert sich der Lüftungswärmeverlust entsprechend.

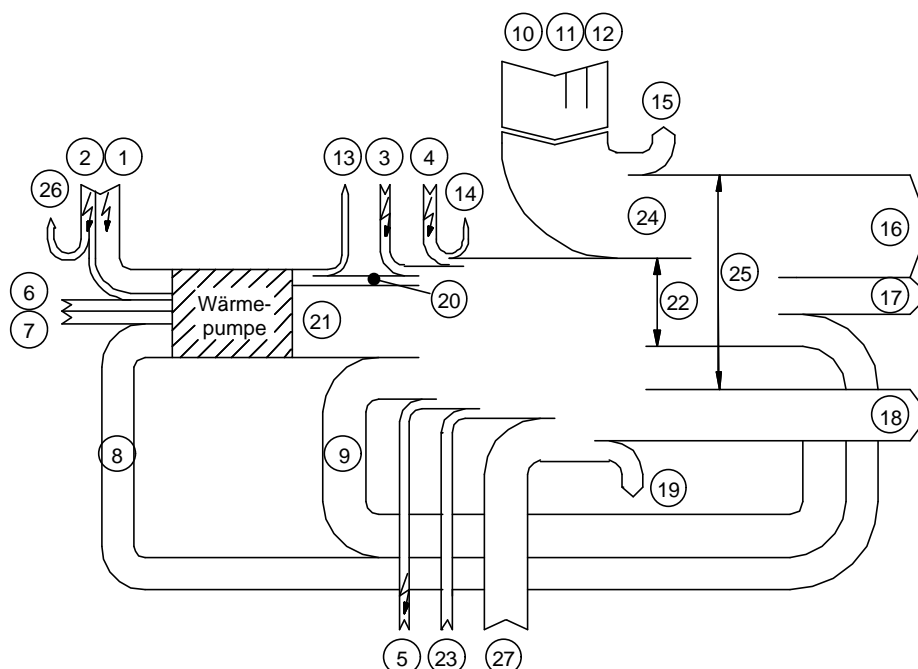
Wärmebedarf vs. Wärmebezug

Der Wärmebedarf stellt immer eine berechnete Grösse dar. Der Wärmebezug hingegen ist immer ein gemessener Wert.

Heizwärmebedarf

Der Heizwärmebedarf bezeichnet die Wärmeenergie, welche dem Gebäude zur Raumheizung mit der Heizungsanlage zugeführt werden muss [SIA380/1].

Energieflussdiagramm



Nr.	Abk.	Bezeichnung
1	E_{WP}	Strombedarf Wärmepumpe
2	E_{Aux}	Strombedarf Hilfsbetriebe der Wärmepumpe (Umwälzpumpe für EWS-Kreislauf, Ventilator zur Überwindung Druckverlust am Verdampfer, Speicherladepumpe, Carterheizung, Steuerung, Abtaueinrichtung)
3	$E_{Z,h}$	Strombedarf Zusatzheizung (Heizstab, Durchlauferhitzer)
4	$E_{Förd}$	Strombedarf Ventilatoren und Heizungspumpen (ohne Verdampferanteil)
5	$E_{Z,w}$	Strombedarf Zusatzheizung Warmwasser (Heizstab, Durchlauferhitzer)
6	Q_{Erd}	Zusätzlicher Wärmegewinn durch Erdwärme für Wärmepumpe (nur Zusatzgewinn zur WRG)
7	Q_{AUL}	Aussenluftwärme für Wärmepumpe
8	Q_{ABL}	Abluftwärme, genutzt für Wärmepumpe
9	Q_{WRG}	Wärmerückgewinnung an Heiztagen, real (ohne Berücksichtigung Erdregister)
10	Q_S	passiver Solargewinn an Heiztagen
11	Q_{Pers}	Personenabwärme an Heiztagen
12	Q_E	Wärmegewinn Elektrizität Haushaltsstrom an Heiztagen
13	Q_{Verl}	Nicht nutzbare Wärme im unbeheizten Raum (Abstrahlung, Wärmeverluste Sondenpumpe)
14	$Q_{Förd,Verl}$	Nicht nutzbare Wärme der Ventilatoren und Heizungspumpen
15	$Q_{g,Verl}$	Nicht nutzbare freie Wärme, an Heiztagen
16	Q_T	Transmissionswärmeverluste
17	Q_V	Lüftungswärmeverluste
18	Q_w	Wärmebedarf für Warmwasser
19	Q_{SP}	Wärmeverlust der Speicher und Verteilungen im unbeheizten Raum
20	$Q_{g,nutz}$	Nutzbare Wärmeverluste Wärmepumpe, Speicher und Verteilung in beheiztem Raum
21	Q_{WP}	Wärmeabgabe der Wärmepumpe
22	Q_h	Heizwärmebedarf (Transmission und thermisch wirksame Lüftung minus genutzte freie Wärme)
23	$Q_{Erd,AUL}$	Zusätzliche Erreichwärme in Aussenluft an Heiztagen, direkt genutzt (nur Zusatzgewinn zur WRG)
24	Q_{ug}	freie Wärme, genutzt an Heiztagen
25	$Q_{h,G}$	Gebäudewärmebedarf
26	$Q_{Q,Verl}$	Nicht nutzbare Wärme Quellenanlage (Pumpen, Ventilatoren)
27	Q_{Kol}	Solarwärme von Sonnenkollektor, eingebracht in Speicher

Abb. 2-7: Energieflussdiagramm eines monoenergetischen Niedrigenergiehauses mit Wärmepumpe (Endenergie nur Strom).

Nutzenergiebedarf Heizung

Der Nutzenergiebedarf Heizung besteht aus dem Heizwärmebedarf sowie den Wärmeverlusten der Heizungsleitungen [SIA380/1].

Freie Wärme

Als Freie Wärme wird der Wärmeeinfall in beheizten Räumen durch Personen, Sonne und Elektrizität bezeichnet [SIA380/1].

Genutzte Gewinne

Die genutzten Gewinne bestehen aus dem Anteil Freie Wärme, welcher für die Heizung des Gebäudes genutzt werden kann [SIA380/1]. Wie gut die freie Wärme ausgenutzt wird, hängt ab von:

- Der Speichermasse des Gebäudes
- Regelung der Wärmezufuhr
- Verhältnis der Wärmegewinne zu den Wärmeverlusten

Wärmebedarf für Warmwasser

Der Wärmebedarf für Warmwasser bezeichnet den Energiebedarf Warmwasser sowie die Wärmeverluste des Warmwasserspeichers, Verteil- und Ausstossverluste [SIA380/1].

Nutzenergiebedarf Warmwasser

Der Nutzenergiebedarf Warmwasser ist gleich der Nutzenergie für Warmwasser an der Entnahmestelle [SIA380/1].

Wärmerückgewinnung (WRG)

Die Wärmerückgewinnung WRG bezeichnet einen Wärmeübertrager, um in Lüftungsanlagen den Wärmehalt der Abluft zu nutzen, indem die Aussenluft aufgewärmt wird. Es gibt verschiedene Typen der WRG wie Kreislaufverbund, Rotor und Plattentaucher. Für die Wohnungslüftung werden vorwiegend Plattentaucher verwendet. Auch eine Kombination mit Wärmepumpen ist möglich.

2.1.5 Grenzwerte

SIA-Grenzwert Heizwärmebedarf

Der SIA-Grenzwert des Heizwärmebedarfs H_g nach SIA 380/1 wird nach der Gebäudekategorie und der Höhe des Gebäudestandortes berechnet. Bei Bauvorhaben ist der Heizenergiebedarf zu berechnen und mit dem Grenzwert zu vergleichen. Dabei muss der ausgewiesene Heizenergiebedarf kleiner als der Grenzwert sein [SIA380/1].

Der SIA-Grenzwert für den Heizwärmebedarf pro Jahr beträgt für Ein- und Mehrfamilienhäuser:

$$H_g = H_{g0} + \Delta H_g \cdot (A / EBF) \quad [\text{MJ/m}^2] \quad \text{Gl. 2-4}$$

Dabei bezeichnet A die Oberfläche des Gebäudes und EBF die Energiebezugsfläche. H_{g0} und ΔH_g sind gegeben durch:

Gebäudekategorie I: Wohnen MFH			
H_{g0}	80 MJ/m ²	ΔH_g	90 MJ/m ²
Gebäudekategorie II: Wohnen EFH			
H_{g0}	90 MJ/m ²	ΔH_g	90 MJ/m ²

Die Grenzwerte gelten für Orte mit einer Jahresmitteltemperatur von 8.5 °C. Sie werden um 4 % pro 1 K höhere oder tiefere Jahresmitteltemperatur reduziert bzw. erhöht.

SIA-Zielwert Heizwärmebedarf

Der Zielwert für den Heizwärmebedarf muss nicht zwingend eingehalten werden. Er ist vor allem bei Neubauten sowie bei neuen Bauteilen und Haus-technikanlagen anzustreben. Mit der richtigen Kombination von energetisch guten Bauteilen ist er erreichbar und kann mit bewährten Technologien sogar unterschritten werden. Die Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit sind von Fall zu Fall zu prüfen.

Grenz- und Zielwerte für Bauteile

Für Bauteile werden Grenz- und Zielwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) angegeben. Die Grenzwerte sind beim Nachweis mit Einzelanforderungen zwingend einzuhalten. Beim Systemnachweis muss der Grenzwert Heizwärmebedarf eingehalten werden, was mehr Spielraum für die U-Werte der Bauteile ermöglicht. Die Grenz- und Zielwerte sind in Tab. 2-2 dargestellt.

Bauteil gegen	SIA-Grenzwerte		SIA-Zielwerte	
	Aussenklima od. < 2 m im Erdreich	Unbeheizte Räume od. > 2 m im Erdreich	Aussenklima od. < 2 m im Erdreich	Unbeheizte Räume od. > 2 m im Erdreich
Bauteil				
Dach, Wände, Boden	0.30	0.40	0.20	0.30
Bauteile mit Flächenheizung	0.25	0.30	0.20	0.30
Fenster	1.7	2.0	1.2	1.6
Fenster mit Heizkörper	1.2	1.6	1.0	1.2
Türen	2.0	2.0	1.6	2.0
Türen > 4 m ²	2.4	2.4	2.0	2.0

Tab. 2-2: Grenz- und Zielwerte für den Wärmedurchgangskoeffizienten U in [W/m²K], bei 20 °C Raumtemperatur und 8.5 °C Jahresmitteltemperatur [SIA380/1].

Passivhaus Grenz- und Zielwerte

Auch beim Passivhausstandard existieren Anforderungen an die nichttransparenten Aussenbauteile (Tab. 2-3).

	U-Wert [W/m ² K]	Bei Wärmeleitgruppe 040 äquivalente Dämmstoffstärke
Grenzwert an jeder Stelle	0.16	25 cm
Zielwert an jeder Stelle	0.10	40 cm

Tab. 2-3: Grenz- und Zielwerte für den Wärmedurchgangskoeffizienten U in [W/m²K] für die Dämmqualität nicht transparenter Bauteile [Feist 96].

2.2 Energetische Kennzahlen

2.2.1 Systemgrenzen

In diesem Handbuch soll die folgende Systemabgrenzung verwendet werden:

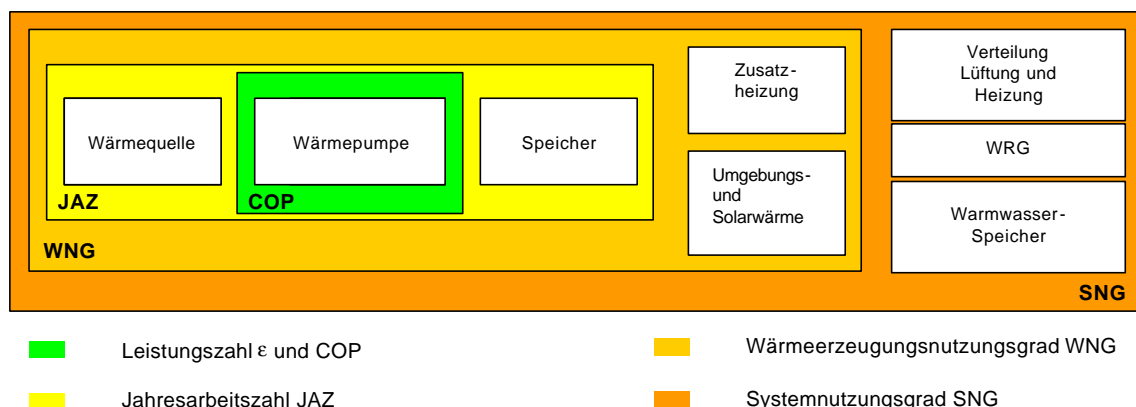


Abb. 2-8: Systemgrenzen für COP, JAZ, WNG, SNG.

Im Folgenden werden die vier Kennzahlen Coefficient of Performance COP, Jahresarbeitszahl JAZ, Wärmeerzeugungsnutzungsgrad WNG und Systemnutzungsgrad SNG definiert.

Für Vergleiche verschiedener Wärmepumpen im gleichen Heizungskonzept wird man den COP heranziehen. Interessiert der Strombedarf für die Wärmepumpe für ein ganzes Jahr, so wird man dafür die JAZ als Kenngröße wählen. Vergleicht man eine Ölheizung mit einer Wärmepumpenheizung, so ist dafür der WNG zu nehmen, wobei dann die verschiedenen Energieträger zu bewerten sind. Um verschiedene Heiz- und Lüftungskonzepte gesamtheitlich zu vergleichen, eignet sich der Systemnutzungsgrad SNG.

2.2.2 Kennzahlen

Kennzahlen werden verwendet, um die Effizienz verschiedener Heizungssysteme mit Wärmepumpe und Wärmerückgewinnung zu beurteilen. Im Folgenden werden die wichtigsten vorgestellt. Zur Beurteilung des Gesamtsystems wird die neue Kennzahl "Systemnutzungsgrad" eingeführt.

Coefficient of Performance (COP)

Der COP dient der Beurteilung der Effizienz einer Wärmepumpe in einem bestimmten Betriebspunkt.

$$COP = \frac{\dot{Q}_{WP,hw}}{P_{WP,hw} + P_{Aux,hw}} \quad [-] \quad \text{Gl. 2-5}$$

$\dot{Q}_{WP,hw}$	Wärmeabgabe an der Wärmepumpe	[W]
$P_{WP,hw}$	Leistungsaufnahme Verdichter	[W]
$P_{Aux,hw}$	zusätzliche Leistungsanteile für: Verdampferrückdruckabfall, Verflüssigerdruckabfall, Abtau-einrichtung, Steuerung und Regelung (nur für Bauteile innerhalb der Wärmepumpe)	[W]

Weil genormte Verdampfer- und Kondensatortemperaturen für die Bestimmung des COP verwendet

werden, erlaubt dies den Vergleich verschiedener Wärmepumpen untereinander [EN255].

Jahresarbeitszahl (JAZ)

Die Jahresarbeitszahl beurteilt die Wärmepumpe über eine Jahresperiode. Darin enthalten sind auch Hilfsenergien wie Sondenpumpe, Carterheizung, Regelung und Speicherverluste der Heizung. Nicht enthalten sind hingegen Zusatzheizungen, Wärmeverteilung und Wärmerückgewinnung.

$$JAZ = \frac{Q_{WP,hw} - Q_{SP}}{E_{WP} + E_{Aux}} \quad [-] \quad \text{Gl. 2-6}$$

$Q_{WP,hw}$	abgegebene Heizwärme während eines Jahres	[MJ]
Q_{SP}	Wärmeverlust der Speicheranlage	[MJ]
E_{WP}	Verdichter-Energieverbrauch der Wärmepumpe	[MJ]
E_{Aux}	zusätzlicher Energieverbrauch für: Verdampferpumpe (-Ventilator), Speicherladepumpe, Abtau-einrichtung, Carterheizung, Steuerung und Regelung	[MJ]

Weil die Zusatzheizungen (Heizstäbe in Wassererwärmer / Heizungsspeicher, Durchlauferhitzer) in der JAZ nicht enthalten sind, ist diese Kennzahl für die Beurteilung unterschiedlicher Heizungskonzepte nicht geeignet. In Abb. 2-9 bis Abb. 2-11 sind als Beispiel drei unterschiedliche Heizungskonzepte dargestellt, bei denen trotz hoher JAZ ein hoher Strombedarf resultiert. Deshalb wird im vorliegenden Handbuch auf eine Beurteilung der verschiedenen Systeme durch die JAZ verzichtet.

In der Regel wird die Bedeutung der Hilfsenergien unterschätzt. Bei einer guten Anlage liegen diese unter 10 % des gesamten Strombedarfs, bei schlechter Planung ist diese aber nicht selten größer als 15 %.

⇒ Beim Vergleich von Jahresarbeitszahlen sollte deshalb immer überprüft werden, ob alle Hilfsenergien eingerechnet und die Hilfsaggregate optimal ausgelegt sind (cf. Kapitel 2.6.2).

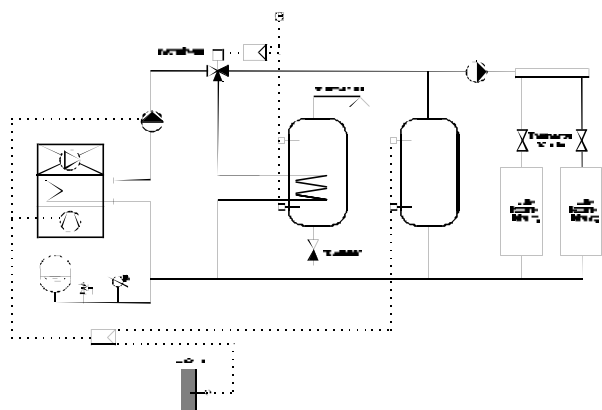


Abb. 2-9: Wärmepumpensystem mit Beistell-Wassererwärmer, ohne Zusatzheizung: Kleine JAZ bei geringem Strombedarf.

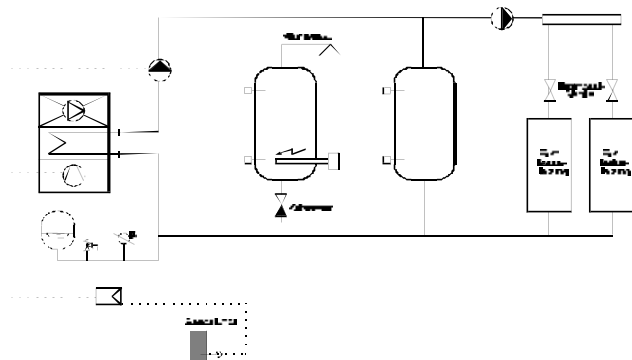


Abb. 2-10: Wärmepumpensystem mit separatem Elektro-Wassererwärmer ohne Zusatzheizung: Mittlere JAZ bei grossem Strombedarf.

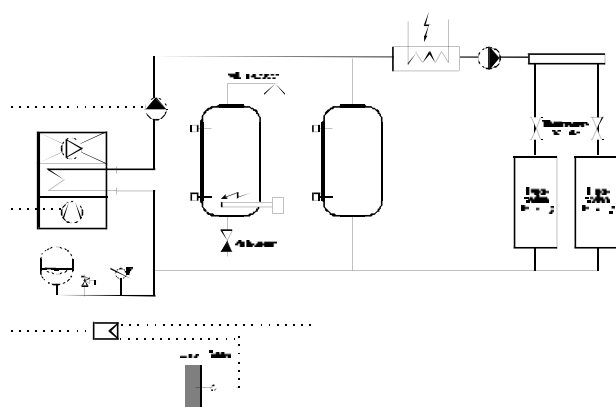


Abb. 2-11: Wärmepumpensystem mit separatem Elektro-Wassererwärmer und Zusatzheizung: Hohe JAZ bei sehr grossem Strombedarf.

Wärmeerzeugungsnutzungsgrad (WNG)

Der Wärmeerzeugungsnutzungsgrad WNG dient der Beurteilung der Effizienz der Wärmeerzeugung über eine Jahresperiode. Er bildet die korrespondierende Vergleichsgrösse zum Wärmeerzeugungsnutzungsgrad von fossilen Heizkesseln. Demzufolge sind keine Umwälzpumpen für die Wärmeverteilung, keine Lüftungsventilatoren und keine thermischen Speicher- und Verteilverluste enthalten. Direkt (nicht über die Wärmepumpe) genutzte Wärmegewinne (z. B. Erdregister, Sonnenkollektor) werden im WNG bilanziert, Umgebungs-

wärme als Wärmequelle für die Wärmepumpe wird nicht eingerechnet.

$$\text{Def: } WNG = \frac{Q_{WP,hw} + Q_{Z,hw} + Q_{Kol} + Q_{Erd,AUL}}{\sum E_{Haustechnik} - \sum E_{Förd}} \quad [-] \quad \text{Gl. 2-7}$$

$Q_{WP,hw}$	von der Wärmepumpe abgegebene Wärme	[MJ]
$Q_{Z,hw}$	Wärmeproduktion der Zusatzheizung (Heizstäbe, Durchlauferhitzer)	[MJ]
$Q_{AUX,hw}$	Wärmeabgabe der Hilfsbetriebe der Wärmepumpe (Sondenpumpe, Carterheizung, Wärmeproduktion durch Druckabfall in Verdampfer / Kondensator)	[MJ]
Q_{Kol}	Solarwärme von Sonnenkollektor	[MJ]
$Q_{Erd,AUL}$	Zulufterwärmung mit Erdwärme (z.B. Erdregister)	[MJ]
$E_{Haustechnik}$	Gesamter Strombedarf für Wärmeerzeugung	[MJ]
$E_{Förd}$	Strombedarf für Heizungs-Umwälzpumpen und Ventilatoren (ohne Anteil für Überwindung Druckverlust in Verdampfer / Kondensator und ohne Speicherladepumpe)	[MJ]

Mit der Nummerierung von Abb. 2-7 kann der WNG wie folgt angenähert werden, wobei gilt, dass $Q_{Z,hw}$ ungefähr gleich $E_{Z,h} + E_{Z,w}$ ist:

$$WNG_{hw} = \frac{21 + 3 + 5 + 28 + 23}{1 + 2 + 3 + 5} \quad \text{Gl. 2-8}$$

Legende

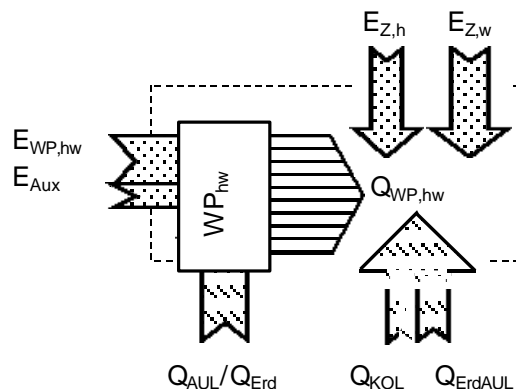
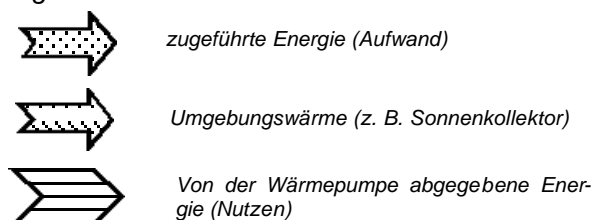


Abb. 2-12: Energieflüsse zur Berechnung des WNG (vereinfacht).

$E_{WP,hw}$	Strombedarf der Wärmepumpe (Kompressor)	[MJ]
$E_{Z,hw}$	Strombedarf der Zusatzheizung (Heizstäbe, Durchlauferhitzer für Warmwasser und Heizung)	[MJ]
E_{AUX}	Strombedarf der Hilfsbetriebe der Wärmepumpe (Sondenpumpe, Carterheizung, Wärmeproduktion durch Druckabfall in Verdampfer / Kondensator)	[MJ]
Q_{AUL}/Q_{Erd}	Wärmequelle der Wärmepumpe (z.B. Aussenluft oder Erdwärme), wird für WNG nicht berücksichtigt!	[MJ]
$Q_{WP,hw}$	von der Wärmepumpe abgegebene Wärme	[MJ]
Q_{Kol}	Solarwärme von Sonnenkollektor	[MJ]
$Q_{Erd,AUL}$	Zulufterwärmung mit Erdwärme (z.B. Erdregister)	[MJ]

Elektro-Thermo-Verstärkung (ETV)

Der ETV dient der Beurteilung von Anlagen, bei denen durch Einsatz von elektrischer Energie Wärme gewonnen wird (wie beispielsweise bei Wärmerückgewinnungsanlagen). Die gewonnene Wärmeenergie wird der dafür aufzuwendenden elektrischen Energie gegenübergestellt [Gabathuler 93]:

$$ETV = \frac{Q}{E_{el}} \quad \text{Gl. 2-9}$$

Q	gewonnene Wärme	[MJ]
E_{el}	dafür aufgewendete elektrische Energie	[MJ]

Systemnutzungsgrad (SNG)

Der Systemnutzungsgrad SNG ermöglicht die energetische Beurteilung des gesamten Haustechniksystems (Wärmeerzeugung, Wärmeverteilung, Lüftung). Der SNG eignet sich für den Vergleich von unterschiedlichen Systemkonzepten bei einer vorgegebenen Luftwechselrate und einem Norm-Warmwasserverbrauch. Beim SNG wird die Wärmerückgewinnung (WRG) zur Haustechnik gezählt, da bei vielen Kombigeräten die WRG fest in das Wärmeerzeugungsmodul integriert ist. Deshalb wird der Wärmebedarf (im Gegensatz zur Norm SIA380/1) ohne Berücksichtigung der WRG mit dem wirklichen Luftwechsel bestimmt. Dies hat zur Folge, dass bei einer guten WRG der SNG grösser sein kann als der WNG. Somit lassen sich aber auch Lüftungssysteme mit und ohne WRG vergleichen.

Bei Systemvergleichen mit dem SNG haben Systeme mit dem grössten SNG immer den geringsten Strombedarf. Bei Aussagen über die Grösse der Stromeinsparung muss aber die Rückkopplung beim Heizenergiebedarf beachtet werden, da ein grösserer SNG auch zu einer kleineren Ausnützung der freien Wärme führen kann.

Der Systemnutzungsgrad wird für Heizung und Warmwasser kombiniert (SNG_{hw}) berechnet. Bei vollständig getrennten Kreisläufen kann der Systemnutzungsgrad für Heizung und Warmwasser separat bestimmt werden (SNG_h , SNG_w).

Der kombinierte Systemnutzungsgrad SNG_{hw} wird nach Gl. 2-10 berechnet:

$$SNG_{hw} = \frac{Q_w + Q_h + Q_{WRG}}{\sum E_{Haustechnik}} \quad [-] \quad \text{Gl. 2-10}$$

Mit der Nummerierung von Abb. 2-7 kann der SNG_{hw} wie folgt berechnet werden:

$$SNG_{hw} = \frac{18 + 22 + 9}{1 + 2 + 3 + 4 + 5} \quad \text{Gl. 2-11}$$

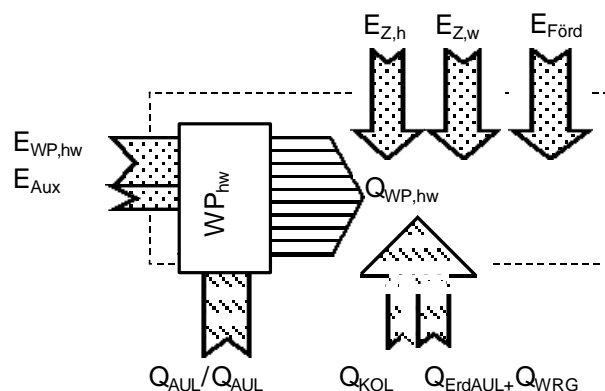


Abb. 2-13: Energieflüsse zur Berechnung des SNG (vereinfacht, ohne Verluste!).

$E_{WP,hw}$	Strombedarf der Wärmepumpe (Kompressor)	[MJ]
$E_{Z,hw}$	Strombedarf der Zusatzheizung (Heizstäbe, Durchlauf-erhitzer)	[MJ]
E_{Aux}	Strombedarf der Hilfsbetriebe der Wärmepumpe (Sondenpumpe, Carterheizung, Wärmeproduktion durch Druckabfall in Verdampfer / Kondensator)	[MJ]
$Q_{WP,hw}$	von der Wärmepumpe abgegebene Wärme	[MJ]
Q_{AUL}/Q_{Erd}	Wärmequelle der Wärmepumpe (z.B. Aussenluft oder Erdwärme), wird für SNG nicht berücksichtigt!	[MJ]
Q_{Kol}	Solarwärme von Sonnenkollektor	[MJ]
Q_{WRG}	Wärmerückgewinnung bei mech. Lüftung	[MJ]
$Q_{Erd,AUL}$	Zulufterwärmung mit Erdwärme (z.B. Erdregister)	[MJ]

SNG nur bei Heizung

Der Systemnutzungsgrad Heizen SNG_h wird nach Gl. 2-12 berechnet:

$$SNG_h = \frac{Q_h + Q_{WRG}}{\sum E_{Haustechnik} - \sum E_{Warmwasser}} \quad \text{Gl. 2-12}$$

Mit der Nummerierung von Abb. 2-7 kann der SNG_h wie folgt berechnet werden:

$$SNG_h = \frac{22 + 9}{1h + 2h + 3 + 4} \quad \text{Gl. 2-13}$$

SNG nur bei Warmwasser

Der Systemnutzungsgrad Warmwasser SNG_w wird nach Gl. 2-14 berechnet:

$$SNG_w = \frac{Q_w}{\sum E_{Warmwasser}} \quad \text{Gl. 2-14}$$

Mit der Nummerierung von Abb. 2-7 kann der SNG_w wie folgt berechnet werden:

$$SNG_w = \frac{18}{1w + 2w + 5} \quad \text{Gl. 2-15}$$

2.3 Ökonomie

2.3.1 Kostensituation 1999

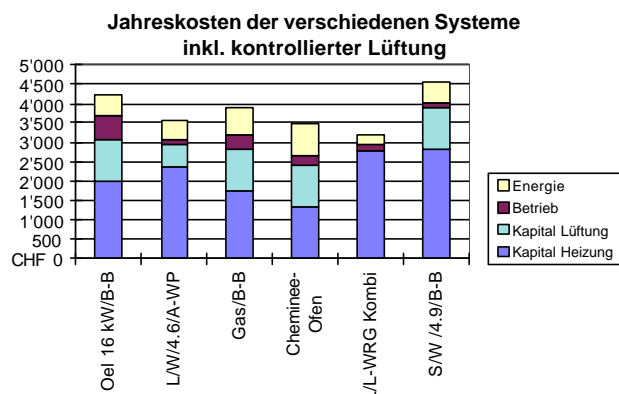


Abb. 2-14: Kostenvergleich mit kontrollierter Lüftung.

Die Kostensituation 1999 ist geprägt durch einen Markt, der noch kleine Stückzahlen aufweist und in dem es nur wenige Spezialisten gibt, die schon genügend Erfahrung mit solchen Systemen haben. Dies wirkt sich auch auf die Preise der Komponenten und der Installationen aus, die Sicherheitszuschläge enthalten. Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurden die folgenden drei Varianten realisiert und kostenmässig genau erfasst:

- Luft/Wasser-Wärmepumpe (L/W/4.6/A-WP) mit Niedrigtemperatur-Bodenheizung 30/25 °C in Kombination mit einem Abluft-WP-Boiler und Zuluft über Mauerventile.
- Sole/Wasser-Wärmepumpe (S/W/4.9/B-B) mit Niedrigtemperatur-Bodenheizung 30/25 °C in Kombination mit einem Warmwasser-Beistellboiler und periodischer mechanischer Lüftung im WC sowie eine Einzelraumlüftung mit WRG im Wohnzimmer.
- Luft/Luft-Wärmepumpen-Kompaktgerät (L/L-WRG Kombi) mit Ansaugung über ein Erdregister und Wärmerückgewinnung für die Zuluft- und die Wassererwärmung.

Die Jahreskosten der verschiedenen Systeme ergeben sich aus den drei Anteilen für Energie, Betrieb/Unterhalt und Kapital. In der Praxis wird oft verglichen mit den konventionellen Heizsystemen Öl- und Gaskessel mit Bodenheizung 45/35 °C und mechanischer Abluft im WC. Das Resultat zeigt Abb. 2-14. Dieser Vergleich ist realistisch aber nicht richtig, da bezüglich Luftqualität die Systeme mit definierter und kontrollierter Zuluft/Abluft-Führung wesentlich besser sind (CO_2 -Konzentration < 1000 ppm). Das beste Kosten/Nutzen-Verhältnis weist das Luft/Luft-Wärmepumpensystem auf, da die hydraulische Wärmeverteilung entfällt. Das System ist allerdings nur für Gebäude mit einem Wärmeleistungsbedarf < 20 W/m² EBF geeignet. Die bauseitigen Kosten für die Dämmung nach Passivhausstandard sind darin nicht enthalten.

Rüstet man die konventionellen Heizsysteme und die Sole/Wasser-Wärmepumpe mit einer Zuluft-/Abluft-Wärmerückgewinnung nach, so erhöhen sich die Kosten wesentlich und die konventionellen Systeme verlieren ihren Investitionskosten-Vorteil. Natürlich verteuert sich auch die Sole/Wasser-Wärmepumpen-Variante im gleichen Mass.

Die detaillierten Kostenangaben zu den drei realisierten Varianten sind aus den Kapiteln 4.2 - 4.4 ersichtlich.

2.3.2 Kostensituation von morgen

Die Anlagekosten für die Wärmepumpen-Varianten dürften aus folgenden Gründen sinken:

- Steigende Stückzahlen und Konkurrenz unter den Geräte-Lieferanten (Gerätepreis: -10 %)
- Reduktion der Sicherheitszuschläge bei der Wärmeverteilung (Verlegeabstand und Berücksichtigung der thermischen Effekte im Gebäude) (Wärmeverteilung: -10 %)
- Kleinerer Planungs- und Installationsaufwand infolge besserer Vertrautheit mit solchen Anlagen
- Standardisierung der Anlagentypen im Neubau und direkte Einplanung der Luftkanäle bei der Haus-Vorfabrikation (Holzbauweise)
- Reduktion der Strompreise infolge der Marktliberalisierung.

Insgesamt darf eine Reduktion von 2000 – 3000 Franken bei den Anlagekosten erwartet werden, die bei den konventionellen Systemen nur zum Teil wirksam wird (bei der Lüftungsanlage).

Wesentlich wichtiger sind jedoch die Vorteile der Wärmepumpen-Systeme hinsichtlich Werterhaltung des Gebäudes. Die Umweltfreundlichkeit der Heizung dürfte in Zukunft ein entscheidendes Verkaufsargument darstellen. Die Weichen dafür müssen jetzt beim Neubau gestellt werden.

2.3.3 Ökonomie des Passivhauses

Neben dem ökologischen Ansatz der Energieeinsparung ist die Motivation zum Errichten von Passivhäusern bei vielen Bauträgern und Bauherren eine ökonomische. Passivhäuser bieten mehrere Ansatzpunkte für besonders kostengünstiges Bauen. Der Zusammenhang ergibt sich aus folgender Betrachtung, die auch in Abb. 2-15 dargestellt ist:

Bei sinkendem Heizwärmebedarf (auf der horizontalen Achse nach links) sinken die Energiebezugskosten weitgehend linear. Um dies zu erreichen, sind jedoch Massnahmen erforderlich, deren Kosten überproportional ansteigen. Die (anteilige) Addition der beiden Kostenarten ergibt eine Kostenfunktion, die im Bereich des Niedrigenergiehauses ihr Minimum findet.

Eine wärmetechnische Verbesserung rechnet sich bei den gegenwärtigen Energiepreisen nicht über den eingesparten Energiebezug. Beim Standard des Passivhauses wird jedoch eine neue Qualität erreicht, da für die thermische Behaglichkeit kein separates Heizwärmeverteilsystem mehr benötigt wird. Die Einsparung dieser Investitionskosten kann einen Teil der zusätzlichen Kosten der verbesserten Gebäudehülle ausgleichen. Zusammen mit den gesenkten Energiebezugskosten (Heizkosten von 200 bis 300 SFr/a) kann damit ein Kostenniveau erreicht werden, welches dem von Niedrigenergiehäusern entspricht.

Eine Vergleichsrechnung von Feist [Feist 00] ergab für das realisierte Niedrigenergiehaus Schrecksbach Mehrkosten von 11'000,- DM, wenn es als Passivhaus errichtet worden wäre.

In der Siedlung Lummerlund in Wiesbaden wurden vom Bauträger Rasch&Partner eine Hälfte der Reihenhäuser als gute Niedrigenergiehäuser und 22 Reihenhäuser als Passivhäuser errichtet. Die Passivhäuser hatten Mehrkosten von 15'000,- DM. Der Bauträger will demnächst in elementierter Bauweise Passivhäuser für 1500 DM/m² (reine Bau-

kosten) bauen und peilt ein Kostenniveau von 1000 DM/m² an.

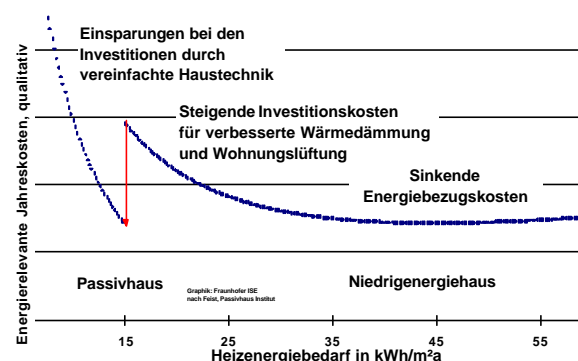


Abb. 2-15: Ökonomischer Ansatz für den Passivhaus-Standard.

Zur Zeit werden einige weitere Einsparungen beim Bau von Passivhäusern umgesetzt: Elementiertes Bauen mit vorgefertigten Bauteilen hoher Qualität, Serienproduktion von neuen Komponenten wie Fenstern mit wärmegeprägten Rahmen und Dreifach-Wärmeschutzverglasung, neue Lüftungs-Kompaktgeräte, Dämmmaterial mit grossen Wandstärken etc. Zusammen mit einigen privatwirtschaftlichen und zunehmend auch staatlichen Fördermassnahmen führt dies zu einer bemerkenswerten Dynamik bei der Verbreitung von Passivhäusern anfangs in Deutschland und in Vorarlberg, aber zunehmend auch in der Schweiz.

Im Juni 2000 waren in Deutschland 500 Passivhauseinheiten bezogen, nachdem es ein Jahr vorher erst 150 waren. Zum Jahreswechsel sind es voraussichtlich 1000 bewohnte Einheiten [PHI 00]. Eine Studie im Auftrag des Fraunhofer ISE [Witt 99] prognostiziert einen Anteil von 5% bis 10 % des Neubauvolumens im Passivhausstandard im Jahr 2005, was in Summe bis zu 50'000 Einheiten entspricht.

2.4 Ökologie

2.4.1 Ziele einer ökologischen Beurteilung

Die Umweltbelastungen, die aus menschlichen Tätigkeiten stammen, nehmen seit Beginn des 19. Jahrhunderts immer grössere Dimensionen an. In Abb. 2-16 sind die Zusammenhänge zwischen den ursprünglichen Emissionen und Ressourcenentnahmen, den Umweltwirkungen und den resultierenden Umwelteffekten dargestellt.

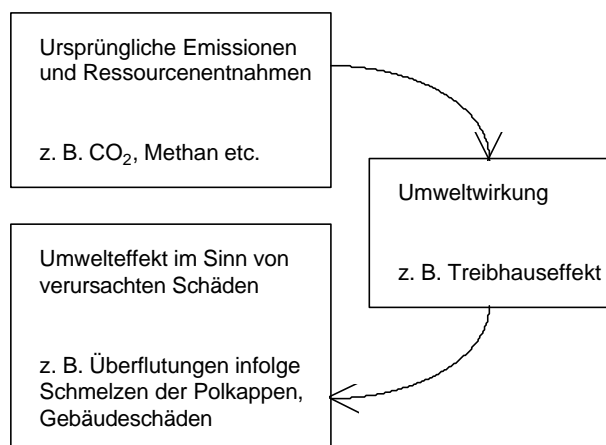


Abb. 2-16: Zusammenhang zwischen ursprünglichen Emissionen und Ressourcenentnahmen, Umweltwirkungen und resultierenden Schäden (nach [Koch 98]).

Wirtschaftliche und private Tätigkeiten führen zu Emissionen, die - alleine oder in Kombination mit anderen Schadstoffen - eine Umweltwirkung verursachen. Erst diese Umweltwirkungen führen zu den eigentlichen Umweltschäden.

Ein Bauwerk zu erstellen bedeutet in jedem Fall eine Umweltbelastung. Im Hochbau werden in der Schweiz jährlich rund 20 Millionen Tonnen Material eingesetzt. Durch die Auswahl dieser Materialien werden der Ressourcenverbrauch und die Umweltbelastung bereits festgelegt [Steiger 95]. Abb. 2-17 gibt einen Überblick über die wichtigsten Umweltwirkungen von Bauten.

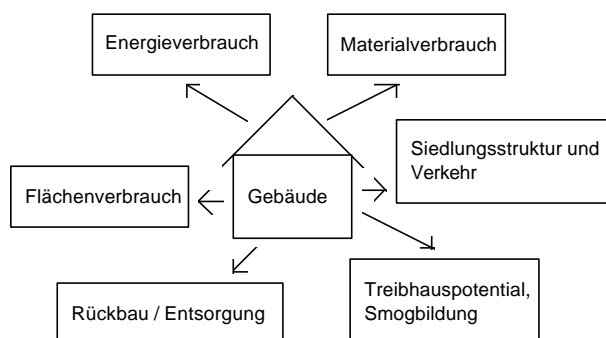


Abb. 2-17: Überblick über die wichtigsten Umweltwirkungen von Bauten (nach [Koch 98]).

Mit Hilfe einer ökologischen Beurteilung soll der gesamte Lebenszyklus eines Gebäudes hinsichtlich seiner Umweltbelastungen und -wirkungen quantitativ erfasst werden. D. h. man möchte abschätzen können, wie umweltverträglich ein Gebäude gesamthaft gesehen ist. Werden ökologische Beurteilungen bereits in frühen Planungsphasen durchgeführt, können auf diese Weise optimale Komponenten (aus einer Auswahl von verschiedenen beurteilten Materialien, Heizsystemen, Standorten etc.) bezüglich Umweltverträglichkeit herausgefunden und in der Folge ausgewählt werden.

Eine gewissenhaft durchgeführte ökologische Beurteilung ist also ein sehr komplexes Gebilde, das nicht nur die grösstmögliche Energieeinsparung während des Betriebes im Gebäude betrachtet. Im weiteren müssen auch die zur Herstellung des Gebäudes benötigten Baustoffe, Energieaufwendungen (graue Energie), Transportwege, der Standort, resp. Anschluss an öffentliche Verkehrsmittel, die Lebensdauer und die Rückbaumöglichkeiten der verwendeten Materialien berücksichtigt werden. So ist es beispielsweise ökologisch gesehen nicht von vornherein eindeutig, dass ein mit ökologischen Bauteilen/Materialien gebautes Niedrigenergiehaus in einer ökologischen Beurteilung als umweltverträglich eingestuft wird. In der Beurteilung müssen auch Aspekte betrachtet werden wie: 'Ist es möglich, mit öffentlichen Verkehrsmitteln zur Arbeit zu fahren oder die Einkäufe zu erledigen? Ist dazu die Benützung von einem oder gar zwei Personenwagen unumgänglich? Welche Infrastruktur ist für die Erschliessung/Entsorgung an einer solchen Lage im Grünen ausserhalb des eigentlichen Dorfes notwendig?' Um eine ökologische Beurteilung abgeben zu können, müssen also die verschiedenen Umweltwirkungen gesamthaft und nicht einzeln für sich betrachtet werden.

2.4.2 Methodik einer ökologischen Beurteilung

Für die Durchführung einer ökologischen Beurteilung im Planungs- und Bauprozess existieren verschiedene Instrumente, die mehr oder weniger komplex sind. Viele dieser Instrumente berücksichtigen jedoch einen relativ eng abgesteckten Anwendungsbereich und sind für eine ganzheitliche Betrachtung nicht oder nur bedingt geeignet. Die SIA-Dokumentation D 0152 [Koch 98] stellt dazu einen Vergleich von 15 Instrumenten für ökologisches Bauen an.

In der Regel geht eine ökologische Beurteilung von einer Ökobilanz aus, deren verschiedene Stufen in Abb. 2-18 dargestellt sind und im Folgenden etwas näher erklärt werden.

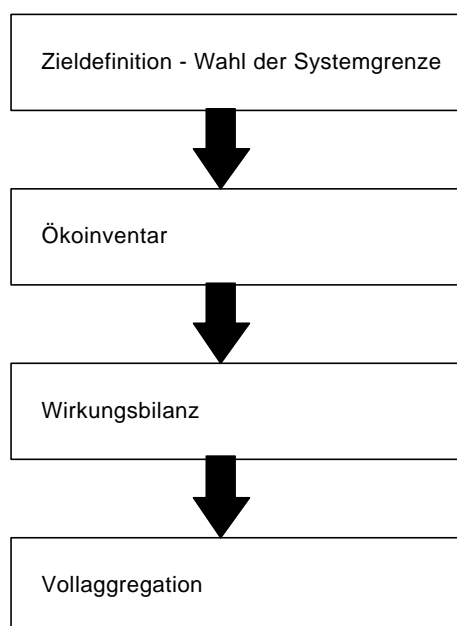


Abb. 2-18: Vorgehensschritte für Ökobilanzen.

Zieldefinition

Der erste und gleichzeitig sehr bedeutende Vorgehensschritt einer Ökobilanz umfasst die Definition des Ziels und legt auf diese Weise die Systemgrenzen fest. Je nachdem wie das Ziel festgelegt wird, ändern sich die Systemgrenzen und die verschiedenen Prozesse werden im weiteren Verlauf der Ökobilanz berücksichtigt oder ausgeschlossen. Die Auswahl der Prozesse hat einen starken Einfluss auf das Ergebnis der abgeschlossenen Ökobilanz und der Anwender sollte sich beim Betrachten der Ergebnisse dieser Systemgrenze immer bewusst sein!

Ökoinventar

Nachdem die Zieldefinition und somit die Systemgrenzen festgelegt sind, wird ein Ökoinventar (auch Sachbilanz genannt) durchgeführt. Konkret werden entlang des Lebenszyklus des Untersuchungsgegenstandes alle Inputflüsse von der und alle Outputflüsse in die Umwelt separat erfasst. Die Inputflüsse bestehen meistens aus Ressourcen, währenddem die Outputflüsse oft aus Emissionen bestehen. Die Lebensdauern der eingesetzten Materialien üben einen wesentlichen Einfluss auf die Bilanz aus, indem sie z. B. die benötigten Mengen bestimmen. Tab. 2-4 stellt beispielhaft ein Ökoinventar einer Wärmepumpe dar. Die verschiedenen Prozesse wurden teilweise zusammengefasst. So beinhaltet beispielsweise die graue Energie den Diesel in der Baumaschine, das Erdgas in der Industrieheizung, das benötigte Heizöl und den Strom. Im Prozess Transport wird der Verkehr von 16 t und 28 t-LKW's, Lieferwagen und Bahn berücksichtigt.

Infrastruktur S/W-Wärmepumpe pro Betriebsjahr		bilanzierte Mengen
Datenmodule aus [ESU 96], zusammengefasst		
Zink für Verzinkung	kg	0.00333
PE (HD)	kg	3.17
Stahl unlegiert + niedriglegiert	kg	4.85
Kupfer	kg	0.5
PET 0 % Rec.	kg	0.056
Kältemittel R134a	kg	0.0453
PVC schlagfest	kg	0.0133
Transport	tkm	35.793
Graue Energie	MJ	317.37
PE und PVC in KVA	kg	0.1463
Zement PC-CH	kg	0.55
R 407c FKW p	kg	0.0453

Tab. 2-4: Ökoinventar (Bilanzierte Materialien und Prozesse) für die Infrastruktur einer S/W-Wärmepumpe (CTA Opti-heat 17 sc) pro Jahr (angepasst aus [Afjei 98b]).

Wirkungsbilanz

Nachdem die Art und Menge der verschiedenen Schadstoffe mit Hilfe des Ökoinventars bekannt sind, müssen die Wirkungen der Schadstoffe auf die Umwelt ermittelt werden. Durch eine Klassifizierung werden die Schadstoffe verschiedenen Umweltwirkungen zugewiesen. Welche Umweltwirkungen berücksichtigt werden, ist abhängig vom angewendeten Instrument, in Frage kommen beispielsweise Treibhauseffekt, Versauerung, Ozonabbau, Überdüngung, Smogbildung, Umwelttoxikologie und Humantoxikologie. Das Resultat einer Wirkungsbilanz besteht demnach aus errechneten Mengen von Emissionen, die zu einer bestimmten Umweltwirkung beitragen. Häufig werden diese Mengen in Äquivalenten (abgekürzt eq.) zu einer typischen Substanz einer Umweltwirkung angegeben, beispielsweise wird eine Menge an FCKW in kg CO₂ eq. umgerechnet.

Vollaggregation

Im letzten Schritt einer Ökobilanz werden die verschiedenen Umweltwirkungen hinsichtlich ihrer Schädlichkeit bewertet. Das heißt, dass Aussagen gemacht werden müssen im Sinn von: 'Die Umweltwirkung A ist ein Vielfaches schädlicher als Umweltwirkung B, folglich sind die Emissionen, die die Umweltwirkung A verursachen als viel gefährlicher einzustufen als die Emissionen, die zu B führen.' Die Bewertung der Umweltwirkungen ist die unsicherste Stufe einer Ökobilanz, wie die folgende Abb. 2-19 zeigt, und daher in der ISO 14040 nicht vorgesehen. Bei dieser vereinfachten Darstellung lässt sich der Zusammenhang zwischen den möglichen Betrachtungsweisen von Umwelteinwirkungen erkennen. Die Messung und Gewichtung der Umwelteinwirkungen basieren auf naturwissenschaftlich-technisch abgesicherten Erkenntnissen und Methoden, der Bewertungsschritt dagegen ist ein politischer, normativer Prozess, der national unterschiedlich vorgenommen werden kann.

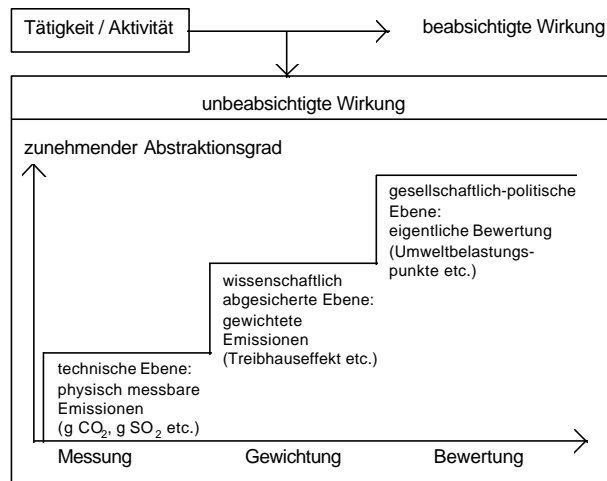


Abb. 2-19: Zusammenhang zwischen möglichen Betrachtungsweisen von Umwelteinwirkungen (nach [Koch 98]).

