

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

Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe

Phase 4: Technisches Handbuch

ausgearbeitet durch

Th. Afjei	INFEL, Zürich afjei@infel.ch
W. Betschart	HTA Luzern, Fachhochschule Zentralschweiz
A. Bühring	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme
M. Dürig	HTA Luzern, Fachhochschule Zentralschweiz
P. Keller	HTA Luzern, Fachhochschule Zentralschweiz
S. Ginsburg	IMRT-ETH Zürich
A. Huber	Huber Energietechnik, Zürich
P. Widmer	Huber Energietechnik, Zürich
G. Zweifel	HTA Luzern, Fachhochschule Zentralschweiz

im Auftrag des
Bundesamtes für Energie

Dezember 1999

Zwischenbericht

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: +41-34-4220785 / 4226910
Projektleitung:	Informationsstelle für Elektrizitätsanwendung (INFEL) Dr. Th. Afjei Lagerstrasse 1, Postfach CH - 8021 Zürich	Projektleitung Email: afjei@infel.ch Tel/Fax: +41-1-2994182 / 2994140
Redaktion:	Huber Energietechnik A. Huber P. Widmer Jupiterstrasse 26 CH - 8032 Zürich	stv. Projektleitung Email: huber@igjzh.com Tel/Fax: +41-1-4227978 / 4227953
Projektgruppe:	ETH-Zürich Institut für Mess- und Regeltechnik S. Ginsburg ETH-Zentrum, ML K39 CH - 8092 Zürich	Regler Email: ginsburg@imrt.mavt.ethz.ch Tel/Fax: +41-1-6322444 / 6321139
	HTA Luzern, Fachhochschule Zentralschweiz W. Betschart G. Zweifel M. Dürig, P. Keller Abteilung HLK CH - 6048 Horw	Planungsvorgehen Simulation mit TRNSYS Email: wbetschart@ztl.ch Tel/Fax: +41-41-3493307 / 3493955
Projektpartner:	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE A. Bühring Oltmannsstrasse 5 D - 79100 Freiburg	Passivhaus Email: buehring@ise.fhg.de Tel/Fax: +49-761-4588288 / 4588132

ZUSAMMENFASSUNG

Zukünftige Niedrigenergiehäuser mit einer Energiekennzahl von weniger als 160 MJ/m²a stellen neue Anforderungen an die Wärmeerzeugung. Um einer unübersehbaren Anhäufung von Einzelresultaten entgegenzuwirken, wird ein technisches Handbuch zur Auslegung von WP-Heizungssystemen für Niedrigenergiehäuser ausgearbeitet. Dieses Handbuch richtet sich primär an den technisch vorgebildeten Leser, wie Planer, Ingenieure, Energieberater, Gerätehersteller und Architekten. Es soll die wesentlichen Zusammenhänge und die Erfahrungen mit den Pilotanlagen erklären und als Grundlage für weitere Umsetzungs- und Marketingaktivitäten dienen.

Das Handbuch wird einen Umfang von maximal 70 Seiten aufweisen. Neben den Grundlagen und Forschungsergebnissen werden auch das Planungsvorgehen und Beispiele ausgeführter Pilotanlagen enthalten sein.

Der gegenwärtige Stand des Handbuchs zeigt eine Abweichung des Terminplans um zwei Monate, weil noch nicht alle Entwürfe der einzelnen Kapitel eingetroffen sind. Dieser Verzug kann aufgeholt werden. Bis Ende 1999 wird ein erster Entwurf aller Kapitel vorliegen. Die Kapitel werden im Januar / Februar 2000 überarbeitet und gehen nachher in eine Vernehmlassung.

Der Grundlagenteil des Handbuchs sensibilisiert die Leser für die Thematik. Beim Planungsvorgehen werden systematisch die nötigen Schritte aufgezeigt. Dabei wird auf die kritischen Stellen ausdrücklich hingewiesen. Durch die Feldmessungen wird deutlich, wie sich die Anlagen in der Praxis bewähren und welche Auswirkung das Benutzerverhalten hat. Das Hydraulik- und Installationskonzept wurde in den Feldmessungen bestätigt.

Drei Musterhäuser zeigen die "Haustechnik von morgen für die Menschen von heute".

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

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	1
1.1	AUSGANGSLAGE	1
1.2	ZIELSETZUNGEN	1
1.3	INHALTSÜBERSICHT	1
2	ERGEBNISSE	1
2.1	AKTUELLER STAND	1
3	GRUNDLAGEN	2
3.1	BEGRIFFE MINERGIE, E2000-ÖKOBAU, PASSIVHAUS	2
3.2	ÖKONOMIE HEUTE UND MORGEN	3
3.3	ÖKOLOGIE	5
3.4	SYSTEMANALYSE – HAUSTECHNIK	10
3.5	REGELKONZEPTE	13
4	PLANUNGSVORGEHEN	17
4.1	INTEGRALE PLANUNG	17
4.2	KENNZAHLEN	21
4.3	HANDRECHENMETHODE FÜR DIE JAHRESARBEITSAHLE JAZ	22
4.4	PLANUNGSBEISPIELE	24
4.5	NOCH AUSZUFÜHRENDE ARBEITEN ZUR LEISTUNGSZAHL, COP, JAZ, NUTZUNGSGRAD	27
5	FELDMESSUNGEN	28
5.1	DREI BESTEHENDE PILOTANLAGEN ALS BEISPIEL	28
6	SCHLUSSFOLGERUNGEN	33
7	WEITERES VORGEHEN	33
8	LITERATURVERZEICHNIS	33

1 EINLEITUNG

1.1 Ausgangslage

Zukünftige Niedrigenergiehäuser mit einer Energiekennzahl von weniger als 160 MJ/m²a stellen neue Anforderungen an die Wärmeerzeugung. Die Erkenntnisse aus den verschiedenen Phasen des Forschungsprojekts "Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe" werden in einem technischen Handbuch zur Auslegung von Wärmepumpen-Heizsystemen für Niedrigenergie- und Passivhäuser zusammengefasst. Grundlage dafür bilden die Phasen 1 bis 3 des o.g. Forschungsprojekts [1], [2], [3], [10], [11].

1.2 Zielsetzungen

Im MINERGIE-Standard ist die Energiekennzahl vorgeschrieben. Die Frage, wie die erforderliche Wärme am optimalsten erzeugt wird, ist damit noch nicht beantwortet. Hier setzt das Projekt "Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe" an, in dem das Gebäude mit der Wärmeerzeugung als integrale Einheit aufgefasst wird, um die Zielgrössen Komfort, Ökologie und Ökonomie optimal zu erfüllen.

In der vorliegenden Arbeit soll als Umsetzungsprojekt ein Planungshandbuch für kostengünstige Niedrigtemperaturheizungen mit Wärmepumpen erstellt werden.

Das Handbuch richtet sich primär an den technisch vorgebildeten Leser, wie

- Planer, Ingenieure
- Energieberater (Energieberaterverein Schweiz EFS, Elektrizitätswerke, etc.)
- Gerätehersteller
- Architekten

Es dient als Grundlage für weitere Aktivitäten (→ Bauherrenbroschüre der Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz).

1.3 Inhaltsübersicht

Das Handbuch setzt sich zusammen aus den Hauptblöcken "Grundlagen", "Planungsvorgehen" und "Beispiele Niedrigenergie- und Passivhaus".

Im ersten Kapitel "Grundlagen" werden die Begriffe Niedrigenergiehaus, Minergie- und Passivhaus definiert. Weiter wird auf energetische, ökonomische und ökologische Eigenschaften eingegangen.

In der Systemanalyse werden ein Niedrigenergie- und ein Passivhaus charakterisiert. Abschliessend werden heutige und neue Regelkonzepte vorgestellt. Im zweiten Kapitel "Planungsvorgehen" wird die integrale Planung vorgestellt, bestehend aus Machbarkeitsabklärung, Vorprojekt- und Projektstudie. Ein Planungsbeispiel rundet dieses Kapitel ab.

Im dritten Kapitel "Beispiele Niedrigenergie- und Passivhaus" werden Beispiele von einer Luft-Wasser-Wärmepumpe, einer Erdsonden-Wärmepumpe und einer Luft-Luft-Wärmepumpe aufgezeigt. Ein Symbolverzeichnis, Angaben zu Informationsquellen und Programmen und eine Checkliste runden das Planungshandbuch ab.

2 ERGEBNISSE

2.1 Aktueller Stand

Nach Terminplanung sollte bis Ende Oktober 1999 die Vernehmlassung des Handbuchs stattfinden. Diese Vernehmlassung hat noch nicht stattgefunden, weil noch nicht alle Ent-

würfe eingegeben wurden. Bis Ende 1999 wird ein erster Entwurf aller Kapitel erwartet und die Vernehmlassung wird auf Januar / Februar 2000 verschoben.

Jahr	1998												1999												2000											
Monat	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J							
Startsitzung, Inhaltsverz.																																				
Entwurf der Beiträge																																				
Füllen der Lücken																																				
Resultate 1. + 2. Messperiode																																				
Vernehmlassung, -sitzung																																				
Bildung des Patronats																																				
Bereinigung, Schlussbericht																																				
Projektabschluss																																				

Anm.: graue Kästchen bedeuten, dass die Arbeit in diesen Monaten geplant ist, schraffierte Kästchen bedeuten Meilensteine oder Sitzungen

3 GRUNDLAGEN

3.1 Begriffe Minergie, E2000-Ökobau, Passivhaus

MINERGIE

MINERGIE ist eine eingetragene Qualitätsmarke. Die MINERGIE-Grenzwerte sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Gewichtete Energiekennzahlen Wärme*	
Neubauten	45 kWh/m ² a (160 MJ/m ² a)
Bauten, Baujahr vor 1990	90 kWh/m ² a (320 MJ/m ² a)
Energiekennzahl Haushaltelektrizität	
Für alle Wohnbauten zusätzlich	17 kWh/m ² a (60 MJ/m ² a)

* Es wird nur dem Grundstück zugeführte hochwertige Energie (Brennstoffe, direkt nutzbare Fernwärme) eingerechnet. Zugeführte Elektrizität für Wärmeerzeugung und Belüftung wird doppelt gerechnet

Tabelle 1: MINERGIE-Grenzwerte

Der MINERGIE-Standard für Wohnbauten beinhaltet mehrere MINERGIE-Grundsätze: Es werden hohe Anforderungen gestellt an das Komfortangebot, wie tiefe Vorlauftemperaturen, Luft- und Oberflächentemperaturen, Luftfeuchtigkeit, Luftschadstoffe im Innenraum, Schallschutz, Bedienungsaufwand sowie an Wirtschaftlichkeit und Ästhetik.

Energie 2000 Nachhaltiges Bauen (ehemals E2000-Ökobau, DIANE-Ökobau)

Nachhaltiges Bauen ist eines der Umsetzungsprogramme von Energie 2000 mit dem Ziel, Niedrigenergiehäuser in ökologischer Bauweise als neuen Baustandard zu fördern. Wohnsiedlungen, Schulhäuser und Bürobauten sind die Arbeitsbereiche. Die Kriterien eines nachhaltigen Gebäudes enthalten Wirtschafts-, Gesellschafts- und Umweltelemente.

Im Gegensatz zum MINERGIE-Standard wird bei Energie 2000 nicht das Ziel, d. h. der Endenergiebezug bewertet, sondern der Weg zum Ziel mit einem Notensystem gewichtet.

Passivhaus

Passivhäuser sind dadurch gekennzeichnet, dass die thermische Behaglichkeit in ihnen mit einer Luftheizung ohne Umluftanteil gewährleistet werden kann. Damit der noch

verbleibende Wärmebedarf kostengünstig mit dem hygienisch notwendigen Zuluftstrom eingebracht werden kann, liegt der Heizleistungsbedarf unter 10 W/m^2 . Daraus ergibt sich ein Jahresheizenergiebedarf unter $54 \text{ MJ/m}^2\text{a}$ ($15 \text{ kWh/m}^2\text{a}$). Die wichtigsten Merkmale eines Passivhauses sind:

- Minimieren der Wärmeverluste durch:
 - verbesserte Wärmedämmung (25 bis 40 cm Vollwärmeschutz)
 - optimiertes Oberflächen/Volumen-Verhältnis
 - sehr gute Fenster mit Dreifach-Wärmeschutzverglasung und möglichst wärmege-dämmten Fensterrahmen
 - Vermeidung von konstruktiven Wärmebrücken, wärmebrückenfreie Konstruktion
 - luftdichte Ausführung der Gebäudehülle ($n_{50} < 0.6 \text{ h}^{-1}$)
- Optimieren der Wärmegewinne
 - passiv-solare Gewinne durch optimale Fensterflächenanteile, g/U-Wert Kombination
 - Gebäudeausrichtung wenn möglich nach Süden (auch als Überhitzungsschutz im Sommer)
 - möglichst beschattungsfrei bauen
- Verbrauchsarmes Haustechniksystem
 - Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung
 - Luftansaugung möglichst über ein Erdregister
 - eventuell Deckung der Heizwärme über das Luftsystem (kostengünstig und dank des geringen Wärmebedarfs ohne Komforteinbuße realisierbar)
 - möglichst aktive Ausnutzung der Sonnenenergie mit Solarkollektor und Photovoltaik

- **MINERGIE Neubau: Heizwärmebedarf: $< 160 \text{ MJ/m}^2\text{a}$ ($45 \text{ kWh/m}^2\text{a}$) - Heizung und Lüftung erforderlich**
- **Passivhaus: Heizwärmebedarf $< 54 \text{ MJ/m}^2\text{a}$ ($15 \text{ kWh/m}^2\text{a}$) – Luftheizung ohne zusätzliches hydraulisches Heizsystem reicht aus**

3.2 Ökonomie heute und morgen

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 BFE-Projektes wurden die folgenden drei Varianten realisiert und kostenmässig genau erfasst:

- Luft/Wasser-Wärmepumpe mit Niedrigtemperatur-Bodenheizung $30/25^\circ\text{C}$ in Kombination mit einem Abluft-WP-Boiler und Zuluft über Mauerventile
- Sole/Wasser-Wärmepumpe mit Niedrigtemperatur-Bodenheizung $30/25^\circ\text{C}$ in Kombination mit einem Warmwasser-Beistellboiler und periodischer, mechanischer Lüftung im Bad und WC
- Luft/Luft-Wärmepumpen-Kompaktgerät mit Ansaugung über ein Erdregister und Wärmerückgewinnung für die Zuluft- und die Wassererwärmung

Abbildung 1 zeigt die Jahreskosten der verschiedenen Systeme inkl. kontrollierter Lüftung.