Vergleichbarkeit

Damit verschiedene Prozesse in einer Ökobilanz miteinander verglichen werden können, müssen sie einen vergleichbaren Nutzen erbringen, der "funktionale Einheit" genannt wird. Sollen beispielsweise verschiedene Heizsysteme miteinander verglichen werden, so kann dieser Nutzen aus der abgegebenen Nutzwärme bestehen. Werden verschiedene Baukonstruktionen miteinander verglichen, kann die funktionale Einheit aus 1 m² Baukonstruktion bei vergleichbaren Leistungen bezüglich Wärme und Schall bestehen.

Die Vergleichbarkeit von Ökobilanzen und somit von ökologischen Beurteilungen zwischen verschiedenen Projekten ist in der Regel nicht gegeben. Zu viele Faktoren - von der Wahl der Systemgrenze über die funktionale Einheit bis hin zu den konkreten Prozessen, die berücksichtigt oder weggelassen werden - verhindern einen seriösen Vergleich.

Im Anhang 5.1 wird ein Fallbeispiel der ökologischen Situation von heute beschrieben. Im Anhang 5.2 wird auf den Einfluss des Strommixes eingegangen.

2.5 Gebäudeoptimierung

Für die nachfolgenden Betrachtungen soll ein typisches Serien-Reiheneinfamilienhaus in Niedrigenergiebauweise untersucht werden, das in der Schweiz mit grossem Markterfolg bereits vielfach gebaut ist. An diesem Leichtbau-Haus sollen die Auswirkungen von verschiedenen Optimierungsmassnahmen diskutiert werden. Eine ausführliche Beschreibung und Diskussion kann in [Afjei 98a] nachgelesen werden.

Beschreibung des untersuchten Gebäudes (Grundvariante):

3-geschossiges, nach Süden ausgerichtetes Reihen-Einfamilienhaus (Eckhaus).

- Erdgeschoss: Wohnen und Küche
- Obergeschoss: Südzimmer und Bad
- Dachgeschoss: Zimmer, Ausrichtung Ost und Süd

U-Werte in $W/(m^2 \cdot K)$ in Klammern die Dämmdicke in [cm] für (Leichtbau in Ständerbauweise / Massivbau)

- Aussenwand $U = 0.29 W/(m^2 \cdot K)$ (16/12)
- Dach $U = 0.22 W/(m^2 \cdot K)$ (20/20)
- Boden EG $U = 0.25 W/(m^2 \cdot K)$ (12/12)
- Fenster $U = 1.1 W/(m^2 \cdot K)$

2.5.1 Optimale Fenstergrösse

Der optimale, transparente Fensteranteil der Südfassade wird nach SIA D010 [Zimmermann 86] mit ca. 20 % der Grundfläche der dahinterliegenden Räume angegeben. Eine etwas feinere Abschätzung lässt sich mit Abb. 2-20 durchführen.

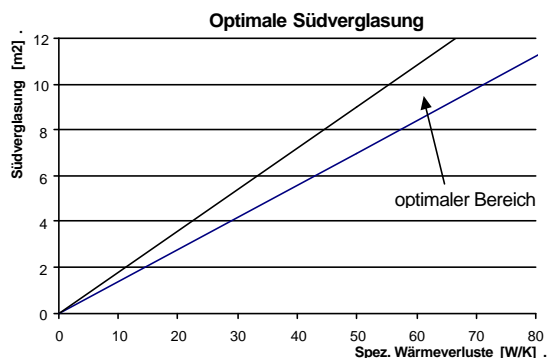


Abb. 2-20: Optimale Fenstergrösse für Massivbauten [Zimmermann 86].

In einem ersten Optimierungsschritt sollen nun die Fensterflächen auf der Südseite als 1. Variante massiv vergrössert (Stand 1, Abb. 2-22) und als 2. Variante entsprechend der Empfehlung von SIA D010 gestaltet werden (Stand 2, Abb. 2-23).

Eine Systemsimulation mit TRNSYS zeigt, dass durch die Vergrösserung der Süd-Fensterfläche 7 % Heizenergie gespart werden kann. Die beiden Varianten Stand 1 und Stand 2 unterscheiden sich dabei bezüglich des Energiebedarfs nicht mehr, weil wegen der längeren Abschattung (Storen) die Gewinne nicht mehr genutzt werden. Eine Fenstervergrösserung über den optimalen Bereich hinaus hat also energetisch gesehen keinen Nutzen.

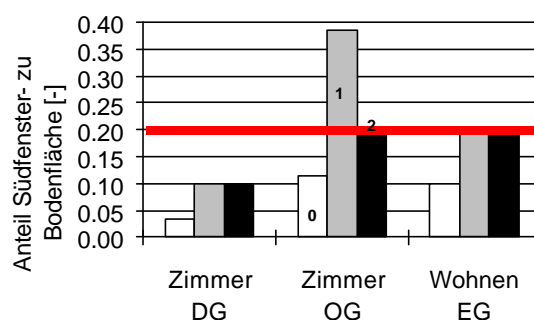


Abb. 2-21: Südverglasungsanteil in Grundvariante (0), Maximalvariante (1) und Optimalvariante (2).

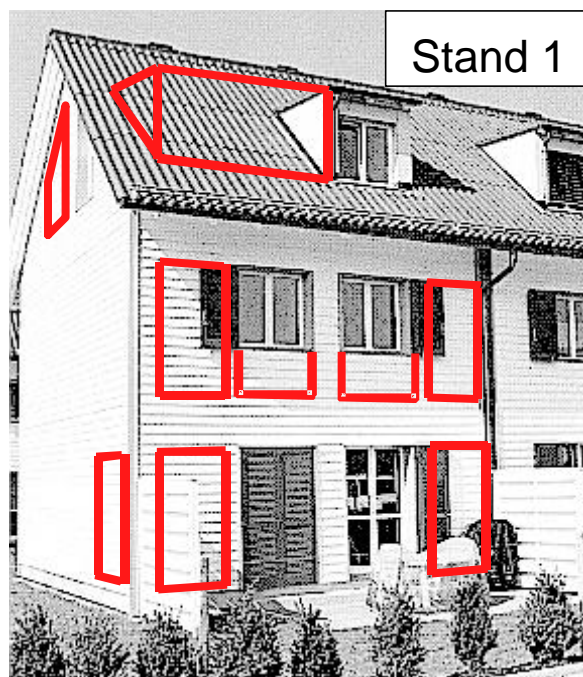


Abb. 2-22: Variante Stand 1 mit maximaler Fenstergrösse.

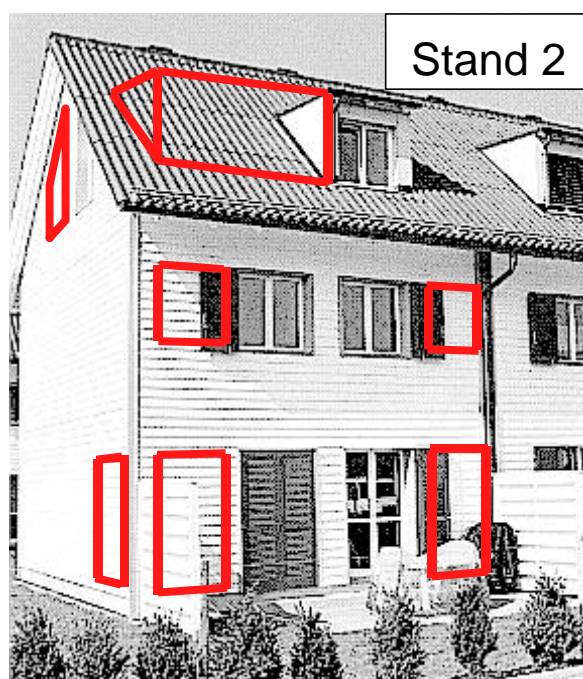


Abb. 2-23: Variante Stand 2 mit optimaler Fenstergrösse.

2.5.2 Optimierung der Wärmedämmung

Als nächster, zusätzlicher Optimierungsschritt soll die Wärmedämmung erhöht werden (Variante 3). Dabei werden die folgenden Dämmstärken verwendet:

U-Werte in $[\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})]$ in Klammern die Dämmdicke in $[\text{cm}]$ für (Leicht- / Massivbau) bei der Variante 3:		
• Aussenwand	$U = 0.20 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	(24/18)
• Dach	$U = 0.15 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	(30/30)
• Boden EG	$U = 0.20 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	(16/16)
• Fenster	$U = 1.1 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	

Mit dieser Massnahme kann der Energiebedarf um weitere 18.5 % gesenkt werden.

2.5.3 Leichtbau oder Massivbau?

Für die oben beschriebenen drei Varianten soll nun als nächster Schritt der Einfluss der Gebäudemasse untersucht werden. Zunächst soll einmal nur der Energiebedarf betrachtet werden.

Bei der Grundvariante wird durch eine Erhöhung der Gebäudemasse keine Energie eingespart. Anders sieht die Situation bei einem erhöhten Süd-Fensteranteil und der stärkeren Wärmedämmung aus. In allen drei Varianten kann durch eine Erhöhung der relevanten Gebäudemasse der Heizenergiebedarf um weitere 13 % gesenkt werden.

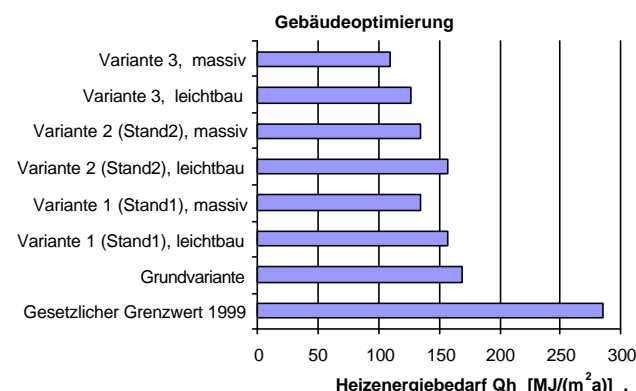


Abb. 2-24: Energetische Bilanz der Optimierungsmassnahmen.

Thermische Behaglichkeit

Ein Gebäude ist nicht nur bezüglich des Energiebedarfs, sondern auch bezüglich der thermischen Behaglichkeit zu optimieren. Wie gezeigt wurde, hat ein zu grosser Südfensteranteil keine energetischen Nachteile im Winter, die damit verbundene, zeitweise Überwärmung in den Räumen führt aber manchmal zu unbehaglichen Temperaturen im Sommer, so dass der Anteil unzufriedener Personen (PPD-Wert) damit steigt. In Abb. 2-25 werden die oben beschriebenen Varianten bezüglich der Bewohnerzufriedenheit quantifiziert. Zu beachten bei diesem Vergleich ist, dass hier von einem idealen Benutzerverhalten ausgegangen wird, bei dem die Beschattungseinrichtung richtig bedient ist, so wie dies in der Praxis kaum je der Fall sein wird.

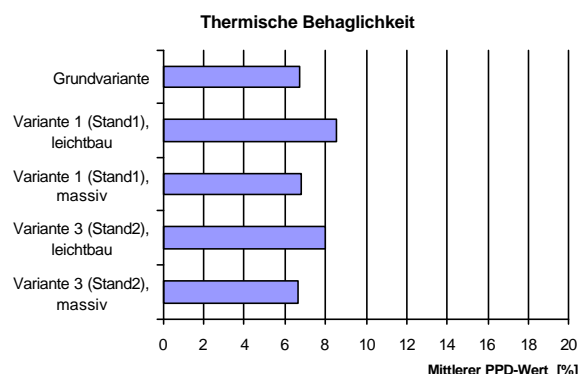


Abb. 2-25: Anteil Unzufriedener (PPD-Index) der Varianten.

Die Erhöhung der Anzahl unzufriedener Bewohner kann mit der stärkeren Temperaturschwankung erklärt werden. Abb. 2-26 zeigt, dass beim Leichtbau die Temperaturen bei sonst gleichen Randbedingungen stärker streuen als beim Massivbau. Die aufgezeigte Tendenz verstärkt sich bei grösserem Fensterflächenanteil noch.

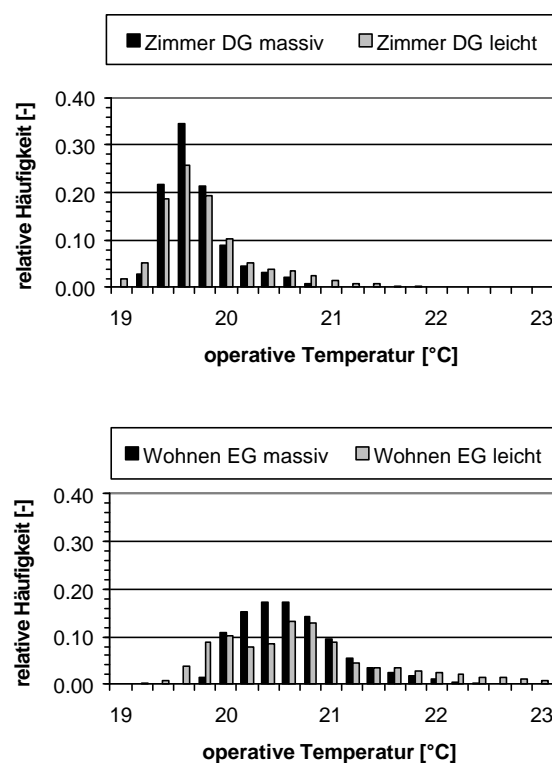


Abb. 2-26: Streuung der operativen Temperatur beim Leicht- und Massivbau [Afjei 96].

2.5.4 Dynamisches Gebäudeverhalten

Eine systematische Optimierung des Gebäudes ist mit der Klimaflächenmethode von [Keller 00b] möglich. Die physikalischen Kennwerte sind die Zeitkonstante τ und das Wärme-Gewinn-Verlust-Verhältnis γ , die im Folgenden kurz vorgestellt werden.

Zeitkonstante

Die Zeitkonstante τ beschreibt die thermische Trägheit eines Gebäudes oder eines Raumes. Nach [SIA380/1] ist τ :

$$\tau = \frac{C}{Q_T + Q_V} (J_i - J_a) t_c \quad [h] \quad \text{Gl. 2-16}$$

C	wirksame Wärmespeicherfähigkeit	[MJ/(m ² K)]
Q _T	Transmissionsverluste	[MJ/m ²]
Q _V	Lüftungswärmeverluste	[MJ/m ²]
ϑ _i	Raumlufttemperatur	[°C]
ϑ _a	mittlere Aussenlufttemperatur	[°C]
t _c	betrachtete Zeitperiode	[Tage]

Als Wärmespeicherfähigkeit C eines Systems (z. B. Raum, Gebäude) bezeichnet man die Wärme, welche in die Bauteile gespeichert werden kann, wenn die Innentemperatur in Form einer Sinuskurve über 24 Stunden variiert und die Amplitude 1 K beträgt [SNEN832].

Die wirksame Wärmespeicherfähigkeit eines Systems hängt ab von:

- der Periodendauer
- den Materialwerten aller Bauelemente:
 - Wärmeleitfähigkeit λ
 - spezifische Wärmekapazität c_p
 - Rohdichte ρ

In [SIA380/1] werden empirische Werte für verschiedene Bauweisen angegeben:

Bauweise:	C [MJ/(m ² K)]
Sehr massive Bauweise (ohne Teppich, Doppelböden bzw. -decken)	1.0
Massive Bauweise (teilweise mit Teppichen und / oder Doppeldecken bzw. -decken)	0.5
Holzbau: Blockbauweise	0.3
Holzbau: Ständerbauweise	0.1

Tab. 2-5: Rechenwerte für wirksame Wärmespeicherfähigkeiten bei verschiedenen Baukonstruktionen [SIA380/1]. Bezugsfläche ist die EBF.

[Burmeister 95] hat gezeigt, dass für die Zeitkonstante τ nur die Innenwände und die Böden/Decken relevant sind, die Aussenwände werden für die Berechnung nicht benötigt. Ausserdem kann statisch gerechnet werden, wenn berücksichtigt wird, dass die Speicherkapazität C durch die dynamische Wärmeeindringtiefe σ gemäss Gl. 2-17 begrenzt wird [Keller 00a]:

$$d \leq \frac{\sigma}{\sqrt{2}} \quad [m] \quad \text{Gl. 2-17}$$

d	Dicke des Innenbauteils	[m]
σ	Wärmeeindringtiefe	[m]

Wobei die Wärmeeindringtiefe σ berechnet werden kann mit:

$$\sigma = \sqrt{\frac{T_p I}{\rho r c_p}} \quad [m] \quad \text{Gl. 2-18}$$

T _p	Periodendauer (für Tagesschwankungen ist T _p = 86'400 s)	[s]
λ	Wärmeleitfähigkeit des Materials	[W/(mK)]
ρ	Materialdichte	[kg/m ³]
c _p	spezifische Wärmekapazität	[J/(kgK)]

Es nützt also nichts, die Böden oder Decken eines Gebäudes beliebig dick zu machen, weil die thermisch aktivierbare Masse durch die Wärmeeindringtiefe σ begrenzt ist.

Unter den oben beschriebenen Randbedingungen kann die wirksame Wärmespeicherfähigkeit berechnet werden mit:

$$C = \frac{1}{10^6} \sum \frac{A_i}{EBF} r c_p d \quad [MJ/(m^2K)] \quad \text{Gl. 2-19}$$

C	wirksame Wärmespeicherfähigkeit	[MJ/(m ² K)]
A _i	Oberfläche der Innenbauteile (für Tagesschwankungen ist T _p = 86'400 s)	[m ²]

Da die Hauptmasse in Neubauten in der Regel im Fussboden und der Decke steckt, kann die wirksame Wärmespeicherfähigkeit in erster Näherung abgeschätzt werden mit:

$$C \approx \frac{1}{10^6} [r_B c_{pB} d_B + r_D c_{pD} d_D] \quad \text{Gl. 2-20}$$

d _B	Dicke des Bodens über der Trittschalldämmung	[m]
d _D	Dicke der Decke bis zum Dämmelement	[m]

Voraussetzung für die Gültigkeit von Gl. 2-20 sind direkt angekoppelte Bauteile ohne Hohlböden, Doppeldecken, Teppiche etc.

Beispiel: Zeitkonstanten τ in Gebäude Abb. 4-8:

Deckenaufbau:

Massivholzdecke: d_B=0.11 m, ρ_D =600 kg/m³, c_{pD} = 2200J/(kgK)
Trittschalldämmung

Zementüberzug: d_B=0.045 m, ρ_B =2000 kg/m³, c_{pB}= 1000 J/(kgK)

Wärmespeicherfähigkeit C (mit Gl. 2-20):	0.24 MJ/(m ² K)
Heizperiode t _c :	209 Tage
Transmissionsverluste Q _T :	267 MJ/m ²
Lüftungswärmeverluste Q _V :	55 MJ/m ²
Raumlufttemperatur J _i :	20 °C
Mittlere Aussenlufttemperatur Heizperiode J _a :	4 °C

Zeitkonstante nach Gl. 2-16: 60 Stunden

Wärme-Gewinn-Verlust-Verhältnis

Das Verhältnis der totalen Wärmegewinne zum Gesamtwärmeverlust wird als Wärme-Gewinn-Verlust-Verhältnis γ bezeichnet:

$$g = \frac{Q_i + Q_s}{Q_T + Q_V} \quad \text{Gl. 2-21}$$

Wärme-Gewinn-Verlust-Verhältnis [SIA380/1]

Q_T	Transmissionsverluste	[MJ/m ²]
Q_V	Lüftungswärmeverluste	[MJ/m ²]
Q_i	totale interne Wärmegewinne	[MJ/m ²]
Q_s	Solare Wärmegewinne	[MJ/m ²]

[Keller 00a] verwendet eine etwas andere Definition des Gewinn-zu-Verlustverhältnisses. Beiden gemeinsam ist die Erkenntnis, dass die Kombination von τ und γ den Ausnutzungsgrad der Wärmegewinne definieren.

Bei den Lüftungsverlusten ist ausserdem zu beachten, dass nur die thermisch wirksamen Verluste eingesetzt werden, d. h. dass die Gewinne aus der Wärmerückgewinnung bereits abgezogen sind.

Ausnutzungsgrad h_g für Wärmegewinne

Wie gut die Wärmegewinne ausgenutzt werden können, hängt von der Zeitkonstante τ und dem Wärme-Gewinn-Verlust-Verhältnis γ ab. Weiter spielt aber auch eine Rolle, wie gut die Regelung der Wärmeabgabe auf eine allfällige Überwärmung im Raum reagiert. Nach [SIA380/1] kann der Ausnutzungsfaktor h_g berechnet werden mit:

$$h_g = F_g \left(\frac{1 - g^{\left(1 + \frac{\tau}{16h}\right)}}{1 - g^{\left(2 + \frac{\tau}{16h}\right)}} \right) \quad \text{Gl. 2-22}$$

F_g	Reduktionsfaktor Regelung	[-]
τ	Zeitkonstante	[h]
γ	Wärme-Gewinn-Verlust-Verhältnis	[-]

Der Reduktionsfaktor Regelung setzt sich aus einem Faktor für die Regelungsart und einem Faktor für die Wärmeabgabeelemente zusammen.

$$F_g = F_{g1} \cdot F_{g2} \quad \text{Gl. 2-23}$$

Als Rechenwerte können die folgenden Werte eingesetzt werden:

Regelungsart:	F_{g1}
Einzelraum - Temperaturregelung	1.0
Referenzraum - Temperaturregelung	0.9
Aussentemperatur-Vorlauftemperaturregelung	0.8

Wärmeabgabeelement:	F_{g2}
Heizkörper	1.0
Fussbodenheizung mit max. 35°C Vorlauftemp.	1.0
Fussbodenheizung mit über 35°C Vorlauftemp.	0.9

In der oben beschriebenen Methode ist nur der winterliche Wärmeschutz berücksichtigt. Mit der Methode von [Burmeister 95] und [Keller 00b] kann aber auch die Gefahr der sommerlichen Überwärmung bei grossem γ und kleinem τ abgeschätzt werden. Generell steigt bei kleinem Ausnutzungsfaktor η_g die Gefahr der sommerlichen Überwärmung, wobei dabei natürlich auch die Abschattungselemente von zentraler Bedeutung sind.

In Tab. 2-6 sind Angaben zu Tagesspeichervermögen verschiedener Bauteile angegeben.

Bauteil:	Tagesspeicher Q_s [kJ/(m ² K)]
<u>Wände:</u>	
- Beton 15 cm	100
- Kalksandstein 15 cm	75
- Backstein 15 cm	60
- Gips 15 cm	45
- Gasbeton 15 cm	30
- Holzkonstruktion 15 cm (Holz 2.5 cm, Isolation / Luft 10 cm, Holz 2.5 cm)	25
- Gipskartonwand 15 cm (Gips 2.5 cm, Isolation / Luft 10 cm, Gips 2.5 cm)	20
<u>Decken:</u>	
- Betondecke 18 cm	115
- Betondecke 18 cm, mit Täfer verkleidet	65
<u>Böden:</u>	
Betondecke 18 cm mit Trittschallisolation 2 cm, Unterlagboden 6 cm und:	
- Klinker 2 cm	90
- Parkett 2 cm	70
- Teppich 1 cm	55
Dito ohne Trittschallisolation, mit:	
- Klinker 2 cm	110
- Parkett 2 cm	80
- Teppich 1 cm	65

Tab. 2-6: Tagesspeichervermögen verschiedener Bauteile pro K zugelasener Raumtemperaturerhöhung [Zimmermann 86].

Bei einer Raumtemperaturerhöhung von 20 auf 25 °C können beispielsweise 300 kJ pro m² Backsteinwand gespeichert werden. Die Berechnung erfolgte anhand eines 27 m² grossen Raumes mit 8 m² Fensterfläche für einen sonnigen Märztag. Die Werte gelten für Innen- und Aussenbauteile eines Raumes. Für besonnte Böden (Absorption 60 %) können die Werte mit folgenden Faktoren aus Tab. 2-7 multipliziert werden:

Besonnung auf Bodenfläche (Beschattung und Möbliierung berücksichtigen):	Faktor
schwach (1500 kJ/(m ² d))	2
mittel (3000 kJ/(m ² d))	3
stark (4500 kJ/(m ² d))	4

Tab. 2-7: Korrekturfaktoren für besonnte Böden [Zimmermann 86].

2.6 Optimierung der Haustechnik

Weil Niedrigenergiehäuser bezüglich ihres Heizenergiebedarfes optimiert sind, wird für die Beheizung nur noch wenig zusätzliche Heizenergie benötigt. Wegen der guten Wärmedämmung, welche Voraussetzung für ein Niedrigenergiehaus ist, sind die Oberflächentemperaturen höher als bei herkömmlichen Gebäuden. Daraus resultiert eine grössere Behaglichkeit für die Benutzer.

Ein zweites Merkmal ist die in der Regel kontrollierte, mechanische Wohnungslüftung. Die dichte Gebäudehülle wird mit kontrollierbaren Luftöffnungen versehen. Die nötige Frischluft wird in einem Lüftungsgerät mittels Wärmerückgewinnung (WRG) aus der Abluft vorgewärmt und den einzelnen Räumen zugeführt. Damit lassen sich bis zu 50 MJ/(m²a) Wärme einsparen.

Eine alternative Variante besteht in der Nutzung der Abluftwärme mittels einer Wärmepumpe. Diese Wärmepumpe erwärmt in der Regel das Warmwasser. Die Zuluft strömt beispielsweise über Mauerventile direkt in die verschiedenen Räume (ohne WRG).

Durch die optimierte Gebäudehülle sinkt der Heizwärmebedarf. Im Folgenden werden für die Wärmeabgabe nur Fussbodenheizungen und keine Radiatoren betrachtet. Einerseits müssten bei Radiatoren die Vorlauftemperaturen um 5 – 10 °C angehoben werden, andererseits wirken Fussbodenheizungen als gute Wärmespeicher. Durch den gesenkten Heizwärmebedarf kann das Wärmeabgabesystem mit tieferen Systemtemperaturen betrieben werden. Dies bringt den Vorteil des Selbstregeleffektes bei Wärmegewinnen im Raum. Bei Wärmepumpenheizungen kann durch die tiefen Systemtemperaturen von einer grösseren Leistungszahl (und damit einem besseren Wärmeenergieerzeugungsnutzungsgrad) profitiert werden.

Für die Brauchwassererwärmung wird mit Vorteil nach energetisch und finanziell günstigen Lösungen gesucht. Zum Beispiel kann das Warmwasser mit einem Abluft-Wärmepumpen-Boiler erzeugt werden. Eine andere Variante ist die Brauchwassererwärmung durch Sonnenkollektoren. Diese Technik wurde kontinuierlich weiterentwickelt. Es gibt Standardlösungen, welche zu relativ günstigen Preisen erhältlich sind und einfach auf dem Dach montiert werden können.

2.6.1 Wärmeverteilung

Im Niedrigenergiehaus entstehen folgende Vorteile für das Wärmeverteilungssystem:

- Optimierte Gebäudehülle und damit tiefer Heizwärmebedarf
- Das Wärmeabgabesystem kann mit tiefen Systemtemperaturen betrieben werden
⇒ Selbstregeleffekt
- Wärmepumpensysteme können mit hoher Leistungszahl und hohem Systemnutzungsgrad betrieben werden.

Selbstregeleffekt (analytische Betrachtung)

Unter Selbstregeleffekt eines Wärmeabgabesystems versteht man die automatische Abnahme der Heizleistung, falls dem Raum Fremdwärme zugeführt wird. Die analytische Betrachtung des Selbstregeleffektes ist in Abb. 2-27 für den heizungstechnisch relevanten Bereich aufgetragen.

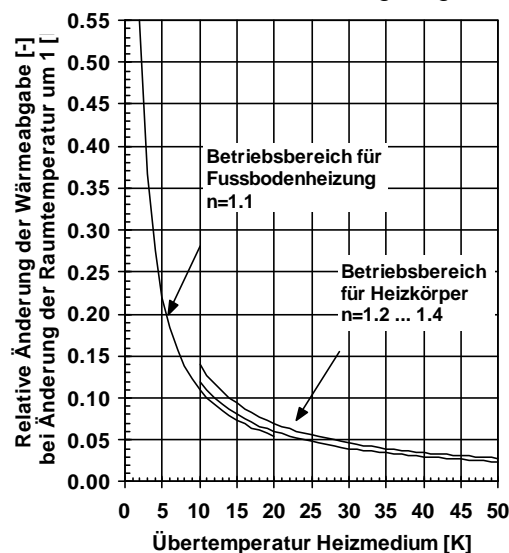


Abb. 2-27: Selbstregeleffekt von Wärmeabgabesystemen [Afjei 96].

Beispiel [Afjei 96]:

Auslegungstemperatur 30/25 °C bei 20 °C Raumtemperatur und Halblast:

Übertemperatur des Heizmediums = 3.8 K
relative Änderung der Wärmeabgabe = 30 %
(bei einer Änderung der Raumlufttemperatur von 1 K)

Auslegungstemperatur 50/40 °C bei 20 °C, bei Halblast:

Übertemperatur des Heizmediums = 12.5 K
relative Änderung der Wärmeabgabe = 10 %
(bei einer Änderung der Raumlufttemperatur von 1 K)

Die Leistung der 50/40 °C-Heizung wird also nur gerade um 1/3 im Vergleich zur 30/25 °C-Heizung reduziert.

Aus diesen Überlegungen folgt, dass die Übertemperatur nicht zu hoch gewählt werden darf, wenn der Selbstregeleffekt ausgenutzt und eine Überschwängung der Raumlufttemperatur vermieden werden soll.

Folgende Auslegungstemperaturen sollten deshalb nicht überschritten werden [Afjei 96]:

		mit 6 h Sperrzeit EW	
$\vartheta_{\text{Vorlauf}}$	= 30 [°C]	35 [°C]	
$\vartheta_{\text{Rücklauf}}$	= 25 [°C]	25 [°C]	

Druckverlust im Rohrsystem

Die tiefen Vorlauftemperaturen einer selbstregulierenden Fussbodenheizung führen in der Regel zu einer dichteren Belegung des Fussbodens mit Heizungsrohren und somit zu langen Rohrschlangen. Damit wird der Druckabfall zu einem wichtigen Thema. Als Richtgrösse sollte darauf geachtet werden, dass der Druckabfall nicht grösser als 12 kPa wird [Koschütz 00]. Bei grösseren Druckverlusten sollten mehrere Heizschleifen oder grössere Rohrdurchmesser verwendet werden.

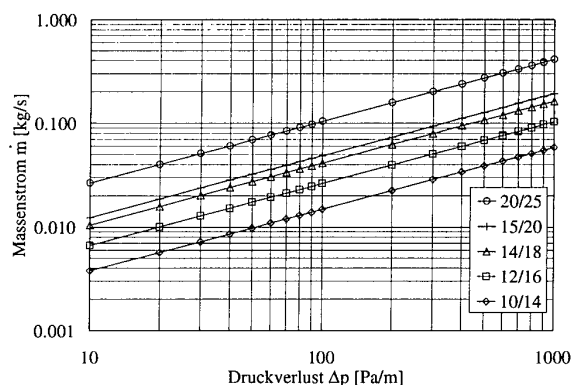


Abb. 2-28: Druckverlust-Diagramm für Wasser bei verschiedenen Rohrdurchmessern (Innen- / Aussendurchmesser) nach [Koschütz 00].

Der Druckabfall kann zum Beispiel aus Abb. 2-28 herausgelesen werden. Dazu muss zunächst der Massenstrom \dot{m} aus dem raumweisen Heizleistungsbedarf \dot{Q}_h berechnet werden:

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_h}{n \cdot c_{p,w} (T_{VL} - T_{RL})} \quad [\text{kg/s}] \quad \text{Gl. 2-24}$$

\dot{Q}_h	raumweiser Heizleistungsbedarf nach SIA 384/2	[W]
n	Anzahl Heizschleifen pro Raum	[-]
$c_{p,w}$	spezifische Wärmekapazität Wasser; = 4200	[J/kgK]
T_{VL}	Vorlauftemperatur	[K]
T_{RL}	Rücklauftemperatur	[K]

Verlegeabstand der Fussbodenheizungsrohre

Als nächster Schritt wird sodann der notwendige, maximale Verlegeabstand d_x der Fussbodenheizungsrohre ermittelt. Je grösser die Übertemperatur ΔT_{lg} (Gl. 2-25) des Heizungswassers ist, umso grösser wird der minimale Verlegeabstand der Heizungsrohre, umso schlechter wird aber auch die Leistungszahl der Wärmepumpe:

$$\Delta T_{lg} = \frac{T_{VL} - T_{RL}}{\ln \left(\frac{T_{VL} - T_R}{T_{RL} - T_R} \right)} \quad \text{Gl. 2-25}$$

ΔT_{lg}	logarithmische Übertemperatur	[K]
T_R	Raumtemperatur	[K]
T_{VL}	Vorlauftemperatur	[K]
T_{RL}	Rücklauftemperatur	[K]

In Anhang 5.8 sind die notwendigen Verlegeabstände für verschiedene Fussbodenaufbauten zu finden.

Abb. 2-29 zeigt beispielhaft den Verlegeabstand von Heizungsrohren einer Fussbodenheizung mit einer Vorlauftemperatur von 30 °C und einer Rücklauftemperatur von 25 °C.



Abb. 2-29: Fussbodenheizungsrohre in einem EFH in Bubendorf BL mit einer 30/25 °C Fussbodenheizung. Der Verlegeabstand beträgt 5 cm [Foto: Bircher + Keller AG].

Beispiel: Maximaler Verlegeabstand der Fussbodenheizung

Vorlauftemperatur T_{VL} :	30 °C
Rücklauftemperatur T_{RL} :	26 °C
Fertigparkett:	10 mm
Raumfläche netto:	20 m ²
Heizleistungsbedarf Raum nach SIA 384/2	600 W
Wärmeabgabe:	30 W/m ²
Fussbodenheizungsrohrdurchmesser:	15 / 20 mm
Wärmedurchlasswiderstand (Anhang 5.8):	0.07 m ² K/W
Übertemperatur ΔT_{lg} (Gl. 2-25):	7.8 K

Maximaler Verlegeabstand (Anhang 5.8): 15 cm

Beim Verlegeabstand sollte man immer bedenken, dass damit nur die Temperaturdifferenz zwischen der mittleren Heizwassertemperatur und der Fussboden-Oberflächentemperatur beeinflusst werden kann, nicht aber die Fussboden-Oberflächentemperatur selbst. Diese ist einzig und alleine durch den Heizleistungsbedarf des Raumes bestimmt. Die wirksamste Methode, um nicht so extrem kleine Verlegeabstände wie in Abb. 2-29 zu erhalten, ist eine bessere Wärmedämmung des Raumes. Räume mit geringem Heizleistungsbedarf haben somit bei gleichmässiger Belegung des Fussbodens immer einen "kalten Boden", ganz egal wie hoch die Vorlauftemperatur eingestellt wird! Ist die Oberflächentemperatur kleiner als 27 °C, so kann sich diese Fläche kalt anfühlen (je nach Stoffeigenschaften des Bodens). Es ist wichtig, diese Zusammenhänge einem Bauherren bereits in der Planungsphase zu erklären, damit keine falschen Erwartungen geweckt werden.

Was nützen Thermostatventile?

Im weiteren stellt sich die Frage, ob eine Einzelraumregelung, zum Beispiel mit Thermostatventilen, bei Wärmeabgabesystemen mit Niedrigtemperatur-Fussbodenheizungen sinnvoll ist oder nicht. Um diese Frage zu beurteilen, wurde die maximal mögliche Energieeinsparung in einem Leichtbau-Gebäude mit einer Vorlauftemperaturregelung untersucht (Abb. 2-30). Die Reduktion beträgt bei einer Maximalbegrenzung der Raumtemperatur von 21.5 °C lediglich 1%, bei jeder höheren Maximalbegrenzung ist die Reduktion noch kleiner. Auch bei Massivbauten reduziert sich das Sparpotential noch mehr.

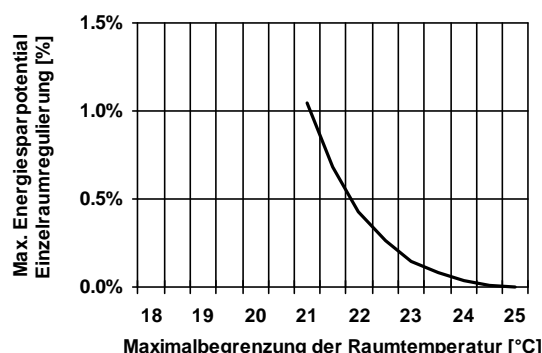


Abb. 2-30: Max. mögliche Energieeinsparung mit Einzelraumregelung [Afjei 96].

Dieses kleine Energiesparpotential mag erstaunen. Es hängt damit zusammen, dass die relative Häufigkeit der Raumtemperaturen über 22 °C mit ca. 5 % klein ist [Afjei 96]. Tritt dieser Fall ein, so gibt es selbst bei einer sofortigen Unterbindung der Wärmeabgabe des Heizsystems bei grossen Wärmegewinnen eine Überwärmung der Raumtemperatur. Dieser Anteil der freien Wärme kann also auch bei Einsatz einer Einzelraumregulierung nicht besser genutzt werden.

Eine Einzelraumregelung mit Thermostatventilen oder elektronischen Reglern ist bei Niedrigtemperaturbodenheizungen nicht sinnvoll, weil der Selbstregeleffekt des Systems diese Funktion bereits erfüllt.

Ist ein Heizungsspeicher nötig?

Stromunterbrüche der Elektrizitätswerke werden immer wieder als Grund dafür angeführt, dass ein Speicher eingebaut werden muss, damit während den Sperrzeiten keine Komforteinbussen eintreten. Um diese Behauptung zu untersuchen, wurde der Raumtemperaturverlauf bei verschiedenen langen Sperrzeiten untersucht. Generell konnte keine Komforteinbüsse festgestellt werden. Einzig die zweistündige Sperrzeit in der Nacht macht sich durch einen minimalen Raumtemperaturabfall bemerkbar. Der Abfall ist jedoch kaum spürbar und wesentlich kleiner als die sonstigen Fluktuationen

der Raumtemperatur. Der Körperkontakt mit der sich abkühlenden Bodenfläche kann jedoch als unangenehm empfunden werden [Afjei 96].

Für die Einhaltung der Raumtemperatur muss die Energie, die während eines Tages dem Raum zugeführt wird, gleich gross sein, egal ob die Heizungsanlage unterbrochen wird oder nicht. Daraus folgt, dass bei Unterbrüchen das Heizmedium mehr Leistung abgeben muss, was zu einer Erhöhung der Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf führt. Die dadurch notwendige Betriebstemperaturerhöhung ergibt eine Verschlechterung der Leistungszahl der Wärmepumpe. Dieser Zusammenhang ist Abb. 2-31 dargestellt. Das Resultat ist praktisch unabhängig von der Quelltemperatur.

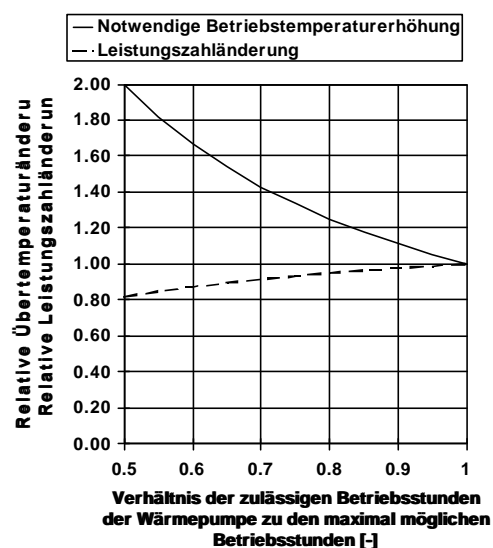


Abb. 2-31: Auswirkung des Betriebsunterbruchs auf die Wärmepumpenleistungszahl und die Systemtemperaturerhöhung. Horizontal aufgetragen ist der Anteil zulässiger Betriebsstunden [Afjei 96].

Ein Verhältnis von 0.8 heisst demzufolge, dass die Wärmepumpe während 0.8·24 h, also 19 Stunden in Betrieb sein kann und die restlichen 5 Stunden vom EW gesperrt werden.

Eine Überbrückung der Sperrzeiten mit einem Speicher hat nach [Afjei 96] aber folgende Nachteile:

- Zusätzliche Wärmeverluste infolge des Wärmespeichers
- Zunahme der Investitionskosten
- Zweite Umwälzpumpe und Regelkreis notwendig
- Grösserer Platzbedarf

Für Niedrigtemperatursysteme mit Bodenheizung sind Heizungsspeicher folglich nicht sinnvoll.

2.6.2 Wärmequellen

Um bei einer Wärmepumpe einen hohen Nutzungsgrad und damit einen möglichst geringen Strombedarf zu erhalten, ist eine hohe Verdampfungstemperatur und eine möglichst tiefe Kondensationstemperatur des Wärmepumpenprozesses erforderlich. Dies bedeutet, dass das Wärmeverteilsystem eine möglichst tiefe und die Wärmequelle eine möglichst hohe Temperatur haben sollte.

Wenn man den Verdampfer beim einfachen Wärmepumpenprozess ohne Unterkühlung etwas genauer betrachtet, dann sieht man, dass bei der Wärmequelle nicht die Eintrittstemperatur, sondern die Austrittstemperatur aus dem Verdampfer für das Temperaturniveau im Kälteprozess massgebend ist und den Nutzungsgrad bestimmt.

Unterschätzt wird in der Regel aber auch die Bedeutung der Hilfsenergien (z. B. Sondenpumpe etc.).



Abb. 2-32: Wärmepumpe der Firma CTA AG, Münsingen.

Aussenluft als Wärmequelle

Beispiel: Luft – Wasser - Wärmepumpe

Wärmequelle:	Aussenluft
Luftmassenstrom \dot{m} der Aussenluft (1500 m ³ /h):	0.5 kg/s
Aussenlufttemperatur T_a (Verdampfeintritt):	10 °C = 283.2 K
Heizleistung Luft-Wasser-Wärmepumpe:	5 kW
COP Wärmepumpe:	4.0
Kälteleistung \dot{Q}_K (Entzug aus Luft):	3.75 kW

Lufttemperatur am Verdampfer – Austritt:

$$T_{VA} = T_a - \frac{\dot{Q}_K}{\dot{m} c_{p_{Luft}}} = 283.2 \text{ K} - \frac{3.75 \text{ kW}}{0.5 \text{ kg/s} \cdot 1.0 \text{ kJ/kgK}} = 275.7 \text{ K}$$

Die für den Nutzungsgrad der Wärmepumpe massgebende Wärmequellen-Temperatur ist also 2.5 °C.

Zu beachten ist, dass die Aussenlufttemperatur im Winter meist tiefer liegt als in diesem Beispiel.

Das Grundproblem bei Aussenluft als Wärmequelle ist die Gegenläufigkeit von Wärmebedarf und Wärmeangebot in Abhängigkeit von der Aussen-temperatur. Immer wenn am meisten Wärme benötigt wird, kann von der Wärmepumpe am wenigsten Wärme geliefert werden (Abb. 2-33).

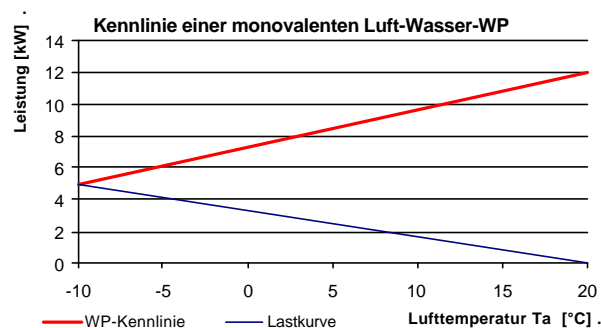


Abb. 2-33: Kennlinie einer monovalenten Luft-Wasser-Wärmepumpe.

Um das Problem an den wenigen extrem kalten Tagen zu lösen, wird in konventionellen Gebäuden bei Luft-Wasser-Wärmepumpen häufig ein zusätzlicher, elektrischer Heizstab eingebaut. Bei Niedrigenergie- und Passivhäusern ist dies nicht mehr nötig, da die Heizleistung in der Regel auch ohne diesen Heizstab ausreicht.

Abluft als Wärmequelle

Beispiel: Abluftwärmepumpe

Wärmequelle:	Raumluft
Luftmassenstrom \dot{m} der Abluft (150 m ³ /h):	0.05 kg/s
Raumtemperatur T_i (Verdampfeintritt):	20 °C = 294.2 K
Heizleistung Abluftwärmepumpe:	1.5 kW
COP Abluftwärmepumpe:	3.0
Kälteleistung \dot{Q}_K (Entzug aus Luft):	1.0 kW

Lufttemperatur am Verdampfer – Austritt:

$$T_{VA} = T_i - \frac{\dot{Q}_K}{\dot{m} c_{p_{Luft}}} = 293.2 \text{ K} - \frac{1.0 \text{ kW}}{0.05 \text{ kg/s} \cdot 1.0 \text{ kJ/kgK}} = 273.2 \text{ K}$$

Die für den Nutzungsgrad der Wärmepumpe massgebende Wärmequellen-Temperatur ist also in diesem Beispiel 0 °C.

Zu beachten ist, dass bei Kombi-Geräten oft eine Wärmerückgewinnung WRG die Abluft vor dem Verdampfer zuerst abkühlt und die Quelltemperatur somit wesentlich tiefer liegen kann.

Das Grundproblem bei der Abluft als Wärmequelle ist die geringe Luftmenge einer Bedarfslüftung, auf die Niedrigenergiehäuser ausgelegt werden. Dadurch sinkt die Verdampfer-Austrittstemperatur auch bei einer bescheidenen Heizleistung von 1.5 kW auf Temperaturen, die nur leicht über 0 °C liegen. Die übliche Heizleistung dieser Geräte reicht in der Regel für das Warmwasser, nicht aber für die Heizung aus. Erst wenn der Energiebedarf des Gebäudes auf die Werte eines Passivhauses gesenkt wird, kann die Abluft, in Kombination mit einem Erdregister und einer sehr guten Wärmerückgewinnung, als Wärmequelle für die Raumheizung in Betracht gezogen werden.

Erdregister

Im mitteleuropäischen Klima wird im Erdreich bereits in geringer Tiefe auch im Winter die Frostgrenze nie unterschritten. Die Lufttemperatur ist im Winter fast immer tiefer als die Erdreichtemperatur. Die Aussenluft kann deshalb erwärmt werden, wenn sie über ein Erdregister geführt wird. Mit einer Bypassklappe kann direkt Aussenluft angesaugt werden, wenn die Erdreichtemperatur tiefer als die Aussenluft ist. Dies steigert die Energieeffizienz, verursacht aber auch nennenswerte Zusatzkosten. Als Erdregister werden vorwiegend Kunststoffrohre verwendet, welche parallel zueinander im Erdreich verlegt sind.

Aus Kostengründen sollte das Erdregister in einem Bereich vorgesehen werden, in dem für das Gebäude ohnehin ein Aushub notwendig ist.

Zur Auslegung des Erdregisters ist das Programm WKM [M] erhältlich. Damit können die Austrittstemperaturen aus dem Erdregister stündlich ermittelt werden.

Energetischer Nutzen von Erdregistern:

- Verringerung der Abtauverluste in WRG / evt. keine Abtauregelung für WRG nötig.
- Kühlung im Sommer (ohne WRG).
- Ohne Abluftwärmepumpe: Je besser die WRG, desto kleiner der Nutzen des Erdregisters.
- Mit Abluftwärmepumpe: Je besser das Erdregister, um so höher die Verdampfertemperatur und somit der Nutzungsgrad der Abluftwärmepumpe, auch bei gutem Wirkungsgrad der WRG.

Erdwärmesonden

Beispiel: Sole – Wasser - Wärmepumpe

Wärmequelle:	Geothermie
Solemassenstrom \dot{m} (1000 kg/h):	0.28 kg/s
Sonden-Austrittstemperatur T_{Quelle} :	5 °C = 278.2 K
Heizleistung Sole-Wasser-Wärmepumpe:	5 kW
COP Wärmepumpe:	4.5
Kälteleistung \dot{Q}_K (Entzugsleistung aus Erde):	3.9 kW

Lufttemperatur am Verdampfer – Austritt:

$$T_{VA} = T_{\text{Quelle}} - \frac{\dot{Q}_K}{\dot{m} \cdot c_{p,\text{Sole}}} = 278.2 \text{ K} - \frac{3.9 \text{ kW}}{0.28 \text{ kg/s} \cdot 3.8 \text{ kJ/kgK}} = 274.5 \text{ K}$$

Die für den Nutzungsgrad der Wärmepumpe massgebende Wärmequellen-Temperatur (= Sondenrücklauf-Temperatur) ist also in diesem Beispiel 1.3 °C.

Bei Erdwärmesonden kann im Schnitt mit höheren Quellentemperaturen gerechnet werden als bei Luft-Wasser-Wärmepumpen. Nachteilig ist der höhere Preis für die Sondenbohrung. Ausserdem dürfen Erdwärmesonden nicht überall gebohrt werden (Wasserschutzgebiete etc).

Nachfolgend wird eine Methode vorgestellt, wie bei konstantem Wärmeentzug die Sondenaustrittstemperatur T_{Quelle} berechnet werden kann. Dabei

geht man von reiner Wärmeleitung aus (keine fließenden Grundwasserströme), was energetisch gesehen einem "worst case" entspricht.

Die reine Wärmeleitung kann mit linearen Gleichungen beschrieben werden. Damit kann das thermische Verhalten einer einzelnen Erdwärmesonde, aber auch eines ganzen Sondenfeldes mit einer Temperatur-Sprungantwort beschrieben werden. Aufgrund von Ähnlichkeitsüberlegungen wurde an der Universität Lund die dimensionslose Temperatursprungantwort (= "g-function") hergeleitet [Claesson 87], [Eskilson 87]. Der Zeitmassstab muss dabei mit der Sondenzeitkonstante t_s dimensionsbefreit werden:

$$t_s = \frac{H^2 \cdot \rho \cdot c_p}{9 \lambda} \quad \text{Gl. 2-26}$$

H	Aktive Bohrtiefe	[m]
λ	Wärmeleitfähigkeit der Erde	[W/mK]
ρ	Dichte der Erde	[kg/m ³]
c_p	spezifische Wärmekapazität der Erde	[J/kgK]

Die Eskilsonzahl Es kann somit als dimensionslose Zeit für Sondenfelder und Einzelsonden betrachtet werden und ist definiert als:

$$Es = \frac{t}{t_s} \quad \text{Gl. 2-27}$$

Damit kann die dimensionslose Temperaturabsenkung g in einem Abstand r_b von der Erdwärmesonde definiert werden als:

$$g(Es, \frac{r_b}{H}) = \frac{\Delta T \cdot 2p \cdot I}{\dot{q}} \quad \text{Gl. 2-28}$$

\dot{q}	spezifischer Wärmeentzug pro Sondenlänge	[W/m]
ΔT	Temperaturabsenkung	[K]
r_b	Abstand von den Erdwärmesonden	[m]

g-Funktionen für verschiedene Sondenanordnungen sind im Anhang 5.5 zu finden.

Um die absolute Temperatur T_b im Erdreich zu erhalten, kann nun die Sprungantwort ΔT einfach von der ungestörten Anfangstemperatur T_m abgezogen werden:

$$T_b = T_m - \frac{\dot{q}}{2p \cdot I_{\text{Erde}}} g(Es, r_b / H) \quad \text{Gl. 2-29}$$

T_b	Erd-Temperatur in der Tiefe $H/2$ nach einem Wärmeentzug von \dot{q} während der Dauer Es	[°C]
T_m	Ungestörte Erd-Temperatur in der Tiefe $H/2$	[°C]

Die ungestörte Anfangstemperatur T_m ist in der Tiefe $H/2$ (halbe Sondenlänge) einzusetzen. Dabei ist mit einem Temperaturgradienten von 0.025 K/m bis 0.04 K/m zu rechnen. Die jahreszeitlichen Temperaturschwankungen sind bis in Tiefen von 10-15 Metern messbar, darunter herrschen konstante Temperaturen. In 10 Metern Tiefe ist das Erdreich etwa 1 K wärmer als die Lufttemperaturen im Jah-

resschnitt. In städtischen Gebieten liegt dieser Wert bei 2 K und in schneereichen Gegenden bis 4 K.

Tiefe:	freie Lage Mittelland	Zürich Basel	Davos
-25 m	11.3	12.5	8.0
-50 m	12.0	13.5	8.7
-100 m	13.5	15.5	10.2
-150 m	15.0	17.5	11.7

Tab. 2-8: Ungestörte Erdtemperatur T_m in verschiedenen Tiefen.

Die Erdwärmesonden - Gleichung

In der Regel interessiert nicht primär die Erdoberflächentemperatur, sondern die Temperatur des Sondenfluids am Austritt aus der Erdwärmesonde. Unter der Annahme, dass das Sondenfluid in der Erdwärmesonde ungefähr dem Mittel zwischen der Sondereintritts- und Austrittstemperatur entspricht (was bei den üblicherweise verwendeten Sonden durchsätzen in etwa der Fall ist, nicht aber bei zu kleinen Sonden durchsätzen), kann die Quelltemperatur (= Sondaustritts-temperatur) einer Doppel-U-Sonde mit der folgenden Erdwärmesonden-Gleichung beschrieben werden.

$$T_{\text{Quelle}} = T_m - \left[\frac{g(r_1/H, Es)}{2 \pi l} + \frac{1}{8 \pi a r_o} + R_c - \frac{H}{2 \dot{m} c p_{\text{fluid}}} \right] \frac{\dot{Q}_K}{H} \quad \text{Gl. 2-30}$$

T_{Quelle}	Sondaustritts-temperatur	[°C]
T_m	Ungestörte Erdtemperatur in der Tiefe $H/2$ (nur für den durchschn. Jahresentzug einsetzen)	[°C]
H	Bohrtiefe	[m]
\dot{Q}_K	Kälteleistung (Entzugsleistung) / Erdwärmesonde	[W]
\dot{m}	Sondendurchsatz pro Erdwärmesonde	[kg/s]
α	Wärmeübergangskoeffizient ans Sondenfluid [W/m ² K] (Berechnung siehe Anhang 5.6)	
R_c	thermischer Widerstand vom Sondenrohr bis zum Bohrlochradius r_1	[Km/W]
r_1	Bohrlochradius	[m]
r_o	Innenradius der Sondenrohre	[m]

Der thermische Widerstand R_c ist bei einer 32 mm-Doppel-U-Sonde und guter Hinterfüllung mit einer Zement-Bentonit-Mischung ca. 0.08 Km/W gross. Eine analytische Berechnung von R_c ist bei [Hellström 91] zu finden. Die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten ist im Anhang 5.6 zu finden. Die Kälteleistung \dot{Q}_K kann aus der Heizleistung der Wärmepumpe und dem COP berechnet werden mit:

$$\dot{Q}_K = \dot{Q}_{\text{WP}} \frac{\text{COP} - 1}{\text{COP}} \quad \text{Gl. 2-31}$$

Die Erdwärmesonden-Gleichung eignet sich für Grobabschätzungen der verschiedenen Einflüsse auf die Quelltemperatur bei konstantem Wärmeentzug $\dot{q} = \dot{Q}_K / H$. In der Praxis hat man es aber in der Regel mit einem Ein-Aus-Betrieb mit unterschiedlichem Entzugsprofil zu tun. Für die konkrete Sondendimensionierung wurden deshalb PC-Programme entwickelt (Programm EWS [B],

[Huber 97], [Huber 99a] und Programm SwEWS [I], [Leu 99]). Damit lassen sich Einzelsonden, aber auch ganze Sondenfelder berechnen.

Dimensionierung der Sondenpumpe

Oft wird der Energiebedarf für die Umwälzpumpen in den Sondenkreisläufen unterschätzt. Mit einer richtigen Dimensionierung lässt sich der Energiebedarf praktisch immer unter 10 % (vorläufiger Richtwert aus bisherigen Erkenntnissen, noch nicht optimiert) des gesamten Strombedarfs für die Wärmeerzeugung senken [Huber 99b]. Zu beachten sind dabei:

- hoher Wirkungsgrad der Umwälzpumpen
- grosse Sonden Durchmesser
- optimaler Sonden durchsatz
- falls möglich kein Frostschutz in Sole
- Druckabfall in Sondenverteiler minimieren

Der Einfluss des Frostschutzes und des Sonden durchmessers ist aus Abb. 2-34 ersichtlich. Der nur geringe Mehrpreis für einen grösseren Sonden durchmesser lohnt sich fast immer.

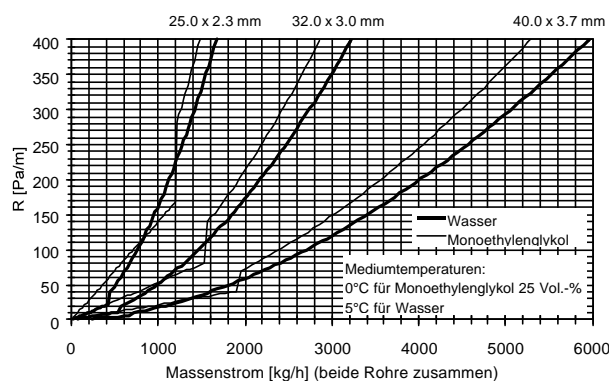


Abb. 2-34: Druckabfall pro Meter Rohr von Wasser und Monoethylenglykol (Antifrogen N) mit 25 Vol.-%.

Beim Diagramm der Abb. 2-34 muss zusätzlich noch die geringere Wärmekapazität der Frostschutzmittel verglichen mit reinem Wasser berücksichtigt werden. Wird dies eingerechnet, erhöht sich der Druckverlust mit 25 Vol.-% Monoethylenglykol im turbulenten Bereich um ca. 42 %. Weil Niedrigenergiehäuser in der Regel mit kleinen Heizleistungen auskommen, sind auch die Bohrtiefen gering (teilweise unter 100 m). Somit gilt:

Das Optimum des Wärmebezugs zum Pumpenverbrauch ergibt sich bei Niedrigenergiehäusern in der Regel bei laminarer Strömung in den Erdwärmesonden!

Zur optimalen Dimensionierung der Sonden-Umwälzpumpen wurde im Auftrag des BFE das Excel-Programm EWSDRUCK [C] entwickelt [Huber 99b], das gratis vom Internet heruntergeladen werden kann (www.waermepumpe.ch/fe).

Beispiel: Grobdimensionierung einer Erdwärmesonde**Standort:**

Schweizerisches Mittelland 500 m. ü. M

Durchschnittliche Lufttemperatur $T_a = 9.5^\circ\text{C}$ Ungestörte Bodentemperatur in 50 m Tiefe $T_m = 12^\circ\text{C}$ Bodenaufbau: Obere Süsswassermolasse OSM
mit Siltstein und Feinsandstein,
darüber geringe MoränenschichtDurchschnittliche Wärmeleitfähigkeit λ der Erde: 2.4 W/(mK) Durchschnittliche Wärmekapazität der Erde: $c_p = 2.7 \text{ MJ/(m}^3\text{K)}$ **Leistungsbedarf:**Heizleistungsbedarf Q_h nach SIA 384/2: 5 kW Zusätzliche Leistungsreserve Sperrzeit 4 h: $1 \text{ kW} = 5 \text{ kW} \cdot \frac{4 \text{ h}}{20 \text{ h}}$ Leistungsbedarf Warmwasser 1 kW Interne Wärmegewinne -1 kW Totaler Leistungsbedarf Wärme: 6.0 kW **Wärmepumpe:**Installierte Heizleistung: 5.6 kW COP Wärmepumpe B0W35: 4.6 Kälteleistung \dot{Q}_K : $5.6 \text{ kW} \cdot \frac{3.6}{4.6} = 4.4 \text{ kW}$ **Dimensionierung Sondenpumpe:**Zielgrösse Energieanteil Sondenpumpe: 5% Sondenfluid: 25% MonoethylenglykolTemperaturspreizung ΔT am Verdampfer: 3.8 K
(Berechnet mit EWSDRUCK, Abb. 2-35)

$$\text{Sondendurchsatz: } \frac{\dot{Q}_K}{\Delta T \cdot c_p \text{ fluid}} = \frac{4.4 \text{ kW}}{3.8 \text{ K} \cdot 3.85 \text{ kJ/kgK}} = 0.30 \text{ kg/s}$$

Lastprofil der Erdwärmesonde:Volllaststunden Wärmepumpe pro Jahr: $2'400 \text{ h}$ Durchschnittliche Jahresentzugsleistung: $\dot{Q}_K \frac{2400 \text{ h}}{8760 \text{ h}} = 1.2 \text{ kW}$ Volllaststunden Winterentzug (Nov – Feb): $1'400 \text{ h}$ Zusätzliche Winterentzugsleistung: $\dot{Q}_K \frac{1400 \text{ h}}{2880 \text{ h}} - 1.2 \text{ kW} = 0.9 \text{ kW}$ Zusätzlicher Spitzenentzug 7 Tage: $\dot{Q}_K - 1.2 \text{ kW} - 0.9 \text{ kW} = 2.3 \text{ kW}$

Das ganze, für die Dimensionierung verwendete Lastdiagramm ist in Abb. 2-36 dargestellt.

Berechnung Sondenlänge:Zielgrösse minimale Quellentemperatur: 2°C Auslegungszeit für Jahres-Durchschnittsentzug: $t_1 = 10 \text{ Jahre}$ Auslegungszeit für zusätzlichen Winterentzug: $t_2 = 4 \text{ Monate}$ Auslegungszeit für zusätzlichen Spitzenentzug: $t_3 = 7 \text{ Tage}$

Durch die dreimalige Anwendung der Erdwärmesondengleichung Gl. 2-30 für den durchschnittlichen Jahresentzug nach 10 Jahren, den zusätzlichen Winterentzug und den zusätzlichen Spitzenentzug kann durch Überlagerung nun die Quellentemperatur Ende Februar berechnet werden (Abb. 2-37). Aus der zulässigen, minimalen Quellentemperatur ergibt sich daraus für dieses Beispiel eine **Sondenlänge von 100 m**.

Pumpen-Auslegungsprogramm für ErdsondenObjekt: **Grafstal NTH**Bundesamt für Energie
Office fédéral de l'énergie
Ufficio federale dell'energia**Gebäude und Standort**

Wärmebedarf	6 kW
Warmwasserbedarf	1 kW
Andere interne Gewinn	-1.4 kW
Gebäude Total	6 kW
Lage	Mittelland 500m
Jahresmitteltemperatur	9.5 °C
Wärmeleitfähigkeit der Erde	2.4 W/mK
mittlere Erdoberflächtemperatur	12.1 °C

Wärmepumpe

Informationen über W/P (Internet)

Fabrikat	CTA	Typ	Optiheat 17sc
Nennleistung Wärmepumpe	5.6 kW		
COP bei obiger Nennleistung	4.6		
Nennverlust Verdampfer	10 kPa		
Nennvolumenstrom Verdampfer	1000 kg/h		
Entzugsprofil / Schaltintervall	Mittel	(5 Tage)	
Leistungsaufnahme (elektrisch)	1.2 kW		
Massenstrom Wärmepumpe	1093 kg/h		

Sondenparameter

spez. Sondenleistung	44 W/m
Bohrtiefe	100 m
Anzahl Sonden	1
Temperaturspreizung VL-RL	3.8 K
Bohrlochdurchmesser	cm
Rohrdimension	32 mm doppel-U

Strömungswerte (für Doppel U-Rohr)

Massenstrom Sonde(n) (mittel)	546 kg/h
Geschwindigkeit Sonde(n)-/l-	0.27 m/s
Hydraulisch glattes Rohr	laminare Strömung
mittlerer spez. Druckverlust	68 Pa/m
mittlerer Druckabfall einer Sonde	13.6 kPa

Stoffwerte Sondenfluid

Monoethylenglykol 25%	2 °C
Dichte ρ	1053 kg/m³
Kinematische Viskosität ν	3.902 mm²/s
spez. Wärmekapazität c_p	3.8 kJ/kgK
Frost bei	-14 °C
Wärmeübergangskoeffizient	86 W/m²K

Druckverluste im Verteiler und Zulu

Nennverlust Verteiler	3 kPa
Nennvolumenstrom Verteiler	1000 kg/h
Nenn-V. Volumenstrommesser	kPa
Nenn-V. Vol. strommesser	kg/h
Nennverlust Rest	2 kPa
Nennvolumenstrom Rest	1000 kg/h
Innendurchmesser Anschluss	26 mm
Länge horizontaler Anschluss	10 m
Bogen 90° ($\xi = 0.3$)	Stk.
Tauchhülse ($\xi = 0.2$)	Stk.
andere ξ -Werte oder $\Sigma \xi$	-

Sonden - Umwälzpumpe

Informationen über U/W/P (Internet)

Fabrikat	Biral	Typ	M12
Totaler Druckabfall	32.3 kPa		
Volumenstrom	3.13 m³/h		
	0.00029 m³/s		
	1.04 m³/h		
benötigte Leistung der Pumpe	9.3 W		
Wirkungsgrad der Pumpe	14		
Leistungsaufnahme Pumpe	65		

Anteil der Pumpenenergie am Stromve
Anteil Sondenpumpe: **5.1 %**

Abb. 2-35: Dimensionierung der Sondenpumpe mit dem Programm EWSDRUCK [Huber 99b] [C].

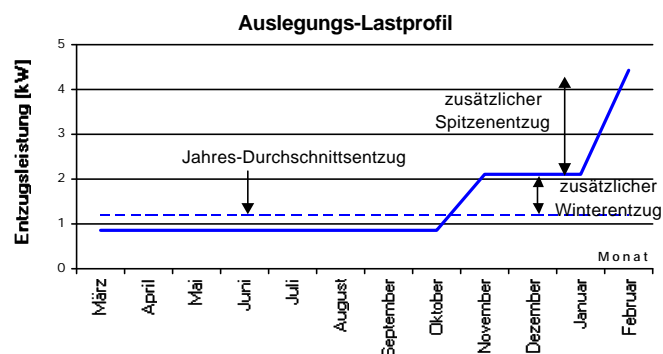
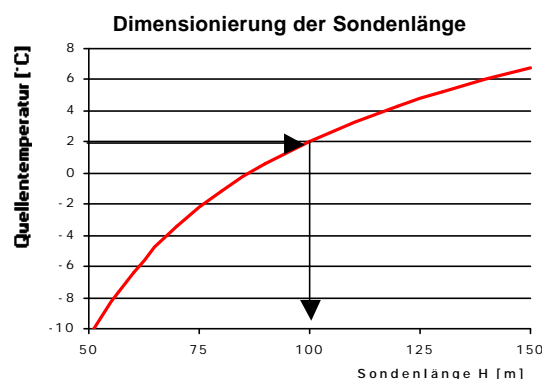
Abb. 2-36: Lastdiagramm für Dimensionierung der Sondenlänge für Rechenbeispiel: Durchschnittlicher Jahresentzug 1.2 kW , zusätzlicher Winterentzug (Nov - Feb) 0.9 kW , zusätzlicher Spitzenentzug (1 Woche): 2.3 kW .

Abb. 2-37: Quellentemperatur in Funktion der Sondenlänge für das vorgestellte Beispiel, berechnet mit Gl. 2-30.

2.6.3 Abluft als Wärmequelle – Systemsimulationen und Messungen Passivhaus

Beispiel: Lüftungs-Kompaktgeräte mit integrierter Abluftwärmepumpe im Passivhaus

Technisches Konzept

Lüftungs-Kompaktgeräte sind dadurch gekennzeichnet, dass sie die Funktionen Lüftung, Heizung und Brauchwassererwärmung für Wohnhäuser mit einem Gerät abdecken, welches sich gegebenenfalls aus koppelbaren Modulen zusammensetzt. Für die Eignung zum Einsatz in Passivhäusern ist das Sicherstellen der Behaglichkeit in den Wohnräumen und eine hohe energetische Effizienz notwendig. Unabdingbar ist der Einsatz effizienter Ventilatoren, eine passive Wärmerückgewinnung von der Abluft auf die Zuluft mit ausreichend hohem Wärmebereitstellungsgrad, die Kopplung mit einem solartauglichen Warmwasserspeicher und eine Wärmepumpe hoher energetischer Effizienz, um den Restwärmebedarf für die Zuluftnachheizung und die Brauchwassererwärmung zu decken.

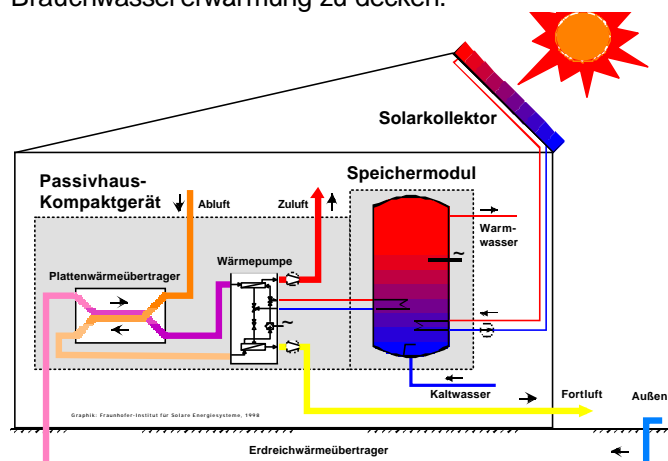


Abb. 2-38: Prinzipschema von Lüftungs-Kompaktgeräten mit Abluftwärmepumpe.

Eine erfolgversprechende Variante der Deckung des Restwärmebedarfs ist durch den Einsatz einer Abluftwärmepumpe gegeben, die die Restenergie der Abluft nach der passiven Wärmerückgewinnung nutzt. Wird ein Erdregister im Winter zum Vorwärmen der Frischluft eingesetzt (siehe Abb. 2-38), so reicht beim Baustandard des Passivhauses die sensible und latente (Kondensationsenergie der Luftfeuchte) Wärme der Abluft aus, um zusammen mit der elektrischen Antriebsenergie der Wärmepumpe den grössten Teil des Restwärmebedarfs zu decken. Für die Bereitstellung der hochwertigen elektrischen Energie für den Antrieb der Wärmepumpe entstehen vorgelagerte Umwandlungs- und Leitungsverluste. Deshalb ist beim Bezug von Strom aus dem deutschen Kraftwerksmix eine Jahresarbeitszahl, also das Verhältnis von Nutzwärme zu elektrischer Energie, über 3 notwendig, um diese auszugleichen. Durch die Liberalisierung der Stromwirtschaft ist es allerdings ab sofort möglich, den Bezug bei geringen Mehrkosten vollstän-

dig auf regenerativ erzeugten Strom umzustellen. Damit entsteht eine kostengünstige Variante für eine Nullemissions-Haustechnik.

Simulationen am Fraunhofer ISE mit einem für Wärmepumpen neu entwickelten Modul für das dynamische Simulationsprogramm TRNSYS ergeben in Simulationen für typische Passivhäuser Stromverbräuche von 10 bis 15 kWh/m²·a für die drei haustechnischen Funktionen Lüften, Heizen und Brauchwassererwärmung. Dies entspricht einem Primärenergieeinsatz von 30 bis 45 kWh_{PE}/m²·a und liegt unter dem Grenzwert von 65 kWh/m²·a [Stärz 00].

Messungen auf dem Teststand des Fraunhofer ISE

Auf dem Teststand ist es möglich, Lüftungs-Kompaktgeräte für Passivhäuser unter realen Einsatzbedingungen über längere Zeiträume zu testen und zu vermessen. Für Messungen unter stationären Bedingungen sind in die Frischluft und die Abluft Kühlgeräte, Nacherhitzer und Befeuchter eingebaut. Durch einen Sekundärkreis mit Wärmeabfuhr kann die Speichertemperatur konstant gehalten werden.



Abb. 2-39: Teststand des Fraunhofer ISE für Lüftungs-Kompaktgeräte im Keller des Solarhaus Freiburg.

Durch eine umfangreiche Sensorik werden vollständige Energiebilanzen der Geräte, Leistungen der elektrischen Komponenten, Lufttemperaturen an verschiedenen Stellen im Gerät sowie Kältemitteltemperaturen und -drücke erfasst. Hierdurch können neben der Berechnung von Bilanzen und Kennwerten auch konstruktive Empfehlungen zur Verbesserung der Geräte gegeben werden.

Das Fraunhofer ISE bietet auf diesem Teststand Messungen über längere Zeiträume, in stationären Betriebspunkten oder für die Brauchwassererwärmung in Anlehnung an die DIN EN 255 an.

Mit einem Luft/Luft-Wärmepumpenkompaktgerät wurden umfangreiche Messungen durchgeführt. In diesem Gerät ist ein Kreuz-Gegenstrom-Wärmeübertrager eingesetzt. Die Ventilatoren haben elektronisch kommutierte Gleichstrommotoren und sind jeweils in drei Drehzahlstufen in %Schritten regelbar. Die Abluftwärmepumpe hat einen Kälte-

mittelverflüssiger in der Zuluft und einen zweiten intern im Warmwasserspeicher. Die beiden können alternativ betrieben werden. Die Zuluftnachheizung hat Vorrang vor der Brauchwassererwärmung. Wenn diese bei gleichzeitigem Wärmebedarf nicht von der Wärmepumpe abgedeckt werden kann, wird ein elektrischer Heizstab im Speicher in Betrieb genommen. Bei der Installation des Gerätes ist wegen des getrennten Transports von Speicher und Lüftungsgerät ein Kältetechniker für den Anschluss der Kältemittelleitungen erforderlich. Der Speicher hat ein Volumen von 190 Litern oder für die Kopplung mit einer thermischen Solaranlage auch 400 Liter.

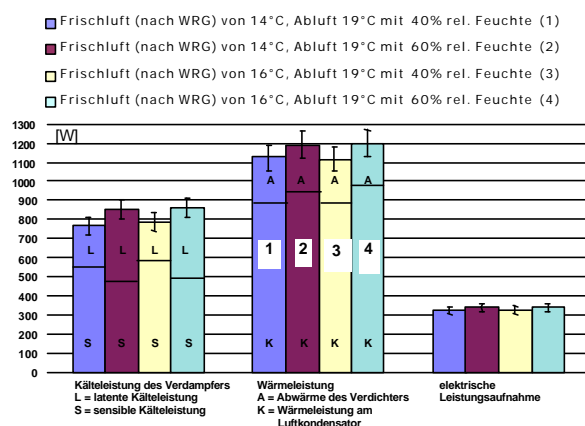


Abb. 2-40: Messungen am L/L-WRG Kombi im Heizbetrieb bei 19 °C Ablufttemperatur und einem Luftvolumenstrom von 125 m³/h. Frischlufttemperatur (nach WRG) 14 °C und 16 °C, Abluftfeuchte r.F. 40 % und 60 %.

Für den Heizbetrieb konnte bei Frischlufttemperaturen von 14 °C bzw. 16 °C und Abluftfeuchten von 40 % und 60 % bei einer Ablufttemperatur von 19 °C eine Leistungszahl der Wärmepumpe (ohne Berücksichtigung des Wärmegewinns am Gegenstromwärmeübertrager) von 3.2 bis 3.3 gemessen werden. Die Heizleistung erreicht bei einem Luftvolumenstrom von 125 m³/h 1100 bis 1200 W (siehe Abb. 2-40). Unter typisch winterlichen Bedingungen (9 °C nach einem Erdregister, Abluftfeuchte von 30 % und Ablufttemperatur von 20.7 °C) wird eine Leistungszahl der Wärmepumpe von 3.14 gemessen.

Bei der Erwärmung des 190-Liter-Speichers von 12 °C auf 52 °C wird eine Arbeitszahl von 3.2 erreicht. Wird die Abwärme des Verdichters, der im Zuluftteil des Lüftungsgerätes platziert ist, in der Heizperiode genutzt, beträgt die Arbeitszahl 3.7 (siehe Abb. 2-41). Für die Erwärmung des gesamten Speichers benötigt das Gerät 9 Stunden. Durch den innenliegenden Wärmeübertrager ohne Ladelanze kommt es zu einer vollständigen Durchmischung des Speichers. Eine geschichtete Beladung wie bei vielen Solarspeichern würde die Verfügbarkeit von Brauchwasser der gewünschten Temperatur und damit den Brauchwasserkomfort erhöhen. Bei der Brauchwasserentnahme kann

eine vorhandene Schichtung weitgehend erhalten bleiben [Bühning 00b].

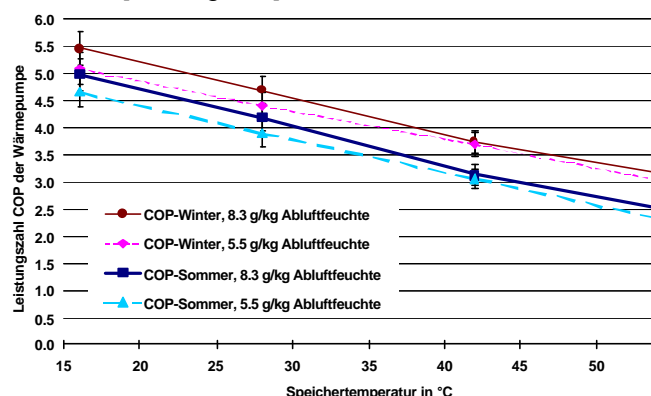


Abb. 2-41: Vergleich der Leistungszahlen (COP) der Wärmepumpe in Abhängigkeit der Speichertemperaturen. Luftmassenströme abgeglichen 150 kg/h, Ablufttemperatur am Verdampferingang 15.3 °C. Winterlichen Leistungszahlen einschliesslich Heizwärmegewinn durch Wärmeabgabe des Verdichters an die Zuluft.

2. Rechenbeispiel Passivhaus

Mit einem am Fraunhofer ISE entwickelten Wärmepumpen-Modul für das Simulationsprogramm TRNSYS wurden Untersuchungen und Optimierungsrechnungen für vergleichbare Einsatzfälle von Lüftungs-Kompaktgeräten mit den Kennwerten des Lüftungsgerätes Aerex durchgeführt. Für das Erdregister wurde eine Temperatureffizienz von 80 % angenommen. Die simulierte Solaranlage entspricht einer 5 m² grossen Flachkollektoranlage. Der Warmwasserbedarf mit zeitlichen Profilen liegt bei 140 l/d bei 45 °C.

Das simulierte Reihenmittelhaus hat 121 m² Wohnfläche und wird von vier Personen genutzt. Die inneren Wärmequellen betragen durchschnittlich 1.6 W/m². Die Feuchteproduktion wird mit 120 g/(h-Person) angenommen. Eine Zirkulation ist nicht vorhanden. Die Lüftungsanlage ist auf einen Volumenstrom von 125 m³/h eingestellt. Die Infiltration verursacht durchschnittlich 0.05 Luftwechsel pro Stunde und entspricht einer sehr guten Dichtigkeit der Gebäudehülle mit $n_{50} = 0.6 \text{ h}^{-1}$. Der simulierte Jahresheizwärmebedarf beträgt 13 kWh/m². Die Ergebnisse der Jahressimulation werden in Abb. 2-42 in Wochenwerten dargestellt. Die Solaranlage deckt 34 % des Restwärmebedarfs für Warmwasser und Heizung, die Wärmepumpe mit einer Jahresarbeitszahl von 3.2 weitere 56 %. Die restlichen 10 % werden direktelektrisch mit einem Heizstab im Speicher erzeugt. Die Heizleistung der Wärmepumpe reicht zur Aufrechterhaltung der Raumsolltemperatur.

Der Jahresstrombedarf für Lüftung, Brauchwassererwärmung und Heizung inklusive aller Nebenggregate liegt bei 11 kWh/m² und entspricht bei deutschem Kraftwerksmix einer Primärenergie von 32 kWh_{PE}/(m²a).

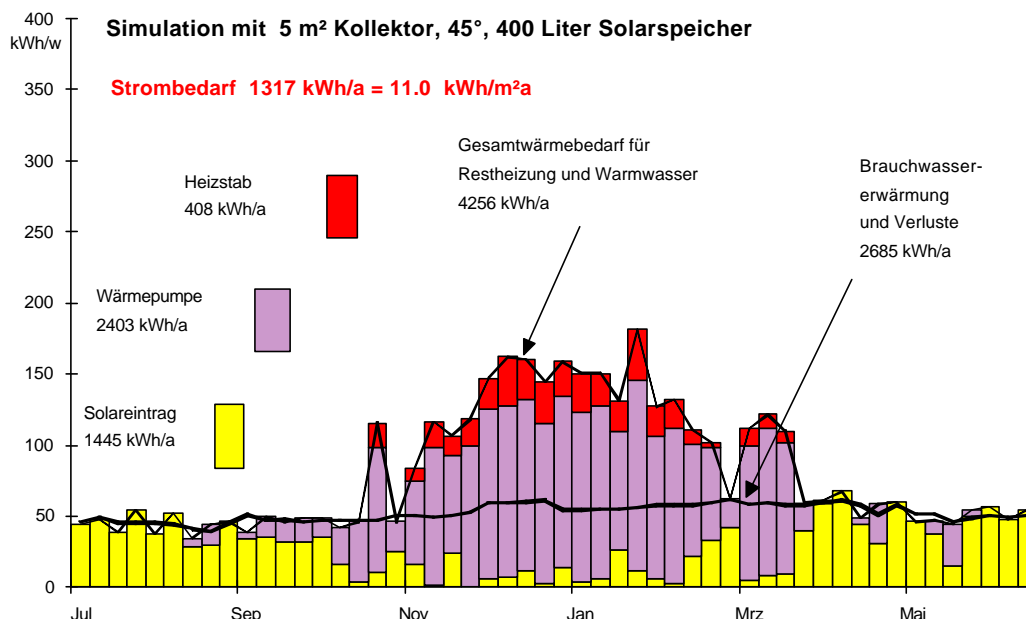


Abb. 2-42: Ergebnisse der TRNSYS-Simulationen des Kompaktgerätes und eines Passivhauses, dargestellt in Wochenwerten, Graphik: Fraunhofer ISE.

2.6.4 Warmwasser

In Niedrigenergiehäusern sinkt der Heizenergiebedarf dank dem gutem Wärmedämm-Standard, anteilmässig nimmt somit der Energiebedarf für die Warmwasserproduktion stark zu. Der Warmwasserbedarf unterscheidet sich bei Niedrigenergiehäusern nicht grundsätzlich von Grenzwerthäusern. Eine Auslegung nach Personenbelegung und Ausbaustandard gemäss Tab. 2-9 ist dabei einem rein flächenbezogenen Ansatz nach [SIA 380/1] vorzuziehen.

Gebäudeart:	1	2	3
Einfamilienhaus, einfacher Standard	30 l	35 l	40 l
Eigentumswohnung, einfacher Standard	35 l	40 l	50 l
Eigentumswohnung, gehobener Standard	40 l	50 l	60 l
Mehrfamilienhaus, einfacher Standard	30 l	35 l	45 l
Mehrfamilienhaus, gehobener Standard	35 l	40 l	50 l

Tab. 2-9: Warmwasserbedarf pro Person und Tag aus SI-Handbuch [Fux 93], bezogen auf 60 °C.

- 1: Mindestwert, der bei der Dimensionierung nicht unterschritten werden sollte
- 2: Durchschnittswert für Energieberechnungen
- 3: Maximalwert für Leistungsberechnungen

Der grosse Energieanteil für die Warmwasserproduktion macht eine integrale Planung unumgänglich. Sinnvoll ist der Einsatz einer Wärmepumpe für die Warmwasserproduktion auf jeden Fall. Dies bedeutet zwar eine Senkung der Arbeitszahl. Gleichzeitig aber sinkt auch der Strombedarf, was zu einer beträchtlichen Erhöhung des Systemnutzungsgrades führt, verglichen mit einem Elektro-Wassererwärmer (cf. Abb. 2-9 bis Abb. 2-11). Nicht alle Wärmepumpen lassen Wassertemperaturen von über 50 °C zu. Damit muss dem Legionellen-Risiko eine erhöhte Aufmerksamkeit geschenkt werden. [Pagano 00] haben gezeigt, dass hohe Ladetemperaturen im Warmwasserspeicher alleine noch nicht ausreichen, das Legionellen-Risiko zu eliminieren. Warmwasserleitungen ohne Zirkulation können eine ähnlich grosse Keimzahl enthalten wie Wassererwärmer, die nie 50 °C überschreiten. Als Lösung des Problems sind denkbar:

- Wärmepumpen mit Enthitzer erreichen 60 °C
- Wärmepumpen mit Propan als Kältemittel einsetzen (erreichen 60 °C)
- Einmal wöchentlich den Wassererwärmer mit Elektro-Heizstab auf 60 °C erhitzen
- Kurze Verteilleitungen für das Warmwasser
- Zapfstellen in Serie bauen ("Steckdosen")
- Wassererwärmer im beheizten Gebäudeteil

In den Beispielen in Kapitel 4.2 und 4.3 wurden Wärmepumpen mit Propan eingesetzt.

2.7 Regelung

Im Folgenden werden zunächst die beiden am häufigsten vorkommenden, konventionellen, monovalenten Regelkonzepte mit den entsprechenden hydraulischen Schaltungen dargestellt (Abb. 2-43 und Abb. 2-44). Im Vergleich dazu präsentiert sich die neue, kostengünstige Rücklauftemperaturregelung ohne Thermostatventile mit selbstregulierenden Fussbodenheizung wesentlich einfacher (Abb. 2-45). Die Praxistauglichkeit dieser Regelung wurde in zwei Feldversuchen nachgewiesen (cf. Kapitel 4.2 und 4.3). Anschliessend werden drei neuentwickelte Konzepte mit Pulsbreitenmodulation vorgestellt. Diese weisen gegenüber den konventionellen Konzepten den Vorteil auf, die Dauer der Einschaltpulse der Wärmepumpe energetisch zu optimieren und ihre Verteilung über den Tag durch das Berücksichtigen der Tarifstruktur und der Sperrzeiten kostenoptimal vorzunehmen. Im Anhang 5.3.1 sind die Resultate der ersten Erprobung der neuentwickelten Reglerkonzepte im Vergleich zum konventionellen Zweipunktregelungskonzept vorgestellt. Die im Vergleich guten Resultate der Zweipunktregelung sind darauf zurückzuführen, dass der eingesetzte Regler neben dem Rücklauftemperaturfühler sowohl über einen Raum- als auch einen Bodenfühler verfügte.

2.7.1 Hydraulische Schaltungen

Die Vorlauftemperaturregelung ist die konventionelle, aber auch die aufwendigste Lösung. Die Rücklauftemperaturregelung kann mit oder ohne Überströmschaltung erfolgen.

Im Rahmen dieses Projektes wurde das Konzept "Rücklauftemperaturregelung mit Niedrigtemperaturheizung" untersucht und erprobt. Dies ist die einfachste und kostengünstigste Lösung. Die Anforderung an eine kostengünstige Heizungsanlage kann deshalb mit diesem System am besten gerecht werden. Beim Einsatz dieses Regelungskonzepts in den Niedrigenergiehäusern kann allerdings das folgende Problem auftauchen: Bei Niedrigenergiehäusern verläuft die Heizkurve relativ flach, so dass die Regelbarkeit dadurch stark eingeschränkt wird. Insbesondere kann es vorkommen, dass für ein gegebenes Hystereseband des Zweipunktreglers die Wärmepumpe über einer bestimmten Aussentemperatur (z. B. 5 °C) nicht mehr einschaltet und als Folge die gewünschte Raumtemperatur nicht mehr eingehalten werden kann. Ausserdem lassen sich bei diesem konventionellen Regelungskonzept mit einem Zweipunktregler die Sperr- und Niedertarifzeiten nicht optimal verarbeiten.

Vorlauftemperaturregelung

Abb. 2-43 zeigt ein entsprechendes Konzept. Die Wärmepumpe lädt einen technischen Speicher auf, der zugleich die Wärmeerzeugung hydraulisch von der Wärmeabgabe entkoppelt. Auf diese Weise können lange Laufzeiten der Wärmepumpe und tiefe Rücklauftemperaturen garantiert werden: Die

Eintrittstemperatur in die Wärmepumpe ist von der momentanen Rücklauftemperatur der Gruppen abhängig. Dank dem technischen Speicher kann jedoch eine Beimischung von Vorlaufwasser ausgeschlossen werden (\Rightarrow Pendelbetrieb, evtl. Hochdruckstörung). Die Auslegung des Wärmeabgabesystems erfolgt üblicherweise mit Vorlauftemperaturen von 40 bis 50 °C.

Eine Anpassung der Wärmeabgabe an sich ändernde Lastverhältnisse wird von einer witterungsgeführten Vorlauftemperaturregelung vorgenommen.

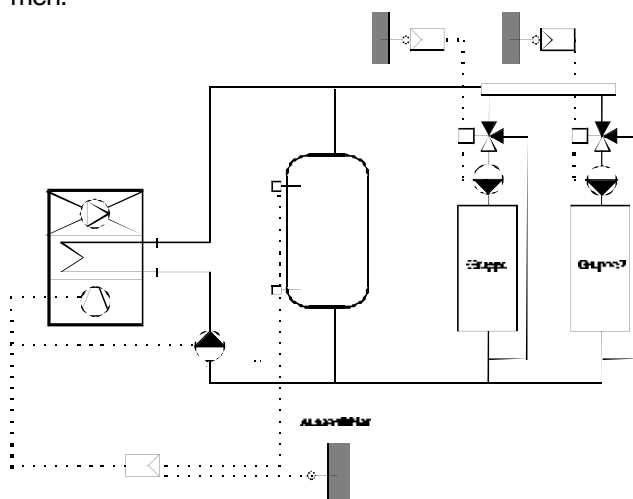


Abb. 2-43: Vorlauftemperaturregelung mit technischem Speicher zur hydraulischen Trennung zwischen Wärmeerzeugung und Wärmeabgabe.

Die Vorlauftemperaturregelung weist die folgenden Vor- und Nachteile auf:

- + Hydraulische Entkoppelung des Erzeugers und des Verbrauchers \Rightarrow keine Probleme bezüglich Hochdruck im Kältemittelkreis
- + Einfache Reglereinstellung und Einregulierung
- Hoher apparativer Aufwand (Speicher, Regelung Gruppe)
- Wärmeverluste des Speichers, zusätzliche Kosten

Rücklauftemperaturregelung (allgemein)

Wird die Anlage ohne technischen Speicher ausgeführt, so muss die Wärmepumpe zwingend über die Rücklauftemperatur ein- und ausgeschaltet werden. Die Verwendung der Vorlauftemperatur würde zu einem Taktbetrieb führen [Afjei 96].

Rücklauftemperaturregelung mit Überströmschaltung

Die Wärmepumpe wird über einen Rücklauftemperaturfühler eingeschaltet. Fremdwärme im Raum kann mit Thermostatventilen ausgenutzt werden. Dies macht den Einsatz eines Überströmventils notwendig, wie in Abb. 2-44 dargestellt.

Durch die Speichermasse des Fussbodens werden genügend lange Laufzeiten der Wärmepumpe erreicht. Für die einwandfreie Funktion dieses Systems ist ein genauer hydraulischer Abgleich Voraussetzung.

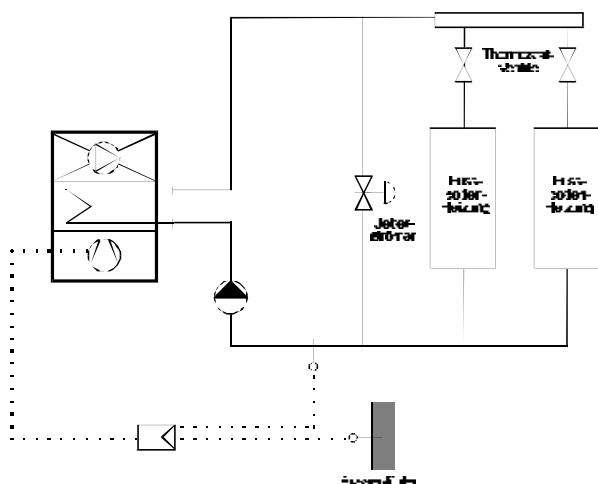


Abb. 2-44: Rücklauftemperaturregelung mit Thermostatventilen und Überströmschaltung.

Die Rücklauftemperaturregelung mit Überströmschaltung besitzt folgende Vor- und Nachteile:

- + Erfassung des Gebäudeverhaltens mittels Rücklauftemperaturfühler
- + Kostengünstig (kein Speicher, einfache Regelung)
- Aufwendige und komplizierte Einregulierung
- Eventuelle falsche Übernahme der Rücklauftemperatur in Funktion der Aussentemperatur aus der Vorlauftemperaturregelung als "Heizkurve".

Rücklauftemperaturregelung mit Niedrigtemperaturheizung

Wie in Kapitel 2.6.1 gezeigt wurde, ist eine Einzelraumregelung bei Niedrigtemperaturheizungen mit Selbstregeleffekt nicht notwendig. Es gilt:

Der Massenstrom über die Fussbodenheizung muss konstant sein (keine Thermostatventile), weil sonst die Rücklauftemperatur als Regelgrösse nicht repräsentativ ist [Afjei 96].

Somit braucht es auch keine Überströmschaltung mehr, was zu einer sehr einfachen hydraulischen Schaltung und einem einfachen Regelkonzept führt (siehe Abb. 2-45). Dieses Regelkonzept kann so-

wohl mit einem Zweipunktregler, als auch mit einem Pulsweitenmodulationsregler betrieben werden.

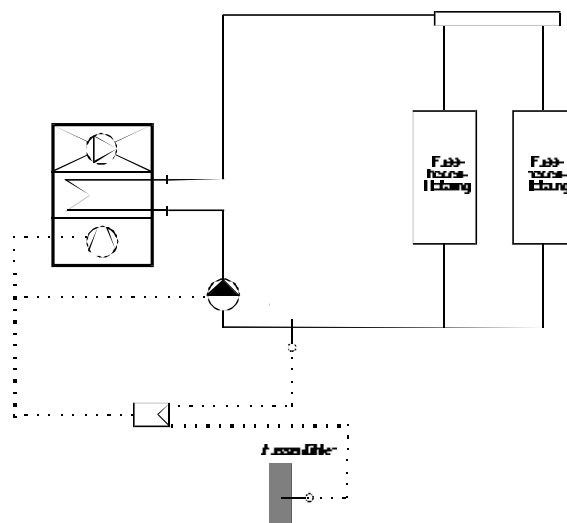


Abb. 2-45: Rücklauftemperaturregelung ohne Thermostatventile. Geeignet für den Betrieb mit einer Niedrigtemperaturfussbodenheizung.

Somit weist die Rücklauftemperaturregelung mit Niedrigtemperaturheizung die folgenden Vor- und Nachteile auf:

- + Sehr einfache Schaltung \Rightarrow kostengünstig, einfach zum Einregulieren, weniger störanfällig
- + Wärmepumpe kann mit hoher Arbeitszahl betrieben werden, weil die Wärmeabgabe auf tiefem Temperaturniveau erfolgt.
- Aufwand für die Planung ist höher (Abstimmung System \leftrightarrow Gebäude)
- Das System kann nur bei Gebäuden mit tiefem Wärmeleistungsbedarf angewendet werden.

Alle nachfolgend beschriebenen Reglerkonzepte mit Pulsweitenmodulation basieren auf einer hydraulischen Schaltung gemäss Abb. 2-45.

Das Ziel all dieser Reglerkonzepte ist die Optimierung des Betriebes, ohne den zusätzlichen Einbau von externen Peripheriegeräten (z. B. Raumtemperaturfühler). Nur so ist der Forderung nach einer kostengünstigen Anlage gerecht zu werden.

Bei der Optimierung sind verschiedene Zielsetzungen möglich und erreichbar:

- Minimaler Energiebedarf
- Maximale Behaglichkeit
- Maximale Lebensdauer des Kompressors

Generell gilt bei einer Niedrigtemperaturheizung:

Nachtabsenkung

Auf eine Nachtabsenkung kann bei einer Niedrigtemperaturheizung verzichtet werden

Die (geringe) Einsparung der Heizenergie wird durch die schlechtere Arbeitszahl, welche in der Aufheizphase am Morgen durch die erhöhten Vorlauftemperaturen zwangsläufig entsteht, wieder zunichte gemacht.

Einzelraumregelung

Der Selbstregelleffekt der Niedrigtemperaturheizung macht eine Einzelraumregelung überflüssig.

Sonnenfühler

Der Einsatz eines Sonnenfühlers, welcher bei starker Sonneneinstrahlung die Wärmepumpe abstellt und gegebenenfalls Storen betätigt, verhindert ein Überspringen der Raumlufttemperatur.

Ein Sonnenfühler ist sinnvoll bei:

- Gebäuden mit grossem Fensterflächenanteil
- Gebäuden mit kleiner Speichermasse
- Kombinationen dieser zwei Parameter

2.7.2 Regelkonzepte mit Pulsbreitenmodulation

Die Anpassung der Wärmeabgabe an die jeweilige Wettersituation erfolgt bei den Regelkonzepten mit Pulsbreitenmodulation durch das Zuführen der vom Haus benötigten Wärmeenergie in Form von einzelnen Wärmepaketen. Ein Wärmepaket ist dabei durch die Laufzeit der Wärmepumpe Δt_{LZ} und die Periodendauer Δt_p , d. h. die Zeitdauer zwischen zwei nacheinander zu erfolgenden Einschaltungen der Wärmepumpe charakterisiert (vgl. Abb. 2-46).

Im Gegensatz zu den konventionellen Regelkonzepten mit einem Zweipunktregler ist es hier möglich, die Grösse der Wärmepakete energetisch zu optimieren und ihre Verteilung über den Tag durch das Berücksichtigen der Tarifstruktur und der Sperrzeiten kostenoptimal vorzunehmen. Weil für die Raumheizung die Stillstandszeiten der Wärmepumpe im Voraus bekannt sind, kann die Wärmepumpe innerhalb dieser "Lücken" für die Warmwasseraufbereitung eingesetzt werden.

Funktionsprinzip der Pulsbreitenmodulation

Die Pulsbreitenmodulation benötigt den Heizleistungsbedarf des Hauses $\dot{Q}_{Bed}(t)$ im Zeitpunkt t zu Beginn eines jeden zu erzeugenden Wärmepakets. Die Wärmepumpe liefert in Abhängigkeit von der momentanen Aussenluft- und Vorlauftemperatur den Wärmestrom $\dot{Q}_{WP}(T_L(t), T_{VL}(t))$. Damit die vom Gebäude benötigte Wärmemenge für die Periodendauer Δt_p in Form eines Wärmepakets geliefert wird, muss die Laufzeit der Wärmepumpe Δt_{LZ} für die aktuelle Periode wie folgt berechnet werden:

$$\Delta t_{LZ} = \frac{\dot{Q}_{Bed}(t)}{\dot{Q}_{WP}(T_L(t), T_{VL}(t))} \cdot \Delta t_p \quad \text{Gl. 2-32}$$

Die Wärmepumpe wird somit zum Zeitpunkt t für die Laufzeit Δt_{LZ} eingeschaltet. Nach Ablauf dieser Zeit wird sie abgeschaltet und bleibt bis zum Erreichen der Periodendauer Δt_p ausgeschaltet. Die Periodendauer kann dabei im Allgemeinen variabel gewählt werden. Sie kann insbesondere energetisch im Sinne einer Maximierung der Arbeitszahl der Wärmepumpe optimiert werden (siehe auch "Optimierung der Periodendauer der Pulsbreitenmodulation", Anhang 5.3).

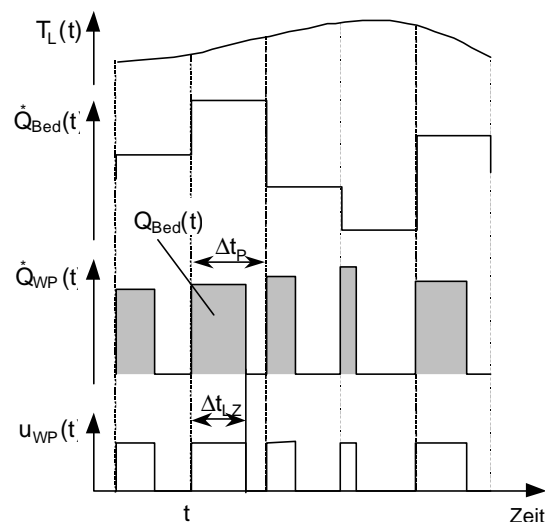


Abb. 2-46: Funktionsprinzip der Pulsbreitenmodulation.

Im Anhang 5.3 werden weitere Ausführungen zu den Regelkonzepten aufgezeigt.

3 PLANUNGSVORGEHEN

Das Planungsvorgehen wird für Niedrigenergiehäuser mit hydraulischer Wärmeverteilung gezeigt. Das Vorgehen beim Passivhausstandard ist analog, der Unterschied besteht hauptsächlich beim Wärmeverteilsystem, weil im Passivhaus in der Regel eine Luftheizung anstelle einer Fussbodenheizung eingesetzt wird.

3.1 Integrale Planung

3.1.1 Was man darunter versteht

Bei der integralen Planungsmethode werden die einzelnen Fachgebiete eines Bauvorhabens nicht voneinander getrennt geplant. Vielmehr wird das Gebäude als Gesamtsystem im Kontext mit dem Standort betrachtet. Ziel ist dabei, die optimale Lösung für dieses Gesamtsystem zu finden, wobei die Optimierungskriterien zu definieren sind.

Die optimale Gesamtlösung ist nicht gleich der Summe der optimalen Teillösungen.

Die hier vertretenen Heizsysteme setzen einen durch optimale Bauweise erzielten niedrigen Energiebedarf voraus. Dieser wird durch frühe Planungsentscheide bezüglich des Baukörpers beeinflusst. Gerade in der anfänglichen Planungsphase ist die planerische Freiheit am grössten und ein energieoptimales Konzept kann ohne grosse Kosten verwirklicht werden (Abb. 3-1).