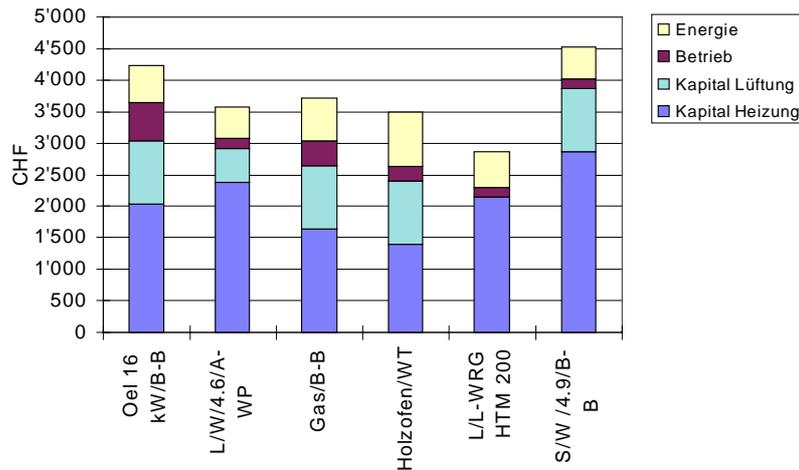


Abbildung 1: Jahreskosten der verschiedenen Systeme inkl. kontrollierter Lüftung

Die Jahreskosten der verschiedenen Systeme ergeben sich aus den Anteilen für Energie, Betrieb/Unterhalt und Kapital, wobei hier unterschieden werden kann zwischen Kapital für Lüftungs- und Kapital für Heizungsinvestitionen.

Die Anlagekosten für die Wärmepumpen-Varianten dürften in Zukunft 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 (ca. SFr. 500.- weniger)
- Standardisierung der Anlagentypen im Neubau und direkte Einplanung der Luftkanäle bei der Haus-Vorfabrikation (Holzbauweise)

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

Passivhaus

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 Abbildung 2 dargestellt ist.

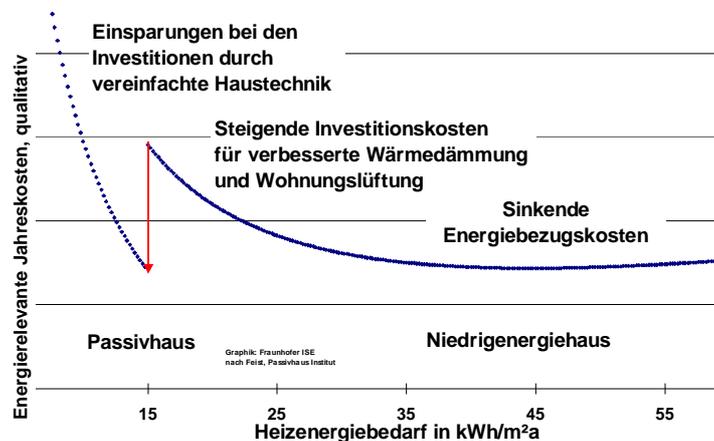


Abbildung 2: Ökonomischer Ansatz für den Passivhaus-Standard

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 zahlt sich bei den gegenwärtigen Energiebezugskosten über den eingesparten Energiebezug nicht aus. Beim Standard des Passivhauses wird jedoch eine neue Qualität erreicht, weil 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 Fr/a) kann damit ein Kostenniveau erreicht werden, welches dem von Niedrigenergiehäusern entspricht.

- **Einsparungen bei den Investitionskosten von Fr. 2000 – 3000 bei Wärmepumpen-Heizsystemen in naher Zukunft möglich.**
- **Kostenniveau von Passivhäuser entspricht demjenigen von Niedrigenergiehäusern.**

3.3 Ökologie

Die Umweltbelastungen, die aus menschlichen Tätigkeiten stammen, nehmen seit Beginn des 19. Jahrhunderts immer grössere Dimensionen an. In Abbildung 3 sind die Zusammenhänge zwischen den ursprünglichen Emissionen und Ressourcenentnahmen, den Umweltwirkungen und den resultierenden Umwelteffekten dargestellt.

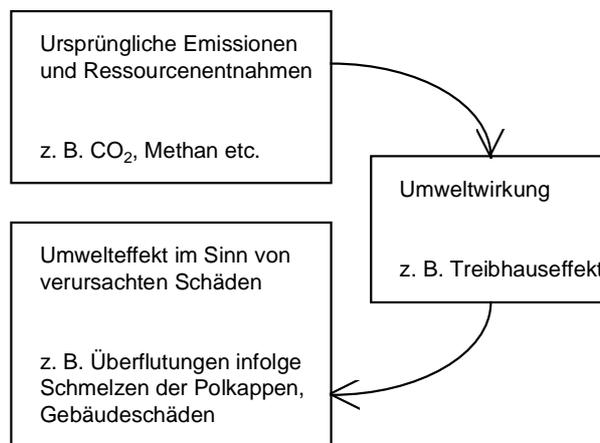


Abbildung 3: Zusammenhang zwischen ursprünglichen Emissionen und Ressourcenentnahmen, Umweltwirkungen und resultierenden Schäden (nach [7])

In der Regel geht eine ökologische Beurteilung von einer Ökobilanz aus, deren verschiedene Stufen in Abbildung 4 dargestellt sind und im folgenden etwas näher erklärt werden.

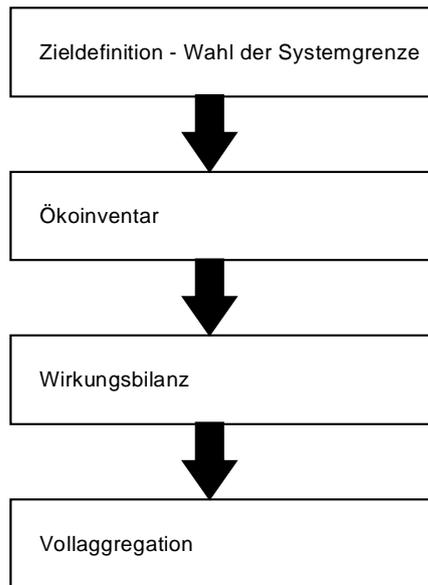


Abbildung 4: Vorgehensschritte für Ökobilanzen

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 wichtigen Einfluss auf die Bilanz aus, indem sie z. B. die benötigten Mengen bestimmen. Tabelle 2 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 Industriefeuerung, das benötigte Heizöl und den Strom. Im Prozess Transport wird der Verkehr von 16 t- und 28 t-LKWs, Lieferwagen und Bahn berücksichtigt.

Infrastruktur S/W-Wärmepumpe pro Betriebsjahr		bilanzierte Mengen
Datenmodule aus [9], 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

Tabelle 2: Bilanzierte Materialien und Prozesse für die Infrastruktur einer S/W-Wärmepumpe pro Jahr (Auszüge aus [1])

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 Abbildung 5 zeigt, und daher in der Norm 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.

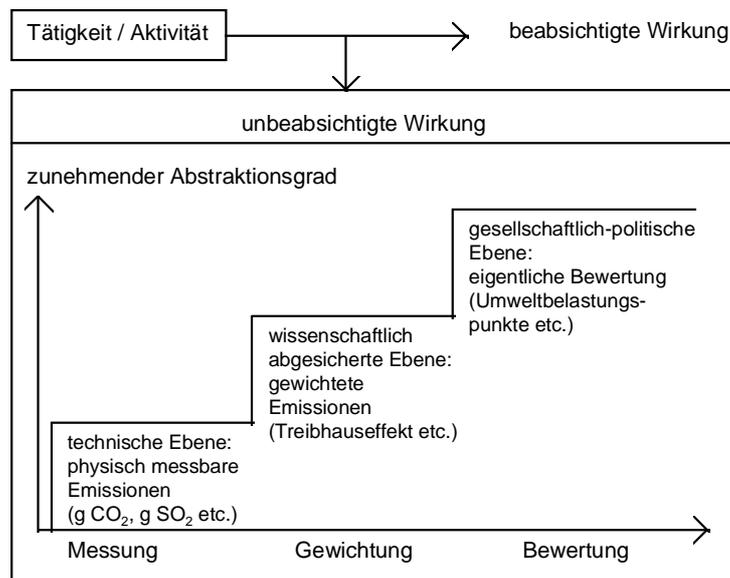


Abbildung 5: Zusammenhang zwischen möglichen Betrachtungsweisen von Umwelteinwirkungen (nach [7])

Vergleichbarkeit

Damit die verschiedenen 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. Zuviele 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.

ECO-Indikator'95

Der ECO-Indikator'95 fasst die unterschiedlichen Emissionen und Ressourcenverbräuche des Ökoinventars (Sachbilanz) zu einem einzigen Wert zusammen. Abbildung 6 zeigt den Aufbau des ECO-Indikator'95. Der ECO-Indikator basiert demzufolge auf einer Vollaggregation, die mithilfe von zwei Gewichtungsschritten vollzogen wird. Der vollaggregierte ECO-Indikator ergibt sich aus der gegenseitigen Abwägung der resultierenden Schäden der Schutzgüter [14].



Abbildung 6: Aufbau des ECO-Indikator'95

Umwelteffekte

Im Bericht "Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe – Phase 2" [1] sollten die ökologischen Belastungen von zwei verschiedenen Heizwärmepumpen (Luft/Wasser- resp. Sole/Wasser-WP) bilanziert werden. Dazu wurden vier Gebäudevarianten definiert, mit deren Bilanzierung die Frage beantwortet werden sollte: "Kann der ökologische Mehraufwand eines Niedrigenergiehauses die ökologischen Entlastungen durch die Einsparung von Wärmepumpenenergie möglicherweise kompensieren?"

Auf die Vollaggregation des ECO-Indikator'95 wurde 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

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 mithilfe 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.

Tabelle 3 fasst die Payoff-Indizes der verschiedenen Umwelteffekten bei den beiden Gebäudevarianten zusammen.

Zusatzaufwand	Wärmevariante				
	L/W-WP	S/W-WP	Öl	Gas	Elektro
Leichtbau					
Treibhauseffekt	0.73	0.92	0.11	0.15	0.25
Ozonerstörung	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
Massivbau					
Treibhauseffekt	0.63	0.8	0.10	0.13	0.22
Ozonerstörung	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

Tabelle 3: Payoff betrachtetes Standard- vs. Niedrigenergiegebäude bei Leicht- und Massivbauweise. Bei Werten unter 1 (fett) lohnt sich der Zusatzaufwand (aus [1])

Mögliche Szenarien für die Zukunft – Strommix

Die Wahl des Strommixes bestimmt das Ergebnis einer Ökobilanz maßgeblich. In der hier betrachteten Ökobilanz beispielsweise stammt ein wichtiger Beitrag der ökologischen Belastungen einer Wärmepumpe aus der Bereitstellung des Betriebsstromes. Je nach Auffassung können verschiedene Strommixe berücksichtigt werden. Eine "objektiv richtige" Wahl des Strommix gibt es aber nicht.

- **Ausgewählte Methodik bestimmt maßgeblich das Resultat einer Ökobilanz (Wahl der Systemgrenzen, berücksichtigte Prozesse)**
- **Vollaggregation nur mit subjektiven Bewertungskriterien möglich**
- **Wahl des Strommixes bestimmt das Resultat einer Ökobilanz maßgeblich**

3.4 Systemanalyse – Haustechnik

Charakteristik eines Niedrigenergiehauses

Da 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 $50 \text{ MJ/m}^2\text{a}$ 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.

Durch die optimierte Gebäudehülle sinkt der Heizwärmebedarf. Dadurch 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 Jahresnutzungsgrad) 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 mit Sonnenkollektoren. Diese Technik wurde kontinuierlich weiterentwickelt. Es gibt Standardlösungen, welche zu relativ günstigen Preisen erhältlich sind und einfach auf dem Dach montiert werden können.