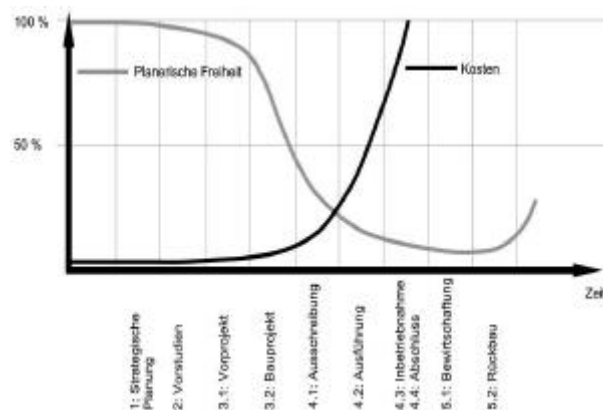


Abb. 3-1: Planerische Freiheit und Kosten in Abhängigkeit des Projektfortschritts [Baumgartner 96].

Deshalb ist die Zusammenarbeit der verschiedenen Planer in einem frühen Planungsstadium unabdingbar [Suter 86]. Anders als bei der seriellen Planung steht bei der integralen Planung nicht mehr der Architekt sondern das ganze Planungsteam dem Bauherrn gegenüber (Abb. 3-3 und Abb. 3-4). So werden die Zielvorgaben im Team mit dem Bauherrn zusammen erarbeitet.

Der Planungsprozess wird zugunsten einfacherer Systeme anspruchsvoller, weil er eine genauere Betrachtung der physikalischen Vorgänge im Innern des Gebäudes und ihr Zusammenwirken bedingt. Abb. 3-2 zeigt diese Verlagerung von Ingenieurleistungen beim Leistungsmodell 95 (LM'95) in eine frühere und spätere Projektphase gegenüber der Leistungs- und Honorarverordnung 84 (LHO 84).

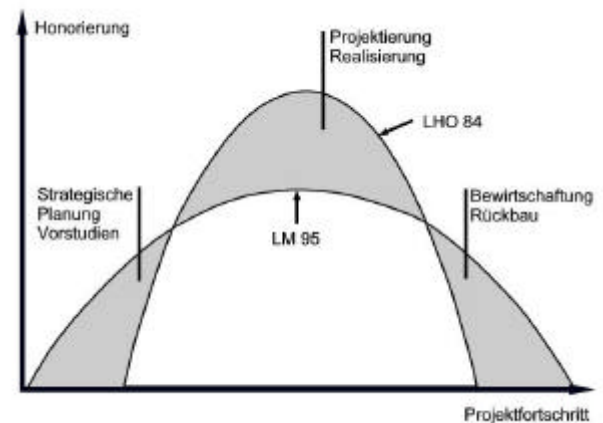


Abb. 3-2: Verlagerung der Ingenieurleistungen in eine frühe Planungsphase beim LM95 [Baumgartner 96].

Abb. 3-3 und Abb. 3-4 zeigen die Unterschiede zwischen der heute üblichen seriellen und der integralen Planung auf. Um eine integrale Planung zu verwirklichen ist die Projektorganisation entsprechend Abb. 3-4 anzupassen.

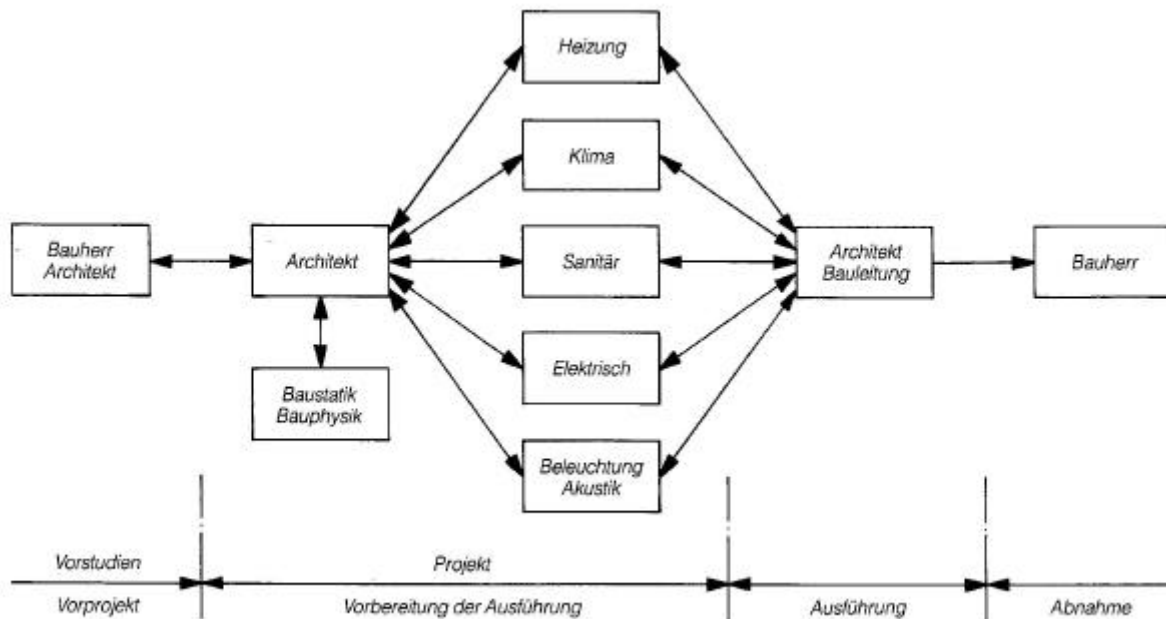


Abb. 3-3: Herkömmliche, serielle Planung [Suter 86], entspricht der LHO 84.

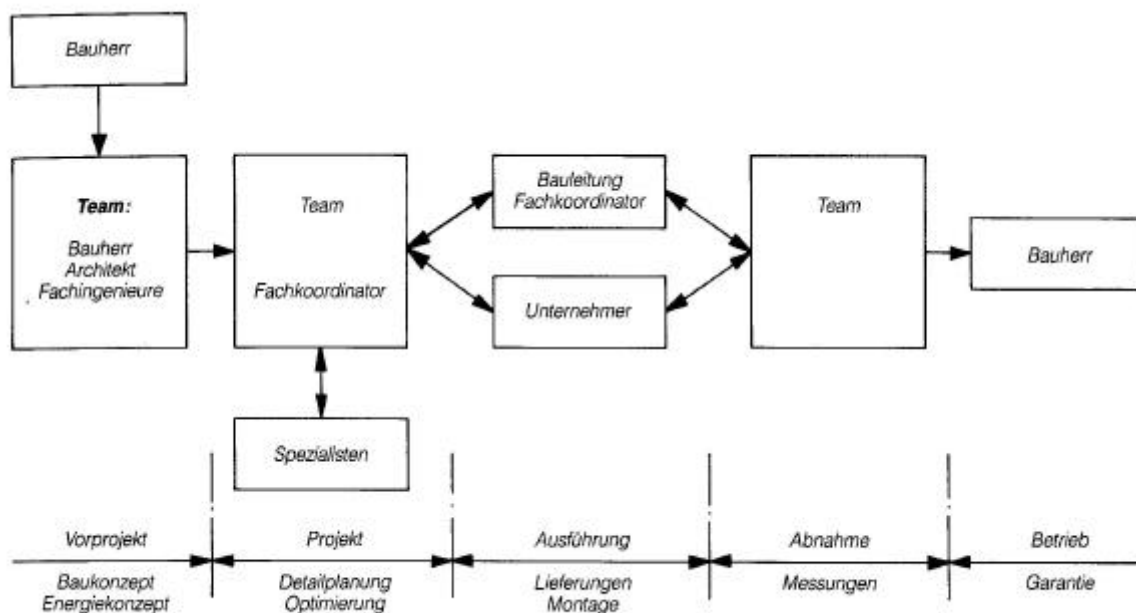


Abb. 3-4: Integrale Planung [Suter 86], entspricht dem LM'95.

3.1.2 Beispiel einer integralen Planungsüberlegung

Der Heizenergiebedarf nimmt in unseren Klimaregionen sowohl in Wohn- als auch in Gewerbebauten einen massgebenden Anteil am gesamten Energiebedarf eines Gebäudes ein (Abb. 3-5). Im Folgenden werden Überlegungen im Sinn einer integralen Planung zur Minimierung des Heizenergiebedarfes aufgezeigt. Bei allen Optimierungen muss die Behaglichkeit der Benutzer gewährleistet werden können.

Grundsätzlich können Massnahmen auf der System- oder der Gebäudeseite getroffen werden: Zum Beispiel kann zur Minimierung der zuzuführenden Energie für die Raumheizung

- eine Wärmerückgewinnungsanlage und ein Erdregister in das Lüftungssystem eingebaut werden (Systemseite) oder
- die Wärmedämmung des Gebäudes verbessert werden.

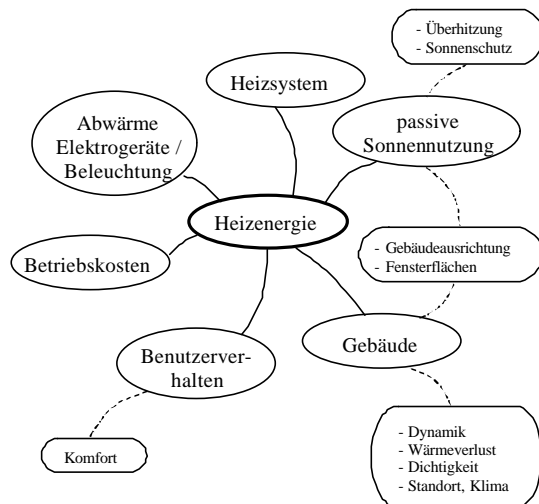


Abb. 3-5: Einflüsse auf den Heizenergiebedarf in einem Gebäude.

Eine zusätzliche Dämmung des Gebäudes ist mit erheblichen Aufwendungen verbunden, was wiederum die Umwelt zusätzlich belastet ("graue Energie", Treibhauseffekt etc.). Es könnte deshalb durchaus passieren, dass ein sehr gut wärmegeprägtes Gebäude ökologisch schlechter abschneidet als eines mit weniger Wärmedämmung und gut auf die Gebäudehülle abgestimmtem Heizungssystem. Es sollten daher immer zuerst Optimierungsmassnahmen ergriffen werden, welche ohne zusätzlichen Aufwand an Ressourcen zu einer Reduktion des Energiebedarfes führen. Viele solcher Massnahmen betreffen das Gebäudedesign und sind nicht zwangsläufig mit erhöhten Kosten verbunden. Nachfolgend sind einige Beispiele aufgeführt:

- Optimieren der solaren Gewinne durch das Festlegen der Gebäudeausrichtung:
 - Beschattung durch Nachbargebäude und topographische Gegebenheiten berücksichtigen
 - Ausrichtung der Dachflächen im Hinblick auf die Nutzung der Sonnenenergie mit einer Solaranlage festlegen
- Optimierung des Oberflächen-Volumenverhältnisses
- Optimale Fenster-Flächenanteile an den verschiedenen Orientierungen und g/U-Wert Kombination
- Optimale Fenstergrössen
- Gebäudezonierung

Der solare Energiegewinn, die Speichermasse und das Heizsystem müssen so aufeinander abgestimmt werden, dass möglichst viel solare Energie genutzt werden kann. Diese darf jedoch nicht zu einer Überschwingung der Raumtemperatur im Winter (abhängig u. a. vom Selbstregeleffekt und der Regelung des Heizsystems) oder zu einer extremen Überwärmung des Raumes im Sommer führen. Dabei spielt auch das Benutzerverhalten bei der Abschattung eine Rolle.

3.1.3 Gebäudesimulation

Wie vorangehend erläutert, erfordert die integrale Planung eine umfassende Beurteilung des Gesamtsystems bezüglich Energie und Komfort. Diese Grössen werden durch das Gebäude- und Systemverhalten bestimmt. Das Zusammenwirken aller Einzelentscheide auf dieses Gesamtsystem kann mit Hilfe von Simulationsprogrammen untersucht und bewertet werden. Damit ist es möglich, einerseits die Bauhülle und andererseits die Haustechnik gesamtheitlich (unter Einbezug der gegenseitigen Beeinflussung) zu optimieren. Dies ist aber insbesondere bei kleineren Objekten aus Aufwandgründen nicht möglich. Simulationen kommen hier nur für Einzelfragen (beispielsweise für die Bestimmung der sommerlichen Überwärmung) zum Einsatz.

3.1.4 Ökologische Beurteilung

Bis zum heutigen Zeitpunkt ist eine ökologische Gesamtbewertung mit grossem Aufwand verbunden. Zudem existiert keine übereinstimmende Konvention, welche Kriterien nun für die Bewertung herangezogen werden sollen. Trotzdem dürfen ökologische Überlegungen nicht ausser acht gelassen werden (siehe dazu auch Kapitel 2.4), weil immer mehr Entscheidungen von der Höhe der Umweltbelastung abhängig gemacht werden, worin die Energieeffizienz nur einer der massgebenden Faktoren ist.

3.1.5 Das Leistungsmodell 95 (LM'95)

Die Integrale Planung ist auch eines der Ziele des SIA-Leistungsmodells 95 (LM'95). Die Phasen, Ziele und Hauptinhalte des LM'95 sind in Tab. 3-1 aufgeführt. Wichtig bei der integralen Planung ist, dass nicht einseitig maximiert, sondern im Interesse des Ganzen optimiert wird. Eine Optimierung der solaren Gewinne darf zum Beispiel nicht auf Kosten der Behaglichkeit oder der sommerlichen Überwärmung erfolgen [E].

SIA LM'95-Phasen		Ziele	Hauptinhalte
1	Strategische Planung	<ul style="list-style-type: none"> - Definition der übergeordneten Ziele und Rahmenbedingungen - Wahl der Lösungsstrategie 	<ul style="list-style-type: none"> - Standorte bewerten - Verfügbarkeit von Energieträgern abklären - Nutzungsbedürfnisse formulieren
2	Vorstudien	<ul style="list-style-type: none"> - Machbarkeit und Standortwahl - Projektdefinition (Pflichtenheft) 	<ul style="list-style-type: none"> - Anforderungen an Nutzung und Betrieb definieren - Wirtschaftliche, betriebliche und ökologische Leitlinien festlegen - Projektorganisation festlegen - Qualitätsmanagement am Projekt festlegen - Vorstudien Haustechnik erarbeiten
3	Projektierung		
3.1	Vorprojekt	<ul style="list-style-type: none"> - Definition der optimalen baulichen Lösung 	<ul style="list-style-type: none"> - Zielvorgaben (Kennzahlen) Energieverbrauch festlegen - Energetische Gebäudeoptimierung - Betriebs- und Haustechnikkonzept erarbeiten - Investitions-, Energie- und Betriebskosten schätzen - Grobterminplanung
3.2	Bauprojekt	<ul style="list-style-type: none"> - Baureifes Projekt - Definition der Kosten und Termine 	<ul style="list-style-type: none"> - Optimieren Haustechnikanlagen und Messkonzept festlegen - Projektdarstellung (Erschliessung, Trassen, Prinzipschemas, Berechnungen Leistung, Massenströme) - Kostenvoranschlag erstellen - Feinterminplan und Baugesuch erstellen
4	Realisierung		
4.1	Ausschreibung	<ul style="list-style-type: none"> - Vergabereife 	<ul style="list-style-type: none"> - Ausschreibungsunterlagen und Materialauszug erstellen - Funktionsbeschreibung mit Plänen erstellen - Ausschreibung, Vergleich, Vergabeantrag
4.2	Ausführung	<ul style="list-style-type: none"> - Projekt- und vertrags-gemässe Realisierung des Bauwerkes und der technischen Gebäudeausrüstung 	<ul style="list-style-type: none"> - Projekt bereinigen - Ausführungspläne erstellen - Fachkoordination (technisch und räumlich) - Fachbauleitung
4.3	Inbetriebsetzung	<ul style="list-style-type: none"> - Nachweis der Vertrags-erfüllung - Ingebrauchnahme 	<ul style="list-style-type: none"> - Wartungs- und Unterhaltsdokumente erstellen - Inbetriebsetzung - Schlussabnahme mit integralen Tests
4.4	Abschluss	<ul style="list-style-type: none"> - Schlussabrechnung - Mängelbehebung 	<ul style="list-style-type: none"> - Dokumentation erstellen - Mängelbehebung während Garantiezeit - Garantieabnahmen
5	Nutzung		
5.1	Bewirtschaftung	<ul style="list-style-type: none"> - Optimale Nutzung und Erhaltung 	<ul style="list-style-type: none"> - Verbrauchsdaten und Messwerte erfassen - Vergleich mit Zielvorgaben - Veränderte Rahmenbedingungen analysieren und bewerten - Optimierungspotenzial identifizieren - Massnahmen zur BO planen und durchführen - Erfolgskontrolle
5.2	Rückbau	<ul style="list-style-type: none"> - Ökologischer Rückbau und Entsorgung 	<ul style="list-style-type: none"> - Rückbauprojekt und Ausschreibung erstellen - Rückbau überwachen - Schlussabrechnung erstellen

Tab. 3-1: Phasen, Ziele und Hauptinhalte des LM'95 (Auszüge aus [Schadegg 97]).

3.2 Strategische Planung

SIA LM 95, PHASE 1

3.2.1 Anforderungen und Zielsetzung

Die Zielsetzungen und Rahmenbedingungen betreffend

- Energie
- Ökonomie
- Ökologie

sind mit der Bauherrschaft festzulegen.

Planungsbeispiel Zielsetzung

Betreffend Energie wurden mit der Bauherrschaft die folgenden Ziele vereinbart:

- Das Gebäude soll MINERGIE-Standard erreichen.
- Die Wärmeerzeugung soll mit einer Wärmepumpe und die Wärmeabgabe mit einer Niedrigtemperaturheizung erfolgen.
- Es muss ein geeignetes und kostengünstiges Lüftungskonzept gefunden werden.

Eine Lösung, welche allen drei Zielsetzungen gerecht wird, ist nur mit einer integralen Betrachtung des Gesamtsystems "Gebäude & Haustechnik" möglich.

Der Heizenergiebedarf des Gebäudes muss mindestens die Anforderungen, welche von der Gesetzgebung her vorgegeben sind, erfüllen. Einen Anhaltspunkt, wo man (zukünftig) mit dem angestrebten Energiebedarf liegt, liefert der SIA-Absenkpfad (siehe Abb. 2-1).

Weitere mögliche Ziele, welche die gegebenen Grenzwerte unterschreiten, sind der MINERGIE- und Passivhausstandard.

Es ist wichtig, der Bauherrschaft zu kommunizieren, dass ein besserer energetischer Standard auch immer Vorteile bezüglich Komfort und Werterhaltung des Objektes bietet.

Mit der Machbarkeitsabklärung wird überprüft, ob die gesetzten Ziele erreicht werden können. Dabei sind gewisse Rahmenbedingungen wie Kosten und Standort gegeben. Allenfalls ist in einem iterativen Prozess eine Überarbeitung des Konzeptes oder eine Neuausrichtung erforderlich.

3.3 Vorstudien

SIA LM 95, PHASE 2

Das Ziel dieser Phase ist die Überprüfung der Machbarkeit und das Festlegen der Anforderungen an Nutzung und Betrieb.

Standort

Bezüglich Standort sind folgende Punkte zu berücksichtigen:

- Erschliessung mit Energieträgern (Gas, Fernwärme)
- Bei Einsatz einer Wärmepumpe ist abzuklären, ob die Bohrung für Erdwärmesonden oder das Erstellen einer Grundwasserfassung möglich ist. Zum Entzug von Wärme aus dem Erdreich ist immer eine kantonale Bewilligung einzuholen. Bei Luft/Wasser-Wärmepumpen muss festgestellt werden, ob keine unzulässige Lärmbelastung bei Nachbargebäuden auftreten.
- Erdregister: Reicht der zur Verfügung stehende Platz aus?
- Lärm- und Schadstoffimmissionen

Komfort

Mit der Bauherrschaft und den zukünftigen Bewohnern ist festzulegen:

- Standard: Mietwohnung oder Eigentumswohnung
- Behaglichkeit: Raumlufttemperaturen, Oberflächentemperaturen (Strahlungsasymmetrie wegen Fenster?), zulässige Temperaturschwankungen, maximale Sommertemperaturen (Betätigung Sonnenschutz), Luftqualität (abklären, welches Lüftungskonzept am geeignetsten ist)
- Bedienung: Temperatureinstellung raumweise gefordert? Bedienungskomfort (Fernbedienung oder in Zentrale?)
- Schallschutz: Von aussen, von Raum zu Raum (Lüftungssystem), allg. Haustechnikinstallationen

3.3.1 Machbarkeit einer Niedrigtemperaturheizung überprüfen

Als Ziel wurde die Ausführung einer Niedrigtemperaturheizung definiert. Bereits in dieser Phase muss die Konzeption der Wärmeabgabe erstellt werden, weil so notwendige Änderungen auf der Gebäudeseite frühzeitig erkannt und Optimierungen vorgenommen werden können. Dabei ist wie folgt vorzugehen (Abb. 3-6 bis Abb. 3-13):

Standort

Ein Anschluss ans Gas- oder Fernwärmenetz ist nicht möglich, weil das Objekt ausserhalb des Versorgungsgebietes liegt.

Die Bohrung zum Erstellen einer Erdwärmesonde ist gemäss einem geologischen Gutachten ausführbar. Auch eine Luft/Wasser-Wärmepumpe könnte aufgestellt werden (genügend Abstand zu Nachbargebäuden vorhanden).

Komfort

Weil der Bauherr den MINERGIE-Standard erreichen möchte, muss ein Lüftungskonzept vorhanden sein. Er würde einer technisch einfacheren Lösung den Vorzug geben und Kosteneinsparungen auf dieser Seite begrüßen. Ein Lüftungssystem darf keine störenden Geräusche verursachen.

Strahlungsasymmetrie durch kalte Oberflächen soll vermieden werden.

Das Gebäude wurde gemäss dem Ablaufschema Abb. 3-6 optimiert, so dass der Wärmeleistungsbedarf unter 30 W/m^2 gesenkt werden konnte:

Wärmeleistungsbedarf

22 W/m^2

U-Werte in $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$

Aussenwand	=	0.29
Dach	=	0.22
Boden EG	=	0.25

Fenster

Glas	U	=	0.90	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
	g	=	0.52	[-]
Kombination Glas / Rahmen				
	U	=	1.10	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

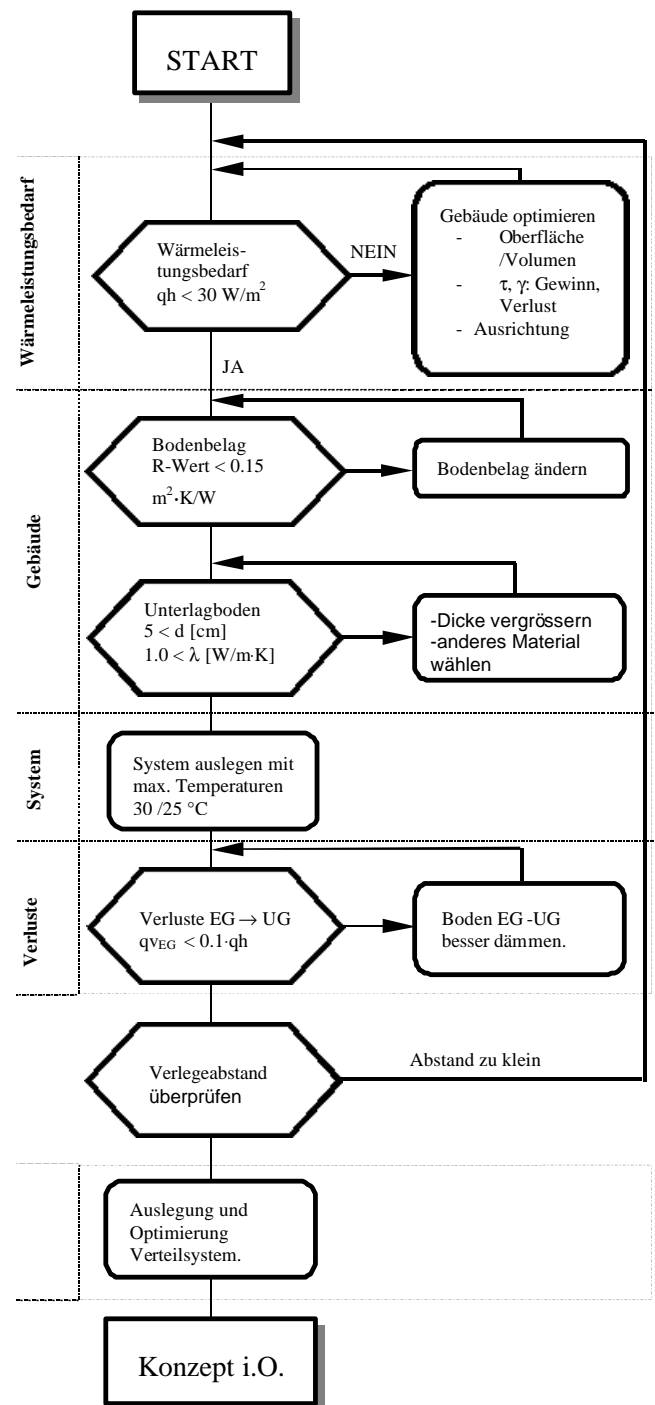


Abb. 3-6: Machbarkeitsüberprüfung.

Wärmeleistungsbedarf

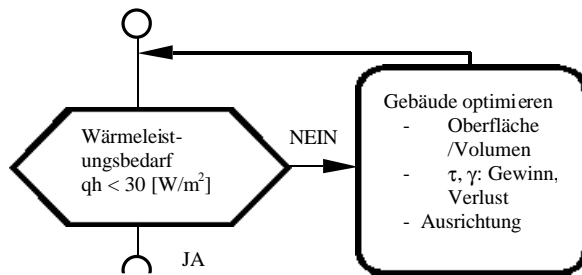


Abb. 3-7: Machbarkeitsüberprüfung: Wärmeleistungsbedarf, Gebäudeoptimierung.

Bei einer Niedrigtemperatur-Fussbodenheizung ist die maximale spezifische Heizleistung relativ klein. Deshalb muss durch Massnahmen auf der Gebäudeseite der Wärmeleistungsbedarf minimiert werden.

Der Wärmeleistungsbedarf ist durch eine gute Dämmung der Gebäudehülle zu minimieren. Die Fussbodenheizung muss den Heizbedarf auch an einem Tag ohne Solargewinne decken können.

Der Wärmeleistungsbedarf ist nach SIA 384/2 zu bestimmen.

Richtwert für den maximalen Wärmeleistungsbedarf, welcher nicht überschritten werden sollte:

$q_{hmax} = 30 \text{ W/m}^2$ [Afjei 96]:
Im Erdgeschoss wird die massgebende Leistung für die Auslegung der Heizflächen ohne den Transmissionsverlust zum Keller bestimmt.

Optimierung des Gebäudes

Wenn der Wärmeleistungsbedarf mit der vorgesehenen Variante zu hoch ist, muss die Gebäudehülle optimiert werden. Es ist dabei zu beachten, dass auch ein energetisch günstiges Gebäude einen hohen Wärmeleistungsbedarf aufweisen kann.

Optimieren von Gebäude und Haustechnik

Hinweise auf das Optimierungspotential von Gebäudehülle und Haustechnik sind der MINERGIE-Planungshilfe zu entnehmen [Fraefel 98].

Passivhaus-Technologie

Hinweise zur Planung, zum Projektierungs-Paket und zu Erfahrungen aus realisierten Projekten stellt das Passivhaus-Institut in Darmstadt (D) zur Verfügung. Dazu können auf dem Internet (www.passivhaus-institut.de) viele Informationen und Hilfsmittel bezogen werden.

Auch wenn kein Passivhaus-Standard angestrebt wird, liefern diese Hilfsmittel viele nützliche Informationen zur energetischen Optimierung von Gebäuden.

Systemrelevante Voraussetzungen Gebäude

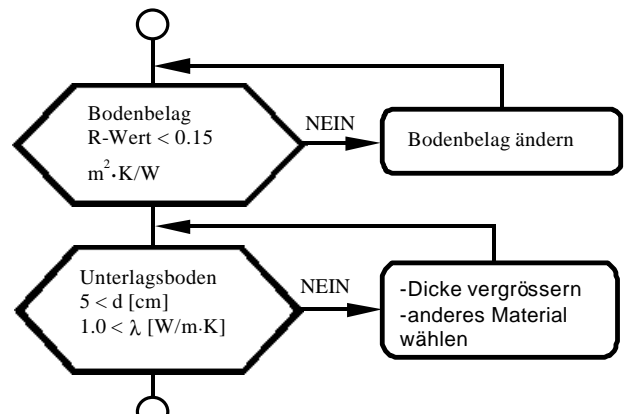


Abb. 3-8: Machbarkeitsüberprüfung: Überprüfung Bodenbelag und Unterlagboden.

Im Folgenden werden die wichtigsten gebäude-seitigen Voraussetzungen erläutert, die für ein einwandfreies Funktionieren mit dem beschriebenen System Voraussetzung sind [Afjei 96].

- **Bodenbelag:**
Der Wärmedurchgangswiderstand (R-Wert, cf. Kap 5.8) des Bodenbelages darf nicht zu gross sein. Sonst werden kleine Rohrabstände (grosser Materialaufwand) nötig oder die geforderte Abgabeleistung kann nicht erreicht werden.

Bodenbeläge mit tiefem R-Wert (geeignet)

- Klebeparkett
- Fliesen

Bodenbeläge mit hohem R-Wert (ungeeignet)

- Teppich
- Kork

- **Unterlagboden:**
Das System wird ohne technischen Speicher (Wasserspeicher) ausgeführt. Die Speicherung der Energie erfolgt im Unterlagboden. Es ist somit sehr wichtig, dass dieser eine ausreichende Masse aufweist, um lange Einschaltzeiten der Wärmepumpe zu gewährleisten.

Minimale Dicke des Unterlagbodens: 5 bis 7 cm.

Im weiteren muss auf eine gute Wärmeleitfähigkeit (λ -Wert) des Unterlagbodens geachtet werden.

Bodenbelag: Parkett

d/λ (R-Wert) = 0.09 $\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$

Es wird zudem 30 % Bedeckung mit einem 8 mm dicken Teppich eingerechnet.

Unterlagboden

Dicke d = 0.07 m

λ = 1.5 W/(m·K)

Auslegung System

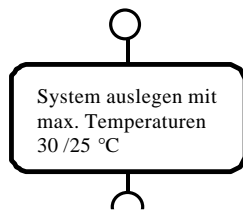


Abb. 3-9: Machbarkeitsüberprüfung: Systemauslegung.

Damit der Selbstregelleffekt funktioniert, dürfen die folgenden Auslegungstemperaturen für den Vor- und Rücklauf nicht überschritten werden:

Maximale Auslegungstemperaturen:

Vorlauftemperatur $\vartheta_{V,L,a} = 30\text{ °C}$

Rücklauftemperatur $\vartheta_{R,L,a} = 25\text{ °C}$

bei 6 Std. EW-Sperrzeit:

Vorlauftemperatur $\vartheta_{V,L,a} = 35\text{ °C}$

Rücklauftemperatur $\vartheta_{R,L,a} = 30\text{ °C}$

Mit diesen Systemtemperaturen können maximal die folgenden Leistungen abgegeben werden:

Maximale spezifische Wärmeleistungen bei einem Verlegeabstand von 5 cm:

- mit Klebeparkett ca. 30 W/m^2
- mit Fliesen ca. 40 W/m^2

⇒ Für die Überprüfung ist die max. belegbare Fläche einzusetzen.

Eine Tabelle mit detaillierten Leistungsangaben ist dem Anhang 5.8 zu entnehmen.

In üblichen Aufenthaltszonen ist die Fläche genügend gross, so dass Verlegeabstände von 15 bis 20 cm realisiert werden können. Die Wärmeabgabe ist dann entsprechend geringer. Ein Beispiel für die Berechnung ist in Kapitel 2.6.1 zu finden.

Auslegungstemperaturen

Vorlauf = 30 °C

Rücklauf = 25 °C

Selbstregelleffekt: Die Leistungsreduktion beträgt mit dieser Auslegung 15 % (bei einer Änderung der Raumlufttemperatur von 1 K).

Rohrabstände

EG Randzone 10 cm

Innenzone 20 cm

OG Innenzone 30 - 40 cm

DG Innenzone 10 cm

Badzimmer 5 cm

Badzimmer

Der Handtuchradiator wird elektrisch beheizt. Die Systemtemperaturen können so tief gehalten werden.

Verluste vom Erdgeschoss in den Keller

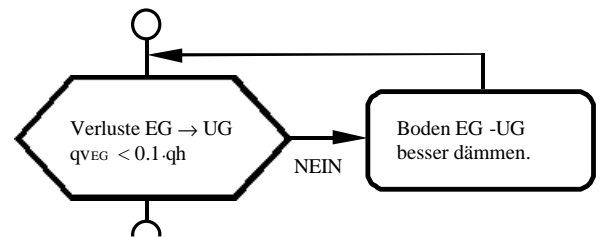


Abb. 3-10: Machbarkeitsüberprüfung: Überprüfung der Verluste EG @UG.

Verluste vom Erdgeschoss in den Keller sollten wenn möglich vermieden werden, indem das Haus unter dem Keller isoliert und der Keller somit zu einem beheizten Raum wird. In diesem Fall ist die Isolation zwischen EG und UG wie in Abb. 3-11 nicht mehr notwendig. Ist dies nicht möglich, sollte versucht werden, die Haustechnik im beheizten Raum zu platzieren.

Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf den schlechtesten Fall, einen unbeheizten Keller. Bei der Niedrigtemperaturheizung nehmen die Verluste vom Erdgeschoss in das Untergeschoss einen grösseren Anteil ein, als bei einer konventionellen Auslegung. Das folgende Beispiel verdeutlicht dies (vereinfachte Berechnung):

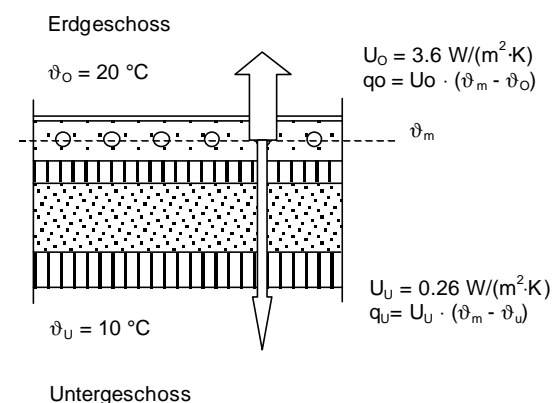


Abb. 3-11: Wärmeflüsse durch den Fussboden EG - UG mit angenommenen U-Werten.

J_o	Raumlufttemperatur im Erdgeschoss	[°C]
J_u	Raumlufttemperatur im Untergeschoss	[°C]
J_m	mittlere Temperatur in der Heizungsebene	[°C]
q_o	Wärmeabgabe nach oben (Nutzwärme)	[W/m²]
q_u	Wärmeabgabe nach unten (Verlust)	[W/m²]
U_o	U-Wert von der Rohrebene nach oben	[W/m²·K]
U_u	U-Wert von der Rohrebene nach unten	[W/m²·K]

		Niedrigtemperatur	Konventionelle Auslegung
Vorlauf- / Rücklauftemperatur	[°C]	30 / 25	45 / 30
ϑ_m	[°C]	27.1	36.6
q_o	[W/m²]	25.5	59.7
q_u	[W/m²]	4.4	6.9
$q_u / (q_o + q_u)$	[-]	0.15	0.10

⇒ Bei der konventionellen Auslegung wird der vorgeschriebene Grenzwert für den Wärmeverlust (SIA 380/1: $0.1 \cdot$ abgegebene Wärmeleistung) gerade noch eingehalten, während er bei der Niedrigtemperaturheizung bereits zu gross ist.

Je kleiner die Differenz zwischen der mittleren Temperatur der Fussbodenheizung und der Raumlufttemperatur ist, desto grösser werden anteilmässig die Verluste gegen unbeheizte Räume!

Der erforderliche untere U-Wert U_u kann wie folgt bestimmt werden:

$$I = \frac{q_u}{q_o + q_u} \quad U_u = I \cdot \frac{U_o \cdot (J_m - J_o)}{J_m - J_u} \quad \text{Gl. 3-1}$$

I Verlustverhältnis: Verlustanteil an der Gesamtwärmeabgabe der Fussbodenheizung [-]

Verlegeabstand

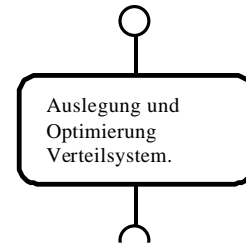


Abb. 3-12: Machbarkeitsüberprüfung: Auslegung / Optimierung des Verteilsystems.

Aus konstruktionstechnischen und wirtschaftlichen Gründen darf der Verlegeabstand der Fussbodenheizungsrohre nicht zu klein gewählt werden. Es gilt der folgende Anhaltspunkt:

Im Randzonenbereich und im Bad (nur kleine Flächen):
minimaler Verlegeabstand = 5 cm

Grosse Flächen: Verlegeabstand bis 20 cm*

- * Bei der Festlegung des minimalen Verlegeabstandes müssen die Investitionskosten beachtet werden.

Kleiner Verlegeabstand

⇒ grosse Rohrlänge

⇒ mehr Kreise notwendig

⇒ grössere Verteiler

⇒ mehr Montageaufwand

► Mehrkosten

Unter Umständen ist es günstiger, die Gebäudehülle besser zu dämmen und damit die Aufwendungen auf der Haustechnikseite tief zu halten.

Kontrolle Verlegeabstand

Im Bad muss ein Verlegeabstand von 5cm gewählt werden. Zusätzlich kann noch mit dem Handtuchradiator geheizt werden.

Im Zwischengeschoss sind sogar Abstände über 20 cm möglich. Hier ist zu beachten, dass die mittlere Oberflächentemperatur des Bodens damit tiefer ist als im Erdgeschoss oder Dachgeschoss.

Verteilsystem

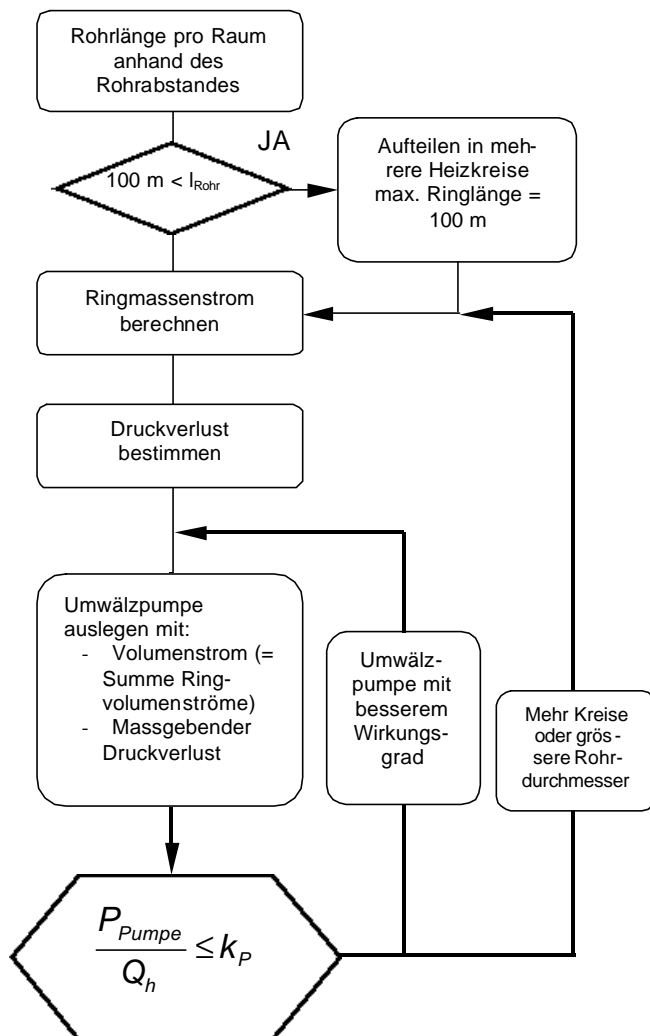


Abb. 3-13: Vorgehen zur Konzeption des Wärmeabgabesystems.

P_{Pumpe} Aufnahmeleistung der Pumpe [W]
 Q_h transportierte thermische Leistung [W]

Für die Kennzahl k_P gilt:

Für Niedrigenergiehäuser gilt etwa
 $k_P = 0.01$ [-]
 Mit Gleichstrommotoren kann dieser Wert um ca. die Hälfte auf $k_P = 0.005$ reduziert werden.

Nach [Koschütz 00] sollte der gesamte Druckabfall in den Fussboden-Schleifen nicht grösser als 12 kPa werden. Mit Abb. 2-28 kann der Druckabfall in den üblichen Heizungsrohren bestimmt werden. Mit der 100 m-Regel (maximale Rohrlänge) ist diese Forderung bei den üblichen Heizungsrohren von 16 mm normalerweise erfüllt.

- Eine Aufteilung auf mehrere Heizkreise hilft, den Druckverlust niedrig zu halten.
- Überprüfen, ob Platzbedarf für grösseren Verteilkasten vorhanden ist!
- Fussbodenheizungsrohre sauerstoffdicht und nicht kleiner als 16 mm Rohrdurchmesser wählen.

Heizkreisauflteilung:

Damit die maximale Heizkreislänge von 100 m eingehalten werden kann, müssen häufig mehrere Heizkreise pro Raum vorgesehen werden.

Dies ist insbesondere nötig:

- im Dachgeschoss bei Zimmern mit mehreren Aussenwänden
- im Erdgeschoss (Wohn- und Esszimmer)

Die Zimmer im Zwischengeschoss weisen einen kleineren Wärmeleistungsbedarf auf, so dass ein Heizkreis pro Zimmer ausreichend ist.



Abb. 3-14: Heizungsverteiler einer selbstregulierenden Fussbodenheizung ohne Thermostatventile. Die maximale Heizkreislänge von 100 m ergibt meist 2 Kreise pro Raum.

3.4 Vorprojekt

SIA LM 95, PHASE 3.1

In dieser Phase wird die optimale bauliche Lösung erarbeitet. Dazu gehören das Haustechnikkonzept sowie die energetische Gebäudeoptimierung.

3.4.1 Varianten- und Systemwahl

Im Folgenden werden verschiedene Systemvarianten für eine Niedrigtemperaturheizung mit Selbstregelleffekt ohne technischen Speicher vorgestellt.

Luft/Wasser-Wärmepumpe mit Warmwasser-Wärmepumpe

Rücklauftemperaturregelung nach Heizkurve

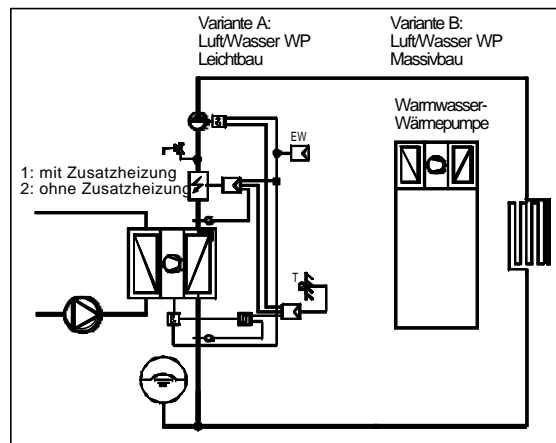


Abb. 3-15: Luft/Wasser-Wärmepumpe, Rücklauftemperaturregelung nach Heizkurve, separate Warmwasser-Wärmepumpe [Afjei 96].

Sole/Wasser-Wärmepumpe mit Beistellwassererwärmer

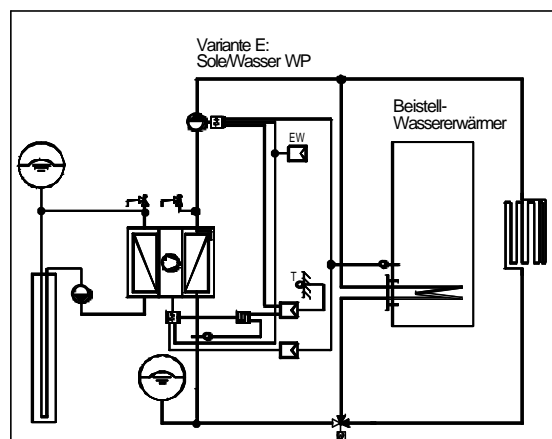


Abb. 3-16: Sole/Wasser-Wärmepumpe, Rücklauftemperaturregelung nach Heizkurve, Beistellwassererwärmer [Afjei 96].

Sole/Wasser-Wärmepumpe mit Elektro-Wassererwärmer

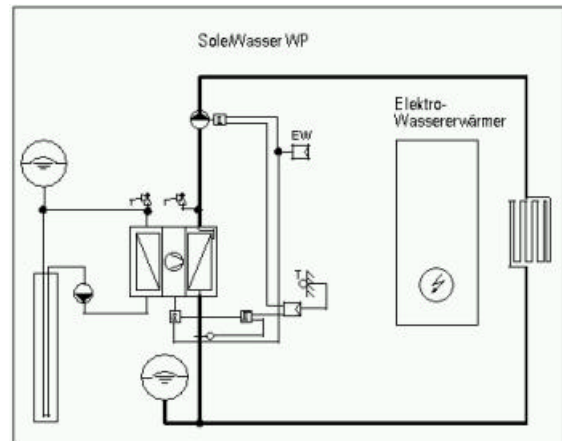


Abb. 3-17: Sole/Wasser-Wärmepumpe, Rücklauftemperaturregelung nach Heizkurve, separater Warmwasser-Elektroboiler [Afjei 96].

Energetischer Vergleich

Die Systeme von Abb. 3-15 bis Abb. 3-17 werden in Abb. 3-18 energetisch verglichen.

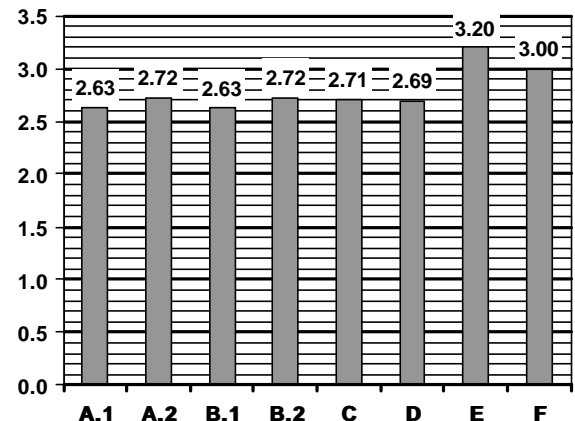


Abb. 3-18: WNG der Varianten A bis F [Afjei 96].

Legende

L/W WP	Luft/Wasser-Wärmepumpe
S/W WP	Sole/Wasser-Wärmepumpe
A.1	L/W-WP, Leichtbau, Heizkurvenregler, Warmwasser-WP, mit elektr. Zusatzheizung
A.2	L/W-WP, Leichtbau, Heizkurvenregler, Warmwasser-WP, ohne elektr. Zusatzheizung
B.1	L/W-WP, Massivbau, Heizkurvenregler, Warmwasser-WP, mit elektr. Zusatzheizung
B.2	L/W-WP, Massivbau, Heizkurvenregler, Warmwasser-WP, ohne elektr. Zusatzheizung
C	L/W-WP, Leichtbau, Zustandsregler, mit Sonnenfühler, Warmwasser-WP
D	L/W-WP, Leichtbau, Zustandsregler ohne Sonnenfühler, Warmwasser-WP
E	S/W-WP, Leichtbau, Heizkurvenregler, Warmwasser-WP
F	S/W-WP, Leichtbau, Heizkurvenregler, Beistellboiler

Sole/Wasser-Wärmepumpe

Diese Variante schneidet energetisch am besten ab, obwohl die mittlere Soletemperatur (+2.1 °C) unter der mittleren Lufttemperatur (+3.6 °C) liegt.

Luft/Wasser-Wärmepumpe

Der Grund für die tieferen Jahresarbeitszahlen und den tieferen Verdampfertemperaturen dieser Varianten liegt hauptsächlich bei den Verlusten für die Enteisung.

Der Einsatz einer Zusatzheizung bei der Luft/Wasser-Wärmepumpe erlaubt die Wärmepumpe kleiner zu dimensionieren. Der Elektrizitätsaufwand für die Heizung erhöht sich dabei nur unwesentlich.

Voraussetzung für den Einsatz einer elektrischen Zusatzheizung ist deren korrekte Zu- und Abschaltung. Ansonsten ist mit einem erheblichen Mehrverbrauch zu rechnen [Afjei 96].

Wenn die Warmwasseraufbereitung auch über die Heizungswärmepumpe erfolgt, verschlechtert sich die Jahresarbeitszahl aufgrund der höheren Kondensationstemperaturen entsprechend.

Kostenvergleich

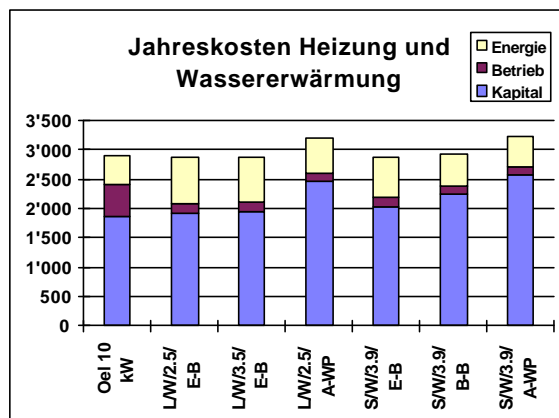


Abb. 3-19: Vergleich der Jahreskosten verschiedener Systeme für Wärmebereitstellung und Warmwasseraufbereitung [Afjei 96].

Legende:

- Öl-Kombikessel 10 kW
- Luft/Wasser-Wärmepumpe mit 2.5 kW Heizleistung bei L7/W35 und 2kW-Heizstab als Zusatzheizung in Kombination mit einem Elektroboiler
- Luft/Wasser-Wärmepumpe mit 3.5 kW Heizleistung bei L7/W35 in Kombination mit einem Elektroboiler
- Luft/Wasser-Wärmepumpe mit 2.5 kW Heizleistung bei L7/W35 und 2kW-Heizstab in Kombination mit einer Abluft-Wärmepumpe (= Variante A1)
- Sole/Wasser-Wärmepumpe mit 3.9 kW Heizleistung bei S0/W35 in Kombination mit einem Elektroboiler
- Sole/Wasser-Wärmepumpe mit 3.9 kW Heizleistung bei S0/W35 in Kombination mit einem Beistellboiler (= Variante F)
- Sole/Wasser-Wärmepumpe mit 3.9 kW Heizleistung bei S0/W35 in Kombination mit einer Abluft-Wärmepumpe (= Variante E)

Interessant ist dabei, dass bei kleinen Leistungen ein Elektrozusatz ähnlich teuer kommt wie eine grössere, monovalent dimensionierte Wärmepumpe.

Wärmepumpen: Leistungsregelung

Einstufig

Diese Wärmepumpen werden vor allem im kleinen Leistungsbereich eingesetzt.

- + einfach, preisgünstig
- Leistungsanpassung nur mit Taktbetrieb möglich \Rightarrow das System muss eine ausreichende Speicherkapazität aufweisen (bei Rücklauf-temperaturregelung). Sonst ist ein technischer Speicher einzusetzen.

Mehrstufig

Einsatz in mittleren bis grossen Anlagen. Der Kompressor kann mit zwei Leistungsstufen betrieben werden. Mehrere Kompressoren können zur Leistungsregelung verwendet werden.

- + Längere Laufzeit durch bessere Anpassung an die Last
- teurer als einstufige Wärmepumpe
- zur Zeit sind noch keine Kleinaggregate auf dem Markt erhältlich.

Drehzahlregelung

Mittels eines Frequenzumformers wird die Drehzahl des Kompressormotors variiert.

- + stufenlose Anpassung
- zusätzlicher Verlust des Frequenzumformers
- Kosten Frequenzumformer

Zweistufige Luft/Wasser-Wärmepumpe

Es wurde die Frage untersucht, ob es lohnenswert wäre, eine zweistufige Wärmepumpe einzusetzen, weil

- durch die tiefere Anzahl Einschaltungen eine gleichmässige Wärmeabgabe der Bodenheizung zu erwarten ist
- durch den besseren Wärmeerzeugungsnutzungsgrad Energie eingespart werden kann.

Die Berechnungen wurden mit einer Luft/Wasser-Wärmepumpe durchgeführt. Weil zur Zeit auf dem Markt in diesem Leistungsbereich keine zweistufigen Aggregate erhältlich sind, ist diese Variante als Bedarfsabklärung zu betrachten.

Abb. 3-20 zeigt das Einschaltverhalten der ein- und zweistufigen Wärmepumpe. Die Aussentemperatur schwankt in dieser Periode zwischen 2.5 und 6 °C, was einem typischen Temperaturbereich im Schweizerischen Mittelland entspricht. Die Rücklauftemperatur, welche bei dem gewählten System die Regelgrösse ist, liegt zwischen 22 °C und 23 °C. Die eingekreisten Stellen markieren diejenigen Zeitpunkte, bei denen die

Wärmepumpe durch die EW-Rundsteuerung abgestellt oder verzögert eingestellt wird.

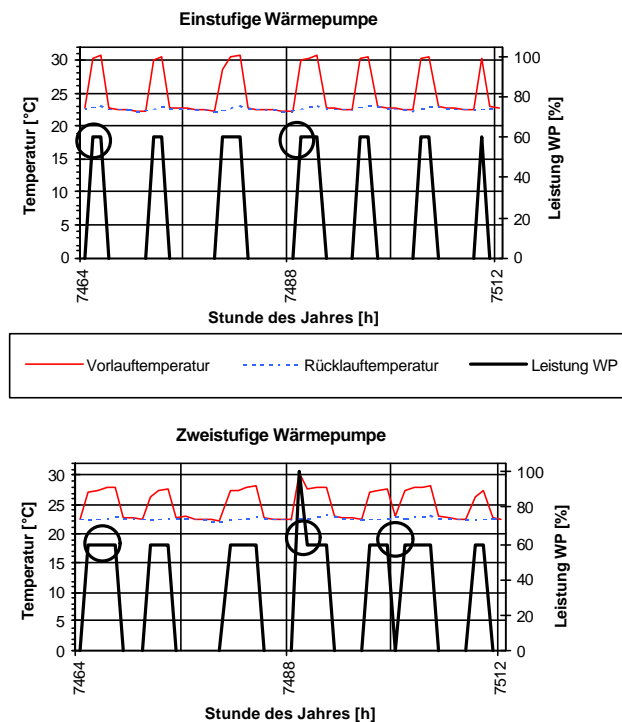


Abb. 3-20: Verhalten der Anlage mit der zweistufigen Wärmepumpe während einer Zweitagesperiode in der Übergangszeit [Afjei 98a].

Die Zuschaltung der zweiten Stufe erfolgt jeweils nach der EW-Sperrzeit und ist nur während kurzer Zeit in Betrieb, um die Systemtemperatur wieder auf den geforderten Wert anzuheben.

Aus den Untersuchungen kann das folgende Fazit gezogen werden [Afjei 98a]:

- Während der gesamten Heizperiode werden die Einschaltungen um knapp 10 % reduziert. In der Übergangszeit sind es sogar noch weniger. Eine massgebliche Verlängerung der Lebensdauer des Kompressors ist dadurch nicht zu erwarten.
- Die Betriebszeit steigt um ca. 40 % und die Jahresarbeitszahl um 20 %. Durch die gute Bauhülle des Gebäudes ist das absolute Sparpotential jedoch gering. Finanziell dürfte sich die Kostenreduktion durch die Energieeinsparung kaum lohnen, weil dieser die Mehrinvestition für den zweistufigen Kompressor mit dem Frequenzumformer gegenübersteht.
- Ein zweistufiger Betrieb mit einem Leistungsverhältnis von 1:2 müsste separat betrachtet werden. Grundsätzlich verschiedene Resultate sind jedoch nicht zu erwarten.
- Zwischen der ein- und der zweistufigen Variante bestehen keine Unterschiede bezüglich den Behaglichkeitswerten. Beide Varianten weisen einen PPD-Wert von 6.5 auf. Eine zweistufige Wärmepumpe ist aus diesem Grund nicht zu bevorzugen.

Energetisch betrachtet ist die zweistufige Wärmepumpe eine lohnenswerte Alternative. Zur Zeit sind in diesem Leistungsbereich jedoch keine zweistufigen Aggregate erhältlich. Finanziell interessant dürfte diese Variante nur sein, wenn der Preis nicht wesentlich über dem einer einstufigen Wärmepumpe liegt.

Technischer Speicher

Gründe für ein System ohne Speicher sind nach [Afjei 96]:

- Besserer Systemnutzungsgrad, tiefere Investitionskosten, kleinerer Platzbedarf, weniger Fehlermöglichkeiten.
- Bei kurzen Sperrzeiten des Elektrizitätswerks sind ohne Speicher keine Komforteinbußen zu erwarten.

Ein Speicher ist nötig wenn die Speichermasse nicht ausreichend ist, um die minimale Laufzeit der Wärmepumpe zu gewährleisten.

Warmwasseraufbereitung

Temperatur

Die Temperatur sollte möglichst tief sein: 45 °C genügen. Bereits bei einem Sollwert von 55 °C anstelle von 50 °C im Tagesmittel sinkt die Jahresarbeitszahl um ca. 10 %. Eine zweistündige Erhöhung des Sollwertes auf 60 °C einmal pro Woche verhindert die Legionellenbildung [Afjei 96]. Der Einsatz einer elektrischen Begleitheizung für die Verteilleitungen ist nicht sinnvoll und sollte vermieden werden.

Beistellwassererwärmer

- + Kleiner Zusatzaufwand, wenn eine Einbindung in das Heizungssystem möglich ist.
- Die Arbeitstemperatur der Wärmepumpe muss zum Aufladen angehoben werden.

Geschieht die hydraulische Einbindung über einen externen Plattentaucher ist eine zusätzliche Umwälzpumpe notwendig. Im Wärmeübertrager resultiert eine Temperaturdifferenz. Ein innerer Wärmeübertrager (Heizregister) ist deshalb einem externen Wärmeübertrager vorzuziehen.

Separater Abluftwärmepumpenboiler

- + Zusammen mit Mauerventilen eine kostengünstige Kombination für Warmwasser und Lüftung (inkl. Entfeuchtung).
- + Ist einfacher in Warmzone aufzustellen (⇒ Verluste nutzbar), weil keine Verbindung zur Heizung besteht.

Speicherverluste

Folgende Punkte zur Minimierung der Speicherverluste sind zu beachten [Afjei 96]:

- Wasssererwärmer nicht überdimensionieren: 200 l reichen für ein EFH
- Gute Wärmedämmung: Satt anliegend, inklusive Dämmung der Anschlussstutzen
- Kurze Verbindungsleitungen zu den Bezügern
- Wasssererwärmer in Warmzone aufstellen, so dass die Verluste zur Raumheizung genutzt werden können.

Solare Wasssererwärmung

Mit Solarkollektoren kann die Warmwasseraufbereitung im Sommer autonom erfolgen. In der Übergangszeit und im Winter dienen sie zur Unterstützung (siehe [Blum 96]).

Ein geeigneter Standort (Dach \Rightarrow Ausrichtung, Neigung) sollte sichergestellt und ein zusätzlicher Stutzen am Warmwasserspeicher sollte vorgesehen werden.

Konzept Lüftung

Es ist abzuklären, ob eine Lüftungsanlage notwendig ist. Dies kann zum Erreichen des gewünschten Energiestandards und zur Sicherstellung eines komfortablen Raumklimas bzw. zur Vermeidung von Bauschäden der Fall sein.

Der Planungshilfe "Die Wohnungslüftung im MINERGIE-Haus" [Fraefel 99] können Hinweise zur Konzeptionierung der Lüftungsanlage entnommen werden.

Erdregister

Ein Erdregister wird häufig in Verbindung mit einer Wohnungslüftung eingesetzt. Die Aussenluft kann dadurch vorgewärmt und der Energieverbrauch somit gesenkt werden.

Planungshinweise zur Konzeption und grundsätzliche Überlegungen sind in [Fraefel 99] und [Zimmermann 99] enthalten. Eine rechnerische Auslegung und Überprüfung von Erdregistern ist mit dem Programm WKM [M] möglich.

Wärmerückgewinnungssystem

Eine energetische Bewertung des Wärmerückgewinnungssystems ist im Gesamtsystem vorzunehmen. Der Vergleich der Systemnutzungsgrade ermöglicht die Beurteilung verschiedener WRG-Konzepte.

Systemwahl

Es wird eine Sole/Wasser-Wärmepumpe gewählt (Variante E, Abb. 3-16). Dies ist energetisch gesehen eine sehr gute Lösung, die allerdings teuer ist. Das Brauchwarmwasser wird mit einem Beistellwasssererwärmer aufbereitet. Die Aufladung erfolgt einmal täglich auf 50 °C im Niedertarif. Durch die Wahl einer tiefen Warmwassertemperatur wird der Verschlechterung der Jahresarbeitszahl entgegengewirkt.

Zum Erreichen des MINERGIE-Standards muss ein Lüftungskonzept vorhanden sein. Es wird eine kostengünstige Variante in Form eines Einzelraumlüftungsgerätes im EG gewählt. In den Obergeschossen ist ein Abluftventilator im Bad mit Mauerventilen vorgesehen.

3.5 Bauprojekt

SIA LM 95, PHASE 3.2

3.5.1 Auslegung Wärmeabgabesystem

Konzeptionelle Änderungen an der Gebäudehülle sind in dieser Phase meistens nicht mehr möglich. Deshalb muss das Wärmeabgabesystem in seiner Grundkonzeption bereits in Phase 2 ausgelegt werden. Nur so besteht die Möglichkeit der Optimierung Gebäudehülle \leftrightarrow Haustechnik.

In dieser Phase wird die Auslegung überprüft und wenn nötig Anpassungen vorgenommen.

3.5.2 Raumlufttemperaturen

Die Raumlufttemperaturen sind als Garantiebestandteil mit der Bauherrschaft festzulegen. Spezielle Beachtung sollte dabei dem Badzimmer geschenkt werden. Bei Niedrigenergiehäusern sind die internen Wärmeströme zwischen den Zimmern mit unterschiedlicher Raumtemperaturen oft grösser als die Transmissionsverluste. Grosse Temperaturunterschiede innerhalb des Hauses sind deshalb gar nicht realisierbar. Oft muss somit, in Abweichung zur Norm SIA 384/2, auch im Badzimmer auf eine Auslegung auf 22 °C Raumtemperatur verzichtet werden:

- Badzimmer weisen einen höheren, spezifischen Wärmeleistungsbedarf auf (interne Wärmeströme!)
- Die belegbare Fläche ist wegen Einbauten reduziert (Badewanne, WC usw.)
- Die nutzbare Übertemperatur der Bodenheizung ist bei 22 °C Raumtemperatur prozentual wesentlich geringer.

Beispiel:

Temperatur Vorlauf = 30 °C

Rücklauf = 25 °C

Raumlufttemperatur = 20 °C

\Rightarrow Übertemperatur = 7.5 K

Bei einer Raumlufttemperatur von 22 °C beträgt die Übertemperatur nur noch 5.5 K, was einer Reduktion von ca. 25 % entspricht!

3.5.3 Massenstrom Fussbodenheizung

Bei einer selbstregelnden Fussbodenheizung mit einer maximalen Auslegungs-Vorlauftemperatur von 30 °C ist die theoretisch tiefste Rücklauftemperatur gleich der Raumlufttemperatur. In der Praxis wird sie jedoch höher sein, so dass bei einer Raumlufttemperatur von 20 °C mit einer Spreizung unter 10 K zu rechnen ist. Für die Auslegung mit den Temperaturen 30 °C / 25 °C (resp. 35 °C / 30 °C bei 6 Stunden EW-Sperrung) ergibt sich eine Spreizung von nur 5K. Trotz des tieferen spezifischen Wärmeleistungsbedarfes ergeben sich damit grössere Massenströme als bei einer konventionellen Auslegung.

Weil die Antriebsenergie der Umwälzpumpe mit der dritten Potenz des Massenstromes zunimmt, muss der Pumpenauslegung, einer sorgfältigen Druckverlustberechnung, dem hydraulischen Abgleich sowie einem minimalen Rohrdurchmesser besondere Beachtung geschenkt werden.

Wird die Umwälzpumpe zu gross ausgelegt und die Anlage hydraulisch nicht abgeglichen, so ergeben sich Systemnutzungsgrad-Reduktionen von 10 % bis 20 % (siehe Abb. 3-21)!

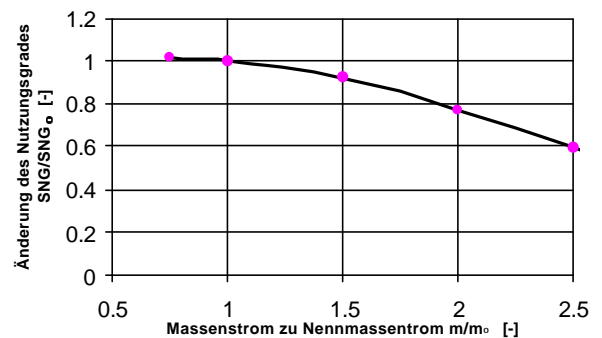


Abb. 3-21: Relative Änderung des Systemnutzungsgrades SNG_h für eine Luft/Wasser-WP in Abhängigkeit des Massenstroms der Fussbodenheizung.

Ist zudem die Wärmeabgabe, so wie in diesem Beispiel, nicht über einen Speicher hydraulisch entkoppelt, so müsste die Ein- und Ausschalthysterese der Wärmepumpe dem Massenstrom der Fussbodenheizung angepasst werden. Da dies in der Regel nicht geschieht, führen grössere Massenströme zu mehr Einschaltzyklen mit den entsprechenden Taktverlusten der Wärmepumpe.

Hydraulischer Abgleich

Es wird eine detaillierte Druckverlustberechnung mit Bestimmung der Ventil-Voreinstellungen am Verteiler gemacht. Damit die Wassermenge überprüft werden kann, müssen Durchflussmesser am Verteiler vorgesehen werden.

3.5.4 Auslegung der Wärmepumpe

Niedrigenergiehäuser haben dank der besseren Wärmedämmung längere Zeitkonstanten (cf. 2.5.4) und einen grösseren, prozentualen Anteil an freier Wärme. In der Leistungsbedarfsberechnung nach SIA 384/2 sollte dies unbedingt berücksichtigt werden (Erhöhung der Auslegungsaussentemperatur und teilweise Berücksichtigung der freien Wärme - kalte Tage sind meist klar!). Eine Überdimensionierung der Wärmepumpe ist in jedem Fall zu vermeiden (siehe auch 3.5.3). Dies wäre aus folgenden Gründen nachteilig:

- Höhere Vorlauftemperaturen \Rightarrow Reduktion der Arbeitszahl.
- Stärkerer Taktbetrieb mit Taktverlusten.

Die Wärmepumpe wird gegenüber der berechneten Leistung nach SIA 384/2 (inkl. Sperrzeiten-Zuschlag) um 20 % kleiner ausgelegt.

3.6 Inbetriebsetzung

SIA LM 95, PHASE 4.3

Die Inbetriebsetzung der Niedrigtemperaturheizung erfordert besondere Aufmerksamkeit in den folgenden Punkten:

3.6.1 Schaltdifferenz Wärmepumpe

Der Einstellung der richtigen Schaltdifferenz des Zweipunktreglers kommt besondere Bedeutung zu [Afjei 96]:

- Durch die kleine Übertemperatur des Systems wirken sich Veränderungen stark auf die Wärmeabgabe aus. Die Folge ist, dass unzulässig hohe oder tiefe Raumlufttemperaturen entstehen.
- Eine zu kleine Schaltdifferenz hat ein häufiges Ein- und Ausschalten der Wärmepumpe zur Folge (Verschleiss). Wird die Schaltdifferenz zu gross eingestellt, dann sinkt die Systemtemperatur zu tief ab, bis die Wärmepumpe wieder einschaltet. Die richtige Einstellung ist abhängig von der Speichermasse des Fussbodens und des Raumes.

Eine Schaltdifferenz zwischen 1 und 2K hat sich als optimal erwiesen [Afjei 96].

3.6.2 Rücklaufftemperaturfühler

Aus dem vorangehenden Kapitel ist ersichtlich, dass eine optimale Einstellung der Schaltdifferenz in einem relativ schmalen Band liegt. Daraus geht auch hervor, dass die Rücklaufftemperatur möglichst genau gemessen werden muss.

Abb. 3-22 zeigt, wie stark die abgegebene Wärmeleistung bei einem Fehler der Rücklaufftemperatur ändert:

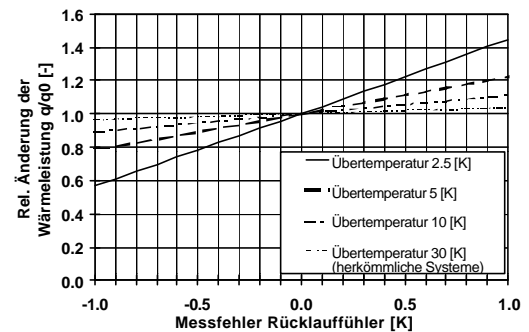


Abb. 3-22: Änderung der Wärmeabgabe bei einer Änderung der Rücklaufftemperatur [Afjei 96].

Bei der Fühlermontage ist daher auf die folgenden Punkte besonders zu achten [Afjei 96]:

- Ausreichende Umströmung des Fühlers gewährleisten. Bei Anlagefühlern ist auf einen guten Kontakt mit der Rohrwandung zu achten (keine Farbe, Wärmeleitpaste).
- Gute Dämmung des Fühlers, um Störgrößen durch die Umgebungstemperatur zu vermeiden.

Systematische Fehler, also solche, die immer in der gleichen Grösse und Richtung auftreten, können durch eine Sollwertkorrektur ausgeglichen werden.

Ein wichtiger Punkt bei der Inbetriebsetzung bildet die Überprüfung der ausgeführten Arbeiten. Die richtige Schaltdifferenz (3.6.1) und die korrekte Montage des Rücklaufftemperaturfühlers (3.6.2) sind bei diesem System von besonderer Wichtigkeit und bedürfen deshalb spezieller Kontrolle.

4 BEISPIELE NIEDRIGENERGIE- UND PASSIVHAUS

4.1 Auswahl von drei Beispielen

Im Folgenden werden zwei Niedrigenergiehäuser und ein Passivhaus umfassend vorgestellt. Dazu gehören typische Angaben von (berechneten) Gebäudedaten sowie detaillierte Messdaten. Daraus können Kennzahlen wie der System- oder Wärmeerzeugungsnutzungsgrad abgeleitet werden. Im weiteren wird die Behaglichkeit untersucht und in einer Tabelle sind Kapital-, Betriebs- und Energiekosten zusammengestellt.

Bei der Auswahl der drei Beispielhäuser wurde darauf geachtet, dass es sich um "normale", gängige Häuser handelt. So sind beispielsweise die beiden Niedrigenergiehäuser vorfabrizierte Serienhäuser (Abb. 4-1). Alle drei betrachteten Häuser sind kostengünstig realisiert worden. Dasselbe gilt für die Haustechnik. Moderne Häuser mit fortschrittlicher Haustechnik sollen auch für junge Familien mit limitiertem Budget erschwinglich sein.

Bei der Betrachtung der Beispiele stellt man fest, dass die Häuser bezüglich Energieverbrauch und Komfort nicht überall Spitzenwerte erreichen. Hauptziel war das Erreichen eines guten Kosten-/Nutzenverhältnisses ohne grosse Abstriche an der Qualität. Entsprechend sind die vorgestellten Beispiele nicht als Lösungen zu verstehen, bei denen das maximal Mögliche realisiert wurde, sondern als wirklichkeitsgetreue Wohnhäuser anzuschauen.

Auch darf nicht vergessen werden, dass das individuelle Benutzerverhalten einen wesentlichen Einfluss auf den Energieverbrauch hat. So liegt beispielsweise in zwei der drei Häuser die mittlere Raumlufthtemperatur um 2 bis 3 K höher als die angenommene Raumlufthtemperatur von 20 °C. Diese Temperaturdifferenz bewirkt eine Erhöhung des Energieverbrauchs um 20 – 30 %!



Abb. 4-1: Montage des vorfabrizierten Serienhauses in Grafstal.

Am Schluss dieses Kapitels, in Unterkapitel 4.5 sind die Schlussfolgerungen aus den Messungen an den folgenden Beispielen zusammengetragen.

4.2 Luft - Wasser - Wärmepumpe mit Abluft - Wärmepumpenwassererwärmung

4.2.1 Systembeschreibung



Abb. 4-2: MINERGIE-EFH in Schötz.

Standort	6247 Schötz (LU)
Höhe über Meer	508 m
Heizgradtage $HGT_{12/20}$	3294 K Tage/a
Energiebezugsfläche	155 m ²
Nettovolumen	365 m ³
U-Werte: Wand	0.18 W/(m ² K)
Dach	0.2 W/(m ² K)
Fenster	1.3 W/(m ² K)
g-Wert Fenster	0.62
Fensterflächen: Süd	14.9 m ²
Ost	5.8 m ²
Nord	1.1 m ²
West	10.9 m ²
Beschattungseinrichtung	keine
Gebäudewärmebedarf ($t_i = 23\text{ °C}$)	350 MJ/(m ² a)
Wärme-Gewinn-Verlust-Verhältnis (γ)	3.22
Temperaturen: beheizt (EG und OG)	23 °C
unbeheizt (Keller)	16 °C
Heizwärmebedarf nach SIA 380/1 (bei $n = 0.3\text{ h}^{-1}$, $t_i = 20\text{ °C}$)	181 MJ/(m ² a)
Heizwärmebezug ($t_i = 23\text{ °C}$)	242 MJ/(m ² a)
Wärmeleistungsbedarf nach SIA 384/2 (für 20/-9 °C)	3.64 kW
Vorlauf / Rücklauf-temperatur Auslegung; real	30/25 °C; 35/30 °C
Luft/Wasser-WP:	
Heizleistung A7/W35	7.2 kW / COP 4.0
Heizleistung A-7/W35	4.6 kW / COP 2.5
Regelungsart der Heizung	Aussentemperaturabhängige Rücklauf-temperaturregelung
Sperrzeiten	2 ⁰⁰ – 4 ⁰⁰ , 10 ⁰⁰ – 12 ⁰⁰ und 17 ⁰⁰ – 19 ⁰⁰ Uhr
Leistung Heizungspumpe	Stufe 1: 35 W
Abluft-WP-Boiler:	
Heizleistung A20W50	1000 W
Leistungsbedarf	408 W
Warmwasser: Temperatur Bezug	50 °C
Leistung Abluftventilator	48 W
Abluftmenge	140 m ³ /h

Tab. 4-1: Kennwerte und Auslegedaten Schötz.

Das freistehende Einfamilienhaus umfasst zwei beheizte Geschosse mit einer Energiebezugsfläche von 155 m² und einen unbeheizten Keller. Der Energiebedarf für die Raumheizung wird mit einer Luft/Wasser-Wärmepumpe gedeckt. Die Wärmepumpe ist ohne Pufferspeicher und Mischventil direkt mit dem Wärmeabgabesystem verbunden. Die Wärmeabgabe erfolgt über eine Fussbodenheizung mit den Arbeitstemperaturen 35/30 °C. Zur Aufbereitung des Warmwassers wird ein Abluft-WP-Boiler eingesetzt. Damit kann die warme Abluft zur Aufbereitung des Warmwassers genutzt werden. Mit dem in der Abluft-Wärmepumpe integrierten Ventilator wird die Abluft aus dem WC und der Küche im EG sowie aus dem Bad im OG abgesogen. Durch den dabei erzeugten Unterdruck im Gebäude strömt die Frischluft über sechs Mauer-ventile ins Innere (siehe Abb. 4-3).

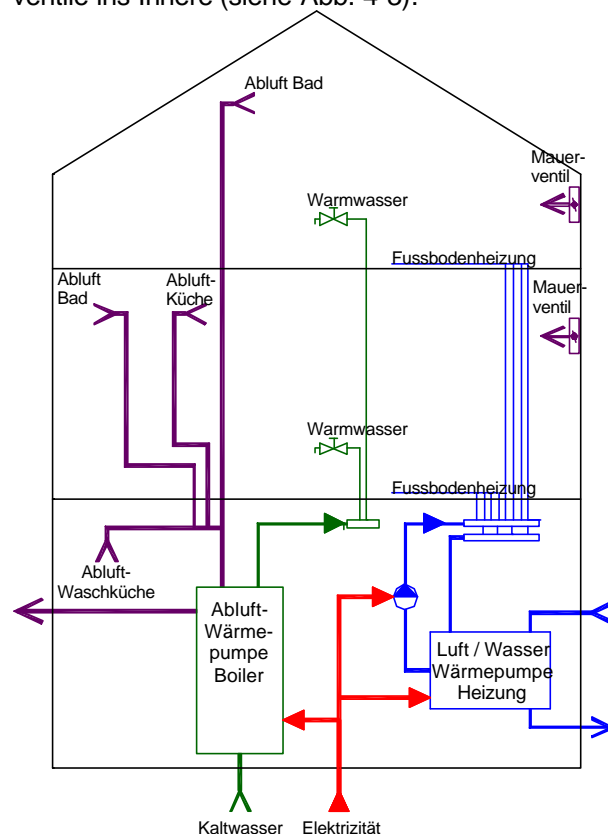


Abb. 4-3: Systemschema.

Regelung

Die Luft/Wasser-Wärmepumpe wird über eine aussentemperaturabhängige Rücklauf-temperaturregelung ohne Raumtemperaturfühler ein- bzw. ausgeschaltet. Die Fussbodenheizung verfügt über keine Thermostatventile. Durch das lokale Elektrizitätswerk wird der Wärmepumpenbetrieb zwischen 2⁰⁰ – 4⁰⁰, 10⁰⁰ – 12⁰⁰ und 17⁰⁰ – 19⁰⁰ Uhr gesperrt. Das Prinzipschema und die Regelung sind in Abb. 4-4 ersichtlich.

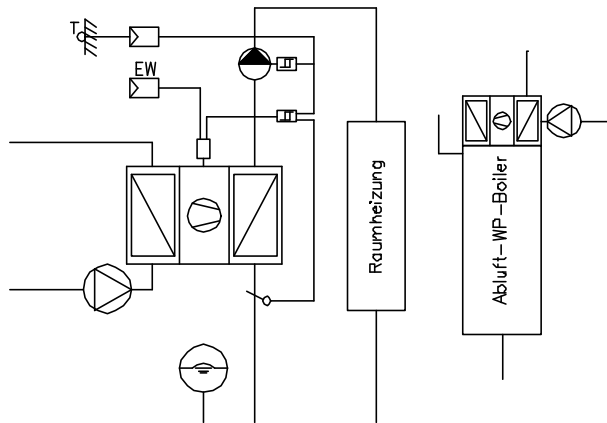


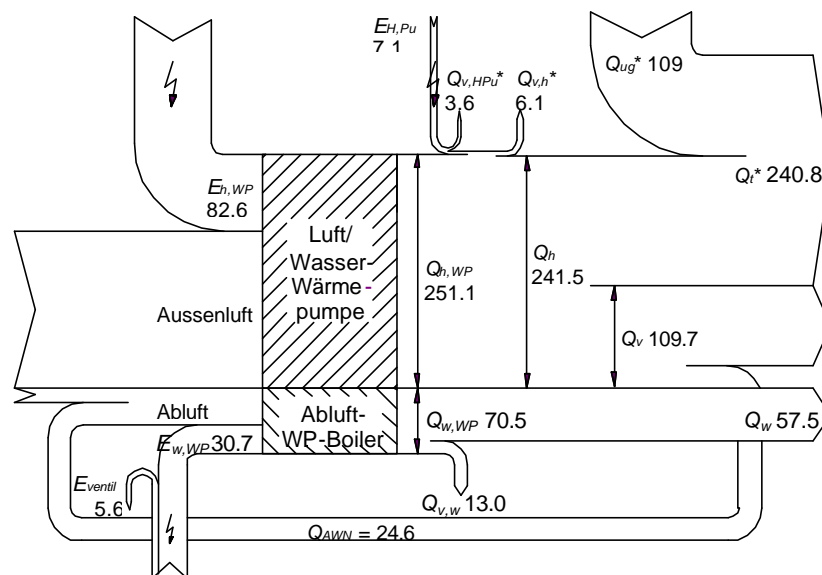
Abb. 4-4: Prinzipschema und Regelung.

4.2.2 Energiebilanzierung

Der gemessene Energieverbrauch an nicht erneuerbarer Energie liegt ca. 56 % über den Werten

nach dem Minergie-Nachweis. Hauptverantwortlich für diese grosse Differenz zwischen Planung und Realität sind folgende Gründe:

- Die effektive mittlere Raumtemperatur beträgt 23 °C. Die Erhöhung der Raumtemperatur gegenüber der Auslegung um 3K hat auf der Erzeugerseite einen Mehrverbrauch an Elektrizität von 41 % zur Folge (höherer Heizwärmebedarf und tiefere Arbeitszahl der Wärmepumpe aufgrund der höheren Arbeitstemperaturen).
- Der mittlere Luftwechsel beträgt 0.4 h⁻¹ statt 0.3 h⁻¹ gemäss Planung.
- Die auftretenden Verluste (z. B. Bereitschaftsverluste beim Warmwasserspeicher) sind je nach Heizsystem im Wirkungsgrad des Erzeugers berücksichtigt oder werden, wie im Falle einer Wärmepumpe, vernachlässigt. Der gemessene Energiebedarf des Abluft-Wärmepumpen-Boilers beinhaltet die Verluste.



$E_{h,WP}$	Energiebedarf Luft/ Wasser-Wärmepumpe
$E_{h,Pu}$	Energiebedarf Heizungspumpe
$E_{w,WP}$	Energiebedarf Abluft-WP-Boiler (inkl. Abluftventilator) während der Boilerladezeit
E_{ventil}	Energiebedarf Abluftventilator ausserhalb der Boilerladezeit
$Q_{h,WP}$	Heizwärme Luft/ Wasser-Wärmepumpe
Q_h	Heizwärmebedarf
$Q_{v,h}$	Wärmeverluste Heizwasserverteilung
$Q_{v,hPu}$	nicht nutzbare Wärmeverluste Heizungspumpe
Q_w	Wärmebedarf für Warmwasser
$Q_{v,w}$	Bereitschaftsverluste Boiler
$Q_{w,WP}$	Heizwärme Abluft-WP-Boiler
Q_{AWN}	Abwärmenutzung
Q_v	Lüftungsverluste
Q_{ug}	genutzte Gewinne durch Sonne, Personen und Elektrizität (nach SIA 380/1)
Q_t	Transmissionswärmeverluste

Abb. 4-5: Energieflussdiagramm "Schötz" für die Monate Mai 1999 bis April 2000, Werte in MJ/(m²a), mittlere Raumtemperatur = 23 °C, EBF = 155 m², * berechnete Werte.

Wärmeerzeugungs- und Systemnutzungsgrade

Wärmeerzeugungsgrad Heizung WNG_h

$$WNG_h = \frac{Q_{h,WP}}{E_{h,WP}} = \underline{\underline{3.04}}$$

Wärmeerzeugungsgrad Warmwasser WNG_w

$$WNG_w = \frac{Q_{w,WP}}{E_{w,WP}} = \underline{\underline{2.30}}$$

Systemnutzungsgrad gesamter Wärmebezug SN_{hw}

$$SN_{hw} = \frac{Q_{h,WP} + Q_{w,WP}}{E_{h,WP} + E_{h,Pu} + E_{w,WP} + E_{Venti}} = \underline{\underline{2.55}}$$

Systemnutzungsgrad Heizung SN_h

$$SN_h = \frac{Q_{h,WP}}{E_{h,WP} + E_{h,Pu}} = \underline{\underline{2.80}}$$

Systemnutzungsgrad Warmwasser SN_w

$$SN_w = \frac{Q_{w,WP}}{E_{w,WP} + E_{Venti}} = \underline{\underline{1.94}}$$

Im Systemnutzungsgrad Warmwasser SN_w ist der Energieverbrauch des Abluftventilators zu reinen Lüftungszwecken enthalten. Ohne Berücksichtigung dieser Energieaufwendung steigt der Nutzungsgrad SN_w um 18 % auf 2.3.

Betriebsunterbrechungen Raumheizung

Durch das lokale EW wird dreimal am Tag für je 2 Stunden die Wärmepumpe gesperrt. Diese Unterbrechungen haben auf die Raumlufttemperatur keinen Einfluss. Trotzdem muss beachtet werden, dass durch die tiefen Vorlauftemperaturen keine hohen Fussboden-Oberflächentemperaturen entstehen. Deshalb ist unter Umständen ein behagliches Raumklima bei längeren Unterbrechungen nur mit entsprechender Fussbekleidung gewährleistet. Dies sollte bereits in der Planungsphase mit den zukünftigen Bewohnern besprochen werden.

Behaglichkeit

Als wichtigste Komfortgrößen wurden die Raumlufttemperatur, die relative Luftfeuchtigkeit und als Indikator für Luftqualität das Kohlendioxid (CO_2) kontinuierlich gemessen. Die Wirksamkeit der Lüftung wurde mit der Passiv-Tracergas-Methode ermittelt.

Die mittlere Raumlufttemperatur betrug im Erdgeschoss 23.1 °C und im Obergeschoss 22.3 °C. Im Obergeschoss schwankte die Temperatur deutlich weniger als im Erdgeschoss. Dies ist auf den Einfluss der Sonneneinstrahlung und das Fehlen von Storen zurückzuführen (siehe Abb. 4-6). An sonnigen Tagen stieg im Erdgeschoss die Temperatur

auf bis zu 28 °C, im Obergeschoss lagen die Spitzenwerte aufgrund der kleineren Fensterfläche ca. 2 K tiefer. Der Einfluss der Aussentemperatur ist gering.

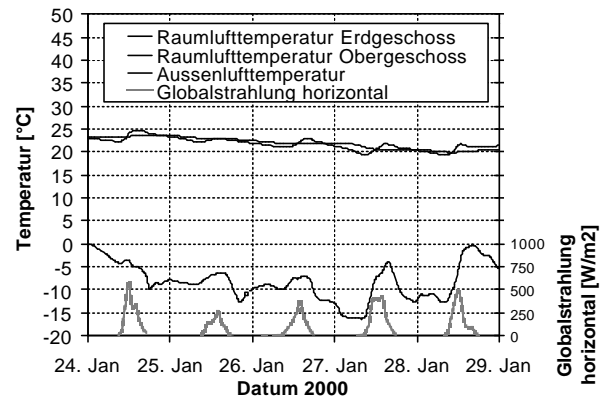


Abb. 4-6: Aussen- und Raumtemperaturverlauf sowie Globalstrahlung horizontal während der kältesten Periode.

Während der gesamten Heizperiode unterschreitet die Luftfeuchtigkeit den behaglichen Bereich von 30 %r.F. während ca. 7 Stunden. Die mittlere Luftfeuchtigkeit betrug ca. 37 %r.F.

Der CO_2 -Mittelwert während den Wintermonaten Oktober 1999 bis April 2000 (740 ppm) war um ca. 14 % höher als während den Sommermonaten Mai 1999 bis September 1999 (647 ppm).

Abgesehen von vereinzelten Spitzenwerten schwankt der CO_2 -Wert im Bereich zwischen 500 ppm und 900 ppm. Die Spitzenwerte übersteigen selten die Komfortgrenze von 1500 ppm, erreichen in Ausnahmefällen 2000 ppm, und treten nur kurzfristig bei intensiver Raumbelastung auf (siehe Abb. 4-7). Die Konzentration sinkt bei Verringerung der Personenzahl rasch wieder ab. Dies deutet auf eine effiziente Durchlüftung des Raumes mit der Abluftanlage hin.

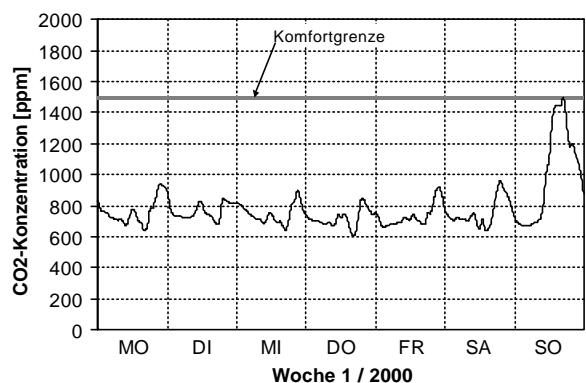


Abb. 4-7: Typischer Verlauf der CO_2 -Konzentration über eine Woche.

Mit der Passiv-Tracergas-Messung wurden die Luftvolumenströme zwischen dem Erdgeschoss, dem Obergeschoss und der einströmenden Aussenluft ermittelt. Während der Heizperiode betrug der mittlere Luftwechsel im Gebäude 0.40 h^{-1} (EG = 0.43 h^{-1} , OG = 0.36 h^{-1}).

4.2.3 Kosten

L/W/4.6/A-WP		Monovalente Luft/Wasser-WP mit 4.6 kWth (bei L-7/W35) + Abluft-WP-Wassererwärmer			
Kapitalkosten		Nutzung	Investition	Annuität	
Zinssatz	5.0%	Jahre	Fr.	Fr.	
	Wärmequelle				
	Bauarbeiten	30	1'500.00		97.58
	Zu- u. Abluftkanäle	15	800.00		77.07
	Wärmeerzeugung				
	Wärmepumpe inkl. Regler	15	9'850.00		948.97
	Montage der WP	15	990.00		95.38
	Einregulierung	15	450.00		43.35
	Elektriker komplett	30	800.00		52.04
	Wärmeverteilung				
	Niedrigtemp. 30/25 Grad (Installation)	30	8'970.00		583.51
	Warmwasseraufbereitung				
	Abluft-WP-Wassererwärmer	15	4'660.00		448.96
	Kanäle, Schalldämpfer	30	1'430.00		93.02
	Mauerventile (6 Stück)	15	1'035.00		99.71
	Montage+Inbetriebnahme	15	3'200.00		308.30
	Planung (SIA384/2, WP-Wahl, Pumpen)	30	2'000.00		130.10
	Unterstützungsbeiträge				
	Total Kapitalkosten		35'685.00		2'978.00
Betriebskosten					Kosten Fr.
	durchschn. Unterhaltskosten				150.00
	Total Betriebskosten				150.00
Energiekosten	80.4 MJ/m2a Elektrizitätsverbrauch Heizung,Warmwasser,Lüftung 155 m2 Energiebezugsfläche	Menge kWh	Preis Fr./kWh		Kosten Fr.
	Elektrizität				
	0.38 Niedertarifanteil Elektrizität im Niedertarif	1315	0.10		136.81
	0.62 Hochtarifanteil Elektrizität im Hochtarif	2146	0.16		341.25
	Fixkosten				
	Zählergebühr				57.60
	Total Energiekosten				535.66
Jahreskosten exkl. Mwst.			35'685.00		3'663.66

4.3 Erdwärmesonden - Wärmepumpe mit Beistellboiler

4.3.1 Systembeschreibung



Abb. 4-8: MINERGIE DEFH in Grafstal.

Standort	8310 Grafstal (ZH)
Höhe über Meer	556 m
Heizgradtage $HGT_{12/20}$	3308 K Tage/a
Energiebezugsfläche	174 m ²
Nettovolumen	390 m ³
U-Werte: Wand	0.35 W/(m ² K)
Dach	0.26 W/(m ² K)
Fenster	1.4 W/(m ² K)
Fensterflächen: Süd	14.8 m ²
Ost	7.14 m ²
Nord	0 m ²
West	3.5 m ²
Beschattungseinrichtung	Sonnenstoren
Gebäudewärmebedarf ($t_i = 22\text{ °C}$)	328 MJ/(m ² a)
Wärme-Gewinn-Verlust-Verhältnis (γ)	2.9
Zeitkonstante t (cf Kapitel 2.5.4)	60 h
Temperaturen: beheizt (EG, OG, DG)	22 °C
unbeheizt (Keller)	13 °C
Heizwärmebedarf nach SIA 380/1 ($n = 0.3\text{ h}^{-1}$, $t_i = 20\text{ °C}$)	215 MJ/(m ² a)
Heizwärmebezug ($t_i = 22\text{ °C}$)	208 MJ/(m ² a)
Wärmeleistungsbedarf nach SIA 384/2 (für 20/-11 °C)	5.0 kW
Vorlauf / Rücklauftemperatur Auslegung; real	30/25 °C; 34/29 °C
Sole/Wasser-WP: Heizleistung B0/W35	4.9 kW / COP 4.6
Erdwärmesonde: Sole	Aethylenglykol (25 %)
Sondenart	32 mm doppel-U
Bohrtiefe	100 m
Regelungsart der Heizung	Aussentemperatur-abhängige Rücklauf-temperaturregelung
Leistungen: Umwälzpumpe EWS-	69 W
Kreislauf	49 W
Heizungspumpe	
Warmwasser: Temperatur	50 °C
Bezug	38 Liter/(Person-Tag)
Einzelraumlüftungsgerät:	
Leistung Ventilatoren	8 W
Abluftvolumenstrom	ca. 30 m ³ /h
Temperatur-Änderungsgrad WRG	ca. 50 %

Tab. 4-2: Kennwerte und Auslegedaten Grafstal.

Beim Gebäude handelt es sich um ein Eck-Reihen-einfamilienhaus mit 174 m² beheizter Fläche auf drei Geschossen und einem unbeheizten Keller. Die Wärme für die Raumheizung und das Warmwasser wird mit einer Sole/Wasser-Wärmepumpe erzeugt, welche primärseitig mit einer Erdwärmesonde verbunden ist. Mit einem Umschaltventil wird von Heiz- auf Warmwasserbetrieb umgestellt. Die Beheizung des Hauses erfolgt über eine Fussbodenheizung mit den Arbeitstemperaturen 34/29 °C.

Von Haus aus wird auf eine mechanische Lüftungsanlage verzichtet. Bei der Pilotanlage wurde jedoch nach dem ersten Betriebsjahr im Wohnzimmer (EG) ein Einzelraumlüftungsgerät und in den Obergeschossen an geeigneten Stellen Mauerventile in die Aussenwände eingebaut, sowie der Abluftventilator im Badezimmer im 1. Obergeschoss durch einen stärkeren ersetzt. Mit dem Abluftventilator wird die verbrauchte Abluft aus den beiden Obergeschossen abgesogen und ins Freie geführt. Durch den dabei entstehenden Unterdruck im Innern kann die frische Aussenluft durch die Mauerventile kontrolliert ins Gebäude strömen.

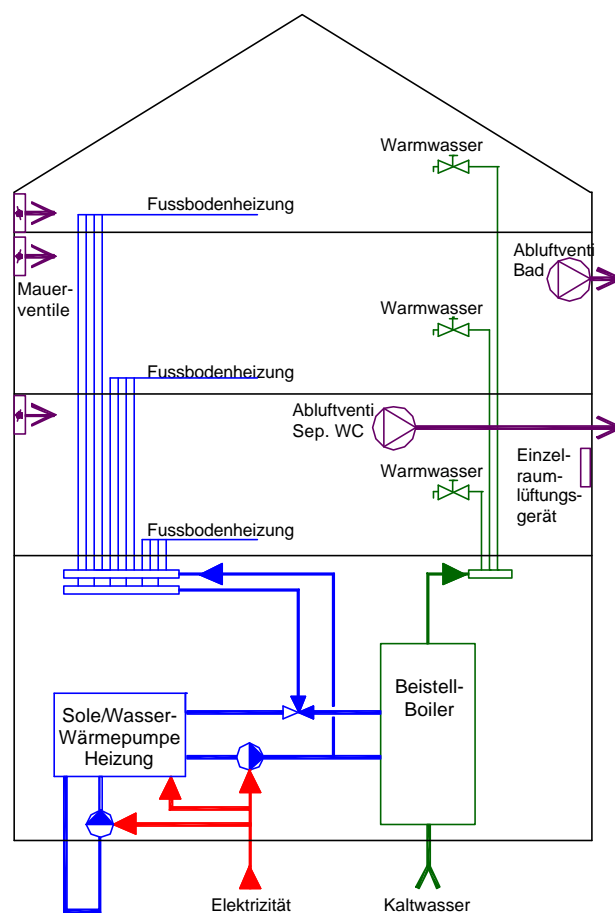


Abb. 4-9: Systemschema.

Regelung

Die Sole/Wasser-Wärmepumpe wird über eine aus-sentemperaturabhängige Rücklauftemperaturregelung ohne Raumtemperaturfühler ein-/ausgeschaltet. Die Fussbodenheizung verfügt über keine Thermostatventile. Um 2⁰⁰ Uhr wird die Boilerladung freigegeben. Während der Wasseraufbereitung steigt die Vorlauftemperatur von 34 °C auf 55 °C.

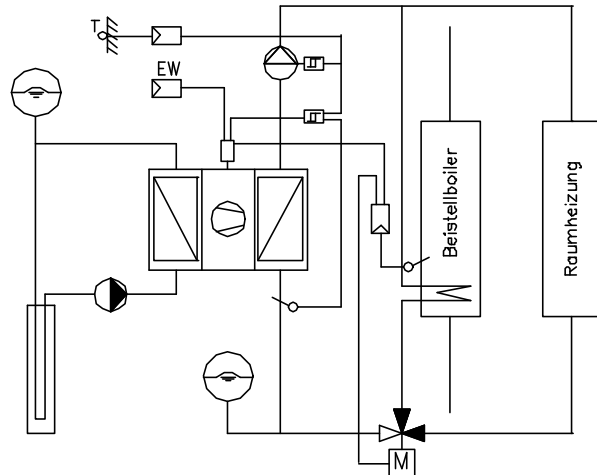


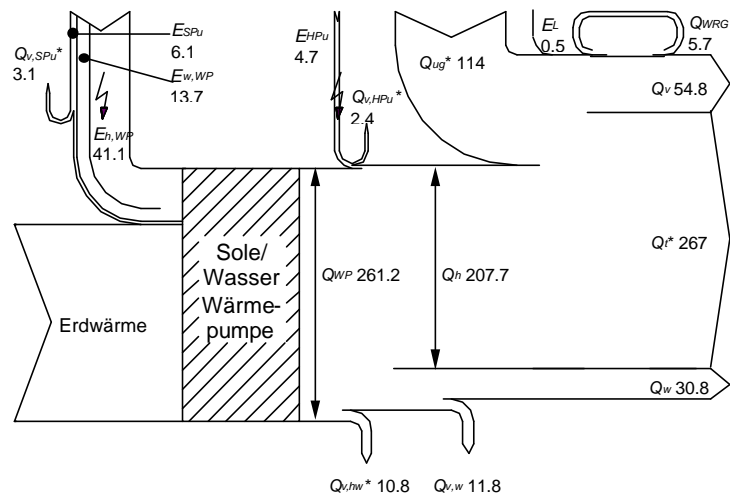
Abb. 4-10: Prinzipschema und Regelung.

4.3.2 Energiebilanzierung

Obwohl die effektive Raumtemperatur um 2.2 K höher als die Auslegungstemperatur von 20 °C war, lag der gemessene Heizwärmebedarf mit 207.7 MJ/(m²a) unter dem Planungswert von 215 MJ/(m²a).

Auffallend tief war der Warmwasserverbrauch. Die vierköpfige Familie verbrauchte während einem Jahr nur gerade 30.9 MJ/(m²a) Warmwasser. Dies ergibt einen Pro-Kopf-Verbrauch von 1340 MJ/Person und liegt damit um 55 % unter dem Nutzenergiebedarf für Warmwasser nach SIA 380/1 von 3000 MJ/Pa. Die Warmwassertemperatur beträgt 50 °C.

Der prozentuale Anteil der Bereitschaftsverluste am Nutzenergiebedarf für Warmwasser liegt aufgrund des geringen Warmwasserverbrauchs dementsprechend hoch bei 38 %. Umgerechnet auf einen Verbrauch von 3000 MJ/Person betragen die Bereitschaftsverluste noch ca. 17 %.



$E_{h,WP}$	Energiebedarf Wärmepumpe für reinen Heizbetrieb
$E_{w,WP}$	Energiebedarf Wärmepumpe für reinen Warmwasserbetrieb
E_{Hpu}	Energiebedarf Heizpumpe
E_{Spu}	Energiebedarf Umwälzpumpe Erdwärmesondenkreislauf
E_L	Energiebedarf Einzelraumlüftungsgerät
Q_{WP}	Heizwärme Wärmepumpe
Q_h	Heizwärmebedarf
$Q_{\dot{h}}$	Wärmeverluste Heizwasserverteilung
Q_w	Wärmebedarf für Warmwasser
$Q_{v,w}$	Bereitschaftsverluste Boiler
$Q_{v,Hpu}$	nicht nutzbare Wärmeverluste Heizpumpe
$Q_{v,Spu}$	nicht nutzbare Wärmeverluste Umwälzpumpe Erdwärmesondenkreislauf
Q_v	Lüftungswärmeverluste
Q_{WRG}	Wärmerückgewinnung Einzelraumlüftungsgerät
Q_{ug}	genutzte Gewinne durch Sonne, Personen und Elektrizität (nach SIA 380/1)
Q_t	Transmissionswärmeverluste

Abb. 4-11: Energieflussdiagramm "Grafstal" für die Monate Mai 1999 bis April 2000, Werte in MJ/(m²a), mittlere Raumtemperatur = 22.2 °C, EBF = 174 m², * berechnete Werte.

Wärmeerzeugungs- und Systemnutzungsgrade

Wärmeerzeugungsgrad WNG

$$WNG = \frac{Q_{WP}}{E_{h,WP} + E_{w,WP} + E_{SPu}} = \underline{\underline{4,29}}$$

Systemnutzungsgrad SNG_{hw}

$$SNG_{hw} = \frac{Q_{WP}}{E_{h,WP} + E_{w,WP} + E_{HPu} + E_{SPu} + E_L} = \underline{\underline{3,95}}$$

Die Leistungszahl der Wärmepumpe alleine beträgt 4.76. Der Anteil der Hilfsaggregate am gesamten Energieverbrauch liegt damit bei ca. 20 %.