Selbstregeleffekt

Unter Selbstregeleffekt eines Wärmeabgabesystems versteht man die automatische Abnahme der Heizleistung, falls dem Raum Fremdwärme zugeführt wird. Die analytische Betrachtung des Selbstregeleffektes ist in Abbildung 7 für den heizungstechnisch relevanten Bereich aufgetragen. Aus ihr geht hervor, dass bei einer Übertemperatur des Heizmediums von 4 K (entspricht der Heizleistung einer Anlage mit Auslegungstemperatur $30/25^\circ\text{C}$, bei 20°C Raumtemperatur und 0°C Aussentemperatur) die Wärmeabgabe um 30% reduziert wird, falls die Raumtemperatur um 1 K ansteigt.

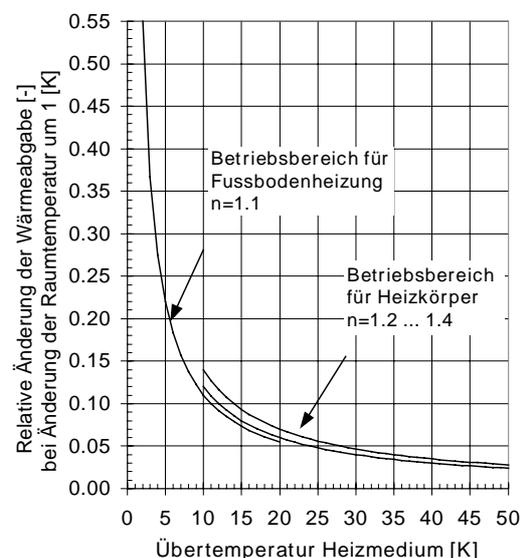


Abbildung 7: Selbstregeleffekt von Niedrigtemperaturheizungen

Leichtbau kontra Massivbau

Es wurde ein Objekt mit kleinen Fensterflächen in Leicht- und Massivbauweise mit dem Mittel der Computersimulation untersucht. Während der ganzen Simulation wurde weder die Beschattungseinrichtung betätigt noch der Luftwechsel zur Dämpfung der Überhitzung erhöht. Die Wärmepumpe wurde über die Rücklauftemperatur ein- und ausgeschaltet. Aus Abbildung 8 geht die Dämpfung der operativen Temperatur (Mittelwert aus Strahlungs- und Lufttemperatur) des Massivbaus gegenüber dem Leichtbau hervor.

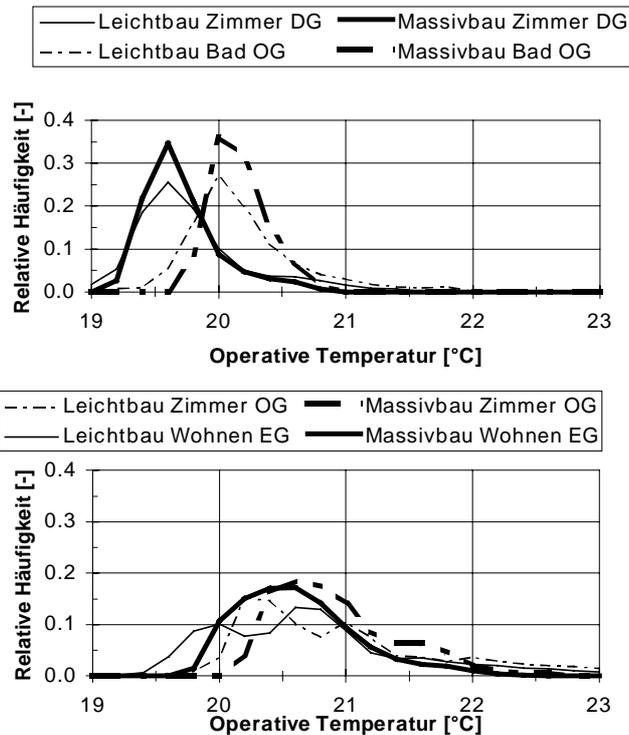


Abbildung 8: Häufigkeit der operativen Temperatur bei Leicht- und Massivbau

Haustechnik im Passivhaus

Im Passivhaus kann auf ein separates hydraulisches Wärmeverteilsystem verzichtet werden. Zentraler Teil der Haustechnik zur Sicherstellung eines behaglichen Raumklimas ist die Lüftungsanlage mit WRG. Ein schematisches Beispiel für eine solche Anlage zeigt Abbildung 9.

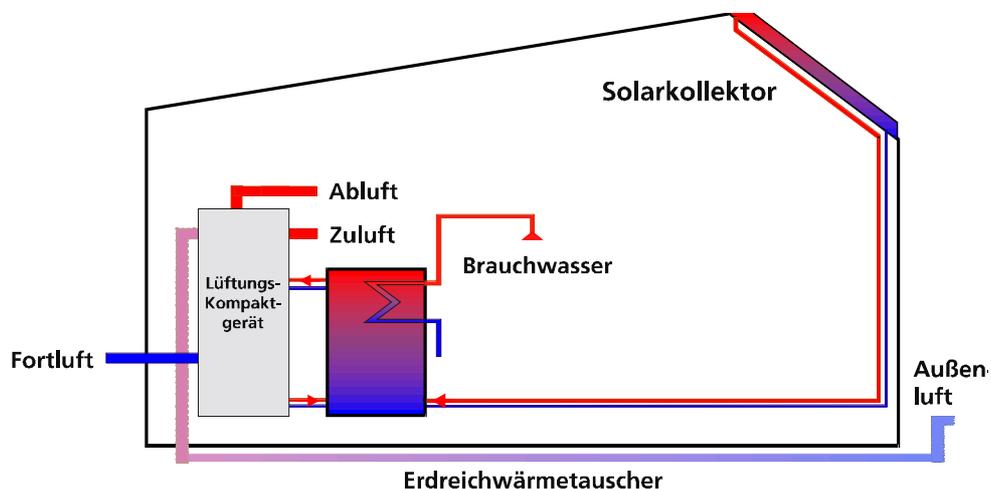


Abbildung 9: Lüftungsanlage im Passivhaus mit integrierter Restheizung und Brauchwassererwärmung und vorgeschaltetem Erdregister

In einem Wohnungslüftungsgerät sind in der Regel die folgenden Komponenten integriert:

- Zuluft- und Abluftventilator
- Wärmetauscher zur Wärmerückgewinnung
- Filter
- Regelung
- evtl. Nacherwärmer

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).

Der minimale Zuluftstrom richtet sich nach hygienischen Gesichtspunkten: nach SIA 382/1 wird ein minimaler Aussenluftanteil von 25 bis 30 m³/hP empfohlen. Zu beachten ist, dass in grossen Räumen die Kohlendioxidkonzentration langsamer steigt als in kleinen (bei gleichbleibender Personenanzahl).

Für die Wärmeerzeugung im Passivhaus wurden folgende Varianten durchgerechnet:

- 1 Wärmepumpe kombiniert mit Solaranlage
- 2 Wärmepumpe ohne Solaranlage
- 3 Gaskessel kombiniert mit Solaranlage
- 4 Gaskessel ohne Solaranlage
- 5 Ölkessel ohne Solaranlage

Diese weisen die folgenden Primärenergiekennwerte auf (siehe Abbildung 10).

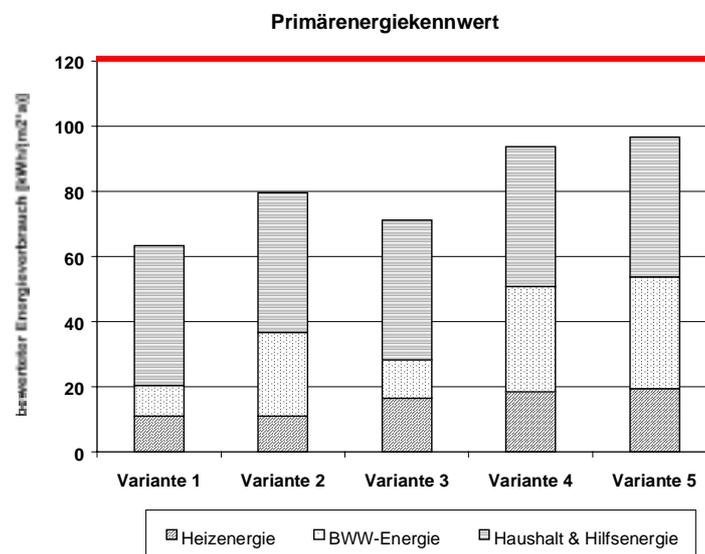


Abbildung 10: Primärenergiekennwerte des Passivhauses mit verschiedenen Wärmeerzeugungsvarianten. Grenzwert Passivhaus: 120 kWh/m²a

- **Selbstregelleffekt optimal bei kleiner Temperaturdifferenz zwischen Heizmedium und Raumtemperatur**
- **Niedrigenergiehaus und MINERGIE-Haus: Heizung mit hydraulischer Wärmeverteilung und mechanische Lüftung mit oder ohne WRG**
- **Passivhaus: Luftheizung mit WRG reicht aus**

- Elektrischen Energieverbrauch der Hilfsaggregate (Pumpen, Ventilatoren, etc.) beachten

3.5 Regelkonzepte

Heutige Regelkonzepte

Die Anpassung der Wärmeabgabe an die jeweilige Wettersituation erfolgt mit herkömmlichen Regelstrategien fast ausnahmslos durch die Regelung der Vor- oder Rücklauftemperaturen aufgrund der Aussenlufttemperatur. Dabei dient die Heizkurve zur Festlegung des Sollwertes für die Vorlauftemperatur. Damit wird die Art des Wärmeabgabesystems, die Heizgrenze und die momentane Aussenlufttemperatur berücksichtigt. Fremdwärmegewinne im Raum können mit dieser Regelungsart nicht erfasst werden. In der Regel wird dies mit thermostatischen Heizkörperventilen gelöst, d.h. durch eine Reduktion des Massenstromes (siehe Abbildung 11 und Abbildung 12).

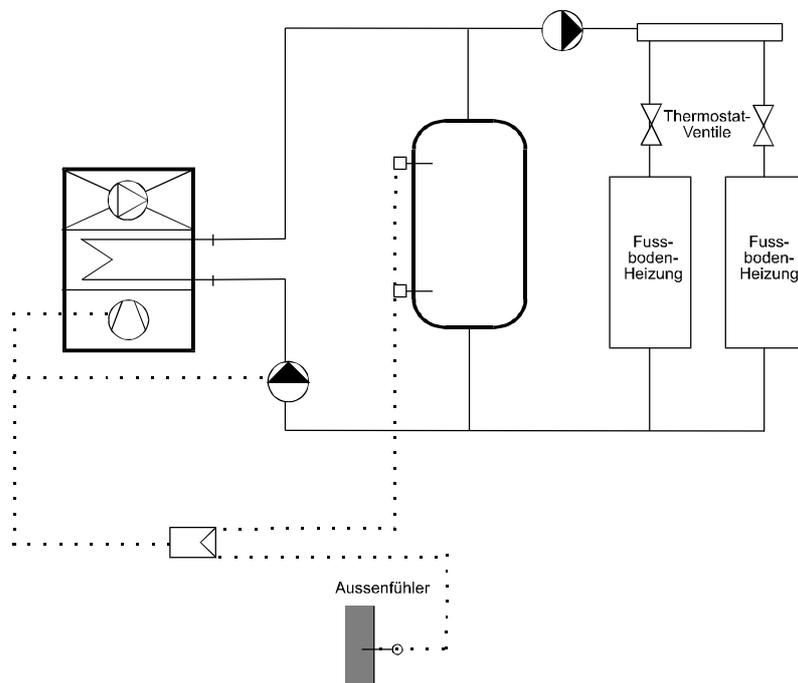


Abbildung 11: WP-Schaltung mit technischem Speicher

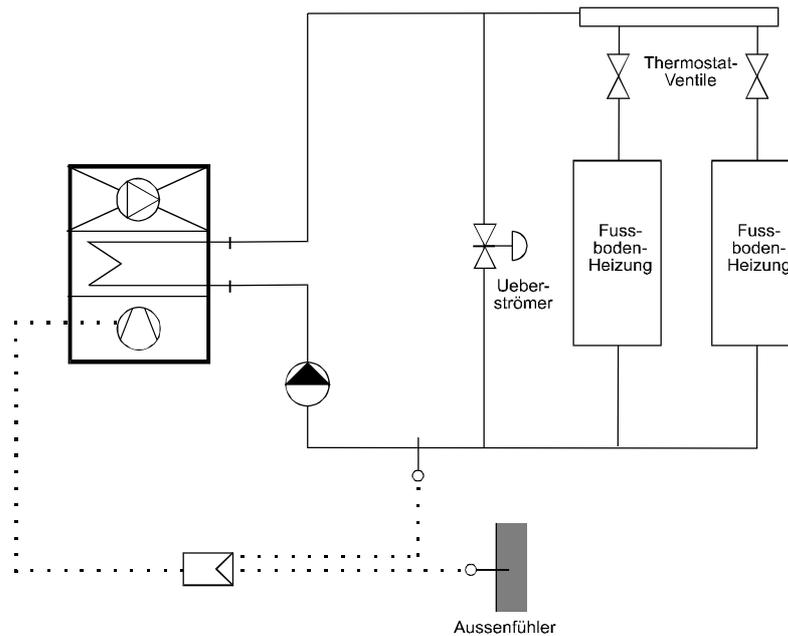


Abbildung 12: Überströmung

Im folgenden die Vor- und Nachteile:

- + Diese Regelungsart ist einfach aufgebaut und im Betrieb leicht 'zu beherrschen'. Die vorzunehmenden Einstellungen sind demzufolge einfach. Die Einstellgrösse 'Heizkurve' ist leicht verständlich, und Adaptionen dieser Reglereinstellung können auch von weniger geübten Personen vorgenommen werden.
- Mit diesem Regelkonzept ist eine Erfassung des Gebäudeverhaltens nicht möglich. Das heisst, dass Fremdwärmegewinne bei der Festlegung der Vorlauftemperatur nicht oder nur indirekt durch einen Anstieg der Aussentemperatur bei Sonneneinstrahlung erfasst werden können. Die Gefahr des Überschwingens der Raumlufttemperatur ist daher recht gross und muss mit dem Einsatz von Thermostatventilen verringert werden, was bei trägen Bodenheizungen nur beschränkt möglich ist. Die Regelparameter für einen energiesparenden Betrieb richtig einzustellen, bleibt schwierig (zum Beispiel das Ein- und Ausschalten der Heizung in der Übergangszeit).

Moderne Haustechnikkonzepte

Bei diesem Wärmeverteilsystem ohne hydraulischen Speicher werden alle Räume gleichzeitig und proportional zueinander beheizt. Die wesentlichen Bestandteile des Wärmeabgabesystems bestehen aus der Wärmepumpe, der Umwälzpumpe, den einzelnen Heizkreisen und den Heizschlangen im Fussboden ohne Thermostatventile (siehe Abbildung 13).

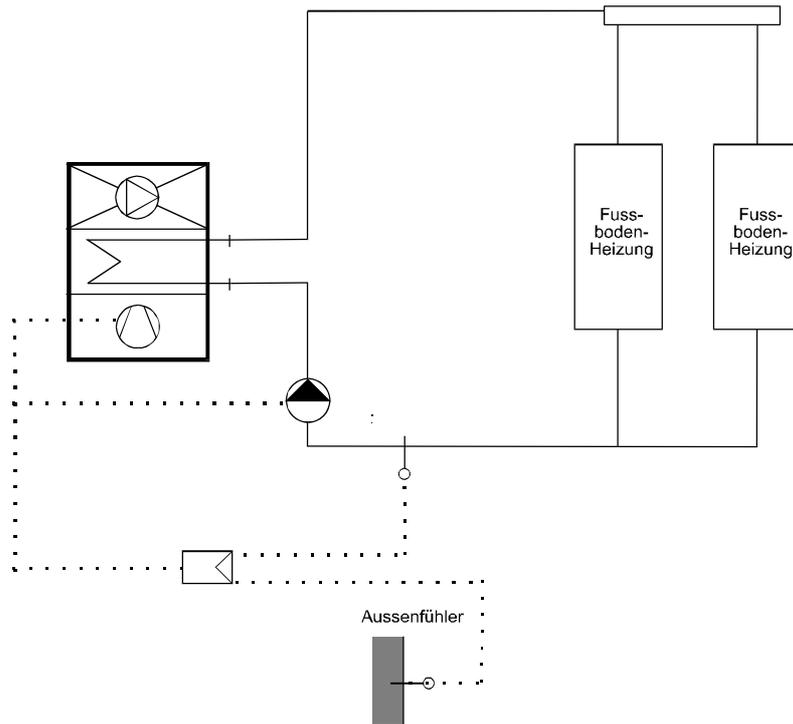


Abbildung 13: Rücklauftemperaturregelung ohne Thermostatventile

Bei der Verwendung von Thermostatventilen muss die Regelung über einen Differenz-Druckfühler gelöst werden, wie auf Abbildung 14 dargestellt.

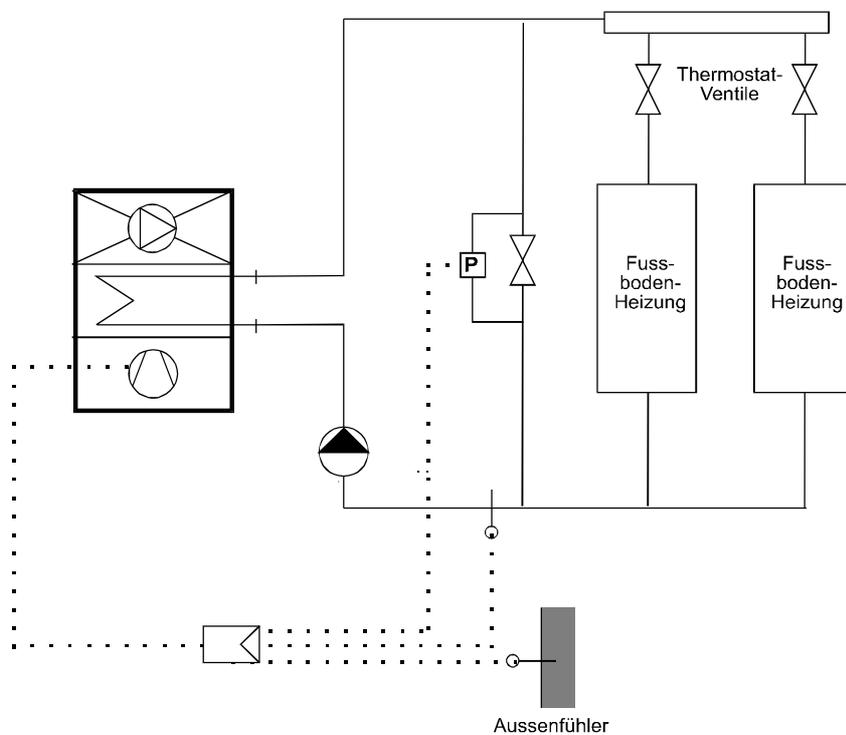


Abbildung 14: Idee für neues Regelkonzept: Druckgeführtes System mit Thermostatventilen

Reglerkonzepte

Bei den modellbasierten Konzepten wird für die Reglerausnutzung ein Modell des Wärmennutzungssystems verwendet. Dieses Modell beschreibt das thermodynamische Verhalten und kann entweder für die Beobachtung der Referenzraumtemperatur oder für die Prädiktion des Wärmebedarfs in nächster Zukunft verwendet werden. Im ersten Fall handelt es sich um einen beobachterbasierten Regler und im zweiten Fall um einen modellprädiktiven Regler.

Durch den Einsatz eines modellbasierten Reglers kann auf die permanente Messung der Referenzraumtemperatur verzichtet werden, weil der Regler mit Hilfe des Modells aus den gemessenen Temperaturen von Aussenluft und Rücklaufwasser auf die Referenztemperatur zurückrechnet. Da kein Parametersatz die Realität exakt wiedergibt, muss beim Entwurf des Reglers eine Methode gewählt werden, die robust gegenüber Modellfehlern ist.

Der modellprädiktive Regler benötigt neben der Modellvorstellung der Wirkung einer Störung auf das zu regelnde System auch eine Vorhersage des Verlaufs dieser Störung. Für diese Vorhersage und einem gewünschten Verlauf der Zielgrösse wird ein optimaler Verlauf der Stellgrösse vorausberechnet.

Da die betrachteten, modellbasierten Regler ein kontinuierliches Stellsignal ausgeben, heutige Wärmepumpen aber nur ein- und ausgeschaltet werden können, muss das Stellsignal noch umgeformt werden. Die Pulsbreitenmodulation [4] formt das Verhältnis zwischen aktuellem Stellsignal zum maximal möglichen Wert zum Verhältnis der Laufzeit der Wärmepumpe zu einer festen Periodendauer um. Dazwischen wird die Wärmepumpe einmal pro Periodendauer eingeschaltet, wie in Abbildung 15 (a) dargestellt. Da die Laufzeit bereits vor dem Einschalten bekannt ist, ist eine Koordination mit voraussichtlichen Sperrzeiten möglich, indem die Periode unmittelbar vor der nächsten Sperrzeit etwas verlängert wird, damit das Wiedereinschalten mit dem Ende der Sperrzeit zusammenfällt (b) oder verkürzt wird, um noch eine Laufzeit vor den Beginn der Sperrzeit hineinzupassen (c).

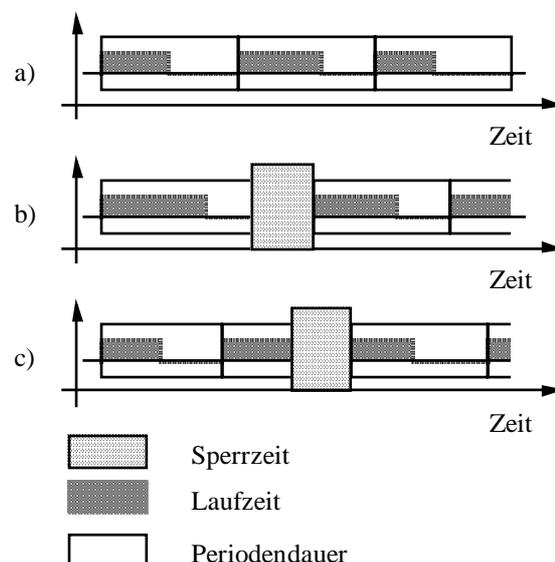


Abbildung 15: Anpassung der Periodendauer an die nächste Sperrzeit

- **Moderne Regelsysteme: beobachterbasierte und modellprädiktive Regler**
- **Pulsbreitenmodulation für Systeme im Ein- und Ausbetrieb**
- **Selbstregulierende Fussbodenheizung ohne Thermostatventile**

4 PLANUNGSVORGEHEN

4.1 Integrale Planung

Der Heizenergiebedarf nimmt in unseren Klimaregionen sowohl in Wohn-, als auch in Gewerbebauten einen massgebenden Anteil am gesamten Energiebedarf eines Gebäudes ein. Abbildung 16 zeigt die Einflussgrössen auf den Heizenergiebedarf.

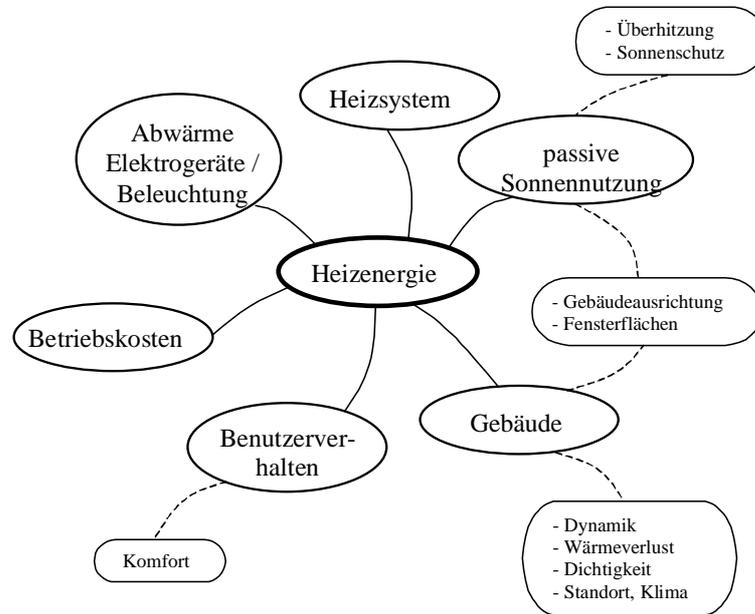


Abbildung 16: Einflussgrössen auf den Heizenergiebedarf

Werden all die vorhandenen Erkenntnisse über Ursachen des Energieverbrauchs zusammengelegt und im Rahmen einer Teamarbeit für die Planung angewendet, so macht man "Integrale Planung". Integrale Planung ist somit ein Planungsverfahren, welches gestattet, ein Bauvorhaben optimal zu verwirklichen. Es soll nicht zuletzt auch mithelfen, Bauten rascher, kostengünstiger und im Betrieb ökonomischer zu erstellen.

Abbildung 17 und Abbildung 18 zeigen die Unterschiede zwischen der heute üblichen seriellen und der integralen Planung auf.