Systemnutzungsgrad Heizung SNG_h

$$SNG_h = \frac{Q_{vhw} + Q_h}{E_{h,WP} + E_{h,SPu} + E_{h,HPu}} = \underline{\underline{4,36}}$$

wobei $E_{h,SPu}$ und $E_{h,HPu}$ die Energiebezüge der Umwälzpumpen bei Heizbetrieb sind.

Systemnutzungsgrad Warmwasser SNG_w

$$SNG_w = \frac{Q_{vW} + Q_w}{E_{w,WP} + E_{w,SPu} + E_{w,HPu}} = \underline{\underline{2,76}}$$

wobei $E_{w,SPu}$ und $E_{w,HPu}$ die Energiebezüge der Umwälzpumpen bei Warmwasserbetrieb sind.

Verglichen mit dem reinen Heizbetrieb verschlechtert sich der Nutzungsgrad bei reinem Warmwasserbetrieb wegen der um 20 K höheren Vorlauftemperatur um etwa 37 %.

Raumheizung

Die Wärmepumpe wird über eine aussentemperaturgeführte Rücklaufregulierung ein- und ausgeschaltet. Die Schaltdifferenz liegt bei 2 K. An sehr kalten Tagen werden Laufzeiten von mehreren Stunden mit höchstens drei Einschaltungen erreicht. In der Übergangszeit mit wärmeren Aussentemperaturen wird die Wärmepumpe bis zu sechs mal pro Tag geschaltet. Die minimalen Laufzeiten betragen noch ca. 1.5 Stunden.

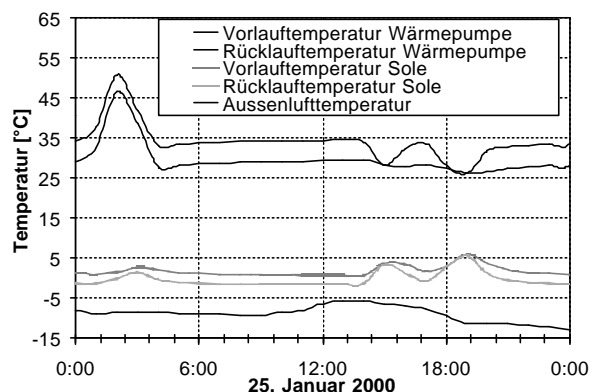


Abb. 4-12: Temperaturverläufe Aussentemperatur, Vor-/ Rücklauf Heizwasser und Sole an einem sehr kalten Tag.

Behaglichkeit

Die Raumlufttemperaturen betrugen im Mittel im Erdgeschoss 23.5 °C, im Obergeschoss 20.8 °C und im Dachgeschoss 22.2 °C. Im Obergeschoss sank die Temperatur zum Teil unter 20 °C (siehe Abb. 4-13). Dies wurde von den Bewohnern jedoch durch Drosselung der Heizkreise eingestellt und gewünscht. Mit der Heizungsanlage hätte die Raumtemperatur, wie im Erd- und Dachgeschoss, problemlos während der ganzen Heizperiode deutlich über 20 °C gehalten werden können. Dank einer Beschattungseinrichtung ist der Einfluss der Sonneneinstrahlung gering.

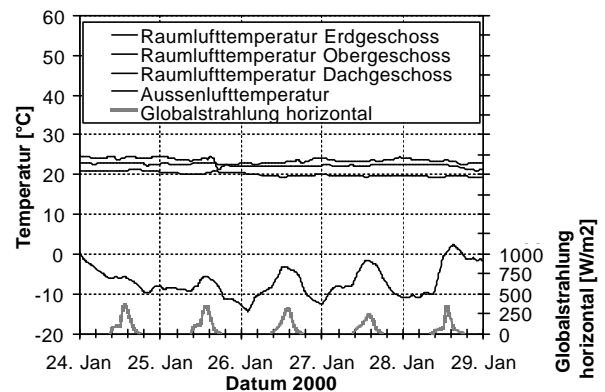


Abb. 4-13: Aussen- und Raumtemperaturen, sowie Globalstrahlung horizontal während der kältesten Periode.

Die mittlere relative Luftfeuchtigkeit während der Heizperiode 1999/2000 betrug 38 %r.F. Die Behaglichkeitsgrenze von 30 %r.F. wurde an 15 Stunden unterschritten.

Luftqualität mit/ohne Einzelraumlüftung

Ursprünglich wurde auf eine kontrollierte Wohnungslüftung verzichtet. Die Auswertungen der CO₂- und der Luftwechsel-Messung nach der Heizperiode 98/99 zeigten jedoch, dass aufgrund der dichten Bauweise die natürliche Lüftung durch Fugen nicht ausreicht, um eine anhaltend gute Luftqualität sicherzustellen. Daher wurde nachträglich eine Wohnungslüftung eingebaut.

Abb. 4-14 zeigt den CO₂-Gehalt im Wohnzimmer über eine Woche vor und nach dem Einbau des Einzelraumlüftungsgerätes.

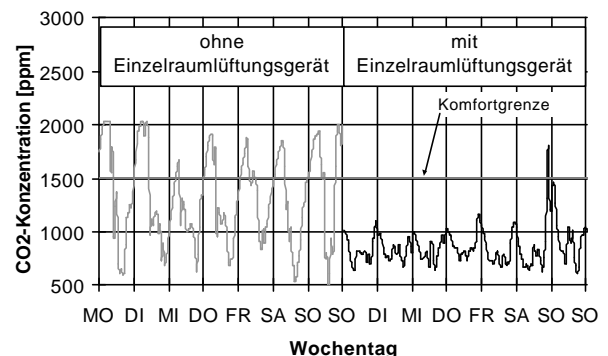


Abb. 4-14: Typischer Verlauf der CO₂-Konzentration im Wohnzimmer EG ohne und mit Einzelraumlüftungsgerät [Afjei 00a].

4.3.3 Kosten

S/W /4.9/B-B sc Propan		Sole/Wasser-WP 4.9 kWth (S0/W35) mit Beistellboiler und Zuluft-/Abluft-Wärmetauschersystem			
Kapitalkosten	Zinssatz	5.0%	Nutzung Jahre	Investition Fr.	Annuität Fr.
	Wärmequelle				
	100m Erdwärmesonde komplett	30		9'500.00	617.99
	Bauseitige Arbeiten (Mauerfräsen, Grabarbeit)	30		1'500.00	97.58
	Wärmeerzeugung				
	Wärmepumpe inkl. Heizungsregelung	15		9'700.00	934.52
	Apparate/Armat./Leit./Isolation	15		1'750.00	168.60
	Lüftung				
	Einzelraumgerät, 2 Abluftventil. Mauerventile+Montage	15 30		2'000.00 1'500.00	192.68 97.58
	Wärmeverteilung				
	Niedertemp. 30/25 Grad (Installation)	30 30		9'000.00	585.46
	Warmwasseraufbereitung				
	Beistellboiler komplett	15		2'100.00	202.32
	Sanitäranschluss	30		1'000.00	65.05
Elektriker komplett	30		1'500.00	97.58	
Transport/Montage komplett	15		1'900.00	183.05	
Planung (SIA384/2, WP-Wahl, Pumpen)	30		2'000.00	130.10	
Unterstützungsbeiträge					
Total Kapitalkosten			43'450.00	3'372.51	
Betriebskosten				Kosten Fr.	
	durchschn. Unterhaltskosten			150.00	
	Total Betriebskosten			150.00	
Energiekosten	66.1 MJ/m2a Elektrizitätsverbrauch Heizung, Warmwasser, Lüftung 174 m2 Energiebezugsfläche	Menge kWh	Preis Fr./kWh	Kosten Fr.	
	Elektrizität				
	0.38 Niedertarifanteil Elektrizität im Niedertarif	1214	0.10	126.26	
	0.62 Hochtarifanteil Elektrizität im Hochtarif	1981	0.16	314.95	
	Fixkosten				
	Zahlergebühr			57.60	
Total Energiekosten				498.81	
Jahreskosten exkl. Mwst.			43'450.00	4'021.32	

4.4 Passivhauskonzept

Dieses Beispiel wurde zusätzlich aufgenommen, um die Unterschiede zwischen MINERGIE- und Passivhausstandard zu veranschaulichen.

4.4.1 Systembeschreibung



Abb. 4-15: Passivhaus in Büchenau/Bruchsal.

Das freistehende Einfamilienhaus mit 120 m² Netto-Wohnfläche (170 m² EBF) steht in Bruchsal/Büchenau bei Karlsruhe und wird seit Weihnachten 1998 bewohnt. Der vom Planer berechnete Heizwärmebedarf nach dem Passivhaus-Projektierungspaket (EN 832) liegt unter 14 kWh/m² a. Der Blower Door Test ergab hohe Luftdichtheit von $n_{50} < 0.6 \text{ h}^{-1}$.

Das Fraunhofer ISE misst im Auftrag der Energie Baden-Württemberg EnBW die Leistungsfähigkeit des Lüftungs-Kompaktgerätes Aerex BW 160 mit dem Speicher BM 400 der Fa. Maico Haustechniksysteme, welche das Haus mit frischer Luft und Wärme versorgen.

In Tab. 4-3 sind die wichtigsten Kennwerte und Auslegedaten aufgeführt.

Standort	76646 Bruchsal (D)
Höhe über Meer	200 m
Heizgradtage, Messperiode	3028
Nettowohnfläche	120.5 m ²
Energiebezugsfläche EBF	170 m ²
Konstruktion	Massivbau mit Wärmedämm-Verbundsystem
U-Wert opake Aussenflächen	< 0.13 W/(m ² K)
U-Wert Fenster	0.80 W/(m ² K)
g-Wert Fenster	60 %
Heizenergiebedarf nach Passivhaus-Projektierungspaket (EN 832)	50 MJ/m ² a
Heizleistungsbedarf	1.4 kW
Solar-Flachkollektor	8 m ²
Erdregister	30 m lang, 1.5 m tief
Abluft/Zuluft-Wasser-WP:	COP 3.25 / 1.4 kW
Heizen / Brauchwasser	COP 3.19 / 1.4 kW
Warmwassertemperatur	50 °C
Architekt	Schuster, Karlsruhe

Tab. 4-3: Kennwerte und Auslegedaten Büchenau/Bruchsal.

Bei einem Luftvolumenstrom von 140 m³/h beträgt der Anlagenluftwechsel 0.5 h⁻¹. Ein Erdregister sorgt für die winterliche Vorerwärmung der Aussenluft. Die Brauchwassererwärmung wird von einer thermischen Solaranlage unterstützt, die aus architektonischen Gründen (Andeuten eines Satteldaches) 8 m² gross ist.

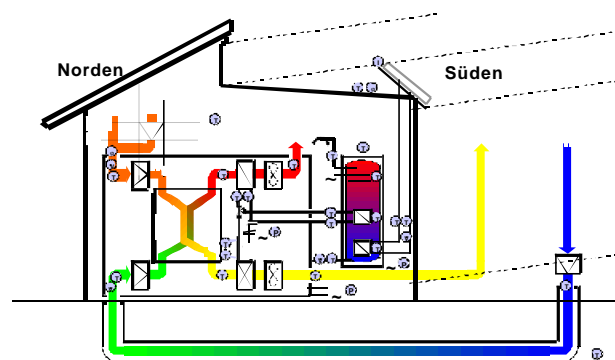


Abb. 4-16: Systemschema mit Sensoren für die Messungen.

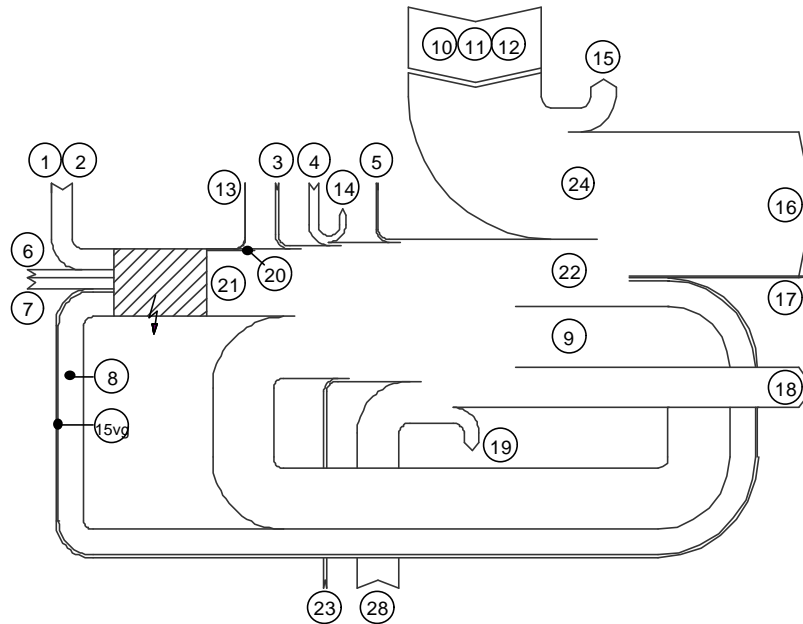
Regelung

Das Lüftungsgerät wird in der Heizperiode mit konstanten und abgeglichenen Zuluft- und Abluftmassenströmen betrieben. Ein Raumtemperaturfühler im Wohnbereich vergleicht den Messwert mit dem einstellbaren Sollwert. Überschreitet die Differenz einen Maximalwert (Hysterese), arbeitet die Wärmepumpe mit einem Verflüssiger in der Zuluft im Heizbetrieb. Bei starker Reglerabweichung (zweite Hysterese) kann das Gerät zusätzlich eine (z. B. elektrische) Zusatzheizung freigeben. Ist die Wärmepumpe nicht im Heizbetrieb, der Vorrang hat, so regeln zwei Sensoren im Speicher die Betriebsweise. Ein auf ca. 1/3 der Höhe befindlicher Sensor schaltet die Wärmepumpe, die mit einem zweiten Verflüssiger im Speicher das Brauchwasser erwärmt. Ein zweiter Fühler auf 2/3 der Höhe des Speichers gibt den Heizstab frei, der zusätzlich über einen eigenen Thermostat verfügt. Beide Temperaturfühler haben die gleiche Hysterese. Bei Wärmepumpenbetrieb ist der Heizstab verriegelt.

Ausserhalb der Heizperiode ist das Lüftungsgerät entweder im Abluftbetrieb, im Zuluftbetrieb zum leichten Kühlen mittels Erdregister oder ganz abgeschaltet.

Die Solaranlage verfügt über einen unabhängigen eigenen Regler für Low-Flow-Betrieb.

4.4.2 Energiebilanzierung



Nr.	Abk.	Bezeichnung	kWh/a	MJ/am ² Netto	MJ/am ² EBF
1ww)	$E_{WP,h}$	Stromverbrauch Wärmepumpe, Warmwasser	180.3	5.4	3.8
1h)	$E_{WP,w}$	Stromverbrauch Wärmepumpe, Heizen	729.6	21.8	15.5
2ww)	$E_{Aux,w}$	Stromverbrauch Ventilatoren für Druckverlust am Verdampfer, Warmwasser	2.7	0.1	0.1
2h)	$E_{Aux,h}$	Stromverbrauch Ventilatoren für Druckverlust am Verdampfer, Heizen	10.7	0.3	0.2
3)	$E_{Z,h}$	Stromverbrauch Elektro-Zusatzheizung	144.6	4.3	3.1
4v)	$E_{Förd}$	Stromverbrauch Ventilatoren (ohne Verdampferanteil)	372.8	11.1	7.9
4s)	$E_{Förd,Kol}$	Stromverbrauch Solaranlage (Umwälzpumpe und Steuerung)	51.5	1.5	1.1
5)	$E_{Z,w}$	Stromverbrauch Heizstab im Warmwasserspeicher	120.4	3.6	2.5
6)	Q_{Erd}	Zusätzlicher Wärmegegewinn Erdwärme für Wärmepumpe (Zusätzlich zur WRG)	353.9	10.6	7.5
7)	Q_{AUL}	Aussenluftwärme für Wärmepumpe	490.6	14.7	10.4
8)	Q_{ABL}	Abluftwärme, genutzt für Wärmepumpe	1154.0	34.5	24.4
9)	Q_{WRG}	Wärmerückgewinnung an Heiztagen, real (ohne Erdregister)	2753.9	82.2	58.3
10)	Q_S	passiver Solargewinn an Heiztagen	4211.7	125.8	89.2
11)	Q_{Pers}	Personenabwärme an Heiztagen	582.2	17.4	12.3
12)	Q_{tE}	Wärmegegewinn Elektrizität Haushaltsstrom an Heiztagen	1016.2	30.3	21.5
13)	Q_{Verl}	Wärmeabgabe des Wärmepumpenverdichters, ungenutzt	11.7	0.3	0.2
14)	$Q_{Förd,Verl}$	Wärmeabgabe der Ventilatoren, ungenutzt	274.2	8.2	5.8
15vg)	$Q_{d,ABL}$	Verdunstungswärme, genutzt für Wärmepumpe	76.9	2.3	1.6
15)	$Q_{g,Verl}$	ungenutzte freie Wärme, an Heiztagen	235.2	7.0	5.0
16)	Q_T	Transmissionswärmeverluste	6193.0	184.9	131.1
17)	Q_V	Lüftungswärmeverluste	112.9	3.4	2.4
18)	Q_w	Wärmebedarf Warmwasser	1768.7	52.8	37.5
19)	Q_{SP}	Wärmeverlust des Speichers	684.4	20.4	14.5
21ww)	$Q_{WP,w}$	Wärmeabgabe der Wärmepumpe, Warmwasser	491.1	14.7	10.4
21h)	$Q_{WP,h}$	Wärmeabgabe der Wärmepumpe, Heizen	2496.0	74.6	52.9
22)	Q_h	Heizwärmebezug	2739.2	81.8	58.0
23)	$Q_{Erd,AUL}$	Zusätzliche Erdreichwärme in Aussenluft an Heiztagen, real genutzt	78.2	2.3	1.7
24)	Q_{ug}	freie Wärme, genutzt an Heiztagen	4719.4	140.9	99.9
28)	Q_{Kol}	Solarwärme von Sonnenkollektor, eingebracht in Speicher	1841.6	55.0	39.0

Abb. 4-17: Energieflussdiagramm Passivhaus Büchenau / Bruchsal, bezogen auf EBF = 170 m².

4.4.3 Messresultate

Die Energieflüsse eines kompletten Jahres vom 1.5.1999 bis zum 30.4.2000 sind in Abb. 4-17 dargestellt.

Jahresverlauf der Energieströme

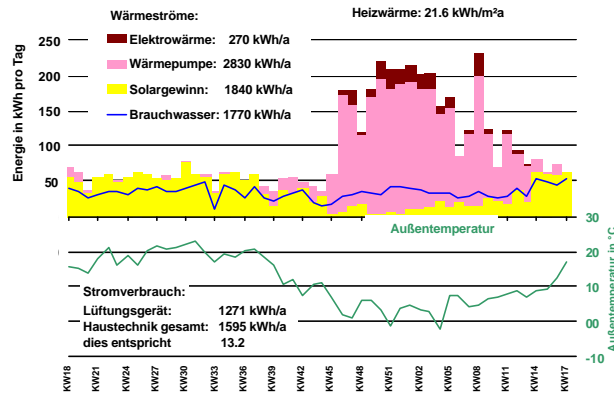


Abb. 4-18: Gemessene Energieumsätze im Passivhaus Büchenau.

Der Gesamtstromverbrauch für das Lüften, Beheizen und Erwärmen des Brauchwassers beträgt 1604 kWh/a, also 13.3 kWh/m²a. Mit Ökostrom, der ausschliesslich regenerativ in Neuanlagen (Biomasse, Wind, Wasserkraft, Solar) zu 8 Pf Mehrkosten pro kWh in Deutschland angeboten wird, kann das Haus für 10,70 DM im Monat zu einem Null-Emissionshaus gemacht werden.

Heizkurve

Deutlich ist in Abb. 4-18 zu erkennen, dass passive Solargewinne wesentlich zum Decken der Heizwärme beitragen. Gerade an kalten Tagen liegen meist hohe Solarerträge vor, die den aktiven Heizwärmebedarf halbieren können. Die höchste Heizleistung wird bei dem untersuchten, solar optimierten Gebäude bei Aussentemperaturen zwischen 0 °C und 10 °C benötigt, wenn gleichzeitig solare Gewinne fehlen.

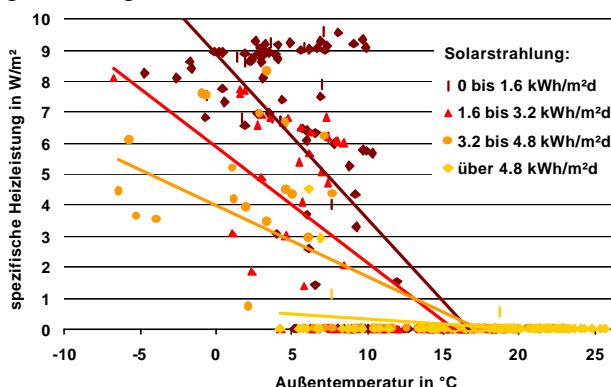


Abb. 4-19: Heizkurve, Tageswerte, abhängig von der Solarstrahlung.

Die maximale Heizleistung wird bei rund +5 °C mit knapp 10 W/m² erreicht. An diesem Auslegungspunkt wird eine Heizleistung von 1200 W benötigt.

Nutzungsgrade

Wärmeerzeugungsgrad WNG_{hw}

$$WNG_{hw} = \frac{Q_{WP,w} + Q_{WP,h} + E_{Z,h} + E_{Z,w} + Q_{ErdAUL} + Q_{Kol}}{E_{WP,w} + E_{WP,h} + E_{Z,h} + E_{Z,w} + E_{Aux,h} + E_{Aux,w}}$$

$$WNG_{hw} = \frac{10.4 + 52.9 + 3.1 + 2.5 + 1.7 + 39}{3.8 + 15.5 + 3.1 + 2.5 + 1.1 + 0.3} = \underline{\underline{4.17}}$$

Systemnutzungsgrad SN_{hw}

$$SN_{hw} = \frac{Q_w + Q_h + Q_{WRG}}{E_{WP,h} + E_{WP,w} + E_{Z,h} + E_{Z,w} + E_{Aux,hw} + E_{Förd}}$$

$$SN_{hw} = \frac{37.5 + 58.0 + 58.3}{3.8 + 15.5 + 3.1 + 2.5 + 1.1 + 0.3 + 7.9} = \underline{\underline{4.5}}$$

Der Grund dafür, dass der SN_{hw} höher liegt als der WNG_{hw} , liegt in der Wärmerückgewinnung der Lüftung. Vernachlässigt man diese, so erhält man einen Nutzungsgrad von

$$Nutzungsgrad = \frac{37.5 + 58.0}{3.8 + 15.5 + 3.1 + 2.5 + 1.1 + 0.3 + 7.9} = \underline{\underline{2.8}}$$

Raumheizung und Warmwasser

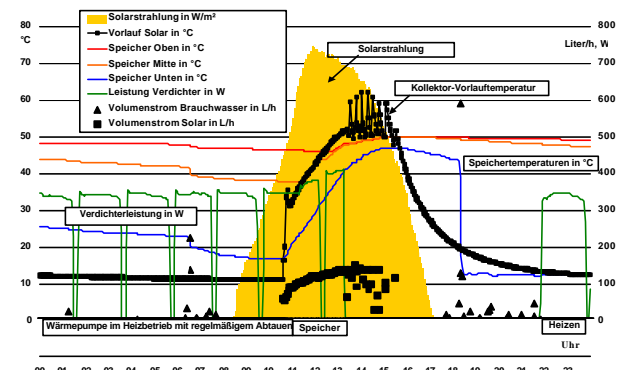


Abb. 4-20: Messungen im Solar-Passivhaus Büchenau bei Heiz- und Brauchwasserbedarf am 25.1.2000.

In Abb. 4-20 ist beispielhaft eine Tagesmessung dargestellt. Ab 11 Uhr reicht die Solarstrahlung zum Heizen, ab 13:30 Uhr auch für die Brauchwassererwärmung. Der Speicher wird komplett erwärmt von der Solaranlage. Bei Verwendung einer Wetterprognose (prädiktiver Regler) hätte die Wärmepumpe früh am Morgen den Betrieb einstellen können [Bühning 00a].

Bewertung des Hauses in Büchenau

- Das Haus wurde sehr kostengünstig realisiert und weist einen geringen Energiebedarf auf.
- Eine Beschattungseinrichtung wurde montiert und hilft auf diese Art, eine Überwärmung im Sommer zu verhindern.
- Der Systemnutzungsgrad SN_{hw} weist einen sehr hohen Wert auf.
- Die Technik steht im unbeheizten Raum. Somit entstehen Verteilverluste, deren Abwärme nicht genutzt werden kann.
- Es wurde eine zu grosse Sonnenkollektorfläche montiert.

4.4.4 Kosten

L/L-WRG Aerex	Passivhaus mit Lüftungsgerät Aerex mit Klein-WP und Solaranlage für die Zuluft- und Wassererwärmung in einem Beistellboiler			
Kapitalkosten	Zinssatz 5.0%	Nutzung Jahre	Investition Fr.	Annuität Fr.
	Wärmequelle			
	Bauarbeiten (LER unter Terrasse)	30	1'000.00	65.05
	Erdregister, Ansaugung seitlich an Mauerwand	30	500.00	32.53
	Wärmeerzeugung			
	Aerex Kompaktgerät inkl. Regelung	15	11'600.00	1'117.57
	Solaranlage	15	5'000.00	481.71
	Elektriker	30	800.00	52.04
	Wärmeverteilung über Luftkanäle Material + Montage	30	9'400.00	611.48
	Warmwasseraufbereitung über Aerex-Kompaktgerät			
	Sanitärinstallation	30	500.00	32.53
	Planung (SIA384/2, WP-Wahl, Lüftung)	30	2'000.00	130.10
	Unterstützungsbeiträge			
Total Kapitalkosten			30'800.00	2'523.01
Betriebskosten				Kosten Fr.
	durchschn. Unterhaltskosten			150.00
	Teuerung			
	Teuerungsrate Beurteilungsdauer	20		
Total Betriebskosten				150.00
Energiekosten	34.2 MJ/m2a Elektrizitätsverbrauch Heizung, Warmwasser, Lüftung	Menge kWh	Preis Fr./kWh	Kosten Fr.
	170 m2 Energiebezugsfläche			
	Elektrizität			
	0.38 Niedertarifanteil Elektrizität im Niedertarif	614	0.10	63.82
	0.62 Hochtarifanteil Elektrizität im Hochtarif	1001	0.16	159.21
	Teuerung/Fixkosten			
	Teuerungsrate Beurteilungsdauer Zahlergebühr	20		57.60
Total Energiekosten				280.63
Jahreskosten exkl. Mwst.			30'800.00	2'953.64

Anmerkungen:

- Die deutschen Preise (DM) wurden wegen der unterschiedlichen Kaufkraft in der Schweiz zum Kurs 1:1 übernommen.
- Planungskosten, welche hier extra ausgewiesen sind, sind oft pauschal im Gerätepreis enthalten. Der hier aufgeführte Gerätepreis für das Kompaktgerät enthält keinen Overhead für die Planung.

4.5 Schlussfolgerungen

Für die drei beschriebenen Beispiele konnten dank ausführlicher Messungen für die zweite gemessene Heizperiode 99/00 einige Verbesserungsmassnahmen realisiert und kritische Stellen lokalisiert werden:

- Zu beachten ist, dass der Energieaufwand für die Warmwassererzeugung in Niedrigenergie- und Passivhäusern im Vergleich zu konventionellen Häusern einen überproportionalen Anteil annimmt.
- Die Leistungsaufnahme der Umwälzpumpe des Erdwärmesondenkreislaufs in Grafstal konnte um den Faktor drei gesenkt werden. Er liegt jetzt bei 70 W für eine 100 m-Sonde. Kälteträger ist eine 25 Vol.-%-Aethylenglykol-Wasser-Mischung. Simulationsergebnisse ergaben für die Erdwärmesonde ein Optimum bei 4 K Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Austritt. In diesem Bereich, in dem die Sonde laminar betrieben wird, ergibt sich für den Elektrizitätsverbrauch ein Minimum [Afjei 00a]. Für die Wärmeverteilung auf der Wärmesenkenseite wurde in der Anlage Grafstal derselbe Pumpentyp verwendet. Ausgelegt wurde die Pumpe mit dem Programm EWSDRUCK [C].
- Die Wärmepumpe sollte so knapp wie möglich ausgewählt werden. D. h. vom berechneten Leistungsbedarf sollte eher die nächst kleinere Pumpe als die nächst grössere Wärmepumpe gewählt werden.
- In der Anlage Schötz wurde die Isolation des Abluft-Wärmepumpenboilers verstärkt und die elektrische Begleitheizung der Zuleitung abgestellt. Dadurch konnten wesentliche Einsparungen erzielt werden, zumal die Begleitheizung in der ersten Heizperiode mehr Energie als der Abluft-Wärmepumpenboiler verbrauchte.
- Die nachträgliche Installation einer Einzelraumlüftung in Grafstal brachte eine markante Verbesserung der Luftqualität (cf. Abb. 4-14).
- Die Kombination von Einzelraumlüftung und Mauerventilen mit zentraler Absaugung in den Nasszellen ist eine besonders kostengünstige Lösung (1999: ca. CHF 3500.-). Der Einbau von Mauerventilen ist aber ein Kompromiss: Die Mauerventile ermöglichen die kontrollierte Zufuhr frischer Aussenluft, welche kalt in die Räume dringt und bei unsachgemässer Installation zu Behaglichkeitsproblemen führen kann. Werden Mauerventile in verschiedenen Stockwerken eingebaut, kann im Winter durch Auftriebseffekte die Strömungsrichtung umkehren (Kamineffekt). Wenn Mauerventile ohne Schalldämpfer eingebaut werden, ergibt sich ein Schallproblem: Von aussen kann gehört werden, was innen gesprochen wird.
- Für zukünftige Bauvorhaben wäre allerdings abzuwägen, ob nicht eine Zu-/Abluft-Anlage mit Wärmerückgewinnung eingesetzt werden kann. Bei Gebäuden mit einer dichten Gebäudehülle sowie Fenstern mit einem guten U-Wert empfiehlt sich der Einbau einer Komfortlüftung (Zu- und Abluft), damit eine gute Luftqualität eingehalten werden kann. Die Komfortlüftung sollte in die Haustechnik integriert werden, so dass beispielsweise die Abwärme der Abluft durch eine Wärmerückgewinnung dem Gebäude wieder zugeführt werden kann.
- Die Haustechnik sollte unbedingt im beheizten Raum stehen. Auf diese Weise können (unvermeidliche) Speicherverluste genutzt werden.
- Das Haus sollte daher unter dem Keller isoliert werden, worin sich die Haustechnik üblicherweise befindet. Ein späterer Ausbau der Kellerräume wird einfacher möglich und Wärmebrücken zwischen Keller und Erdgeschoss können vermieden werden. Wird das Gebäude zwischen dem Erdgeschoss und dem Keller wärmegeklämmt (kalter Keller), so sollte das Erdgeschoss auf der Isolation stehen, damit Wärmebrücken verhindert werden.
- Um Überwärmung im Gebäude bei einfallender Sonnenstrahlung zu vermeiden, sollte das Gebäude viel Masse besitzen (Dämpfung der Temperaturschwingungen). Bei Leichtbauten in Holzbauweise ist eine unbedingt Beschattungsvorrichtung vorzusehen.
- Die installierten Heizstäbe im Passivhaus sind mit 4 kW Leistung relativ gross.
- Der Kreuz-Gegenstrom-Wärmetauscher wird im Passivhaus mit Gleichstrom betrieben und hilft auf diese Weise, den Energieverbrauch gering zu halten.

5 ANHANG

5.1 Fallbeispiel Ökologie: Situation heute

Im Bericht "Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe - Phase 2" [Afjei 98a] sollten die ökologischen Belastungen von zwei verschiedenen Heizwärmepumpen (Luft/Wasser- resp. Sole/Wasser-WP) bilanziert werden. Neben der Heizenergie wurde in der Bilanz auch die Warmwasserbereitstellung berücksichtigt. Die Bilanzierungen der Wärmesysteme wurden für vier verschiedene Gebäudevarianten mit unterschiedlichen Heizenergieansprüchen durchgeführt. Dabei wurden je zwei Gebäudevarianten mit unterschiedlichen Fensterflächen und Isolations-Dämmstärken in je einer Holzleichtbau- und Massivbauweise betrachtet (Tab. 5-1).

	Bauweise Leichtbau Dämmstärken [cm]		Bauweise Massivbau Dämmstärken [cm]	
Standard-Varianten	Holz-Leichtbauhaus	16	Massivbauhaus	12
Niedrigenergie-Varianten	Holz-Leichtbauhaus	24	Massivbauhaus	18

Tab. 5-1: Bilanzierte Varianten der Gebäude (angepasst aus [Afjei 98a])

Mit Hilfe der Bilanzierung der vier Gebäudevarianten sollte die folgende Frage beantwortet werden: 'Lohnt sich aus ökologischer Sicht die Einsparung von Wärmepumpenenergie durch eine Niedrigenergie-Architektur gegenüber einem konventionellen Haus?' Oder anders formuliert: 'Kann der ökologische Mehraufwand eines Niedrigenergiehauses die ökologischen Entlastungen durch die Einsparung von Wärmepumpenenergie möglicherweise kompensieren?'

Funktionale Einheit

Als "funktionale Einheit" wurde das Gebäude und dessen Wärmebereitstellung (Heiz- und Brauchwasser) während eines durchschnittlichen Betriebsjahres betrachtet. Die allgemeinen Annahmen über Kältemittel, Luft/Wasser-Wärmepumpe, Sole/Wasser-Wärmepumpe, Erdwärmesonde, Strommix, Heiz- und Warmwasserenergiebedarf etc. können in [Afjei 98a] nachgelesen werden. Die Systemgrenzen umfassen das schlüsselfertige Haus, darin eingeschlossen sind beispielsweise Aushub, Anstriche innen und aussen, Fenster, Türen, Sanitärrohre, Energieverbrauch etc. (siehe auch [Afjei 98a]).

Umwelteffekte

Wie bereits erwähnt, wurde auf die Vollaggrierung des ECO-Indikator verzichtet, weil die Gewichtung der einzelnen Umwelteffekte nicht ohne subjektive Wertung erfolgen kann. Somit wurden folgende neun charakterisierte Umwelteffekte aufgrund ihrer Wichtigkeit an der Schädigung der

menschlichen Gesundheit sowie der Beeinträchtigung von Ökosystemen ausgewählt und berechnet:

- Treibhauseffekt
- Ozonloch
- Sommersmog
- Versauerung
- Überdüngung
- Schwermetalle
- Karzinogene
- Wintersmog
- Radioaktivität

Es muss allerdings beachtet werden, dass nicht alle betrachteten Umwelteffekte als gleich gravierend verstanden werden dürfen. Um eine abschließende Beurteilung zu erhalten, müssen die Umwelteffekte gegeneinander gewichtet werden. Wegen den verschiedenen Unsicherheiten, die bei Berechnungen von Ökobilanzen auftreten, dürfen Schlussfolgerungen nicht auf kleinsten Unterschieden in den Resultaten basieren. Relative Unterschiede im Bereich unter 20 % sind als nicht signifikant anzusehen.

Die folgenden Ergebnisse und Aussagen gelten nur für die beschriebenen untersuchten Niedrigenergiehäuser und Heizsysteme aus [Afjei 98a].

Resultate

Grundsätzlich konnte festgestellt werden, dass die beiden Wärmepumpenvarianten Luft/Wasser und Sole/Wasser nur geringe Unterschiede in ihrem Ökopprofil aufweisen. Bei fast allen betrachteten Umwelteffekten schneiden die Varianten mit Öl- resp. Elektrodirektheizung signifikant schlechter als beide Wärmepumpensysteme ab. Die Gasheizungsvariante dagegen ist nicht eindeutig schlechter als die Wärmepumpenvarianten. Es wurde berechnet, dass die Gasheizungsvariante bei allen Umwelteffekten, ausser beim Treibhauseffekt und knapp beim Sommersmog, vorteilhafter als die Wärmepumpenvarianten abschneiden. Daraus kann jedoch nicht geschlossen werden, dass die Gasheizungsvariante ökologisch besser als die Wärmepumpenvarianten ist. Der Vorteil der Gasheizung liegt in der relativen Reinheit der Rohressource Erdgas, das nur geringe Aufwendungen zur Aufbereitung benötigt und relativ geringe Verbrennungsemissionen erzeugt. Erdgas ist andererseits aber kein erneuerbarer Energieträger.

Leichtbau - Massivbau

Zwischen Leicht- und Massivbauweise konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden, d. h. aus ökologischer Sicht unterscheiden sich die beiden betrachteten Bauweisen nicht.

Payoff für Energieeinsparung

Um festzustellen, ob sich der Zusatzaufwand für den Bau des betrachteten Niedrigenergiehauses relativ zum Standardhaus ökologisch lohnt, wurden die Umweltbelastungen aus diesem Zusatzaufwand verglichen mit den vermiedenen Umweltbelastungen durch die erzielte Heizenergieeinsparung. Diese Rechnung wurde mit Hilfe eines Payoff-Index durchgeführt, der für jeden Umwelteffekt berechnet wurde. Der Index ergibt sich aus dem Verhältnis "Umweltbelastung durch Zusatzbauaufwand für Energieeinsparung" zu "vermiedene Umweltbelastung durch Energieeinsparung". Bei Indizes unter 1 lohnt sich der Zusatzaufwand, bei Werten über 1 lohnt sich der Zusatzaufwand nicht.

Tab. 5-2 fasst die Payoff-Indizes der verschiedenen Umwelteffekten bei beiden Gebäudevarianten zusammen. Der Strom wurde mit dem differenzierten Netzverbund (CH-Strommix mit Importanteilen, Transit = 0 %; siehe Anhang 5.2) berechnet.

Zusatzaufwand Leichtbau	Wärmevariante				
	L/W-WP	S/W-WP	Öl	Gas	Elektro
Treibhauseffekt	0.73	0.92	0.11	0.15	0.25
Ozonzerstörung	0.38	0.48	0.05	1.2	0.13
Sommersmog	1.8	2.3	0.22	0.68	0.62
Versauerung	2.2	2.8	1	3.3	0.75
Überdüngung	1.9	2.4	0.48	1.1	0.64
Schwermetalle	1.1	1.4	0.47	3.7	0.39
Karzinogene	0.53	0.67	0.19	0.29	0.18
Wintersmog	2.3	2.9	1	3.7	0.79
Radioaktivität	0.08	0.1	0.71	1.5	0.03
Zusatzaufwand Massivbau	Wärmevariante				
	L/W-WP	S/W-WP	Öl	Gas	Elektro
Treibhauseffekt	0.63	0.8	0.10	0.13	0.22
Ozonzerstörung	0.2	0.25	0.03	0.62	0.07
Sommersmog	0.5	0.63	0.06	0.19	0.17
Versauerung	1.3	1.6	0.58	1.9	0.43
Überdüngung	0.62	0.78	0.16	0.36	0.21
Schwermetalle	0.69	0.87	0.29	2.3	0.23
Karzinogene	0.3	0.37	0.1	0.16	0.1
Wintersmog	1.3	1.6	0.57	2	0.44
Radioaktivität	0.04	0.05	0.39	0.8	0.02

Tab. 5-2: Payoff betrachtetes Standard- vs. Niedrigenergiegebäude bei Leicht- und Massivbauweise. Bei Werten unter 1 (fett) lohnt sich der Zusatzaufwand.

Bei den relativ hochbelastenden Wärmebereitstellungsvarianten "Öl" und "Elektro" liegen bei beiden Bauweisen Massiv- und Leichtbau alle Indizes teilweise weit unter 1. Hier lohnt sich also der Zusatzaufwand, weil dadurch hochbelastende Energiequellen eingespart werden können. Bei den Wärmepumpen liegen die Payoff-Indizes für Wintersmog, Versauerung, Überdüngung, Sommersmog und Schwermetalle über 1. Dies bedeutet, dass sich der Zusatzaufwand bezüglich dieser Umwelteffekte nicht lohnt. Die Indizes sind für die L/W-WP-Variante generell tiefer als für die S/W-WP-Variante. Bei der Gasheizung spielt die verwendete Architektur eine Rolle: Bei der Massivbauweise sind es

weniger Effekte, für die sich der Zusatzaufwand nicht lohnt.

Im verwendeten Beispiel gibt es also durchaus Wärmesysteme, für die sich der Zusatzaufwand für eine Energieeinsparung ökologisch gesehen teilweise nicht lohnt. Eine differenzierte und fallspezifische Betrachtungsweise ist daher bei der Beurteilung von Energieeinsparung angebracht.

Anmerkungen

Man sollte sich beim Betrachten einer Ökobilanz bewusst sein, dass die Resultate immer eine Bestandesaufnahme zu einem bestimmten Zeitpunkt wiedergeben. So wird beispielsweise eine Ökobilanz der Wärmepumpen in ein paar Jahren bereits bessere Resultate ergeben, allein weil der Nutzungsgrad der Stromerzeugung in der Zwischenzeit verbessert wurde.

Ebenso kann eine Ökobilanz verändert werden, wenn ein Stoff auf einen Prozess einen dominierenden Einfluss hat. In diesem Fall ist es massgeblich, wie sich die Aufbereitung und Entsorgung dieses Stoffes entwickelt. Beispielsweise übt Kupfer in der beschriebenen Ökobilanz einen stark negativen Einfluss auf verschiedene Umwelteffekte aus. Werden aber in Zukunft Kupferminen saniert, so tragen die umweltverträglicheren Aufbereitungsmethoden zu einer Verbesserung der Ökobilanz bei.

5.2 Ökologie: Einfluss des Strommixes

Als mögliche Szenarien für die Zukunft bieten sich die beiden folgenden Varianten an:

- Variation des Systemnutzungsgrades SNG
- Änderung des Strommixes

In [Afjei 98a] wurde dazu je eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Im Folgenden soll auf diese beiden Aspekte etwas genauer eingegangen werden.

Systemnutzungsgrad SNG

Der Systemnutzungsgrad SNG übt einen wichtigen Einfluss auf eine Ökobilanz aus. Im behandelten Beispiel wurden für die Luft/Wasser-Wärmepumpe mit einem SNG_{netto} von 2.9 und einem erhöhten SNG_{netto} von 4.5 gerechnet. Durch diese SNG-Erhöhung verringern sich die Belastungen bei allen Umwelteffekten. Am stärksten sichtbar ist der Rückgang bei der Radioaktivität (11 %), am geringsten beim Treibhauseffekt (5 %).

Strommix

Die Wahl des Strommixes bestimmt das Ergebnis einer Ökobilanz massgeblich. In der betrachteten Ökobilanz stammt ein wichtiger Beitrag der ökologischen Belastungen einer Wärmepumpe aus der Bereitstellung des Stromes. Je nach Auffassung können verschiedene Strommixe berücksichtigt werden. Eine "objektiv richtige" Wahl gibt es aber nicht. Im Folgenden werden fünf Argumente und Überlegungen dargestellt, die zu einer Wahl des Strommixes führen können.

- Das generalisierte Netzverbund-Argument (UCPTE-Durchschnitt)
In Europa besteht ein grosser, frequenzsynchronisierter Netzverbund der Elektrizitätsgesellschaften von 15 Ländern, inkl. der Schweiz: der UCPTE-Netzverbund (Union pour la coordination de la production et du transport de l'électricité). Alle UCPTE-Verbundländer tragen gemäss ihrer Jahresproduktion zur europäischen Versorgung bei. Wird Strom aus diesem Netz bezogen, spielt es folglich keine Rolle, wo und wie dieser Strom produziert wurde. Der UCPTE-Mix wurde in Ermangelung an differenzierteren Daten bei früheren Ökobilanzstudien oft angewendet.
- Das differenzierte Netzverbund-Argument (CH mit Importanteilen, Transitgeschäfte = 0 %)
Zwischen den Elektrizitätsgesellschaften der UCPTE bestehen vertraglich geregelte Handelsbeziehungen. Strom wird demzufolge in Nachbarländer exportiert und aus Nachbarländern importiert. Bei einem Netzstrombezug ist bei dieser Betrachtungsweise also wesentlich, in welchem Land der Bezug stattfindet. Wird ein Importstrommix eines Landes bilanziert, sind die (nicht exportierten) Inlandproduktion des Landes sowie die von den verschiedenen ausländischen Handelspartnern bezogenen Strommengen zu berücksichtigen. Der politische Einfluss auf die

Stromproduktion in einem Land wird dadurch miteinbezogen.

- Das differenzierte Netzverbund-Argument inkl. Transitanteil (CH inkl. Importanteile abzüglich Transitgeschäfte)

Beim oben dargestellten Argument wird davon ausgegangen, dass sämtliche importierten Strommengen in ein Land auch vollständig in diesem Land konsumiert werden. In Realität jedoch wird ein Teil des berücksichtigten Importstroms in vertraglich geregelten Transitgeschäften weitergeleitet. D. h. dass bei Transitgeschäften eine dem importierten Strom entsprechende Menge zeitgleich exportiert bzw. die importierte Strommenge lediglich durchgeleitet wird. Dies kann so aufgefasst werden, dass dieser importierte Strom in der Schweiz gar nicht benötigt resp. konsumiert wird und deshalb in der Ökobilanz nicht angerechnet werden darf. Folglich werden nur diejenigen importierten Stromanteile dem schweizerischen Strommix angerechnet, die sich nicht auf Transitgeschäfte beziehen.

- Das Argument der koordinierten Förderung von Wärme-Kraft-Kopplung (WKK) und Elektro-Wärmepumpen

Im Zusammenhang mit Wärmepumpen wird oft die Frage gestellt, woher bei einer zukünftigen Verbreitung von Wärmepumpen die zusätzlich benötigte Elektrizität stammen soll. Wärmepumpen werden gefördert, um fossile Ressourcen zu schonen und den CO_2 -Ausstoss im Heizsektor zu verringern. Für die Produktion des dazu zusätzlich benötigten Strombedarfs werden Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen in dem Mass gefördert, wie sie für den Betrieb von Elektrowärmepumpen benötigt werden. So gesehen werden die neuen Wärmepumpenanlagen mit 100 % WKK-Strom betrieben und eine Bilanzierung erfolgt über den Verbund dieser beiden Anlagentypen zusammen. Bei dieser Systemgrenze wird kein Strom als Eingangsgrösse benötigt, der Strommix ist bei dieser Betrachtung somit völlig unerheblich.

- Argument der Marginal-Technologien
Mit diesem Argument wird bei höherem Wärmepumpeneinsatz nur die Veränderung von ökologischen Belastungen betrachtet. Wenn also der gesamte Stromkonsum des Landes steigt, muss daher für Wärmepumpen als Stromkonsumenten nur die Stromproduktion aus zusätzlich gebauten Kraftwerken verbucht werden, statt dem gesamten, durchschnittlichen Kraftwerksparkmix. Die obige Berücksichtigung von 100 % WKK-Strom kann bereits als solche Marginalbetrachtung in einem wachsenden Strommarkt aufgefasst werden. Alternativ können bei einer Marginalbetrachtung auch andere Wachstums- oder Grenztechnologien betrachtet werden. Der zusätzliche Strombedarf bei einer Grossumstellung auf Wärmepumpen könnte beispielsweise auch mit neu zu bauenden Kombikraftwerken

(Gas- und Dampfturbinenkraftwerke GuD) produziert werden.

Die Bilanzen mit den beiden marginalen Stromvarianten weisen ein ähnliches Ökopprofil auf, weil bei beiden Erdgas die Hauptenergiequelle ist. Ob die Gasvarianten besser oder schlechter als die Varianten mit dem gegenwärtigen durchschnittlichen Strommix sind, konnte nicht abschliessend beantwortet werden. Die Marginaltechnologien sind jedenfalls als nicht generell schlechter als der heutige durchschnittliche Strommix der Schweiz einzustufen. Die Sensitivitätsanalyse zur Strombereitstellung

zeigte, dass der Einfluss der Strombereitstellung auf die Bilanzresultate wesentlich ist.

Die Umwelteffekte bei den verschiedenen Strommixen sind in Tab. 5-3 aufgeführt. Für beschreibende Analysen werden das generalisierte Netzverbund-Argument (UCPTE-Mix) und das differenzierte Netzverbund-Argument (CH mit Importanteilen, Transitgeschäfte = 0 %) verwendet, für entscheidungsorientierte Analysen hingegen das Argument der Marginaltechnologien.

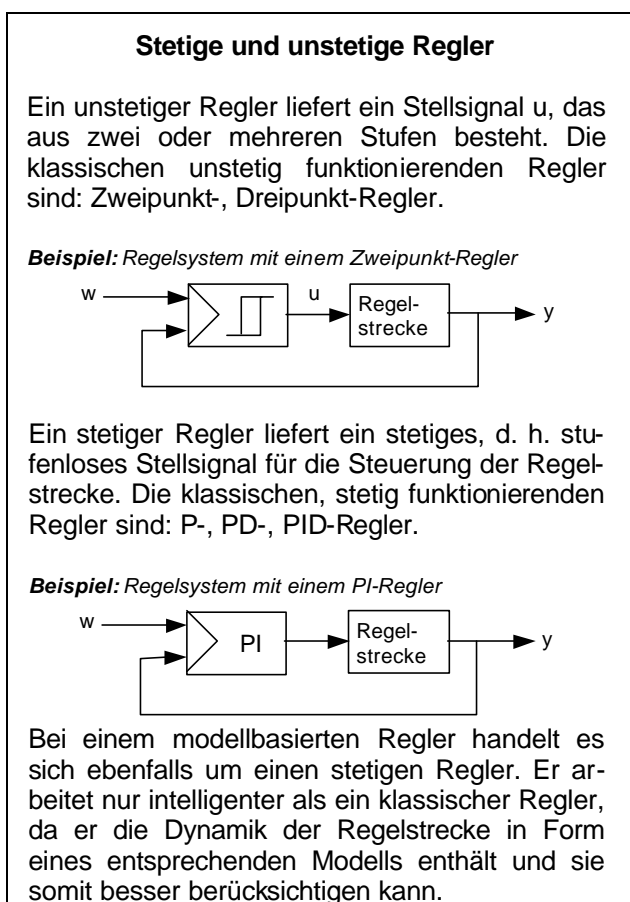
Charakterisierter Umwelteffekt (Belastung pro kWh _{el} Endenergie, Niederspannung)		Strommix				
		CH-Inland	CH mit Import (40 % Transit)	Kombikraft- werk (GuD)	ölthermisches Kraftwerk CH	UCPTE
Treibhauseffekt	g CO ₂ -Äquiv.	38.8	114	482	960	597
Ozonloch	mg R11-Äquiv.	0.222	0.257	0.113	1.13	0.332
Sommersmog	g Ethylen-Äquiv.	0.0647	0.153	0.265	1.75	0.77
Versauerung	g SO ₂ -Äquiv.	0.294	0.763	0.45	5.29	4.32
Überdüngung	g PO ₄ -Äquiv.	0.0106	0.0286	0.0374	0.183	0.144
Schwermetalle	mg Pb-Äquiv.	1.48	2.46	1.21	6.94	8.06
Karzinogene	mg PAH-Äquiv.	0.0453	0.0632	0.0604	1.91	0.264
Wintersmog	g SO ₂ -Äquiv.	0.285	0.701	0.287	4.52	3.92
Radioaktivität	Bq ²³⁵ U-Äquiv.	148	149	0.96	15.1	100

Tab. 5-3: Umwelteffekte bei verschiedenen Strommixen [Frischknecht 96], [Goedkoop 95], [Frischknecht 2000a], [Frischknecht 2000b].