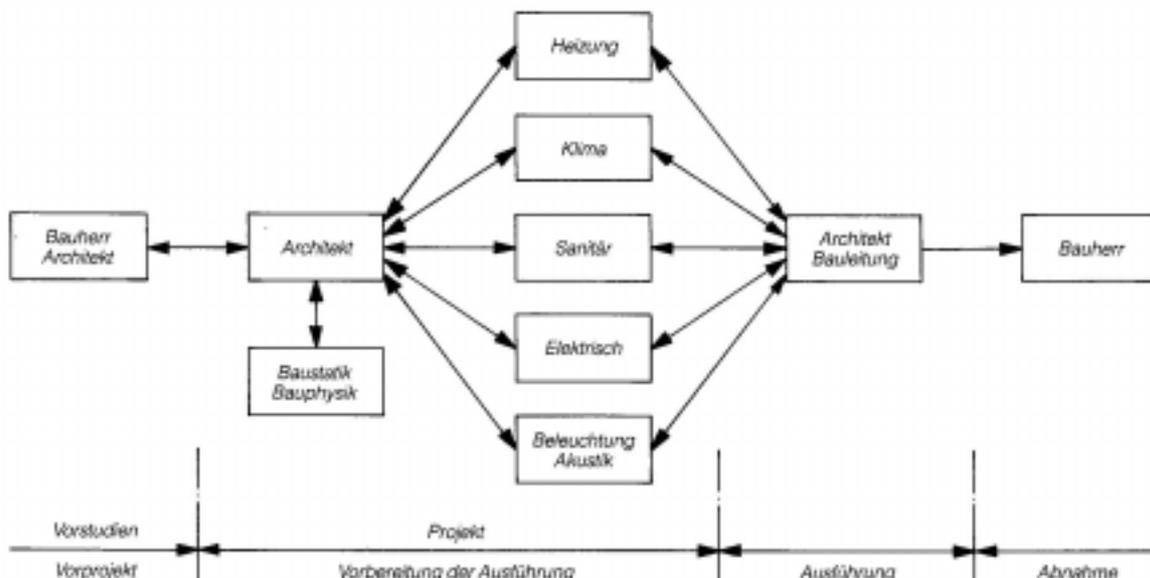


Abbildung 17: Serielle Planung (aus [5])

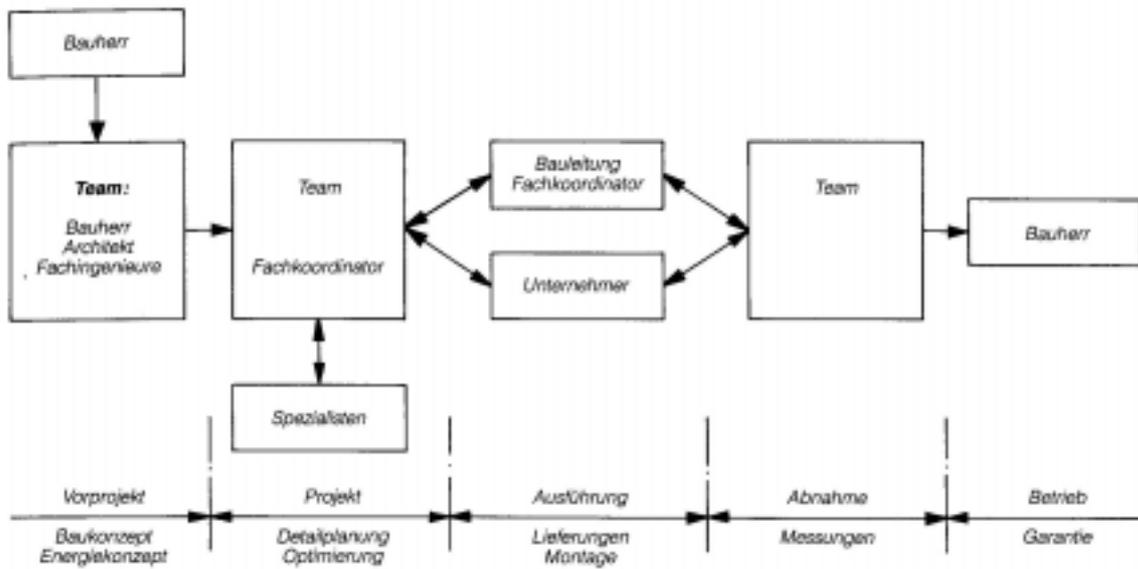


Abbildung 18: Integrale Planung (aus [5])

Die Integrale Planung ist auch eines der Ziele des SIA-Leistungsmodells 95 (LM'95). Die Phasen, Ziele und Hauptinhalte des LM'95 sind in Tabelle 4 aufgeführt.

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 	
3.2	Bauprojekt	<ul style="list-style-type: none"> - Baureifes Projekt - Definition der Kosten und Termine 	
4	Realisierung		
4.1	Ausschreibung	<ul style="list-style-type: none"> - Vergabereife 	
4.2	Ausführung	<ul style="list-style-type: none"> - Projekt- und vertragsgemässe Realisierung des Bauwerkes und der technischen Gebäudeausrüstung 	
4.3	Inbetriebsetzung	<ul style="list-style-type: none"> - Nachweis der Vertragserfüllung - Ingebrauchnahme 	
4.4	Abschluss	<ul style="list-style-type: none"> - Schlussabrechnung - Mängelbehebung 	
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

Tabelle 4: Phasen, Ziele und Hauptinhalte des LM'95 (Auszüge aus [6])

Die Hauptinhalte der Phasen 3 und 4 sind in Tabelle 4 nicht erwähnt, weil diese deckungsgleich mit dem herkömmlichen LM nach SIA 108 sind.

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 Abbildung 19).

SIA Zielwert Absenkpfad

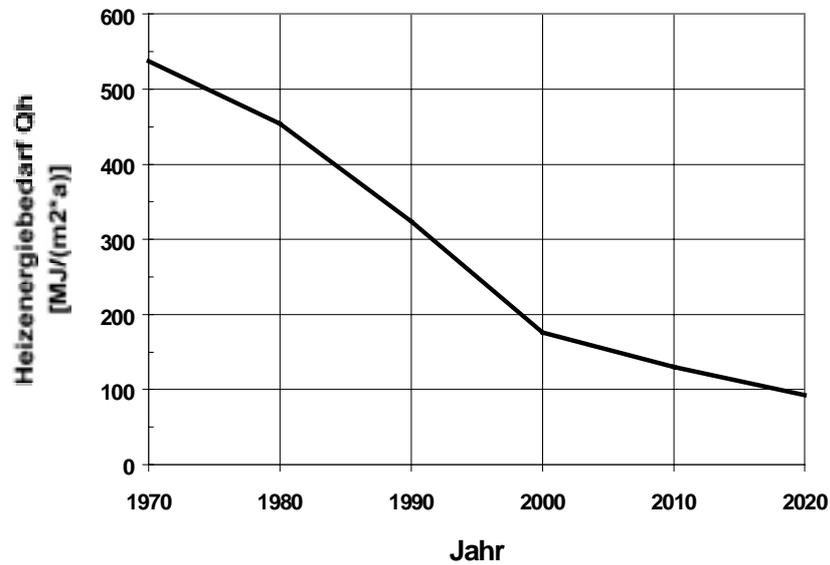


Abbildung 19: SIA Zielwert Absenkpfad

Lösungsstrategie

Im folgenden wird aufgezeigt, welche Punkte für die Konzeption einer selbstregelnden Fussbodenheizung überprüft und abgeklärt werden müssen (siehe Abbildung 20).

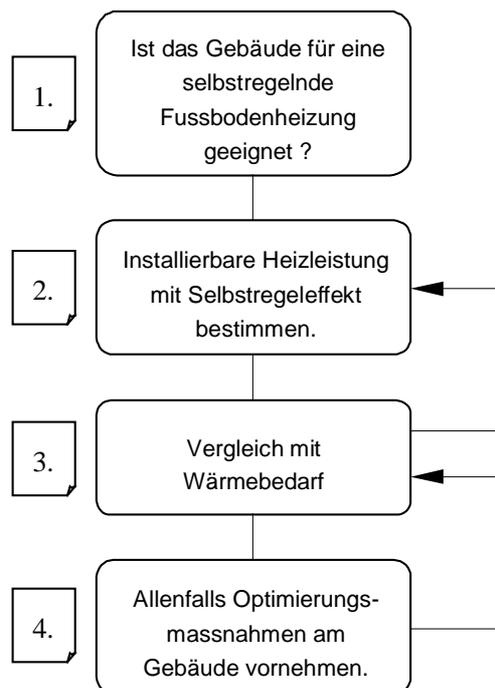


Abbildung 20: 4 Schritte zur Konzeption einer selbstregelnden Fussbodenheizung

Dabei gilt es, das Gebäude und die Bodenheizung so aufeinander abzustimmen, dass der Selbstregelleffekt ausgenutzt werden kann, d. h. dass die Vorlauftemperatur tief ist ($< 30^{\circ}\text{C}$).

Die wichtigsten gebäudeseitigen Voraussetzungen, die für ein einwandfreies Funktionieren Voraussetzung sind, bestehen aus dem gewählten Unterlagsboden und der passiven Sonnenenergienutzung:

- Unterlagsboden: Das hier vorgestellte System wird ohne technische Speicher im System geführt. Die Speicherung der Energie erfolgt deshalb hauptsächlich in der Bodenschicht, in der die Bodenheizungsrohre eingelegt sind. Es ist somit sehr wichtig, dass der Unterlagsboden eine ausreichende Masse aufweist, um lange Einschaltzeiten der Wärmepumpe zu gewährleisten. Eine übliche Dicke von 8 bis 10 cm hat sich als ausreichend erwiesen.
- Passive Sonnenenergienutzung: Das Gebäude ist für die Nutzung der passiven Sonnenenergie zur Reduktion der aufzubringenden Heizenergie zu optimieren.

Varianten- und Systemwahl: Niedrigtemperaturfussbodenheizung mit Sole/Wasser-Wärmepumpe und Wärmepumpenwassererwärmer

Als Wärmequellen dienen bei dieser einstufigen Sole/Wasser-Wärmepumpe Erdsonden (siehe Abbildung 21). Die Energie wird mittels einem Sole-Kreislauf (Wasser-Glykol-Gemisch) dem Verdampfer zugeführt.

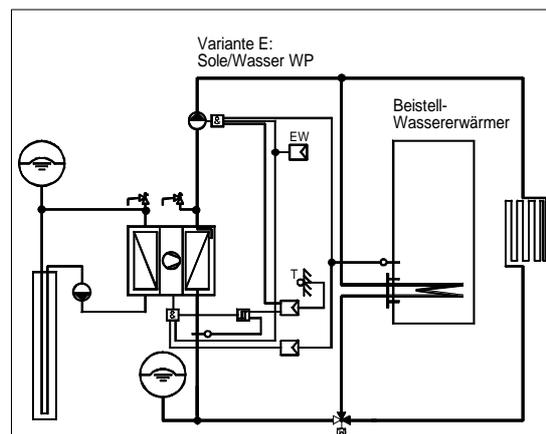


Abbildung 21: Einstufige Sole/Wasser-Wärmepumpe mit Beistellboiler

4.2 Kennzahlen

Es hat sich gezeigt, dass bei den Kennzahlen für die Heizsysteme im MINERGIE- und Passivhausbereich grosse Verwirrung herrscht. Zum Teil werden dieselben Ausdrücke für ganz unterschiedliche Sachverhalte angewendet. Ein Schwerpunkt des technischen Handbuchs wird es deshalb sein, Klarheit in die verwirrende Vielfalt von Definitionen von Wirkungsgraden und spezifischen Verbrauchsangaben zu liefern. Es soll dabei auch aufgezeigt werden, warum es vorkommen kann, dass Häuser zwar den MINERGIE-Standard, aber nicht die minimalen, energetischen Bauvorschriften erfüllen, und weshalb ein Passivhaus-Standard nicht zwingend einen niedrigeren Energiebedarf aufweist als ein MINERGIE-Haus.

Als wichtigste Grundlage für die Definition von Ausdrücken sollen die in der Schweiz und in Europa geltenden Normen dienen. Dabei soll insbesondere die soeben verabschiedete, revidierte Norm SIA 380/1 berücksichtigt werden, die der europäischen Norm EN 832 angepasst ist.

Eine weitere Grundlage sollen die diversen RAVEL-Arbeiten des Bundesamtes für Konjunktur sein, da diese Arbeiten eine sehr grosse Verbreitung und einen entsprechend hohen Bekanntheitsgrad aufweisen. Da in diesen Arbeiten aber von klassischen Wohnbauten ohne

kontrollierte Wohnungslüftung ausgegangen wird, müssen die darin definierten Kennzahlen überarbeitet und angepasst werden.

Da die Normung der Technik um teilweise mehr als 10 Jahre hinterher hinkt, sollen aber auch neue Definitionen eingeführt werden, sofern keine adäquaten Kennwerte vorhanden sind. Speziell der Miteinbezug einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung bereitet bei vielen Kennwerten Mühe. Diese Lücke soll nun geschlossen werden.

4.3 Handrechenmethode für die Jahresarbeitszahl JAZ

Zur Bestimmung des Jahresenergiebedarfes für den Vergleich verschiedener Systemvarianten ist die Jahresarbeitszahl eine wichtige Grösse. 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 von $\pm 10\%$.

JAZ Raumheizung

Die Leistungszahl von Wärmepumpen sind sehr stark von der Wärmequellen- und Wärmesenktemperatur abhängig. Wenn die vorhandenen Betriebstemperaturen von den Normtemperaturen abweichen, muss der COP (Coefficient of Performance) mit dem Faktor f_T korrigiert werden:

$$f_T = \frac{(\vartheta_{VL,eff} + 273)(\vartheta_{VL,norm} - \vartheta_{Ver,ein,norm})}{(\vartheta_{VL,norm} + 273)(\vartheta_{VL,eff} - \vartheta_{Ver,ein,eff})}$$

Gl. 1

- $\vartheta_{VL,norm}$ Vorlauftemperatur (Wärmesenke) nach Herstellerangaben
- $\vartheta_{Ver,ein,norm}$ Verdampfeintrittstemperatur (Wärmequelle) nach Herstellerangaben
- $\vartheta_{VL,eff}$ Effektiv vorhandene Vorlauftemperatur
- $\vartheta_{Ver,ein,eff}$ Effektiv vorhandene Verdampfeintrittstemperatur

Die Wärmequellentemperatur wird vereinfachend über das ganze Jahr als konstant angenommen. Wenn die vorhandenen Temperaturen von den Normpunkten abweichen, ist der COP_h nach EN 255 mit f_T gemäss Gl. 1 zu korrigieren. Der effektive COP_{eff} ist somit:

$$COP_{eff} = f_T \cdot COP_h$$

Gl. 2

Für die Jahresarbeitszahl ergibt sich dann nach Gl. 11:

$$JAZ_h = COP_{eff} \cdot \frac{1}{1 + Verluste}$$

Gl. 3

Bei der Luft/Wasser-WP wird die Variation der Quelltemperatur berücksichtigt. Vereisungs- und Abtauverluste sind in den COP_h -Werten bereits enthalten. Die Verluste beinhalten den Stromverbrauch für die Hilfsaggregate, Taktverluste der Wärmepumpe und Leitungsverluste. Die Jahresarbeitszahl wird in diesem Verfahren bei einer Luft/Wasser-Wärmepumpe über 3 Stützpunkte bestimmt. Es sind dies die Leistungszahlen bei den in der Euronorm EN255 definierten Betriebspunkten A-7/W35, A+2W35 und A+7/W35. Für Anlagen mit wesentlich höheren Vorlauftemperaturen sind die Normpunkte A-7/W50, A+2W50 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, wie auf Abbildung 22 aufgezeigt wird.

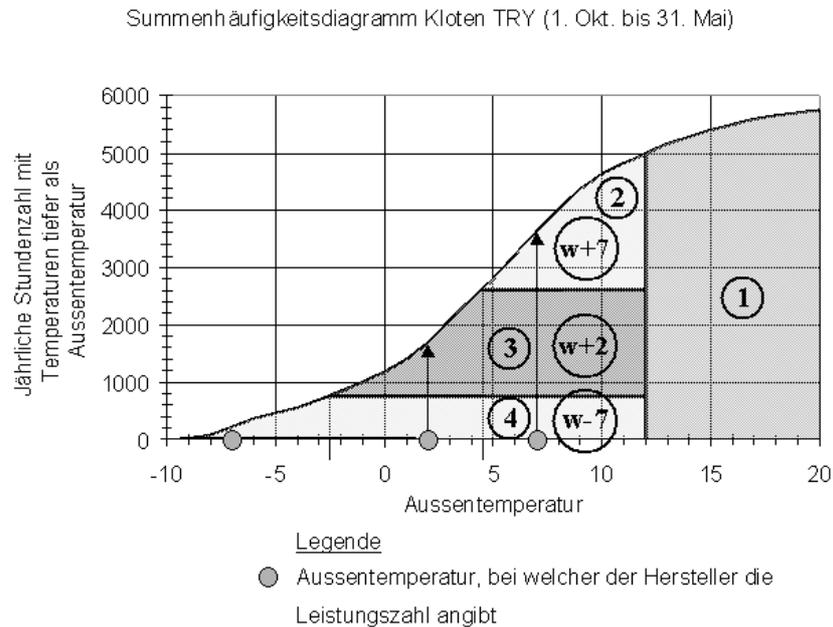


Abbildung 22: Summenhäufigkeitsdiagramm für Zürich Kloten, 1. Oktober bis 31. Mai

Wenn 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. 4

Damit ergibt sich der effektive COP_{eff} nach Gl. 5 und die Jahresarbeitszahl für die Luft/Wasser-Wärmepumpe nach Gl. 6:

$$\overline{COP}_{eff} = \frac{1}{\frac{w_{-7}}{f_{T,-7} \cdot COP_{-7}} + \frac{w_{+2}}{f_{T,+2} \cdot COP_{+2}} + \frac{w_{+7}}{f_{T,+7} \cdot COP_{+7}}}$$

Gl. 5

$$JAZ_h = \overline{COP}_{eff} \cdot \frac{1}{1 + \text{Verluste}}$$

Gl. 6

JAZ Warmwasser

Die Wärmeverluste des Speichers und der Verteilungen werden mit einem Korrekturfaktor berücksichtigt:

$$f_{ww,v} = 1 - \frac{Q_{ww,v}}{Q_{ww,n} + Q_{ww,v}}$$

Gl. 7

$Q_{ww,v}$ Wärmeverlust Verteilung + Speicherverluste, falls diese nicht im COP des Herstellers enthalten sind.

$Q_{ww,n}$ Energiebedarf Warmwasser (Nutzen aus Zapfhahn) (z.B. gemäss SSIV)

Die Temperaturschwankung der Eintrittsluft in den Verdampfer wird vernachlässigt. Falls die Warmwasser- oder Ablufttemperatur nicht den Herstellerdaten entspricht, so muss der COP die Leistungszahl mit dem Temperaturumrechnungsfaktor nach Gl. 1 umgerechnet werden:

$$JAZ_{ww} = f_{ww,T} f_{ww,v} COP_{ww}$$

Gl. 8

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.

$$w_h = \frac{Q_h}{Q_h + Q_{ww,n}}$$
$$w_{ww} = \frac{Q_{ww,n}}{Q_h + Q_{ww,n}}$$

Gl. 9

$$JAZ_{h+ww} = \frac{1}{\frac{w_h}{JAZ_h} + \frac{w_{ww}}{JAZ_{ww}}}$$

Gl. 10

4.4 Planungsbeispiele

Beispiel 1: Sole/Wasser-Wärmepumpe für Raumheizung

Im ersten Beispiel wurde eine Erdsondenanlage aus dem WPZ-Bulletin [8] ausgewählt. Der Normtemperaturwert und die Leistungszahl COP stammen aus dieser Publikation.

Normtemperatur: B5/W35
COP_h = 5.8

Für die Berechnung der Jahresarbeitszahl wurden für die Auslegung folgende Annahmen getroffen:

Annahmen: Verdampfeintrittstemperatur = 2 °C
Vorlauftemperatur = 40 °C

Zusatzstromverbrauch (Hilfsverbraucherpumpen etc.) = 15 %

Nach Gl. 1 wird der Faktor f_T berechnet:

$$f_T = \frac{(\vartheta_{VL,eff} + 273) * (\vartheta_{VL,norm} - \vartheta_{Ver,ein,norm})}{(\vartheta_{VL,norm} + 273) * (\vartheta_{VL,eff} - \vartheta_{Ver,ein,eff})}$$

Gl. 11

	Annahmen im Beispiel [°C]:
$\vartheta_{VL,norm}$ Vorlauftemperatur nach Herstellerangaben	35
$\vartheta_{Ver,ein,norm}$ Verdampfereintrittstemp. nach Herstellerangaben	5
$\vartheta_{VL,eff}$ Effektiv vorhandene Vorlauftemperatur	40
$\vartheta_{Ver,ein,eff}$ Effektiv vorhandene Verdampfereintrittstemperatur	2

Daraus ergibt sich für f_T :

$$f_T = \frac{(40 + 273) * (35 - 5)}{(35 + 273) * (40 - 2)} = 0.8$$

Der COP_{eff} lässt sich gemäss Gl. 12 berechnen als:

$$\overline{COP}_{eff} = f_T \cdot COP_h = 0.8 \cdot 5.3 = 4.25$$

Gl. 12

Die JAZ_h beträgt somit nach Gl. 13:

$$JAZ_h = \overline{COP}_{eff} \cdot \frac{1}{1 + Verluste} = 4.25 \cdot \frac{1}{1 + 0.15} = 3.7$$

Gl. 13

Im ersten Beispiel beträgt die Jahresarbeitszahl der Heizung 3.7.

Beispiel 2: Luft/Wasser-Wärmepumpe für Raumheizung

Im zweiten Beispiel wurde eine Luft/Wasser-Wärmepumpe aus dem WPZ-Bulletin [8] ausgewählt. Der Normtemperaturwert und die Leistungszahl COP stammen aus dieser Publikation.

Normtemperaturen: A-7/W35 A2/W35 A7/W35
 COP₋₇ = 2.8 COP₂ = 3.4 COP₇ = 4.0

Für die Berechnung der Jahresarbeitszahl wurden für die Auslegung folgende Annahmen getroffen:

Annahmen: Verdampfereintrittstemperaturen = -7 °C, 2 °C, 7 °C
 Vorlauftemperatur = 40 °C
 Zusatzstromverbrauch (Hilfverbraucherpumpen etc.) = 8 %

Nach Gl. 1 werden die drei Faktoren $f_{T,-7}$, $f_{T,2}$ und $f_{T,7}$ berechnet:

$$f_{T,-7} = \frac{(40 + 273) * (35 + 7)}{(35 + 273) * (40 + 7)} = 0.91$$

$$f_{T,2} = \frac{(40 + 273) * (35 - 2)}{(35 + 273) * (40 - 2)} = 0.88$$

$$f_{T,7} = \frac{(40 + 273) * (35 - 7)}{(35 + 273) * (40 - 7)} = 0.89$$

Die Gewichtungsfaktoren w_{-7} , w_2 und w_7 werden für die Klimaregion Zürich übernommen und betragen:

COP Normtemperatur	Gewichtungsfaktor w
-7	0.33
+2	0.45
+7	0.22

Somit ergibt sich für den COP_{eff} nach Gl. 14:

$$\overline{COP}_{eff} = \frac{1}{\frac{w_{-7}}{f_{T,-7} \cdot COP_{-7}} + \frac{w_2}{f_{T,2} \cdot COP_2} + \frac{w_7}{f_{T,7} \cdot COP_7}} = \frac{1}{\frac{0.33}{0.91 \cdot 2.8} + \frac{0.45}{0.88 \cdot 3.4} + \frac{0.22}{0.89 \cdot 4}} = 2.93$$

Gl. 14

Die JAZ_h beträgt nach Gl. 15:

$$JAZ_h = \overline{COP}_{eff} \cdot \frac{1}{1 + \text{Verluste}} = 2.93 \cdot \frac{1}{1 + 0.08} = 2.7$$

Gl. 15

Die Jahresarbeitszahl der Heizung beträgt 2.7.

Beispiel 3: Sole/Wasser-Wärmepumpe für Warmwasser

Im zweiten Beispiel wurde eine Erdsondenanlage aus dem WPZ-Bulletin [8] zur Warmwasserbereitung ausgewählt. Der Normtemperaturwert und die Leistungszahl COP stammen aus dieser Publikation.

Normtemperatur: B5/W50
COP = 3.6

Für die Berechnung der Jahresarbeitszahl wurden folgende Annahmen getroffen:

Annahmen: Verdampfeintrittstemperatur = 2 °C
Vorlauftemperatur = 60 °C
Speicherverluste = 20 %

Nach Gl. 1 wird der Faktor $f_{ww,T}$ berechnet:

$$f_{ww,T} = \frac{(60 + 273) * (50 - 5)}{(50 + 273) * (60 - 2)} = 0.8$$

Der Korrekturfaktor für die Wärmeverluste des Speichers beträgt nach Gl. 16:

$$f_{ww,v} = 1 - \frac{Q_{ww,v}}{Q_{ww,n} + Q_{ww,v}} = 1 - 0.2 = 0.8$$

Gl. 16

Somit lässt sich die JAZ gemäss Gl. 17 berechnen als:

$$JAZ_{ww} = f_{ww,T} \cdot f_{ww,v} \cdot COP_{ww} = 0.8 \cdot 0.8 \cdot 3.6 = 2.3$$

Gl. 17

Die Jahresarbeitszahl der Warmwasserbereitstellung beträgt 2.3.

4.5 Noch auszuführende Arbeiten zur Leistungszahl, COP, JAZ, Nutzungsgrad

Eine mögliche Einteilung von Kennwerten geht von der folgenden Grundlage aus (Definitionen aus [12] und [13]):

- COP: Durchschnittlicher Qualitätswert einer Wärmepumpe
- JAZ: Qualitätswert einer Wärmeerzeugung mit Wärmepumpe ohne Zusatzheizungen
- Nutzungsgrad: Qualitätswert eines Heizungssystems
- ETV: Qualitätswert einer Wärmerückgewinnungsanlage

Es herrscht in der Fachwelt leider nach wie vor die falsche Annahme vor, dass eine hohe Arbeitszahl (JAZ) eine energetisch gute Anlage charakterisiert. Da aber z.B. in der Ravel-Definition (in [12], [13]) darin weder Zusatzheizstäbe noch die Verteilenergie (Ventilatoren, Umwälzpumpen) mitberücksichtigt werden, kann von einer hohen JAZ noch nicht auf einen niederen Stromverbrauch geschlossen werden. In der Praxis wird die JAZ häufig sogar nur als jährliche Wärmeabgabe einer Wärmepumpe im Verhältnis zur Stromaufnahme der Wärmepumpe definiert, die Sondenpumpen und die Verluste in der Speicherung also zusätzlich vernachlässigt. Dies führt dann dazu, dass in Schweizer Fachzeitschriften von Arbeitszahlen von 5 und 6 geschwärmt wird, Anlagen mit Arbeitszahlen für Heizung und Warmwasser von 3.5 aber als „ungenügend“ eingestuft werden.

Ein weiterer Schwachpunkt herkömmlicher Definitionen ist die Vernachlässigung des Warmwassers. Teilweise wird sogar geraten, das Warmwasser mit einem Elektroheizstab zu erzeugen, wodurch auch eine höhere JAZ erreichbar sei. Und da Niedrigenergiehäuser prozentual einen viel höheren Warmwasseranteil aufweisen, sinkt natürlich die JAZ in Niedrigenergiehäusern verglichen mit „normalen“ Neubauten, falls auch das Warmwasser mit einer Wärmepumpe erzeugt wird.