5.3 Regelkonzepte

Energiekennlinienbasiertes Konzept mit Pulsbreitenmodulation

Dieses Konzept geht von einer mittleren Aussenlufttemperatur aus und verwendet als Heizkurve direkt die Energiekennlinie des Hauses. Zu einem beliebig festgesetzten Zeitpunkt (z. B. 20:00 Uhr) wird basierend auf dem Aussenlufttemperaturmittelwert der letzten 24 Stunden die Anzahl Starts und damit die Laufzeit Δt_{LZ} für die folgenden 24 Stunden festgelegt. Um den Änderungen der Aussenlufttemperatur der nächsten 24 Stunden Rechnung zu tragen, wird der aktuelle Aussentemperaturmittelwert der letzten 24 Stunden laufend neu berechnet und für die Bestimmung der Laufzeit Δt_{LZ} verwendet. Zu dem festgesetzten Zeitpunkt (20:00 Uhr) wird eine Bilanzierung vorgenommen und dem Gebäude exakt die für die letzten 24 Stunden notwendige Wärmemenge zugeführt. Dieses Regelkonzept wurde im Rahmen des Projekts "Pulsbreitenmodulation für Kleinwärmepumpenanlagen" [Gathuler 98] entwickelt und mit Erfolg sowohl dort als auch im Projekt "Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe" implementiert [Afjei 98].



Modellbasierte Konzepte mit Pulsbreitenmodulation

Bei modellbasierten Konzepten mit Pulsbreitenmodulation wird der Heizleistungsbedarf $\dot{Q}_{Bed}(t)$ des Hauses mit Hilfe eines modellbasiert entworfenen stetigen Regler bestimmt (vgl. Kasten "Stetige und unstetige Regler"). In diesem Konzept wird keine Heizkurve verwendet. Die Energiekennlinie des Gebäudes wird zusammen mit der Gebäudetragheit (Gebäudedynamik) im Modell indirekt verwendet.

In der Abb. 5-1 ist das Regelkonzept mit der Pulsbreitenmodulation und einem stetig funktionierenden Regler schematisch in Form eines Signalflossbildes dargestellt.

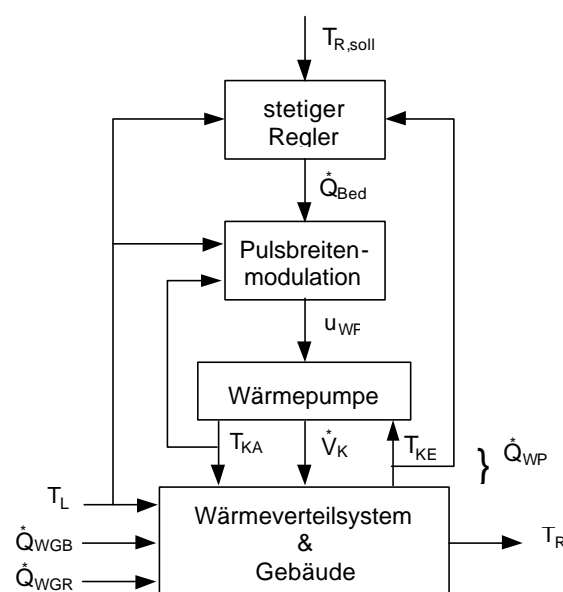


Abb. 5-1: Das Signalflossbild des Regelkonzepts mit einem stetigen Regler und Pulsbreitenmodulation.

Das Modul "stetiger Regler", der sinnvollerweise modellbasiert entworfen wird, bestimmt basierend auf Aussenluft-, Rücklauf- und Sollraumtemperatur den momentan erforderlichen Wärmestrom \dot{Q}_{Bed} . Dabei ist angenommen, dass die Raumtemperatur T_R nicht gemessen wird. Dieser Wärmestrom wird dann im Modul "Pulsbreitenmodulation" in das Einschalt-/Ausschaltsignal u_{WP} umgeformt, welches direkt die Wärmepumpe ansteuert. Die Wärmepumpe gibt den Wärmestrom \dot{Q}_{WP} , der durch den Kondensatorvolumenstrom \dot{V}_K , die Ein- und Austrittstemperatur des Kondensators (T_{KE} und T_{KA}) bestimmt wird, via Wärmeverteilungssystem an das Gebäude ab. Die Störgrößen dieses Regelsystems sind die Aussenlufttemperatur T_L , die äusseren und inneren Wärmegewinnen im Raum \dot{Q}_{WGR} und im Boden \dot{Q}_{WGB} .

Das Modul "Wärmeverteilsystem & Gebäude" ist in der Abb. 5-2 in die beiden Teilsysteme "Wärmeverteilsystem" und "Gebäude" unterteilt worden. Im Teilsystem "Gebäude" ist die relevante thermische Gebäudedynamik enthalten. Sie wird insbesondere für den Reglerentwurf benötigt. Dessen Ausgangsgrößen sind die Rücklauf- und Referenzraumtemperatur (T_{RL} und T_R); dessen Eingangsgrösse ist die Enthalpiestromdifferenz des Heizungssystems, die durch die Vorlauf-, Rücklauf- und den Volumenstrom des Heizungswassers (T_{VL} , T_{RL} und \dot{V}_H) bestimmt wird. Die grauen Signalpfade deuten auf weitere, für den Reglerentwurf jedoch nicht relevante Ein- und Ausgangssignale des Teilsystems "Wärmeverteilsystems".

Gebäudemodell

Als Modell eines Systems wird das durch mathematische Beziehungen beschriebene Abbild der sich im System im wesentlichen abspielenden Vorgängen verstanden. Im Allgemeinen wird das Modell durch Differentialgleichungen repräsentiert, die eine gewisse Anzahl Parameter aufweisen. Es wird hier davon ausgegangen, dass für die Beschreibung der Vorgänge im System physikalische Gesetze angewendet werden. In diesem Fall haben die Parameter eine physikalische Bedeutung.

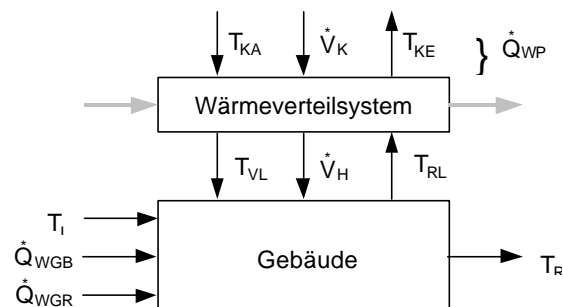
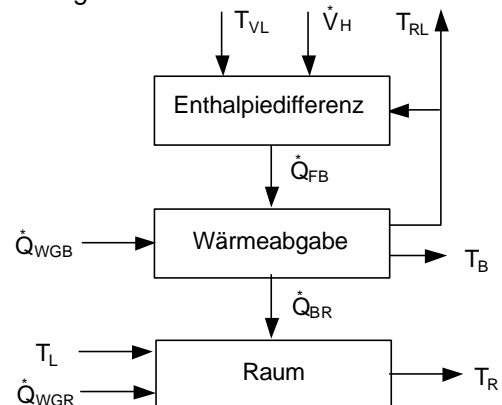


Abb. 5-2: Die beiden Teilsysteme "Wärmeverteilsystem" und "Gebäude" einer Heizungsanlage und deren Ein- und Ausgangssignale.

Eine Methode zur Bestimmung der Parameter verwendet Stoffdaten der für den Gebäudebau verwendeten Materialien. Diese Methode hat den Vorteil, dass keine Messdaten notwendig sind. Somit kann das Verhalten des Gebäudes vor dem Bau durch numerische Simulation des Modells untersucht werden. Der Nachteil der Methode ist, dass die Stoffdaten aufgrund von Materialunterschieden grossen Schwankungen unterliegen und somit die modellierte Gebäudedynamik stark von der effektiv gemessenen Gebäudedynamik abweichen kann. Eine alternative Methode verwendet Messdaten, um die Modellparameter so zu bestimmen, dass die Abweichung zwischen dem Modell der Gebäudedynamik und den Messdaten möglichst klein bleibt. Diese Methode setzt somit voraus, dass das Objekt bereits fertiggestellt sein muss.

Modellierung der Gebäudedynamik

Im folgenden Blockschaltbild ist das "Gebäude" in drei Teilsysteme unterteilt: Enthalpiedifferenz, Wärmeabgabe und Raum.



Im Block "Enthalpiedifferenz" wird die Enthalpiedifferenz des Heizungswassers berechnet:

$$\dot{Q}_{FB}(t) = \rho_W c_W \dot{V}_H(t) \cdot [T_{VL}(t) - T_{RL}(t)]$$

Das Teilsystem "Wärmeabgabe" ist durch zwei Energiespeicher (das Heizungswasser in den Rohren und der Fussboden) mit den Zustandsgrößen Rücklauf- und Bodentemperatur T_{RL} und T_B modelliert. Das Teilsystem "Raum" wird pauschal durch einen einzigen Energiespeicher mit der Referenzraumtemperatur T_R als Zustandsgrösse modelliert.

Für diese drei Energiespeicher werden die folgenden drei Energiebilanzgleichungen aufgeschrieben:

$$\rho_W c_W V_H \cdot \dot{T}_{RL}(t) = \dot{Q}_{FB}(t) - \dot{Q}_{WB}(t)$$

$$m_B c_B \cdot \dot{T}_B(t) = \dot{Q}_{WB}(t) - \dot{Q}_{BR}(t) - \dot{Q}_V(t)$$

$$\rho_G c_G V_G \cdot \dot{T}_R(t) = \dot{Q}_{BR}(t) - \dot{Q}_V(t)$$

Sie bilden drei gekoppelte Differentialgleichungen, die das dynamische Verhalten des Gebäudes beschreiben. Die Kopplungsterme sind:

\dot{Q}_{WB} : Wärmestrom vom Wasser in den Boden

\dot{Q}_{BR} : Wärmestrom vom Boden in den Raum

\dot{Q}_V : Verlustwärmestrom

Diese Wärmeströme werden jeweils durch einen linearen Ansatz beschrieben:

$$\dot{Q}_{WB}(t) = \kappa_W \cdot [T_{RL}(t) - T_B(t)]$$

$$\dot{Q}_{BR}(t) = \kappa_B A_B \cdot [T_B(t) - T_R(t)]$$

$$\dot{Q}_V(t) = \kappa_G \cdot [T_R(t) - T_L(t)]$$

Im Rahmen des Projekts "Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen" [Reiner 98] wurde ein Modell dritter Ordnung mit sechs Parametern für die Beschreibung der Gebäudedynamik entwickelt (vgl. Kasten "Modellierung der Gebäudedynamik"). Es konnte nachgewiesen werden, dass die Parameter des Modells erfolgreich mit Hilfe der Methode der Parameteridentifikation [Shafai 99] geschätzt werden können. Die Parameterschätzung beruht dabei auf der Messung der folgenden Größen: Die Aussenlufttemperatur, eine Referenzraumtemperatur, der Volumenstrom der Fussbodenheizung, sowie der Vorlauf- und der Rücklauftemperatur. Das Gebäudemodell wird einerseits für die Reglerauslegung und andererseits für die Optimierung der Periodendauer der Pulsbreitenmodulation Δt_P verwendet. Nachfolgend wird zunächst die erwähnte Optimierung vorgestellt und anschliessend werden zwei modellbasierte Reglertypen präsentiert.

Optimierung der Periodendauer der Pulsbreitenmodulation

Um die optimale Laufzeit Δt_{LZ} und damit die optimale Periodendauer Δt_P der Pulsbreitenmodulation zu ermitteln, wurde das Verhalten einer Luft-Wasser-Wärmepumpe und eines Hauses anhand von Simulationsmodellen untersucht. Dabei wurde für das Haus das im letzten Kapitel vorgestellte Gebäudemodell (vgl. Kasten "Modellierung der Gebäudedynamik") und für die Wärmepumpe ein einfaches Modell basierend auf den Herstellerdaten (die Heizleistung und die elektrische Leistungsaufnahme der Wärmepumpe in Funktion von Aussenlufttemperatur und Kondensatoraustrittstemperatur) verwendet.

Die Ein- und Ausschalttransiente der Wärmepumpe wurde dabei durch ein asymmetrisches Tiefpass-element erster Ordnung mit 60 s Ein- und 6 s Ausschaltzeitkonstante modelliert.

Bei konstanter Aussenlufttemperatur T_L steigt nach dem Einschalten der Wärmepumpe die Kondensatoraustrittstemperatur T_{KA} an. Dadurch erhöht sich die von der Wärmepumpe aufgenommene elektrische Leistung, während der abgegebene Wärmestrom nach relativ kurzer Zeit (ca. 60 s) den stationären Betrieb erreicht. Die momentane Leistungszahl $\varepsilon(t)$ (vgl. Abb. 5-3) erreicht schon nach kurzer Zeit ihr Maximum (mit '*' markiert).

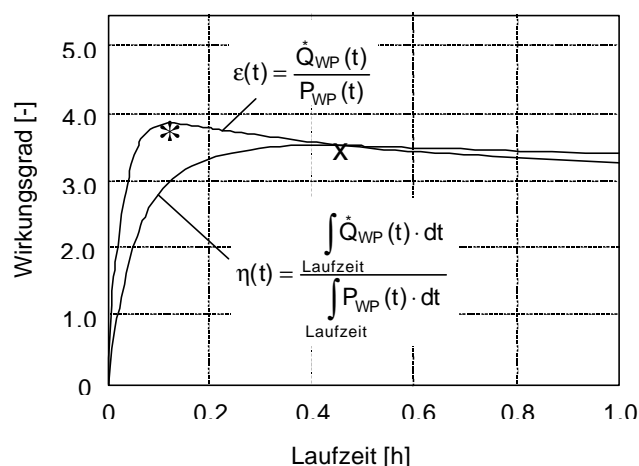


Abb. 5-3: Verlauf der Leistungszahl $\varepsilon(t)$ und des energetischen Wirkungsgrads $\eta(t)$ in Funktion der Laufzeit.

Der energetische Wirkungsgrad $\eta(t)$ (vgl. Abb. 5-3), welcher für die optimale Laufzeit massgebend ist, erreicht jedoch erst nach längerer Zeit den höchsten Wert (mit 'x' markiert) und verläuft relativ flach an dieser Stelle.

Wie in der Abb. 5-4 dargestellt ist, hängt die so ermittelte optimale Laufzeit $\Delta t_{LZ,opt}$ von der Aussenlufttemperatur T_L ab. Je höher die Aussenlufttemperatur ist, um so kürzer ist die optimale Laufzeit.

Da das Optimum relativ flach verläuft, muss die optimale Laufzeit nicht genau eingehalten werden. In der Abb. 5-4 ist ebenfalls grau der Bereich eingezeichnet, in dem 95 % des maximal möglichen energetischen Wirkungsgrads erreicht werden. Der 95 %-Bereich stellt einen gewissen Spielraum dar, der bei der Berücksichtigung der Sperrzeiten ausgenutzt werden kann (vgl. Abb. 5-4).

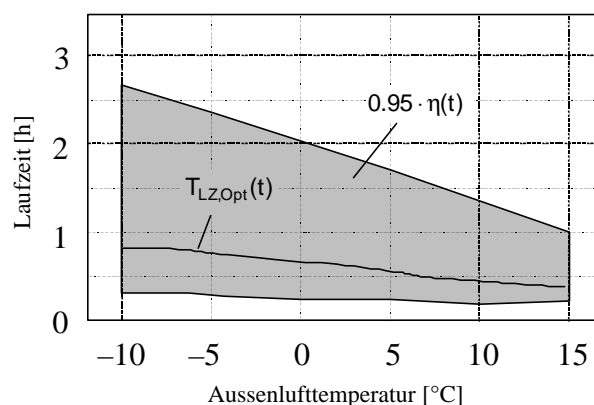


Abb. 5-4: Energieoptimale Laufzeit $T_{LZ,Opt}$ in Funktion der Aussenlufttemperatur und der Bereich der Laufzeit mit 95 % des optimalen Wirkungsgrades.

Beobachterbasierter Regler

Wie bereits in der Abb. 2-45 angegeben, wird die Referenzraumtemperatur nicht gemessen, so dass für die Regelung nur der Sollwert der Referenzraumtemperatur, die Aussenluft- und die Rücklauf-temperatur zur Verfügung stehen. Der beobachterbasierte Regler verwendet das im letzten Kapitel vorgestellte Gebäudemodell, um einerseits die Zielgrösse Referenzraumtemperatur beobachten und andererseits das dynamische Verhalten des Systems für die Regelung berücksichtigen zu können. Da kein Modell die Realität exakt wiedergibt, muss beim Entwurf des Reglers eine Methode gewählt werden, die zu einem gegenüber Modellfehlern und Parameterunsicherheiten robusten Regelsystem führt. Das bedeutet, dass der mit dieser Methode entworfene Regler richtig reagiert, auch wenn das Modell Abweichungen von der Realität aufweist. Die im Projekt "Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe" [Afjei 98] eingesetzte H_∞ -Methode [Geering 99] weist diese Fähigkeit auf. Die Struktur des Reglers besteht aus drei Subreglern (vgl. Abb. 5-5), die je eine spezifische Aufgabe erfüllen. Die Vorsteuerung dient zur Verarbeitung des Sollwertverlaufes. So kann möglichst rasch auf eine Sollwertänderung reagiert werden. Die Störgrössenkompensation dient zum Ausgleich des Einflusses der Aussenlufttemperatur. Der Rückführregler soll alle nicht modellierten Störungen und den Einfluss von Modellunsicherheiten ausgleichen.

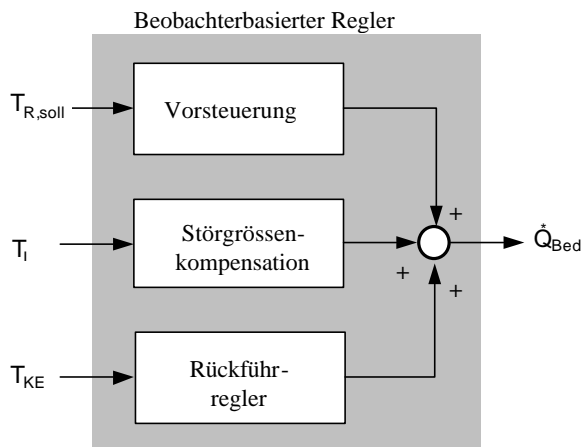


Abb. 5-5: Der beobachterbasierte Regler besteht aus drei Subreglerblöcken: Vorsteuerung, Störgrössen-kompensation und Rückführregler, die gleichzeitig mit der H_∞ -Methode ausgelegt werden.

Das Ausgangssignal des Reglers ist der aktuelle Wärmeleistungsbedarf, der zwecks Pulsbreitenmodulation in ein notwendiges Laufzeitverhältnis ($\Delta t_z / \Delta t_p$) umgeformt wird. Durch Anpassung der Periodendauer wird auf anstehende und im voraus als bekannt vorausgesetzte Sperrzeiten reagiert (vgl. Abb. 5-6). Die Periodendauer wird unmittelbar vor der nächsten Sperrzeit etwas verlängert, damit das Wiedereinschalten mit dem Ende der Sperrzeit zusammenfällt (b) oder verkürzt, um noch eine Laufzeit vor den Beginn der Sperrzeit hineinzu-
passen (c).

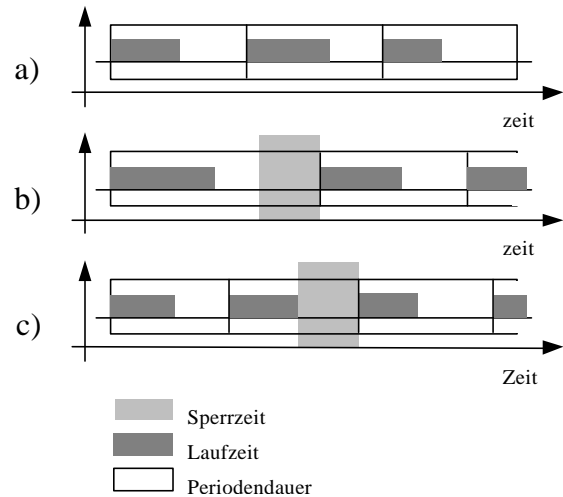


Abb. 5-6: Anpassung der Periodendauer der Pulsbreitenmodulation an die nächste Sperrzeit.

Modellprädiktiver Regler

Der im letzten Kapitel vorgestellte beobachterbasierte Regler kann nur auf die aktuelle Aussenlufttemperatur und Strahlung reagieren. Er lässt keinen Eingriff basierend auf einer Prädiktion dieser Störgrössen zu. In diesem Kapitel wird eine Regelstrategie mit einer solchen modellbasierten prädiktiven Steuerung vorgestellt. Es handelt sich dabei um eine reine Steuerung, weil nur die Aussenlufttemperatur T_L und der Sollwert der Referenzraumtemperatur $T_{R,soll}$ verwendet werden.

Als Gebäudemodell wird auch hier das im Kapitel "Gebäudemodell" vorgestellte Modell eingesetzt, das hauptsächlich für eine Prädiktion des Systemverhaltens auf einen mutmasslichen zukünftigen Aussentemperaturverlauf verwendet wird. Der Wärmestrombedarf des Hauses \dot{Q}_{Bed} wird bei dieser Regelungsstrategie durch eine Optimierung des Systemverhaltens für den prädiktierten Aussenlufttemperaturverlauf bestimmt (vgl. Abb. 5-7).

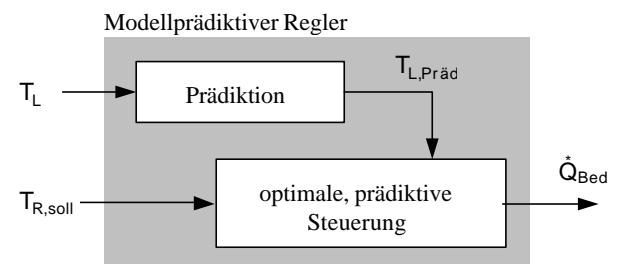


Abb. 5-7: Der modellprädiktive Regler besteht aus einer Prädiktion des Aussenlufttemperaturverlaufs und darauf basierte Optimierung des Heizleistungsbedarfs.

Für die Optimierung sind grundsätzlich beliebige Optimierungskriterien möglich. Bis anhin wurde das folgende quadratische Gütekriterium verwendet, das jeweils zur aktuellen Zeit t für die Prädiktionshorizont Δt_{horiz} minimiert wird:

$$J = \int_t^{t+\Delta t_{horiz}} \{ R \cdot \dot{Q}_{Bed}^2 + Q \cdot [T_R(t) - T_{R,soll}(t)]^2 \} dt$$

Als Prädiktionszeithorizont Δt_{hor} wird ein Zeitfenster von 24 Stunden ausgewählt. Andere Zeitfenster sind selbstverständlich auch möglich.

Im Gütekriterium wird mit dem Gewichtungsfaktor R der Wärmestrom \dot{Q}_{Bed} und mit dem Gewichtungsfaktor Q die Abweichung der Raumtemperatur T_R von ihrem Sollwert $T_{R,\text{soll}}$ bestraft. Die Prädiktion des Aussenlufttemperaturverlaufs T_L und die anschließende Optimierung des benötigten Wärmestroms werden jede Viertel Stunde neu durchgeführt, so dass man die momentane Veränderung von T_R berücksichtigen kann.

Durch entsprechende Wahl der Randbedingungen und zeitabhängigen R und Q können Sperrzeiten (falls im voraus bekannt) und Stromtarifstrukturen berücksichtigt werden. Dabei muss beispielsweise R für die Dauer der Sperrzeit sehr gross gewählt werden, damit die Optimierung den Wärmestrom \dot{Q}_{Bed} entsprechend so bestimmt, dass er während der Sperrzeit durch Optimierung bewusst auf Null gesetzt wird und nicht durch die Sperrung überrascht wird.

Diese Möglichkeit und die Integration einer geeigneten Prädiktion des Aussenlufttemperaturverlaufes und der Strahlung basierend auf den vergangenen 24 Stunden und der SMA-Prognose der nächsten 24 Stunden werden zur Zeit untersucht. Bis anhin wurde nur eine einfache Aussenlufttemperaturprädiktion basierend auf dem Temperaturverlauf der vergangenen 24 Stunden verwendet. Als Verlauf für die nächsten 24 Stunden wird dabei der Verlauf der letzten 24 Stunden angenommen, wobei der Temperaturverlauf parallel verschoben wird, so dass der Anfangspunkt der Prädiktion mit der tatsächlichen momentanen Temperatur übereinstimmt.

5.3.1 Schlussfolgerung aus den Messungen

Im Rahmen der Phase 3 des Projektes "Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe" wurde die Pilotanlage in Schötz (vgl. Kapitel 4.2) für die Erprobung der drei vorgestellten Regelungsstrategien ausgewählt.

Sowohl das energiekenlinienbasierte Regelungskonzept als auch die beiden modellbasierten Konzepte mit Pulsbreitenmodulation (beobachterbasiert resp. modellprädiktiv) konnten erfolgreich implementiert und für eine kurze Periode am realen Objekt erprobt werden.

Die Messresultate zeigen, dass das Hauptproblem das Beherrschen der Auswirkung der Strahlung darstellt. Dieses kann bei einem Niedrigenergiehaus sehr wahrscheinlich nicht ohne eine entsprechende Beschattungssteuerung möglich sein.

Die Resultate der Messungen sind nachfolgend in der Tab. 5-4 zusammengestellt. Die beiden Strategien (energiekenlinienbasiertes und modellprädiktives Konzept mit Pulsbreitenmodulation), die als reine Steuerung funktionieren, haben mehr mit dem Konstanthalten der Referenzraumtemperatur Probleme gehabt.

Wie bereits im letzten Kapitel erwähnt, befindet sich das modellprädiktive Konzept in der Entwicklungsphase, sowohl im Hinblick auf einer besseren Prädiktion der Aussenlufttemperatur und Strahlung als auch im Zusammenhang mit einer besseren Integration der Sperrzeiten und Tarifstrukturen in der Optimierung. Dieses Konzept wird ebenfalls zur Zeit unter der Verwendung der Rücklauftemperatur (resp. Kondensatoreintrittstemperatur) zwecks Regelung weiterentwickelt. Dabei wird die Rücklauftemperatur (in einem thermostatfreien System) als einzige erfassbare Information über der effektiven Auswirkung der Störung ausgenutzt.

		Zweipunktregler Periode 1999 *	Zweipunktregler Periode 2000 *	Beobachter- basierter Regler **	LQ-optimale Steuerung **	Energieken- linienbasierte Steuerung **
Dauer	Total [h]	568	994.5	780	526	287.5
Einschal- tungen	Total [-]	63	68	160	110	54
	pro Tag [1/d]	2.7	1.6	4.9	5.0	4.5
Aussen- temperatur	Mittelwert [°C]	-0.6	5.93	0.29	1.75	1.89
	Std. Abw. [°C]	3.47	4.55	3.02	5.96	3.83
Raum- temperatur	Mittelwert [°C]	22.9	23.2	23.2	23.2	233
	Std. Abw. [°C]	0.58	1.51	0.66	1.34	1.23
	bez. Std. Abw. [°C]	0.17	0.33	0.22	0.22	0.33
Heizgradtage (HGT)	Norm 20/12 [°C·d]	478.5	571.6	626.6	387.1	201.7
	Effektiv 23/12 [°C·d]	547.5	691.6	722.6	450.1	234.7
Heizenergie	Total [kWh]	1248.1	1373.3	1960.9	1119.3	611.0
	Pro HGT_{23/12} [kWh/°C·d]	2.3	2.0	2.7	2.5	2.6

Tab. 5-4: Vergleich der Mittelwerte und der Standardabweichungen von Aussen- und Raumtemperatur EG sowie der Einschaltungen, der Heizgradtage, Heizenergie total und Heizenergie pro Heizgradtage für die einzelnen Regler. Generell kamen keine Sonnenstoren zum Einsatz.

* mit Raumtemperaturfühler

** ohne Raumtemperaturfühler

5.4 Handrechenmethode zur Bestimmung des Wärmeenergieerzeugungsgrads

Zur Bestimmung des Systemnutzungsgrads muss die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe bekannt sein, um aus der abgegebenen Wärmeenergie die aufgenommene elektrische Energie zu bestimmen [Wetter 97].

Im Folgenden wird ein Berechnungsverfahren vorgestellt, mit dem die Jahresarbeitszahl (JAZ) von monovalenten Wärmepumpenheizungen mit oder ohne Brauchwassererwärmung bestimmt werden kann. Die Leistungszahlen müssen an wenigen normierten Betriebspunkten vorliegen.

Vergleichsrechnungen der Handmethode mit Simulationsrechnungen ergaben eine Genauigkeit der Rechnung für die Jahresarbeitszahl von $\pm 10\%$.

Die Jahresarbeitszahlen für Raumheizung und Warmwasser werden getrennt berechnet und anschliessend zu einer gesamten Jahresarbeitszahl kombiniert.

JAZ Raumheizung

Von der Normtemperatur abweichende Temperaturen

Die Leistungszahl von Wärmepumpen sind sehr stark von der Wärmequellen- und Wärmesenktemperatur abhängig. Wenn die vorhandenen Betriebstemperaturen von den Normtemperaturen abweichen, muss die Leistungszahl (COP) mit dem Faktor f_T korrigiert werden:

$$f_T = \frac{(\vartheta_{VL,eff} + 273)(\vartheta_{VL,norm} - \vartheta_{Ver,ein,norm})}{(\vartheta_{VL,norm} + 273)(\vartheta_{VL,eff} - \vartheta_{Ver,ein,eff})} \quad \text{Gl. 5-1}$$

$J_{VL,norm}$ Vorlauftemperatur nach Herstellerangaben [°C]

$J_{Ver,ein,norm}$ Verdampfeintrittstemp. nach Herstellerangaben [°C]

$J_{VL,eff}$ Effektiv vorhandene Temperaturen [°C]

$J_{Ver,ein,eff}$

Sole/Wasser-Wärmepumpe

Die Wärmequellentemperatur wird vereinfachend über das ganze Jahr als konstant angenommen. Wenn die vorhandenen Temperaturen von denen des Herstellers abweichen, ist die Leistungszahl mit f_T gemäss Gl. 5-1 zu korrigieren. Die Jahresarbeitszahl ist somit:

$$JAZ_h = f_{h,T} \cdot COP_h \quad \text{Gl. 5-2}$$

Luft/Wasser-Wärmepumpe

Bei der Luft/Wasser-Wärmepumpe wird die Variation der Quelltemperatur berücksichtigt. Vereisungs- und Abtauverluste müssen in den COP-Werten bereits enthalten sein.

Die Jahresarbeitszahl wird in diesem Verfahren über drei Stützpunkte bestimmt. Es sind dies die Leistungszahlen bei den in der Euronorm EN255 definierten Betriebspunkten:

A-7/W35 Aussenluft -7 °C, Wasser 35 °C

A+2/W35 Aussenluft +2 °C, Wasser 35 °C

A+7/W35 Aussenluft +7 °C, Wasser 35 °C

Für Anlagen mit wesentlich höheren Vorlauftemperaturen sind allenfalls die Normpunkte A-7/W50, A+2/W50 und A+7/W50 zu verwenden. Unter der Annahme, dass die Leistungszahl im Bereich dieser Normpunkte konstant sei, wird dann eine Gewichtung mit der Summenhäufigkeit vorgenommen:

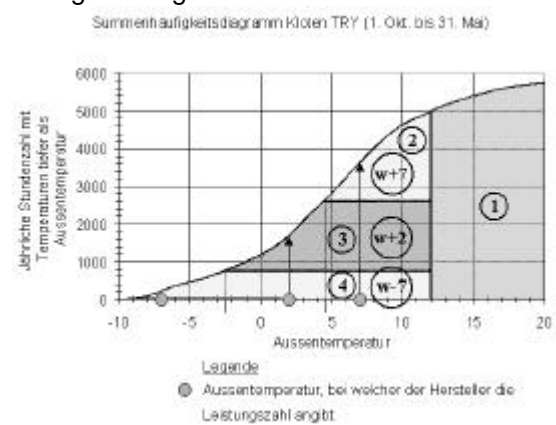


Abb. 5-8: Summenhäufigkeitsdiagramm für Zürich Kloten, 1. Oktober bis 31. Mai [Wetter 97].

① Freie Wärme (Elektro, Personen, Sonne)
Es wird angenommen, dass die freie Wärme über den ganzen Temperaturbereich konstant ist.

② Flächen, welche dem Wärmeenergieanteil entsprechen, der durch die WP mit der Leistungszahl des entsprechenden Temperaturbereiches gedeckt werden muss.

④ Die Wärmeenergieanteile lassen sich über die Heizgradstunden bestimmen. Diese können mit den Klimadaten des entsprechenden Standortes berechnet werden:

$$HGH_i = \sum_{j_{h,m}=j_{\min}}^{j_i} p_{h,m} (J_{HG} - J_{h,m}) \quad \text{Gl. 5-3}$$

$J_{h,m}$ Stundenmitteltemperatur [°C]

$p_{h,m}$ Anzahl Stunden, bei der die Stundenmitteltemperatur $J_{h,m}$ beträgt [°C]

Wenn nun die Summe der Heizgradstunden als Funktion der Aussentemperatur bekannt ist, können die Wärmeverhältnisse für die drei Temperaturbereiche bestimmt werden:

$$w_{-7} = \frac{HGH_{-2.5}}{HGH_{+12}}$$

$$w_{+2} = \frac{HGH_{+4.5} - HGH_{-2.5}}{HGH_{+12}}$$

$$w_{+7} = \frac{HGH_{+12} - HGH_{+4.5}}{HGH_{+12}}$$

Gl. 5-4

Diese Wärmeverhältnisse müssen für jede Klimaregion bestimmt werden. Falls abweichende COP-Normtemperaturen der Wärmepumpe vorliegen, müssen auch die Temperaturbereiche angepasst werden.

Für die Klimaregion Zürich ergeben sich die folgenden Gewichtungsfaktoren:

COP Normtemperatur	Gewichtungsfaktor w
-7	0.313
+2	0.447
+7	0.240

Tab. 5-5: Gewichtungsfaktoren für die Meteostation Zürich.

Damit ergibt sich für die Jahresarbeitszahl der Luft/Wasser-Wärmepumpe:

$$JAZ_h = \frac{1}{\frac{w_{-7}}{f_{T,-7} COP_{h,-7}} + \frac{w_{+2}}{f_{T,+2} COP_{h,+2}} + \frac{w_{+7}}{f_{T,+7} COP_{h,+7}}}$$

Gl. 5-5

JAZ Warmwasser

Korrektur für Speicher- und Verteilverluste

Die Wärmeverluste des Speichers und der Verteilungen werden mit einem Korrekturfaktor berücksichtigt:

$$f_{ww,v} = \left(1 - \frac{Q_{ww,v}}{Q_{ww,n} + Q_{ww,v}} \right)$$

Gl. 5-6

$Q_{ww,v}$ Wärmeverlust Verteilung + Speicherverluste, falls diese nicht im COP des Herstellers enthalten sind.

$Q_{ww,n}$ Energiebedarf Warmwasser (Nutzenergie, berechnet mit Hilfe von Tab. 2-9)

$Q_{ww,v}$ und $Q_{ww,n}$ sind als Energie in [MJ] zu berechnen und in Gl. 5-6 einzusetzen.

Abluftwärmepumpe

Die Temperaturschwankung der Eintrittsluft in den Verdampfer wird vernachlässigt. Falls die Warmwasser- oder Ablufttemperatur nicht den Herstellerdaten entspricht, so muss die Leistungszahl mit dem Temperaturumrechnungsfaktor nach Gl. 5-1 umgerechnet werden.

$$JAZ_{ww} = f_{ww,T} f_{ww,v} COP_{ww}$$

Gl. 5-7

Sole/Wasser-Wärmepumpe (kombiniert mit Heizung)

Es wird ebenfalls eine konstante Wärmequellen-temperatur angenommen. Als Vorlauftemperatur ist ein Mittelwert von 50 °C sinnvoll, wenn von einer Warmwassertemperatur von 45 °C mit einmaliger Aufheizung auf 55 °C ausgegangen wird. Die Berechnung dieser Jahresarbeitszahl erfolgt ebenfalls nach Gl. 5-7.

JAZ Raumheizung und Warmwasser

Wenn die Wärme für die Raumheizung und das Warmwasser mit der gleichen Wärmepumpe erzeugt wird, erfolgt die Berechnung der gesamten Arbeitszahl über die Gewichtung der beiden Energieanteile (Gl. 5-8).

$$w_h = \frac{Q_h}{Q_h + Q_{ww,n}}$$

$$w_{ww} = \frac{Q_{ww,n}}{Q_h + Q_{ww,n}}$$

Gl. 5-8

Q_h Heizwärmebedarf [MJ]
 $Q_{ww,n}$ Wärmebedarf für Warmwasser [MJ]

$$JAZ_{h+ww} = \frac{1}{\frac{w_h}{JAZ_h} + \frac{w_{ww}}{JAZ_{ww}}}$$

Gl. 5-9

w_h Gewichtungsfaktor Heizung [-]
 w_w Gewichtungsfaktor Warmwasser [-]
 JAZ_h Jahresarbeitszahl Heizung [-]
 JAZ_w Jahresarbeitszahl Warmwasser [-]

Abgegebene Energie der Wärmepumpe

Die von der Wärmepumpe abgegebene Energie setzt sich aus einem Anteil für die Heizung und einem solchen für die Aufbereitung des Warmwassers zusammen (Gl. 5-10).

$$Q_{WP,hw} = Q_{WP,h} + Q_{WP,w}$$

Gl. 5-10

$Q_{WP,w}$ Anteil Warmwasser. Diese Energiemenge ist aufgrund der Nutzungscharakteristik des Gebäudes zu bestimmen.

Der Energieanteil für die Heizung lässt sich über die Heizgradstunden bestimmen.

$Q_{WP,h}$ für eine Luft/Wasser-Wärmepumpe mit Zusatzheizung:

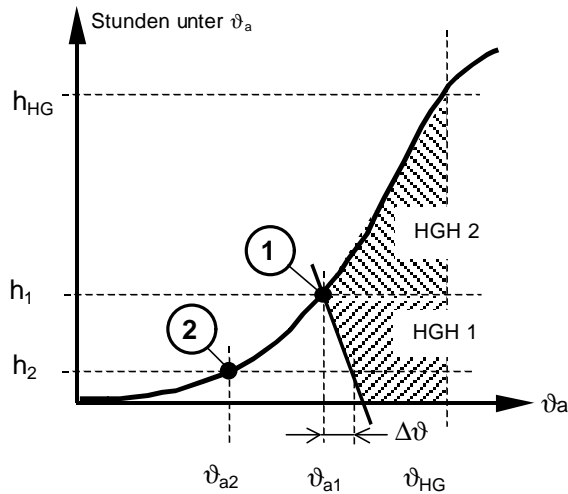


Abb. 5-9: Berechnung der Energieanteile mit Hilfe der Summenhäufigkeit der Aussenlufttemperatur.

J_{a1}	Auslegungstemperatur der Wärmepumpe	[°C]
J_{a2}	Auslegungstemperatur gemäss Wärmeleistungsbedarf	[°C]
$h_{1/2}$	Stunden unter J_{a1} , resp. J_{a2}	[h]
h_{HG}	Stunden unter J_{HG}	[h]

Punkt 1: Auslegungspunkt der Wärmepumpe: Leistung bei der Temperatur ϑ_{a1} . Bei tieferen Temperaturen als ϑ_{a1} muss die Zusatzheizung eingeschaltet werden.

Punkt 2: Auslegungspunkt der Anlage gemäss Wärmeleistungsbedarf.

$$\Delta J = J_{HG} - J_{a1} - \frac{\dot{Q}_{WP,2} \cdot (J_{HG} - J_{a1})}{\dot{Q}_{WP,1}} \quad [K] \quad \text{Gl. 5-11}$$

$Q_{WP,1}$	abgegebene Wärmeleistung der Wärmepumpe bei Temperatur J_{a1}	[kW]
$Q_{WP,2}$	abgegebene Wärmeleistung der Wärmepumpe bei Temperatur J_{a2}	[kW]
J_{HG}	Temperatur Heizgrenze	[°C]

$$HGH_1 = \frac{2 \cdot (J_{HG} - J_{a1}) - \Delta J}{2} \cdot (h_1 - h_2) \quad [K \cdot h]$$

$$HGH_2 = \frac{(J_{HG} - J_{a1}) \cdot (h_{HG} - h_1)}{2} \quad [K \cdot h]$$

$$HGH_{WP,h} = HGH_1 + HGH_2 \quad [K \cdot h] \quad \text{Gl. 5-12}$$

$HGH_{1/2}$ Anteile Heizgradstunden [K·h]

$$Q_{WP,h} = \frac{HGH_{WP,h} \cdot \dot{Q}_{WP,1}}{(J_{HG} - J_{a1})} \cdot 3.6 \quad [MJ] \quad \text{Gl. 5-13}$$

Abgegebene Energie mit Zusatzheizung

Als Zusatzheizung wird hier eine elektrische Direktheizung für die Unterstützung der Raumheizung verstanden. Die Energie für die Zusatzheizung kann damit über die Heizgradstunden berechnet werden:

$$HGH_{z,h} = HGH_{12} - HGH_{WP,h} \quad [K \cdot h] \quad \text{Gl. 5-14}$$

$$Q_{z,h} = \frac{HGH_{z,h} \cdot \dot{Q}_{z,2}}{(J_{a1} + \Delta J - J_{a2})} \cdot kW \quad [MJ] \quad \text{Gl. 5-15}$$

$Q_{z,2}$ erforderliche Leistung der Zusatzheizung am Auslegungspunkt 2 [kW]

Energieertrag aus Sonnenkollektor

Erträge aus Sonnenkollektoren müssen im WNG berücksichtigt werden. Deren Grösse hängt im allgemeinen von vielen Faktoren ab wie:

- Aufstellungsort, Ausrichtung, Neigung der Kollektoren
- Kollektorenart
- Betriebsweise (Low-Flow, High-Flow, Einschaltkriterien)
- Speicher

Auf eine Berechnung wird an dieser Stelle nicht eingegangen, sondern auf die erhältlichen Programme verwiesen ([H],[K]).

Energieertrag aus Erdregister

Der Energieertrag aus einem Erdregister kann mit dem Programm WKM [M] ermittelt werden. Dabei werden unter anderem zeitlich ändernde Betriebsverhältnisse (z. B. Luftvolumenstrom nach Fahrplan), das Speicherverhalten des Erdreiches und der Einfluss verschiedener Rohr-anordnungen berücksichtigt.

Elektrische Energie für Haustechnik

Zur Berechnung des WNG muss die elektrische Antriebsenergie für die Haustechnik (ohne Wärmeverteilung) bekannt sein.

Die elektrische Energie lässt sich aus der von der Wärmepumpe abgegebenen Wärmeenergie und der Jahresarbeitszahl bestimmen:

$$E_{WP,hw} = \frac{Q_{WP,hw}}{JAZ_{h+ww}} \quad [MJ] \quad \text{Gl. 5-16}$$

$$E_{WP,h} = \frac{Q_{WP,h}}{JAZ_h} \quad [MJ] \quad \text{Gl. 5-17}$$

$$E_{WP,w} = \frac{Q_{WP,w}}{JAZ_{ww}} \quad [MJ]$$

Die Energieanteile zur Überwindung des Druckverlustes von Verdampfer und Kondensator sind bereits im COP-Wert enthalten und müssen nicht mehr zusätzlich eingerechnet werden.

Beispiel: Berechnung des Wärmenutzungsgrades

Gegeben:

Aussenluft/Wasser-Wärmepumpe für die Raumheizung				
A-7/W35 ³	COP _{-7/35}	=	2.49	[-]
A+2/W35	COP _{+2/35}	=	3.04	[-]
A+7/W35	COP _{+7/35}	=	3.97	[-]
Auslegung bei -3 °C:			5 kW	
el. Zusatzheizung			2.2 kW	

Auslegungstemperaturen Heizung in [°C] und übrige Auslegungsparameter				
ϑ_{VLa}	=	30	ϑ_{RLa}	= 25
ϑ_{aa}	=	-8	ϑ_i	= 25
Heizgrenze		ϑ_{HG}	=	12 °C
Heizflächenexponent m			=	1.24[-]
(Bodenheizung)				
Abluftwärmepumpenboiler für die Warmwasseraufbereitung				
A20/W55	COP _{20/55}	=	3.3	[-]
Leistung			7.5 kW	

Energiebedarf, Speicher- und Verteilverluste Warmwasser				
$Q_{WW,V}$	=	32		
Ablufttemperatur	ϑ_{ABL}	=	15 °C	
Vorlauftemp. WP	ϑ_{VL}	=	55 °C	
• Gebäudestandort: Zürich				
ϑ_{a1}	=	-3 °C	h_1	= 686 h
ϑ_{a2}	=	-8 °C	h_1	= 77 h
h_{HG}	=	4976 h		

Sonnenkollektoranlage	
Zur Unterstützung der Brauchwarmwasseraufbereitung ist eine Sonnenkollektoranlage installiert. Während der Heizperiode wird ein Deckungsgrad von 35 % erreicht.	

Arbeitszahl Heizung

Vorlauftemperatur bei der entsprechenden Aussentemperatur (Beispiel mit +2 °C). Der Temperatur-Korrekturfaktor aus den effektiven und den Normtemperaturen berechnet sich nach:

$$t_{VL_T} = 20 + \frac{30 - 25}{2} \cdot \frac{20 - 2}{20 - (-8)} + \left(\frac{30 + 25}{2} - 20 \right) \cdot \left(\frac{20 - 2}{20 - (-8)} \right)^{\frac{1}{1.24}} = 26.9 \text{ [°C]}$$

Diese Temperaturen und Korrekturfaktoren werden für alle drei Bereiche der Aussentemperatur berechnet:

ϑ_a [°C]	-7	+2	+7
ϑ_{VL} [°C]	29.7	26.9	25.2
f_T [-]	1.12	1.29	1.49

Mit den Korrekturfaktoren und den Gewichtungsfaktoren (Tab. 5-5) wird nun die Arbeitszahl Heizung für die gesamte Periode bestimmt:

$$JAZ_h = \frac{1}{\frac{0.313}{1.12 \cdot 2.49} + \frac{0.447}{1.29 \cdot 3.04} + \frac{0.24}{1.49 \cdot 3.97}} = 3.75$$

Arbeitszahl Warmwasser

Es ist zu beachten, dass für die Berechnung der Arbeitszahl 'Warmwasser' ein gemessener COP-Wert herangezogen werden sollte, der möglichst nahe im Bereich des vorgesehenen Arbeitsbereiches ist (Ablufttemperatur und Warmwassertemperatur).

Da der COP bereits für die richtige Temperatur vorliegt, beträgt der Korrekturfaktor für die Temperatur 1.0:

$$f_{T,WW} = 1.0 \text{ [-]}$$

Daraus lässt sich nun die Jahresarbeitszahl bestimmen:

$$JAZ_{WW} = 1.0 \cdot 0.66 \cdot 3.3 = 2.18 \text{ [-]}$$

Die Speicherverluste werden aus dem Faktor $f_{ww,v}$ berechnet (Gl. 5-6 umgestellt nach $f_{ww,v}$):

$$Q_{ww,v} = \frac{(1 - 0.66) \cdot 72351}{0.66} = 37'272 \text{ [MJ]}$$

³ Normierte Betriebspunkte gem EN 255 für die Leistungsmessung. A-7/W35 \Rightarrow Eintrittstemperatur der Aussenluft in den Verdampfer = -7 [°C], Austrittstemperatur aus dem Kondensator = 35 °C.

Auf eine Kombination der beiden Jahresarbeitszahlen kann in diesem Fall verzichtet werden, weil das Warmwasser mit einer separaten Wärmepumpe erwärmt wird.

$$\begin{aligned} \text{JAZ}_h &= 3.75 \quad [-] \\ \text{JAZ}_{ww} &= 2.28 \quad [-] \end{aligned}$$

Falls die Aufbereitung des Warmwassers auch über die Heizungswärmepumpe erfolgt, muss analog der Berechnung der JAZ_h auch die JAZ_{ww} gemäss Gl. 5-6 berechnet werden.

Abgegebene Energie zur Heizung mit Wärmepumpe

$$\Delta J = 12 - (-3) - \frac{4.5 \cdot (12 - (-3))}{5} = 1.5 \quad [\text{K}]$$

gemäss Gl. 5-11

$$\text{HGH}_1 = \frac{2 \cdot (12 - (-3)) - 1.5}{2} \cdot (686 - 77) = 8'678$$

[K.h]

gemäss Gl. 5-12

$$\text{HGH}_2 = \frac{(12 - (-3)) \cdot (4976 - 686)}{2} = 32'175 \quad [\text{K.h}]$$

$$\text{HGH}_{WP,h} = 8678.3 + 32175.0 = 40'853.3 \quad [\text{K.h}]$$

gemäss Gl. 5-12

$$Q_{WP,h} = \frac{40853.3 \cdot 5}{(12 - (-3))} \cdot 3.6 = 49'024.0 \quad [\text{MJ}]$$

gemäss Gl. 5-13

Abgegebene Energie mit der Zusatzheizung

$$\text{HGH}_{z,h} = 43019 - 40853.3 = 2'165.7 \quad [\text{K.h}]$$

gemäss Gl. 5-14

$$Q_{z,h} = \frac{2165.7 \cdot 2.2}{((-3) + 1.5 - (-8))} \cdot 3.6 = 2'639 \quad [\text{MJ}]$$

gemäss Gl. 5-15

Energieertrag aus Sonnenkollektor

Mit der Solaranlage können während der Heizperiode 35 % des Warmwasserbedarfes abgedeckt werden.

$$Q_{Kol} = 0.35 \cdot 87795 = 30'728 \quad [\text{MJ}]$$

Energieertrag aus Erdregister

Die Anlage weise kein Erdregister auf.