Auch mit Abluftwärmepumpen haben die meisten herkömmlichen Definitionen grosse Mühe: Eigentlich dürfte der Ausdruck JAZ bei solchen Anlagen nicht angewendet werden, da es sich dabei um eine Wärmerückgewinnung handelt, für die der Ausdruck ETV definiert ist. Vergleicht man gar eine Abluftwärmepumpe mit einer integrierten WRG (Plattentauscher zur Zuluft), so sinkt gar die JAZ, obwohl wir einen geringeren Stromverbrauch der Anlage haben als bei einer Abluftwärmepumpe ohne WRG. Der Grund dafür liegt darin, dass der Verdampfer einer solchen Wärmepumpe natürlich erst nach der WRG angeordnet ist und somit im Schnitt eine tiefere Temperatur aufweist als Anlagen ohne integrierte Plattentauscher.

All diese Beispiele zeigen, dass die Arbeitszahl nicht geeignet ist, die Qualität eines Niedrigenergie-Heizsystems zu beschreiben. Dafür werden Kennzahlen benötigt, die bei normiertem Warmwasserverbrauch und normierter Luftqualität den gesamten Strombedarf für Aufbereitung und Verteilung mitberücksichtigen.

- **Integrale Planung: optimale Verwirklichung von Bauvorhaben, angelehnt nach dem SIA-Leistungsmodell 95 (LM'95)**
- **Handrechenmethode für Jahresarbeitszahl JAZ: Genauigkeit von $\pm 10\%$**

5 FELDMESSUNGEN

5.1 Drei bestehende Pilotanlagen als Beispiel

Im Handbuch "Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe – Phase 4" werden zwei bestehende Niedrigenergiehäuser und ein Passivhaus als Beispiele aufgeführt. Im folgenden wird ein Haus (Pilotanlage Schötz) genauer beschrieben.

Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Abluft- Wärmepumpenwassererwärmer

Die wichtigsten Kennwerte und Auslegedaten sind in Tabelle 5 zusammengestellt. Abbildung 23 zeigt das Prinzipschema einer Anlage. Zu erwähnen ist, dass bei der Pilotanlage in Schötz aus Kostengründen auf die Installation eines Luft-Erdregisters verzichtet wurde.



Abbildung 23: Prinzipschema einer Anlage mit Luft/Wasserwärmepumpe zum Heizen und separatem Abluft-Wärmepumpenwassererwärmer

Standort	6247 Schötz (LU)
Höhe über Meer	508 m
Heizgradtage	3651
Energiebezugsfläche	155 m ²
Heizenergiebedarf nach SIA 380/1	181 MJ/(m ² a)
Wärmeleistungsbedarf nach SIA 384/2 (für 20/-9°C)	3.64 kW
Luft/Wasser-WP:	
Heizleistung A7W35	7.2 kW / COP 4.0
Heizleistung A-7/W35	4.6 kW / COP 2.5
Vorlauf / Rücklauftemperatur	30 / 25 °C
Abluft-WP-Wassererwärmer	
Heizleistung A20W50	1.0 kW
Warmwassertemperatur	50 °C
Leistung Abluftventilator	48 W

Tabella 5: Kennwerte und Auslegedaten

Die Luft/Wasser-Wärmepumpe wird über eine aussentemperaturabhängige Rücklauftemperaturregulierung 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. Die hydraulische Schaltung ist aus Abbildung 24 ersichtlich.

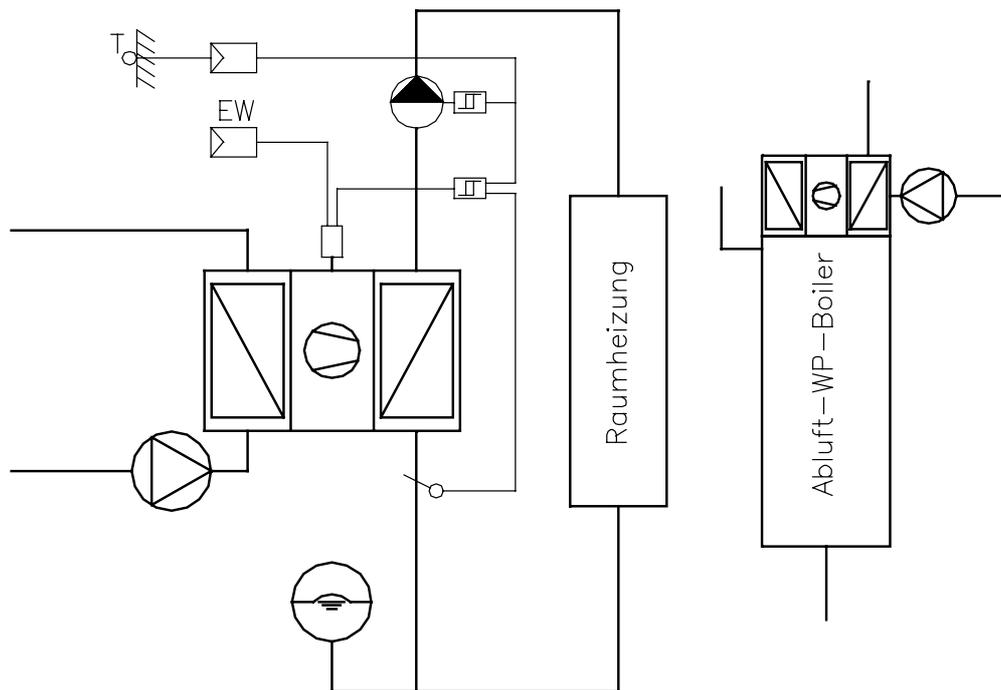


Abbildung 24: Prinzipschema und Regelung der Anlage in Schötz, Luft/Wasserwärmepumpe zum Heizen mit separatem Abluft-Wärmepumpenwassererwärmer

Die Energiebilanz sieht folgendermassen aus (Abbildung 25):

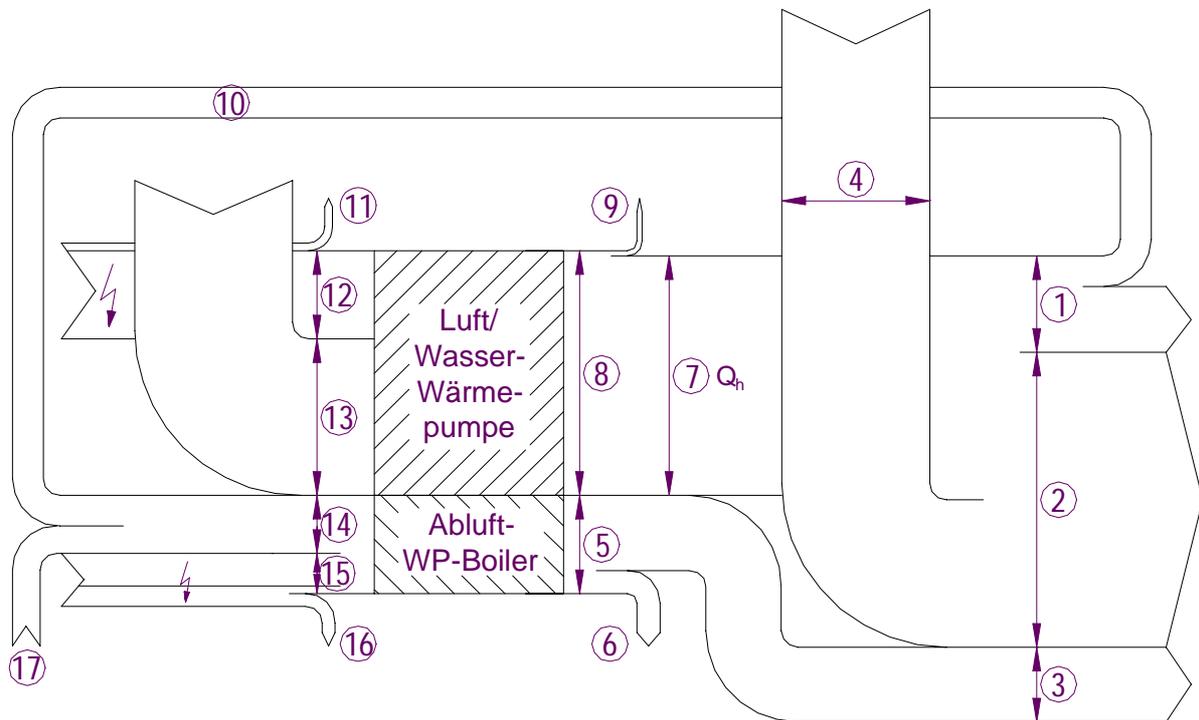


Abbildung 25: Energieflussdiagramm der Anlage mit Luft/Wasserwärmepumpe zum Heizen und Abluft-Wärmepumpenwassererwärmer

- (1) Energiebedarf Lüftung
- (2) Energiebedarf Transmission
- (3) Energiebedarf Warmwasser
- (4) Nutzbarer Anteil an Wärmegewinn durch Personen, Sonne und Elektrizität
- (5) Nutzenergiebedarf Warmwasser
- (6) Wärmeverluste Warmwasserspeicher
- (7) Heizenergiebedarf
- (8) Nutzenergiebedarf Heizung
- (9) Wärmeverluste Leitungen Heizung
- (10) Abkühlung Fortluft während der Heizperiode
- (11) Elektrizitätsverbrauch Umwälzpumpe Heizung
- (12) Elektrizitätsverbrauch Luft/Wasser-WP (inkl. Ventilator)
- (13) Aussenluft
- (14) Fortluft
- (15) Elektrizitätsverbrauch Abluft-WP-Boiler und Ventilator während der Warmwasser-Aufbereitung
- (16) Elektrizitätsverbrauch Ventilator ausserhalb Warmwasser-Aufbereitung
- (17) Fortluft ausserhalb der Heizperiode

Messresultate

Die Heizgradtage $HGT_{20/12}$ für die Messperiode von Kalenderwoche 5/99 bis 21/99 betragen 1252 Gradtage. Daraus lässt sich eine Heizkurve berechnen, wie Abbildung 26 darstellt.

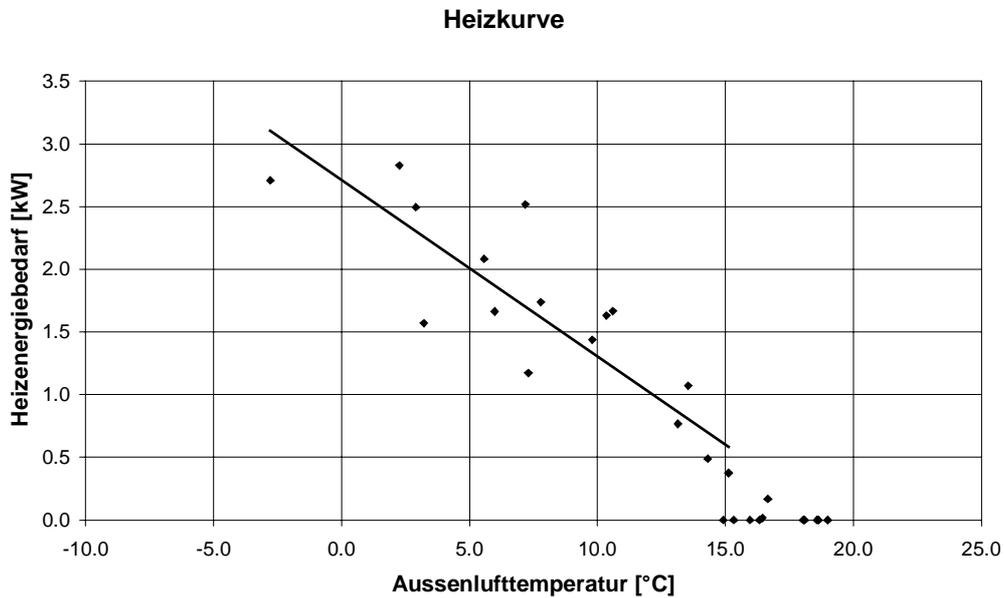


Abbildung 26: Heizkurve, resultierend aus Wochenmittelwerten

Beispielhaft wird auf Abbildung 27 der Temperaturverlauf der Luft/Wasser-Wärmepumpe am 7. März 1999 aufgezeigt.

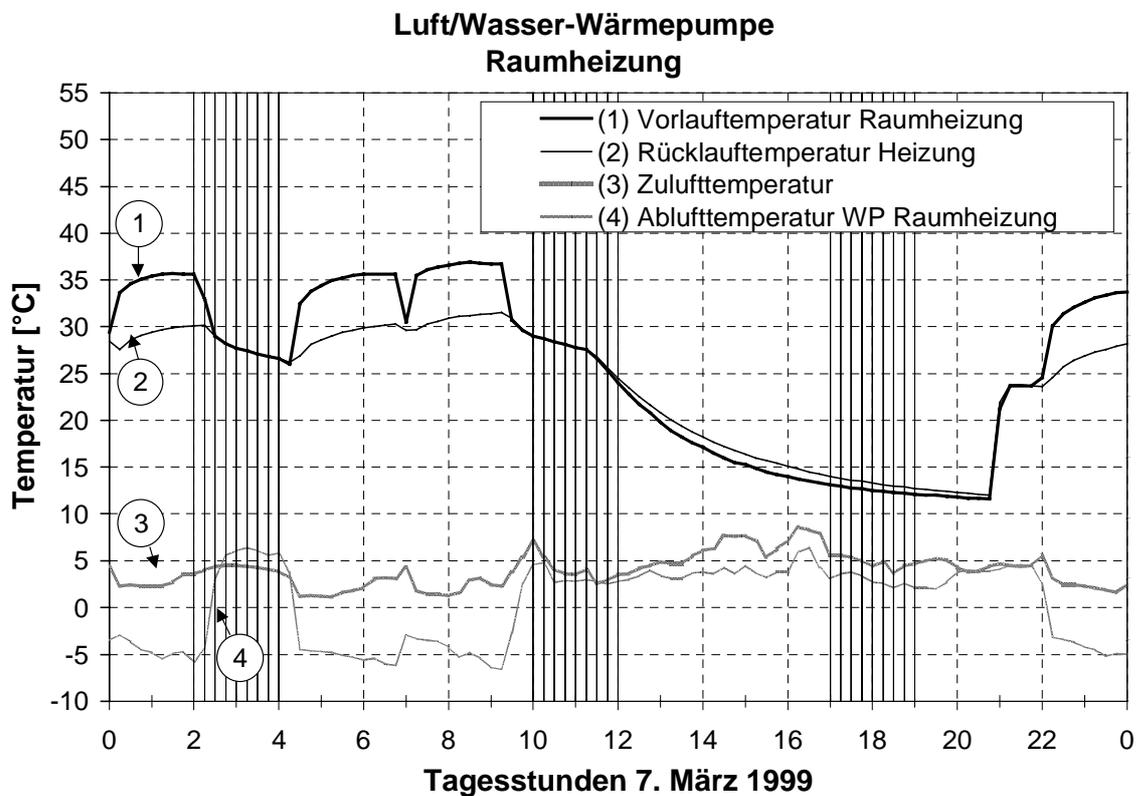


Abbildung 27: Temperaturverlauf der Luft/Wasser-WP am 7. März 1999. Die schraffierten Flächen stellen die drei mal zwei Stunden Sperrzeiten des lokalen Elektrizitätswerkes dar.

Erdsonden-Wärmepumpe mit Beistellboiler - Resultate

Eine weitere bewährte Schaltung ist die Erdsonden-Wärmepumpe mit Beistellboiler (Pilotanlage Grafstal). Sie wurde bis Dezember 1999 mit einem zeitrelaisgesteuerten Abluftventilator im Bad gelüftet. Für die Aufenthaltsräume (ohne den unbeheizten Keller) wurde ein relativ tiefer mittlerer Aussenluftwechsel von ca. 0.2 h^{-1} ermittelt (zum Vergleich: Aussenluftwechsel nach SIA 380/1, Standardnutzung EFH = 0.4 h^{-1}). Demgegenüber ist der Aussenluftwechsel mit 0.8 bis 1.0 h^{-1} im Keller ungewöhnlich hoch. Abbildung 28 zeigt die Luftströme zwischen den zwei Messzonen und die einströmende Frischluft.

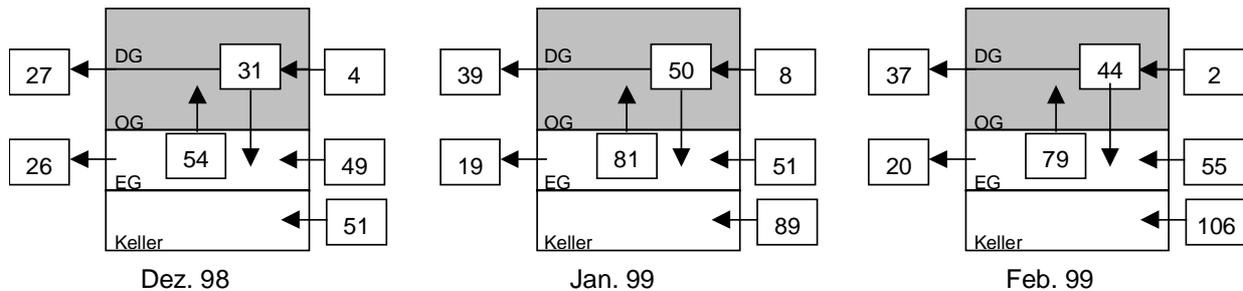


Abbildung 28: Luftströme in m^3/h zwischen den Zonen (Zone 1 = Keller und EG, Zone 2 = OG und DG) und der Frischluft.

Seit anfangs Dezember ist in der Anlage Grafstal eine Einzelraumlüftung mit WRG installiert. Zusätzlich wurden Mauerventile in Schlaf-, Kinder- und Bürozimmer des Obergeschosses installiert. Der Abluftventilator im Bad sorgt für eine Querlüftung (auch: Kaskadenlüftung).

Passivhauskonzept

Mit einem am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme entwickelten TRNSYS-Modul für ein Kompaktgerät wurden Untersuchungen und Optimierungsrechnungen für vergleichbare Einsatzfälle von Lüftungs-Kompaktgeräten mit den Kennwerten eines Aggregats vom Typ Aerex der Fa. Maico HaustechnikSysteme durchgeführt. Für den Erdreichwärmetauscher wurde eine Temperatureffizienz von 80% angenommen. Die simulierte Solaranlage entspricht einer 5 m^2 großen Flachkollektoranlage. Der Warmwasserbedarf mit zeitlichen Profilen liegt bei 140 l/d bei $45 \text{ }^\circ\text{C}$.

Das simulierte Reihenmittelhaus hat 121 m^2 Wohnfläche und wird von vier Personen genutzt. Die inneren Wärmequellen betragen durchschnittlich 1.6 W/m^2 . Die Feuchteproduktion wird mit $120 \text{ g}/(\text{h}\cdot\text{Person})$ angenommen. Die Lüftungsanlage ist auf einen Volumenstrom von $125 \text{ m}^3/\text{h}$ eingestellt. Die Infiltration verursacht durchschnittlich 0.05 Luftwechsel pro Stunde und entspricht einer sehr guten Dichtheit der Gebäudehülle mit $n_{50} = 0.6 \text{ h}^{-1}$. Der simulierte Jahresheizwärmebedarf beträgt 13 kWh/m^2 . Die Ergebnisse der Jahressimulation werden in Abbildung 29 in Wochenwerten dargestellt.

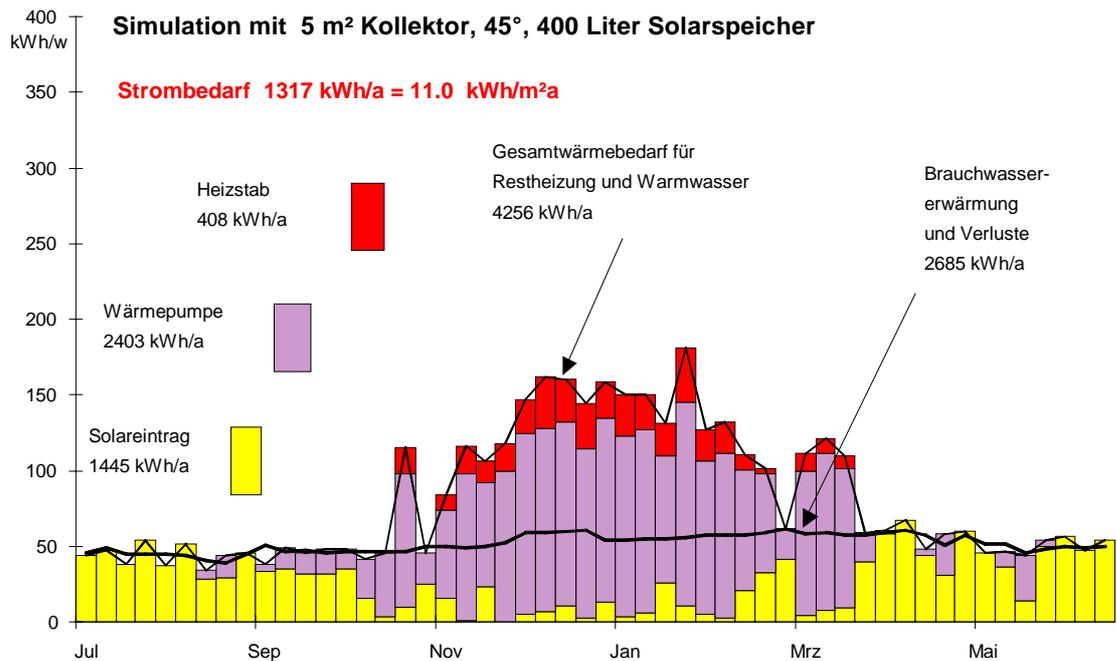


Abbildung 29: Ergebnisse der TRNSYS-Simulationen des Kompaktgerätes und eines Passivhauses, dargestellt in Wochenwerten. Graphik: Fraunhofer ISE

- Einfache Hydraulik in Pilotanlagen; Heizkreise ab Verteiler funktionieren
- Die Pumpenenergie darf nicht vernachlässigt werden!

6 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Das Planungshandbuch für MINERGIE- und Passivhäuser richtet sich vorwiegend an Planer und interessierte Installateure. Als Einstiegshilfe dient der Grundlagenteil, der die Leser für die Thematik sensibilisiert. Beim Planungsvorgehen werden systematisch die nötigen Schritte aufgezeigt. Dabei wird auf die kritischen Stellen ausdrücklich hingewiesen. Durch die Feldmessungen wird deutlich, wie sich die Anlagen in der Praxis bewähren und welche Auswirkung das Benutzerverhalten hat. Die Feldmessungen bestätigen das Hydraulik- und Installationskonzept.

Die drei Musterhäuser (zwei Pilotanlagen stehen in zwei verschiedenen Kantonen und eine Pilotanlage liegt in Baden-Württemberg) zeigen die "Haustechnik von morgen für die Menschen von heute". Dies bedeutet, dass eine fortschrittliche Haustechnik im Neubau für jedermann erschwinglich sein kann.

7 WEITERES VORGEHEN

Bis Ende 1999 wird ein erster Entwurf aller Kapitel erwartet. Die Vernehmlassung, die im Herbst 1999 hätte stattfinden sollen, wird auf Januar / Februar 2000 verschoben.

8 LITERATURVERZEICHNIS

[1] : Afjei, Th.; Betschart, W.; Bircher, R.; Bircher, R.; Geering, H.P.; Ginsburg, S.; Giger, Th.; Ginsburg, S.; Glass, A.; Huber, A.; Shafai, E; Wetter, M., Wittwer, D.; Zweifel, G.:

- Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe, Phase 2, Forschungsprogramm UAW des Bundesamtes für Energie, Bern, 1998, CH.
- [2] : Afjei, Th.; Betschart, W.; Bircher, R.; Geering, H.P.; Ginsburg, S.; Hässig, W.; Wetter, M., Wittwer, D.; Zweifel, G.: Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe, Phase 1, Forschungsprogramm UAW des Bundesamtes für Energie, Bern, 1996, CH.
- [3] : Afjei, Th.; Betschart, W.; Bonvin, M.; Geering, H.P.; Ginsburg, S.; Keller, P.; Shafai, E.; Wetter, M., Wittwer, D.; Zweifel, G.: Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe, Phase 3, Forschungsprogramm UAW des Bundesamtes für Energie, Bern, 1999, CH.
- [4] : Gabathuler, H.R.; Mayer, H.; Shafai, E.; Wimmer, R.: Pulsbreitenmodulation für Kleinwärmepumpenanlagen, Forschungsprogramm UAW des Bundesamtes für Energie, Bern, 1998, CH.
- [5] : Bundesamt für Konjunkturfragen: Haustechnik in der Integralen Planung, Band A, Bern, 1986, CH.
- [6] : Bundesamt für Energiewirtschaft: Leistungsmodul Haustechnik für die Planung / Ausführung und den Betrieb von Haustechnikanlagen, Bern, 1997, CH.
- [7] : Schweizerische Ingenieur- und Architekten-Verein SIA: Instrumente für ökologisches Bauen im Vergleich – Ein Leitfaden für das Planungsteam, Zürich, 1998.
- [8] : Wärmepumpentest- und Ausbildungszentrum Töss: WPZ-Bulletin, Mitteilungsblatt des Wärmepumpentest- und Ausbildungszentrums Winterthur-Töss, Nr. 21, 1999, CH.
- [9] : Frischknecht, R.; Suter, P.; Dones, R.: Ökoinventare von Energiesystemen, Gruppe Energie-Stoffe-Umwelt (ESU), ETH Zürich und PSI Villigen, 3. Auflage, 1996, CH.
- [10] : Zogg, M: Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe, Phase 2, Ökologischer und ökonomischer Vergleich – in Heizung Klima Kälte, 26. Jahrgang, 5(48-51), 1999.
- [11] : Afjei, Th.: Haustechnik von morgen – in Schweizer Ingenieur und Architekt SIA, 33/34(32-38), 1999.
- [12] : Bundesamt für Konjunkturfragen, RAVEL: Wärmepumpen – Planung, Bau und Betrieb von Elektrowärmepumpen-Anlagen, Bern, 1993.
- [13] : Bundesamt für Konjunkturfragen, RAVEL: Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung – Planung, Bau und Betrieb von Wärmerückgewinnungs- und Abwärmenutzungsanlagen, 1993, Bern.
- [14] : Goedkoop, M.: "The Eco-indicator 95 - Final Report", University of Leiden (CML), PRé Consultants, Amersfoort, Netherlands agency for energy and the environment (NOVEM), Utrecht, et al., 1995 [Im Internet unter www.pre.com/eco-ind.html].