Energie für Warmwasseraufbereitung

Der Warmwasserverbrauch für eine Heizperiode wird wie folgt abgeschätzt:

Verbrauch: 40 l/(d·P)

Heizperiode 270 d

4-Personen Haushalt

$$Q_w = m_w \cdot c_{p,w} \cdot (J_w - J_k) \quad [\text{MJ}]$$

$$Q_w = 4 \cdot 0.04 \cdot 1000 \cdot 270 \cdot 4187 \cdot (50 - 10) \cdot 10^{-6} = 72'351 \quad [\text{MJ}]$$

Dazu kommen noch die Speicher –und Verteilverluste:

$$Q_w = 72351 + 37272 = 109'623 \quad [\text{MJ}]$$

Unter Berücksichtigung der Unterstützung durch die Solarkollektoren muss deshalb über die Abluftwärmepumpe die folgende Energiemenge aufgebracht werden:

$$Q_{WP,w} = (1 - 0.35) \cdot 109623 = 71'255 \quad [\text{MJ}]$$

Elektrische Energie für Haustechnik

Kompressorenergie Wärmepumpen

$$E_{WP,h} = \frac{49024.0}{3.75} = 13'073.1 \quad [\text{MJ}]$$

$$E_{WP,w} = \frac{71255}{2.18} = 32'686 \quad [\text{MJ}]$$

gemäss Gl. 5-16

Energieaufwand Haustechnik ohne Förderenergie

$$E_{Haustechnk} = 13073 + 32686 = 45'759 \quad [\text{MJ}]$$

Damit kann nun der Wärmenutzungsgrad nach Gl. 2-7 berechnet werden:

$$\text{WNG} = \frac{49024 + 71255 + 2639 + 30728 + 0}{45759}$$

$$\text{WNG} = 3.4 \quad [-]$$

Rechenformular für JAZ Luft/Wasser-Wärmepumpensystem

1) COP-Werte für Heizsystem

$$COP_{A-7/W35} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$COP_{A+2/W35} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$COP_{A+7/W35} = \underline{\hspace{2cm}}$$

2) JAZ Raumheizung

$$JAZ_h = \frac{1}{\frac{0.33}{1.12 COP_{A-7/W35}} + \frac{0.45}{1.16 COP_{A+2/W35}} + \frac{0.22}{1.20 COP_{A+7/W35}}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$= \frac{1}{\frac{0.33}{1.12 \underline{\hspace{1cm}}} + \frac{0.45}{1.16 \underline{\hspace{1cm}}} + \frac{0.22}{1.20 \underline{\hspace{1cm}}}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

3) COP-Werte Warmwasseraufbereitung

Fall a)

Wärmeverluste des Speichers
sind bereits in der
Leistungszahl enthalten

$$COP_{A+7/W50} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$COP_{A+20/W50} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$f_{ww,v} = 0.95$$

Fall b)

Wärmeverluste des Speichers
sind nicht in der Leistungszahl
enthalten

$$COP_{A+7/W50} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$COP_{A+20/W50} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$f_{ww,v} = 0.66$$

4) JAZ Warmwasseraufbereitung

$$JAZ_{ww} = f_{ww,v} \frac{COP_{A+7/W50} + COP_{A+20/W50}}{2}$$

$$= \underline{\hspace{1cm}} \frac{\underline{\hspace{1cm}} + \underline{\hspace{1cm}}}{2} = \underline{\hspace{2cm}}$$

5) JAZ Heizung und Warmwasseraufbereitung

$$JAZ_{h+ww} = \frac{1}{\frac{w_h}{JAZ_h} + \frac{w_{ww}}{JAZ_{ww}}}$$

$$= \frac{1}{\frac{0.65}{\underline{\hspace{1cm}}} + \frac{0.35}{\underline{\hspace{1cm}}}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

Rechenformular für JAZ **Sole/Wasser**-Wärmepumpensystem

1) COP-Werte für Heizsystem

$$COP_{B0/W35} = \underline{\hspace{2cm}}$$

2) JAZ Raumheizung

$$JAZ_h = COP_{B0/W35}$$

$$= \underline{\hspace{2cm}}$$

3) COP-Wert Warmwasseraufbereitung

$$COP_{B0/W50} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$f_{ww,T} = 0.92$$

$$f_{ww,V} = 0.66$$

4) JAZ Warmwasseraufbereitung

$$JAZ_{ww} = f_{ww,T} f_{ww,V} COP_{B0/W50}$$

$$= 0.61 \underline{\hspace{1cm}} = \underline{\hspace{1cm}}$$

5) JAZ Heizung und Warmwasseraufbereitung

$$JAZ_{h+ww} = \frac{1}{\frac{w_h}{JAZ_h} + \frac{w_{ww}}{JAZ_{ww}}}$$

$$= \frac{1}{\frac{0.65}{\underline{\hspace{1cm}}} + \frac{0.35}{\underline{\hspace{1cm}}}} = \underline{\hspace{1cm}}$$

5.5 Sprungantworten von Erdwärmesonden

5.5.1 Einzelsonden

Für die Berechnung der Quellentemperaturen bei Erdwärmesonden nach Gl. 2-30 werden die Sprungantworten der Sonden benötigt. Für eine Einzelsonde kann die dimensionslose Temperatursprungantwort g bis zum Zeitpunkt $t < t_s$ (cf Gl. 2-26) angenähert werden mit

$$g(Es, r_b / H) = \ln\left(\frac{H}{2r_b}\right) + 0.5 \ln(Es) \quad \text{Gl. 5-18}$$

Für Zeiten grösser als t_s strebt die Einzelsonde dem folgenden Gleichgewichtszustand zu:

$$g(r_b / H) = \ln\left(\frac{H}{2r_b}\right) \quad \text{Gl. 5-19}$$

5.5.2 Sondenfelder

Für Sondenfelder ist in der Literatur eine grosse Anzahl von dimensionslosen Temperatursprungantworten zu finden [z. B. Eskilson 87]. Eingezeichnet ist üblicherweise die g -function in einem Sondenabstand von $r_b = 0.0005 \times H$. Um die g -function und damit die Erdoberflächtemperatur in einem anderen Sondenabstand r_1 zu berechnen, kann unter Vernachlässigung der Dynamik im Sondennahbereich der folgende, logarithmische Ansatz verwendet werden:

$$g(Es, r_1 / H) = g(Es, r_b / H) - \ln(r_1 / r_b) \quad \text{Gl. 5-20}$$

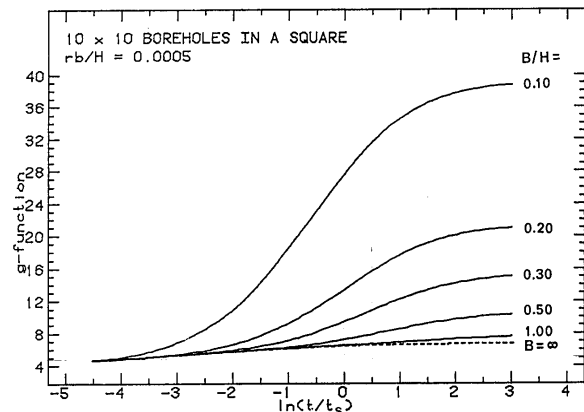
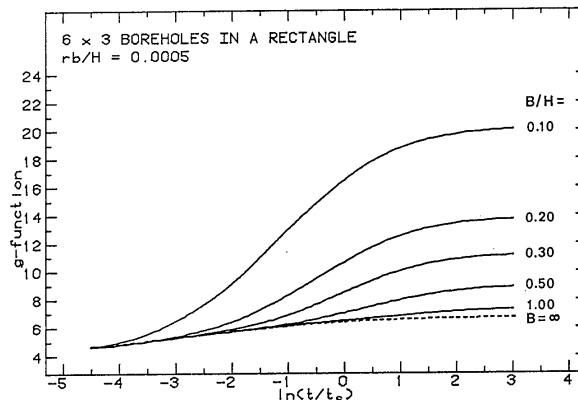
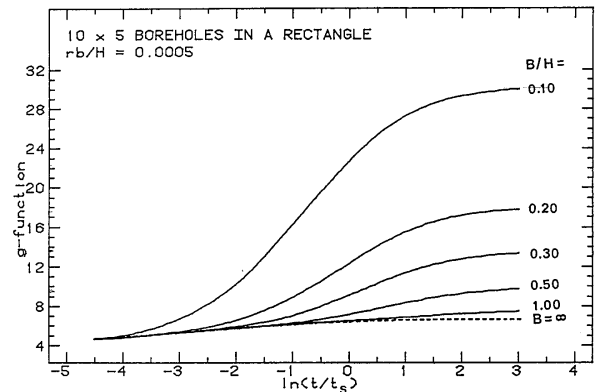
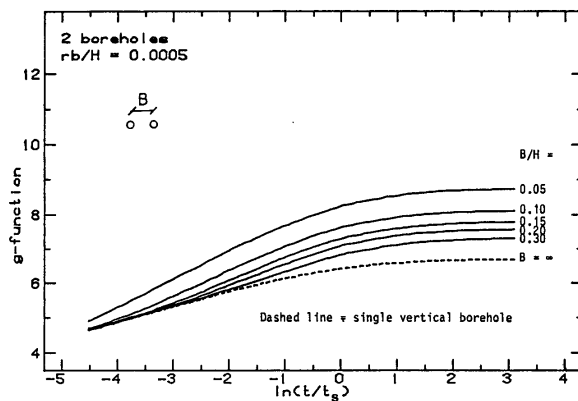
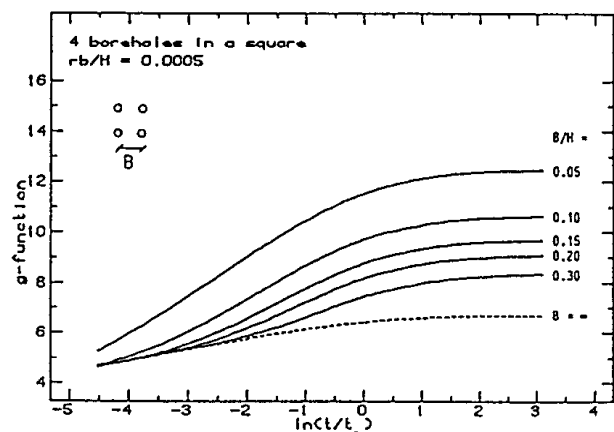
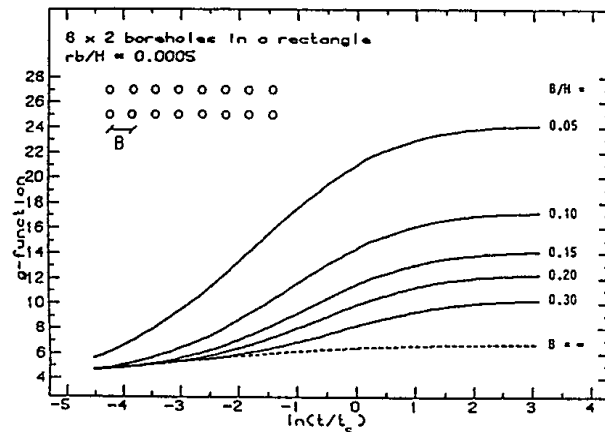


Figure 7

Abb. 5-10: Dimensionslose Sprungantworten Erdwärmesonden mit dem Abstand B nach [Eskilson 87].

5.6 Wärmeübergangskoeffizient Sonde-Sole

Der Wärmeübergangskoeffizient α vom Fluid an die Sondenrohre ist eine Funktion der mit dem Rohrdurchmesser D_i gebildeten Reynoldszahl Re und der Prandtlzahl Pr der Sole.

$$Re = \frac{D_i \cdot v}{\eta_{Sole}} \quad \text{Gl. 5-21}$$

$$Pr = \frac{\eta_{Sole} \cdot r_{Sole} \cdot c_{p,Sole}}{\lambda_{Sole}} \quad \text{Gl. 5-22}$$

D_i	Innendurchmesser Sondenrohre	[m]
v	Strömungsgeschwindigkeit im Sondenrohr	[m/s]
η_{Sole}	kinematische Viskosität der Sole	[m ² /s]
ρ_{Sole}	Dichte der Sole	[kg/m ³]
λ_{Sole}	Wärmeleitfähigkeit der Sole	[W/(mK)]
$c_{p,Sole}$	spezifische Wärmekapazität	[J/(kgK)]

Der Wärmeübergangskoeffizient wird üblicherweise dimensionslos mit der Nusseltzahl Nu für die ausgebildete Rohrströmung angegeben:

$$Nu(Re, Pr) = \frac{\alpha \cdot D_i}{\lambda_{Sole}} \quad \text{Gl. 5-23}$$

Je nach Reynoldszahl befindet man sich im laminaren Bereich ($Re < 2 \cdot 10^3$), dem Übergangsbereich laminar-turbulent ($2 \cdot 10^3 < Re < 10^4$) oder im turbulenten Bereich ($Re > 10^4$).

Für Reynoldszahlen $Re < 2'300$ liegt man immer im laminaren Bereich, für den [Merker 87] die folgende Nusseltzahl angibt:

$$Nu_{lam} = 4.36 \quad \text{Gl. 5-24}$$

Im turbulenten Bereich $Re > 10^4$ kann z. B. die Petukhov-Formel für den Wärmeübergang im Rohr angewendet:

$$Nu_{turb} = \frac{\frac{x}{8}}{K_1 + K_2 \sqrt{\frac{x}{8}} (Pr^{2/3} - 1)} Re Pr \quad \text{Gl. 5-25}$$

mit

$$K_1 = 1 + 27.2 \left(\frac{x}{8} \right) \quad \text{Gl. 5-26}$$

$$K_2 = 11.7 + 1.8 Pr^{-1/3} \quad \text{Gl. 5-27}$$

$$x = \frac{1}{(1.82 \cdot \log_{10}(Re) - 1.64)^2} \quad \text{Gl. 5-28}$$

Zwischen dem laminaren und dem turbulenten Bereich liegt ein Übergangsbereich ($2'300 < Re < 10'000$). [Huber 97] schlägt für diesen Bereich einen stetigen Ansatz vor (Abb. 5-11), der analog zum turbulenten Bereich von einer exponentiellen Zunahme der Nusseltzahl mit der Reynoldszahl ausgeht.

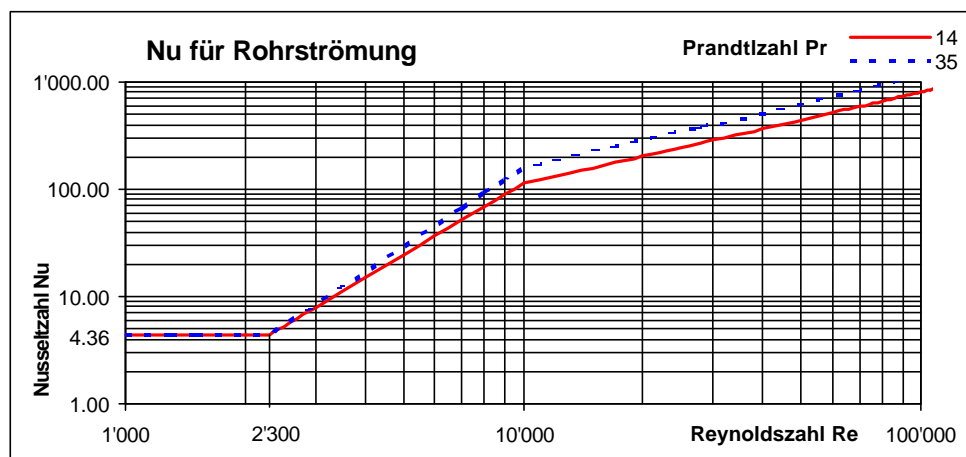


Abb. 5-11: Mittlere Nusseltzahl für die Rohrströmung in Abhängigkeit der Reynoldszahl Re [Huber 97].

5.7 Stoffwerte der Erde

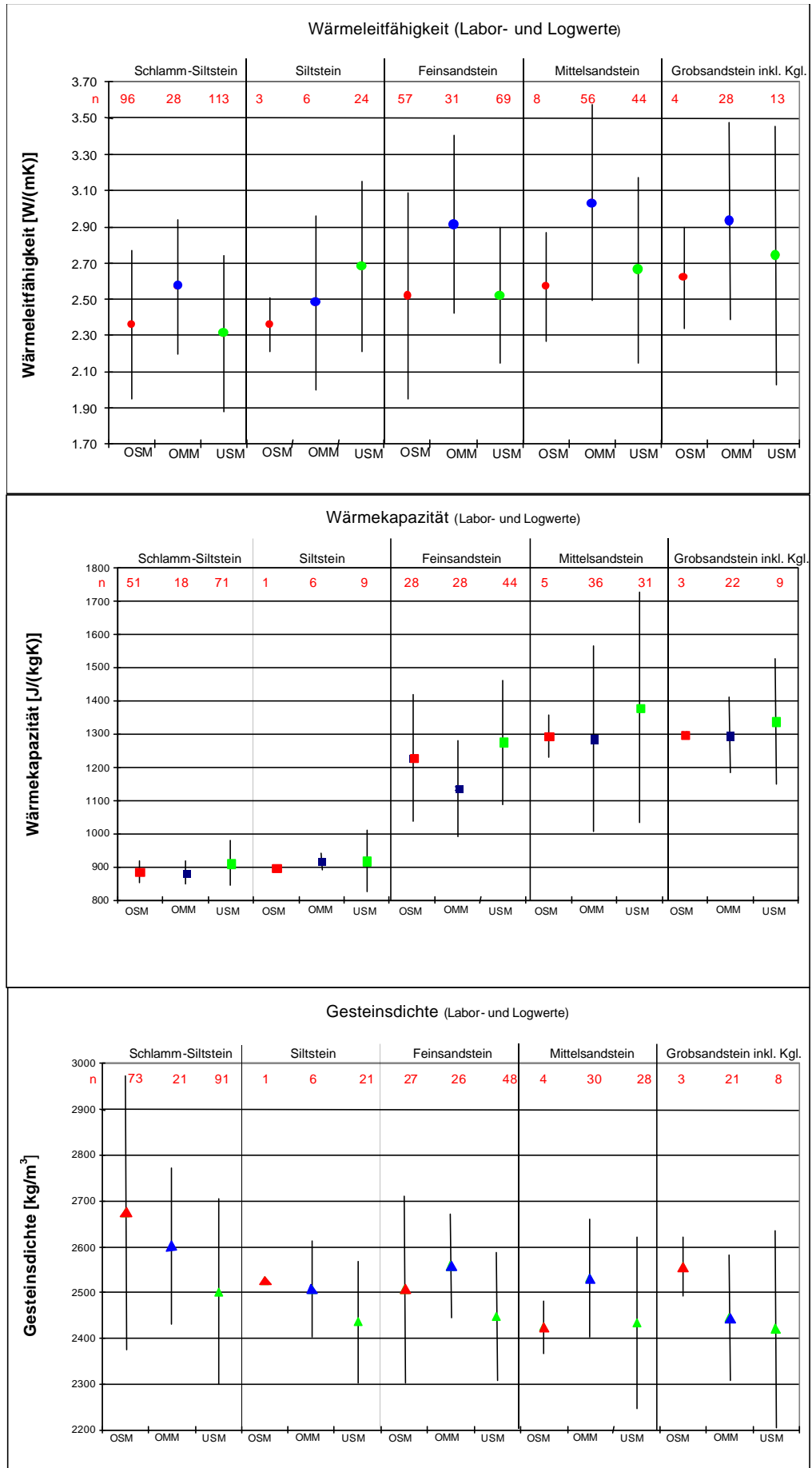


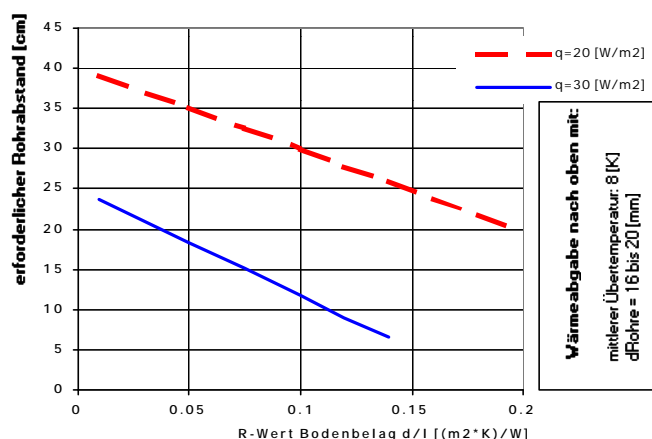
Abb. 5-12: Stoffwerte des Bodens im Molassebecken des Schweizerischen Mittellandes [Leu 99b].
(OSM, OMM, USM siehe Symbolverzeichnis)

5.8 Verlegeabstände von Fussbodenheizrohren bei verschiedenen Bodenbelägen

In der Tab. 5-6 sind Werte für Wärmedurchlass-Widerstände verschiedener Bodenbeläge angegeben.

Bodenbelag	Dicke	Wärmedurchlass-Widerstand d/λ [m ² ·K/W]
Klinkerplatten PVC-Beläge Plättli/Marmor	10.0 mm 2.5 mm	0.01 – 0.02
Travertin Schiefer Novilon	30.0 mm 30.0 mm 2.5 mm	0.015 – 0.025
Novilon	3.2 mm	0.02 – 0.03
Mosaikparkett Eiche Platten tw. mit Teppichen überdeckt	8.0 mm	0.04 – 0.05
Fertigparkett	10.0 mm	0.07
Nadelfilz Dünner Teppich		0.07 – 0.11
Mittlerer Teppich		0.12 – 0.14
Dicker Teppich		0.15 – 0.20

Tab. 5-6: Richtwerte für Durchlasswiderstände (genaue Angaben sind bei den Lieferanten der verschiedenen Bodenbeläge erhältlich) [Werte von HAKA.GERODUR AG, Gossau].



Die Verlegeabstände von Fussbodenheizrohren mit einem Durchmesser zwischen 16 und 20 mm können aus Tab. 5-7 oder Abb. 5-13 herausgelesen werden. Die mittlere Übertemperatur ΔT_{ig} (cf Gl. 2-25) wurde mit 8 °C angenommen.

Abb. 5-13: Verlegeabstand der Fussboden-Heizungsrohre bei 16 bis 20 mm Rohrdurchmesser und einer Übertemperatur ΔT_{ig} von 8 K.

	d/λ [m ² ·K/W]	0.01	0.05	0.075	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20
Wärmeabgabe [W/m ²]										
20		40 cm	35 cm	32 cm	30 cm	28 cm	26 cm	24 cm	22 cm	20 cm
30		23 cm	19 cm	15 cm	12.5 cm	10 cm	5 cm	--	--	--

Tab. 5-7: Verlegeabstände von Fussbodenheizrohren mit Durchmesser 16 bis 20 mm bei einer mittleren Übertemperatur ΔT_{ig} von 8 °C [Werte von HAKA.GERODUR AG, Gossau].

Werte für die Wärmeabgabe nach unten bei einer 20 cm dicken Wärmedämmung mit $\lambda = 0.04$ W/(mK) sind in Tab. 5-8 enthalten. Für grössere Wärmedämmstärken mit einem $\lambda = 0.04$ W/mK können für die Wärmeabgabe nach unten die Korrekturwerte aus Tab. 5-9 eingesetzt werden.

Verlegeabstand [cm]	5	7.5	10	12.5	15	20	25	30	35	40
Wärmeabgabe [W/m ²]	9.0	8.2	7.8	7.4	6.8	6.1	5.1	4.5	4.0	3.6

Tab. 5-8: Wärmeabgabe nach unten für eine 20 mm dicke Wärmedämmung mit $\lambda = 0.04$ W/(mK). Die Übertemperatur ΔT_{ig} beträgt 8 °C. Die Fussbodenheizungsrohre haben einen Durchmesser von 16 – 20 mm [Werte von HAKA.GERODUR AG, Gossau].

Dämmstärke [mm]	30	40	50	60
Korrekturfaktor f	0.84	0.64	0.54	0.47

Tab. 5-9: Korrekturwerte für grössere Wärmedämmstärken mit $\lambda = 0.04$ W/(mK) [Werte von HAKA.GERODUR AG, Gossau].

6 SYMBOLVERZEICHNIS

Lateinisches Alphabet

A	m ²	Oberfläche
B	m	Sondenabstand
C	MJ/(m ² K)	wirksame Wärmespeicherfähigkeit
cp	J/(kgK)	Spezifische Wärmekapazität
d	m	Schichtdicke
D	m	Rohrdurchmesser
E	MJ/m ²	Strombedarf, Endenergie pro EBF
f	-	Korrekturfaktor
F _g	-	Reduktionsfaktor Regelung
g	-	Gesamtenergiedurchlassgrad
g	-	Dimensionslose Temp. sprungantwort
H	m / -	Bohrtiefe / SIA-Grenzwert
\dot{m}	kg/s	Massenstrom, Durchsatz
n	-	Anzahl Heizschleifen pro Raum
P	W	Leistung
q	W/m ²	Flächenbezogener Wärmestrom
qh	W/m ²	Spezifischer Heizleistungsbedarf
Q	MJ/m ²	Nutzwärme, Nutzenergie pro EBF
\dot{Q}		Leistung, Wärme oder Kälte
r ₀	m	Radius Sondenrohr innen
r ₁	m	Bohrlochradius
r _b	m	Radialer Sondenabstand
R	m ² K/W	Wärmedurchgangswiderstand
R _c	Km/W	Thermischer Widerstand der Sonden- hinterfüllung
T	K	Temperatur
T _p	s	Periodendauer
t _c	h	Zeitperiode nach SIA V380/1
T _m	K	Ungestörte Erdtemp. in der Tiefe H/2
T _{Quelle}	K	Sondenaustrittstemperatur
t _s	s	Sondenzeitkonstante
T _u	s	Turbulenzgrad
U	W/(m ² K)	Wärmedurchgangskoeffizient
v	m/s	Strömungsgeschwindigkeit
w	-	Gewichtungsfaktor

Griechisches Alphabet

α	W/(m ² K)	Wärmeübergangskoeffizient
ε	-	Leistungszahl
Δ		Intervall, Differenz
γ	-	Wärme-Gewinn-Verlust-Verhältnis
η	-	Energetischer Wirkungsgrad
η_g	-	Ausnutzungsfaktor Wärmegewinne
λ	W/(mK)	Wärmeleitfähigkeit
ν	m ² /s	Kinematische Viskosität
ρ	kg/m ³	Dichte
σ	m	Wärmeeindringtiefe
ϑ	°C	Temperatur
τ	h	Zeitkonstante
Ψ	W/(mK)	Linearer Wärmedurchgangskoeffizient (früher linearer U-Wert)
ξ	-	Druckverlustkoeffizient

Kennzahlen

E _w	MJ/m ²	Energiekennzahl Wärme
EBF	m ²	Energiebezugsfläche
E _s	-	Eskilsonzahl, t/t _s
ETV	-	Elektro-Thermo-Verstärkungsfaktor
HGH	Kd/h	Heizgradstunden
HGT	Kd/a	Heizgradtage
JAZ	-	Jahresarbeitszahl
Nu	-	Nusseltzahl, $\alpha D / \lambda$

Pr	-	Prandtlzahl, $\nu \rho c_p / \lambda$
Re	-	Reynoldszahl, $D v / \nu$
SNG	-	Systemnutzungsgrad
WNG	-	Wärmeerzeugungsnutzungsgrad

Indizes

a	Aussen
ABL	Abluft
AUL	Aussenluft
Aux	Hilfsenergie
AWN	Abwärmenutzung
B	Boden oder Sole (brine)
Bed	Bedarf
Comp	Kompressor
D	Decke
E	Elektrizität
el	elektrisch
Erd	Erdwärme
Förd	Förderung (Ventilator, Umwälzpumpen)
g	Freie Wärme; Gebäude
G	Gebäude
h	Heizung
HG	Heizgrenze
hw	Heizung und Warmwasser
i	Innen
lg	Logarithmischer Mittelwert
K	Kondensator
KE	Kondensator Eintritt
KA	Kondensator Austritt
Kol	Sonnenkollektor
L	Aussenluft
LZ	Laufzeit
m	Mitte
nutz	Genutzte Wärme
o	oben
OMM	Obere Meeres-Molasse
OSM	Obere Süsswasser-Molasse
P	Periode
PE	Primärenergie
Q	Quellenanlage
R	Raum
RL	Rücklauf
S	Sonne, passiv
s	Sonde
Sole	Sondenfluid
SP	Speicher
SPu	Solepumpe
T	Transmission, Verlust
u	unten
ug	Genutzt an Heiztagen
USM	Untere Süsswasser-Molasse
V	Lüftung, Verlust
VA	Verdampfer - Austritt
Verl	Verlust
VL	Vorlauf
w	Warmwasser
W	Wasser
WP	Wärmepumpe
WRG	Wärmerückgewinnung
WGR	Wärmegewinne im Raum (äussere und innere)
WGB	Wärmegewinne im Boden
Z	Zusatzheizung

7 LITERATURVERZEICHNIS

- [Afjei 96] **Afjei, Th.; Betschart, W.; Bircher, R.; Geering, H.P.; Ginsburg, S.; Hässig, W.; Wetter, M., Wittwer, D.; Zweifel, G.:** Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe. Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärmekraftkopplung (UAW). Bundesamt für Energie (BFE), Bern, CH, 1996. ENET-Nr. 194'987.
- [Afjei 98a] **Afjei, Th.; Betschart, W.; Bircher, R.; Doka, G.; Geering, H. P.; Giger, Th.; Ginsburg, S.; Glass, A.; Huber, A.; Shafai, E.; Wetter, M.; Wittwer, D.; Zweifel, G.:** Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe. Phase 2: Ökologischer und ökonomischer Vergleich, Systemoptimierung, intelligente Regelung, Versuche. Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärmekraftkopplung (UAW). Bundesamt für Energie (BFE), Bern, CH, 1998. ENET-Nr. 194'993.
- [Afjei 98b] **Afjei, Th.; Betschart, W.; Bircher, R.; Doka, G.; Geering, H. P.; Giger, Th.; Ginsburg, S.; Glass, A.; Huber, A.; Shafai, E.; Wetter, M.; Wittwer, D.; Zweifel, G.:** Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe. Phase 2: Ökologischer und ökonomischer Vergleich, Systemoptimierung, intelligente Regelung, Versuche. Anhang zum Schlussbericht. Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärmekraftkopplung (UAW). Bundesamt für Energie (BFE), Bern, CH, 1998. ENET-Nr. 194'994.
- [Afjei 00a] **Afjei, Th.; Betschart, W.; Bonvin, M.; Geering, H. P.; Ginsburg, S.; Keller, P.; Shafai, E.; Wittwer, D.; Zweifel, G.:** Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe. Phase 3: Messungen an drei Funktionsmustern, Benutzereinfluss, Vergleich verschiedener Heiz- und Regelkonzepte. Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärmekraftkopplung (UAW). Bundesamt für Energie (BFE), Bern, CH, 2000.
- [AUE 99] **Amt für Umweltschutz und Energie, Kanton Basel-Landschaft:** Merkblatt über die Förderung von Gebäuden mit niedrigem Heizenergiebedarf und vorbildlichen Haustechnikanlagen, 1999.
- [Baumgartner 96] **Baumgartner, W.; Beyeler, U.; Bürki, T.; Erb, A.; Gerber, D.; Gugerli, H.; Hermann, M.; Hobler, A.; Hubmann, J.; Kunz, M.; Muggli, C.; Schalcher, H.; Sigg, R.; Sommerhalder, M.; Stulz, R.; Tanner, C.; Völke, T.; Willers, J.; Witschi, U.:** Teamorientiertes Planen (TOP). Impulsprogramm RAVEL, Bundesamt für Konjunkturfüragen, Bern, CH, 1996. ISBN 3-905251-04-3. EDMZ 724.305.
- [Blum 96] **Blum, B.; Marti, J.; Schuppisser, F.; Schmid, F.:** Projekt Solaranlage. Planungshinweise und Beispielsammlung für thermische Solaranlagen in Objekten unterschiedlicher Nutzung. Impulsprogramm PACER, Bundesamt für Konjunkturfüragen, Bern, CH, 1996. ISBN 3-905232-62-6. EDMZ 724.218d.
- [Bührling 00a] **Bührling, A.; Russ, C.:** Lüftungs-Kompaktgeräte: Angebot, Erfahrungen und Weiterentwicklung, Tagungsband der 4. Passivhaustagung in Kassel (D), März 2000.
- [Bührling 00b] **Bührling, A.:** Wärmeversorgung von Solar-Passivhäusern durch Lüftungs-Kompaktgeräte mit integrierter Kompressionswärmepumpe. Dissertation an der TU Hamburg-Harburg. (Entwurf), erstellt am Fraunhofer ISE, 2000.
- [Burmeister 95] **Burmeister, H.; Keller, B.:** Die gebäuderelevante, quantitative Darstellung von Klimata. Schweizer Ingenieur und Architekt SI+A Nr. 21 und 23, 1995, Zürich, CH.
- [Buwal 00] **Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (Buwal):** Heizenergie aus Heizöl, Erdgas oder Holz? Schriftenreihe Umwelt Nr. 315, Ökobilanzen, Bern, 2000.
- [Claesson 87] **Claesson, J.; Eskilson, P.:** Conductive Heat Extraction by a Deep Borehole. Analytical Studies. Dep. of Mathematical Physics, University of Lund. Lund, S, 1987.
- [DIN 1946] **DIN 1946, Teil 2:** Raumluftechnik, Gesundheitstechnische Anforderungen, Ausgabe 1983.
- [Eskilson 87] **Eskilson, P.:** Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes. Department of Mathematical Physics, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden. Lund, S, 1987. ISBN 91-7900-298-6.
- [Fanger 70] **Fanger P. O.:** Thermal Comfort, Analysis and Applications in Environmental Engineering; Technical University of Denmark, Copenhagen; 1970; Lyngby.
- [Feist 96] **Feist, W.:** Grundlagen der Gestaltung von Passivhäusern. Institut für Wohnen und Umwelt, Darmstadt, D, 1996.
- [Feist 99] **Feist, W.; Baffia, E.; Schnieders, J.:** Passivhaus Vorprojektierung 99. Fachinformation PHI-1999/3. Passivhaus-Institut, Darmstadt, D, 1999. Download von www.passivhaus-institut.de
- [Feist 00] **Feist, W.:** Einleitungsreferat zur 20. Sitzung des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser in Darmstadt (D), Mai 2000.
- [Fraefel 98] **Fraefel, R.:** Das MINERGIE-Haus, Planungshilfe für Baufachleute, Baudirektion des Kanton Zürich, AWEL, Abt. Energie, Bau-, Verkehrs- und Energiedirektion des Kantons Bern, 1998, Bezug: bei allen kantonalen Energiefachstellen. Internet: www.minergie.ch/planung/index.html
- [Fraefel 99] **Fraefel, R.; Huber, H.; Trawnika, M.:** Die Wohnungslüftung im MINERGIE-Haus, Planungshilfe für Baufachleute. CLIMA SUISSE, Olgastrasse 6, 8024 Zürich, 1999.

- [Frischknecht 96] **Frischknecht, R.; et al.:** Ökoinventare von Energiesystemen. 3. Auflage, Bundesamt für Energie BFE, Bern, 1996.
- [Frischknecht 00a] **Frischknecht, R.; Braunschweig, A.; Hofstetter, P.; Suter, P.:** Human Health damages due to ionising radiation in life cycle impact assessment. In Environmental Impact Assessment Review, Vol. 20, p. 159-189. 2000.
- [Frischknecht 00b] **Frischknecht, R.; Jungbluth, N.:** Graue Treibhausgasemissionen des Energie- und des Ernährungssektors in der Schweiz 1990 und 1998. BUWAL, Bern 2000 (in Vorbereitung).
- [Fux 93] **Fux, O.; Berchtold, B.; Reist, J.; Stauber, C.; Zehender, E.:** SI-Handbuch 5. Vereinigung Schweiz. Sanitär- und Heizungsfachleute VSSH, Burgdorf, 5. Auflage, 1993.
- [Gabathuler 93] **Gabathuler, R.; Baumgartner, T.; Mayer, H.; Szodoky, G.:** Wärmepumpen: Planung, Bau und Betrieb von Elektrowärmepumpenanlagen. Impulsprogramm RAVEL, Bundesamt für Konjunkturfüragen, Bern, CH, 1993. EDMZ 724.356d.
- [Gabathuler 98] **Gabathuler H.R.; Mayer H.; Shafai E.; Wimmer R.:** Pulsbreitenmodulation für Kleinwärmepumpenanlagen, Forschungsprogramm UAW des Bundesamtes für Energie, Bern, CH, 1998.
- [Geering 99] **Geering H.P.:** Robuste Regelung, Zurich, CH. IMRT-Press, 2nd ed., 1999.
- [Ginsburg 99] **Ginsburg, S.:** Hierarchische Wärmepumpenregelung mit Fuzzy Control und Robust Control. Diss. ETH Nr. 13365, Zürich, CH, 1999.
- [Goedkoop 95] **Goedkoop, M.:** The Eco-Indicator 95 – Final Report. University of Leiden (CML), PRé Consultants, Amersfoort, Netherlands agency for energy and the environment (NOVEM), Utrecht, NL, 1995.
- [Hellström 91] **Hellström, G.:** Ground Heat Storage. Thermal Analyses of Duct Storage Systems. Theory. Dep. of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden, 1991. ISBN 91-628-0290-9.
- [HDK1 89] **Eichmann, R., A.; Orth, H., W.; Leiner, W.; Lochau, R.; Müller, K.; Epperlein, H.; Katz, Ph.; Kopp, H.; Schedwill, H.; Stupperich, F., R.; Lettner, J.; Seng, G.; Hofmann, H., J.; Stäbler, W.:** Handbuch der Klimatechnik, Band 1: Grundlagen, 1989. Verlag C. F. Müller GmbH, Karlsruhe. ISBN 3-7880-7335-7.
- [Huber 97] **Huber, A.; Schuler, O.:** Berechnungsmodul für Erdwärmesonden. Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärmekraftkopplung (UAW). Bundesamt für Energie (BFE), Bern, CH, 1997. ENET-Nr. 195'115.
- [Huber 98] **Huber, A.; Remund, S.; Bürgler, A.:** WKM. Programm zur Auslegung von Luft-Erdregistern. 10. Schweizerisches Status-Seminar 1998. Energieforschung im Hochbau. EMPA-KWH, 8600 Dübendorf, CH, 1998. S. 323.
- [Huber 99a] **Huber, A.; Pahud, D.:** Erweiterung des Programms EWS für Erdwärmesondenfelder. Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärmekraftkopplung (UAW). Bundesamt für Energie (BFE), Bern, CH, 1999. ENET-Nr. 195'116, Download von www.waermepumpe.ch/fe
- [Huber 99b] **Huber, A.:** Hydraulische Auslegung von Erdwärmesondenkreisläufen. Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärmekraftkopplung (UAW). Bundesamt für Energie (BFE), Bern, CH, 1999. ENET-Nr. 195'393, gratisdownload ab www.waermepumpe.ch/fe
- [Huber 00] **Huber, A.:** WKM. PC-Rechenprogramm für Luft-Erdregister. Benutzerhandbuch. Huber Energietechnik, Zürich, CH, 2000. Download von www.igjzh.com/huber
- [Keller 00a] **Keller, B.; Magyari, E.:** Energieeffiziente Bauten, Grundlagen für intelligente Planer energiesparsamer Bauten, Schweizer Ingenieur und Architekt SI+A, Nr. 7, 18. Februar 2000.
- [Keller 00b] **Keller, B.:** Wirklich nachhaltiges Bauen. Schweizer Ingenieur und Architekt SI+A Nr. 22, 2000.
- [Klein 96] **Klein, S.; Duffie, J.; Mitchell, J.; Kummer, J.; Thornton, J.; Beckman, W.; Duffie, N.; Braun, J.; Urban, R.; Blair, N.; Mitchell, J.; Freeman, T.; Evans, B.; Fiksel, A.:** TRNSYS 14.2. A Transient System Simulation Program. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, USA, 1996.
- [Koch 98] **Koch, P.; Ott, W.; Seiler, B.; Lalive d'Epinay, A.; Gilgen, D.; Gugerli, H.:** SIA Dokumentation D 0152. Instrumente für ökologisches Bauen im Vergleich. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, Zürich, CH, 1998.
- [Koschenz 00] **Koschenz, M.; Lehmann B.:** Thermoaktive Bauteilsysteme tabs. EMPA, ZEN, Dübendorf, CH, 2000. ISBN 3-905594-19-6.
- [Leu 99a] **Leu, W.; Keller, G.; Mégel, Th.; Schärli, U.; Rybach, L.:** Programm SwEWS-99. Berechnungsprogramm für geothermische Eigenschaften der Schweizer Molasse (0-500m). Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm UAW, Bern, CH, 1999. ENET-Nr. 9723763.
- [Leu 99b] **Leu, W.; Keller, G.; Matter, A.; Schärli, U.; Rybach, L.:** Geothermische Eigenschaften Schweizer Molassebecken (Tiefenbereich 0-500m). Bundesamt für Energie, Programm Geothermie, Bern, CH, 1999.
- [Moser 97] **Moser, W.; Glauser, H.; Hässig, W.; Hodel, N.; Mercier, C.:** Niedrigenergiehäuser: komfortabel, kostengünstig und umweltschonend. Aktionsprogramm Energie 2000, Öko-Bau, 1997. EDMZ 805.212.28df.

- [Pagano 00] **Pagano, E.; Raeber, P.; Alber, J.; Decludt, B.; Francioli, P.; Gaia, V.; Gaille, P.; Kamm, U.; Gutzwiller, A.; Hohl, P.; Lang T.; Michel P.; Ruef C.; Studer, P.:** Legionellen und Legionellose. Bundesamt für Gesundheit, Bern, CH, 2000.
- [PHI 00] Rundschreiben 3'2000 des Informationskreises kostengünstige Passivhäuser, Damstadt, D, 2000.
- [Reiner 98] **Reiner G.; Shafai E.; Wimmer R.; Zogg D.; Gabathuler H. R.; Mayer H.; Bruderer H. U.:** Kurztestmethode für Wärmepumpenanlagen, Forschungsprogramm UAW des Bundesamtes für Energie, Bern, CH, 1998.
- [Remund 95] **Remund, J.; Salvisberg, E.; Kunz, S.:** METEONORM. Bundesamt für Energie, Bern, CH, 1995.
- [Russ 00] **Russ, C. Bühring, A.:** Wärmeversorgung von Passivhäusern, Tagungsband zum DGS Sonnenforum 2000, Freiburg im Brsg (D), Juli 2000.
- [RWE 99] RWE-Bauhandbuch, 12. Ausgabe, 1/98. ISBN 3-87200-700-9. Internetadresse: www.rweenergie.de
- [Schadegg 97] **Schadegg, E.; Ems, F.; Baumgart, K.; Rohr, P.; Siegenthaler, P.; Stoll, K.; Büchler, B.; Keller, H.; Weber, J.:** Leistungsmodule Haustechnik. Bundesamt für Energie BFE, Bern, CH, 1997. EDMZ 805.220.5d.
- [Shafai 99] **Shafai E.:** Einführung in die Adaptive Regelung, Zurich, CH. IMRT-Press, 1999.
- [Shell 96] **Shell International Limited (SIL):** The Evolution of the Worlds's Energy Systems, Group External Affairs, SIL Shell Centre, London SE1 7NA, 1996.
- [SIA180] **Norm SIA 180:** Wärme- und Feuchteschutz im Hochbau. Ausgabe 1999.
- [SIA380/1] **Empfehlung SIA 380/1:** Energie im Hochbau. Ausgabe 1999.
- [SIA384/2] **Empfehlung SIA 384/2:** Wärmeleistungsbedarf von Gebäuden. Ausgabe 1982.
- [SIAV382/1] **Empfehlung SIA V382/1:** Technische Anforderungen an Lüftungstechnische Anlagen. Ausgabe 1992, verlängerte Vernehmlassung.
- [SNEN832] **SN EN 832:** Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Berechnung des Heizenergiebedarfs – Wohngebäude, Ausgabe 1999.
- [Stärz 00] **Stärz, N.:** Wärmeversorgung von Passivhäusern, Tagung des Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Wuppertal (D), Juni 2000.
- [Steiger 95] **Steiger, P.; Gugerli, H.; Bucheli, U.; Gilgen, D.; Meier, H.; Walder, E.; Stritz, A.; Weibel, T.; Frischknecht, R.:** SIA Dokumentation D 0123. Hochbaukonstruktionen nach ökologischen Gesichtspunkten. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, Zürich, CH, 1995.
- [Stulz 96] **Stulz, R.; Burkhardt, P.; Gay, J., B.; Merz, C.:** Absenkpfad für die Energiekennzahl, SIA, Fachkommission Energie, Energie 2000, Ressort Wohnbauten, 1996.
- [Suter 86] **Suter, P.; Gfeller, R.; Kohler, N.; van Gilst, J.:** Haustechnik in der Integralen Planung. Impulsprogramm Haustechnik. Bundesamt für Konjunkturfragen, Bern, 1986. EDMZ 724.608.
- [Trawnika 96] **Trawnika, M.:** Manuskript Lüftungs- und Klimatechnik, Komfort und Raumluftqualität, 1996. Hochschule Technik+Architektur Luzern, Technikumstrasse 21, 6048 Horw.
- [Wetter 97] **Wetter, M.; Zweifel, G.:** Handrechenmethode zur Bestimmung der Jahresarbeitszahl von Wärmepumpenanlagen für Heiz- und Warmwasserbetrieb. HTA Luzern, Technikumstrasse 21, 6048 Horw, CH, 1997.
- [Widder 94] **Widder, F.; Steinemann, U.; Filleux, C.; Krummenacher, S.; Aiulfi, D.; Chuard, P.:** Zeitgemässe Lüftungssysteme, Aktuelles Wissen und Leitfaden für die Projektierung bei Dienstleistungsgebäuden, 1994. Bundesamt für Energie / Verband Schweizerischer Heizungs- und Lüftungsfirmen (VSHL). Bezug: VSHL, Olgastrasse 6, 8024 Zürich.
- [Witt 99] **Witt, J., Leuchtner, J.:** Passivhäuser: Nischenprodukt oder Zukunftsmarkt? Eine Marktpotentialstudie, Tagungsband der 3. Passivhaustagung, Bregenz (A), 1999.
- [Wittwer 99] **D. Wittwer et al.:** Die Wärmepumpe im Minergie-Haus – Energieeffiziente Haustechnik für das 21. Jahrhundert, Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz, Zürich, CH (16 Seiten).
- [Zimmermann 86] **Zimmermann, M.:** Handbuch der passiven Sonnenenergienutzung. SIA Dokumentation D010. SIA, Zürich, CH, 1986.
- [Zimmermann 99] **Zimmermann, M.:** Handbuch der passiven Kühlung. EMPA (ZEN) / Bundesamt für Energie BFE, Bern, CH, 1999. ISBN 3-905594-06-4.
- [Zweifel 98] **Zweifel, G.; Hess, S.; Schütz, B.:** IDEA Haustechnik – Programm zur Bedarfsermittlung SIA 382/3. 10. Schweizerisches Status-Seminar 1998. Energieforschung im Hochbau. EMPA-KWH, 8600 Dübendorf, CH, 1998. S. 331.

8 PROGRAMME & INFORMATIONEN

		Einarbeitung	Bezug
[A]	DOE-2: Thermische Simulation von Mehrzonenmodellen. Viele Möglichkeiten im Gebäudemodell. Vordefinierte Systeme (vor allem Luftsysteme). 1-Stundenschritt.	+++	EMPA
[B]	EWS: Auslegung und Dimensionierung von Erdwärmesonden und Erdwärmesondenfeldern [Huber 97 / Huber 99a].	+	HUET
[C]	EWSDRUCK: Druckabfallberechnung im Erdwärmesonden-Kreislauf. Dimensionierung der Sondenpumpe. [Huber 99b].	+	BFE HUET
[D]	HELIOS: Thermische Simulation von 1-Zonen-Modellen. Berücksichtigung einer Heizung nach Heizkurve. Keine Luftsysteme. Zeitauflösung: 1 Stunde.	++	EMPA
[E]	IDEA -Programmfamilie bestehend aus: - SIA 38x: Programm zur Berechnung der Heiz- und Kühllast nach SIA 384/2 und SIA 382/2 - Bedarfsermittlung nach SIA 382/3 mit DOE-2 als Rechenmaschine [Zweifel 98].	+	HTA LU
		++	HTA LU
[F]	MATLAB: Systemsimulationsprogramm, basierend auf den physikalischen Grundgleichungen. The Mathworks Inc.	+++	SC
[G]	Meteonorm: Berechnung der Sonnen-Strahlung auf beliebig orientierte Flächen für beliebige Standorte in der Schweiz und ausgewählte Standorte in Europa [Remund 95].	+	INFO
[H]	Polysun: PC-Programm zur Dimensionierung thermischer Sonnenenergieanlagen. Das Gebäude wird mit dem Simulationsprogramm Helios berechnet. Gute Benutzeroberfläche.	++	INFO
[I]	SwEWS: Abschätzungen der Wärmeleitfähigkeiten der Schweizer Molasse (0 – 500 m) [Leu 99a], [Leu 99b].	++	INFO
[K]	TRNSYS: Systemsimulationsprogramm, basierend auf Zeitschrittmolellen. Grosse Modul-Bibliothek. [Klein 96].	+++	TRN
[L]	Winiso: Berechnung von zweidimensionalen Wärmeströmen. Kann zur Bestimmung von Wärmebrücken verwendet werden. DXF-Schnittstelle für den Import der Geometrie.	+	SOIN
[M]	WKM Programm zur Auslegung von Erdregistern auf Excel-Basis mit WKM-Modell [Huber 00], [Huber 98].	+	HUET INFO

Einarbeitungszeit für Standardanwendung:

+	<i>kleine Einarbeitungszeit</i>	<i>ca. 1 Tag</i>
++	<i>mittlere Einarbeitungszeit</i>	<i>mehrere Tage</i>
+++	<i>grosse Einarbeitungszeit</i>	<i>Wochen, Monate</i>

BFE	Bundesamt für Energie BFE Forschungsprogramm UAW CH-3003 Bern http://www.waermepumpe.ch/fe	HUET	Huber Energietechnik Jupiterstrasse 26, CH-8032 Zürich Tel.: +41 1 422 79 78 Fax: +41 1 422 79 53 http://www.igjzh.com/huber huber@igjzh.com
EMPA	Energierengruppe EMPA Abteilung Haustechnik CH-8600 Dübendorf Tel.: +41 1 823 42 75 Fax: +41 1 823 40 09 http://www.empa.ch/erg	INFO	INFOENERGIE, c/o Nova Energie GmbH Schachenallee 29, CH-5000 Aarau Tel.: +41 62 834 03 00 Fax: +41 62 834 03 23 http://www.novaenergie.ch office.aarau@novaenergie.ch
SOIN	Sommer Informatik GmbH Kampenwandstrasse 13 D-83026 Rosenheim Tel.: 08031 / 24881 Fax: 08031 / 24882 http://www.sommer-informatik.de	SC	Scientific Computers SC AG Schurrmatstrasse 6+8, CH-3073 Gümligen info@scientific.ch
HTA LU	Hochschule Technik+Architektur Luzern Technikumstrasse 21, CH-6048 Horw Tel.: +41 41 349 32 75 Fax: +41 41 349 39 34 http://www.hta.fhz.ch ftp://ztl.ch/pub/idea	TRN	Transsolar Energietechnik GmbH Curierstrasse 2, D-70563 Stuttgart Tel.: +49 711 679 76 0 Fax: +49 711 679 76 11 http://www.transsolar.de transsolar@rus.uni-stuttgart.de