

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

Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe

Phase 2: Ökologischer und ökonomischer Vergleich des Gesamtsystems, Systemoptimierung, Konzeption einer intelligenten Regelung und Versuche an Testanlagen

ausgearbeitet durch

Dr. Th. Afjei	INFEL (Projektleitung)
Prof. W. Betschart	HTA Luzern
R. Bircher	Bircher+Keller AG
G. Doka	Ingenieurbüro Doka
Prof. Dr. H.P.Geering	IMRT-ETHZ
Th. Giger	HTA Luzern
S. Ginsburg	IMRT-ETHZ
Dr. A. Glass	HTA Luzern
A. Huber	Huber Energietechnik
Dr. E. Shafai	IMRT-ETHZ
M. Wetter	HTA Luzern
D. Wittwer	INFEL
G. Zweifel	HTA Luzern

im Auftrag des
Bundesamtes für Energiewirtschaft

Impressum

Auftraggeber:	Bundesamt für Energiewirtschaft (BEW)	
	Prof. Dr. M. Zogg	Projektbegleiter
	Leiter Forschungsprogramm UAW	Email:
	Kirchstutz 3	martin.zogg@bluewin.ch
	3414 Oberburg	Fax. 034 / 422 69 10
Beauftragter:	Informationsstelle für Elektrizitätsanwendung	
	Dr. Th. Afjei	Projektleiter
	D. Wittwer	stv. Projektleiter
	INFEL	Email:
	Lagerstrasse 1, Postfach	afjei@infel.ch
	8021 Zürich	Fax. 01 / 299 41 40
Projektgruppe:	Bircher + Keller AG	Fussbodenheizung
	R. Bircher	Email:
	Weidenbodenweg 2	bircherkeller@bluewin.ch
	4450 Sissach	Fax. 061 / 971 61 16
	G. Doka	Ökobilanzen
	Stationsstrasse 32	Email: doka@logon.ch
	8003 Zürich	Fax. 01 / 463 16 08
	ETH-Zürich	Regler
	Institut für Mess.- und Regeltechnik	
	Prof. Dr. H.P. Geering	
	Dr. E. Shafai, S. Ginsburg	Email:
	ETH-Zentrum, ML K39	ginsburg@imrt.mavt.ethz.ch
	8092 Zürich	Fax. 01 / 632 11 39
	Huber Energietschnik, A. Huber	Erdsonde
	Jupiterstrasse 26	Email: huber@igjzh.com
	8032 Zürich	Fax. 01 / 422 79 53
	HTA Luzern, Fachhochschule Zentralschweiz	
	Prof. W. Betschart, G. Zweifel,	
	M. Wetter, Th Giger	Simulation mit TRNSYS
	Dr. A. Glass	Zweistufige Wärmepumpe
	Abteilung HLK	Email: wbetschart@ztl.ch
	6048 Horw	Fax. 041 / 349 39 55

Anhang Der Anhang zum Schlussbericht ist als separater Berichtssteil bei ENET erhältlich

Zusammenfassung

Zielsetzung

Bei Niedrigenergiehäusern steigt der Anteil für die Wassererwärmung wegen der geringen Heizleistung auf 30-40 %, wodurch sich neue Anforderungen an die Aggregate ergeben. Es müssen daher innovative und fehlertolerante Lösungen gefunden werden, mit denen die gesamte Wärmeerzeugung effizient, ökologisch verträglich und kostengünstig erbracht werden kann. In der 2. Phase werden neue Gebäudevarianten simuliert, Testanlagen gemessen und die ökologischen Aspekte vertieft untersucht.

Mit dem Systemkonzept wird das Gesamtsystem „Gebäude&Wärmeerzeugung“ als *integrale Einheit* aufgefasst. Kriterien, wie Funktionalität, Bauhülle, Baumaterialien, Komfort, Anlagentechnik, Energieeffizienz, Kosten und Ökologie sollen in ihrer Gesamtheit berücksichtigt werden (s. Abb. 1).

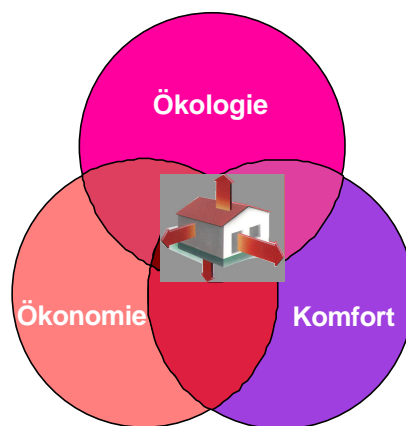


Abb. 1: Gesamtheitliche Betrachtung von Gebäude und Wärmeerzeugung

Durchgeführte Arbeiten

Das NOAH-Gebäude der ersten Phase wurde zur Verbesserung der passiven Solarnutzung optimiert. Für 2 Varianten, Leicht- und Massivbau mit vergrößerten Fensterflächen und Beschattungseinrichtung wurden mit TRNSYS Simulationsrechnungen durchgeführt. Im weiteren ist ein dynamisches Erdsondenmodell in Zusammenarbeit mit A. Huber [Huber, Schuler 97] in TRNSYS implementiert und eine Sensitivitätsstudie zur Bestimmung der Soletemperatur als Funktion der Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs durchgeführt worden. Für die Ökobilanzen wurden verschiedene Ziele definiert. Zum einen sollen die massgeblichen Verursacher der ökologischen Belastung ermittelt werden, zum andern werden die gewählten Heizsysteme mit heute gängigen Systemen verglichen, wodurch eine ökologische Positionierung ermöglicht wird. Im weiteren interessieren Fragen, wie „Ist bei der anvisierten Wärmepumpenheizung der zusätzliche Aufwand für den Bau eines Passivhauses überhaupt noch sinnvoll?“ oder „Wie wirkt sich die Stromerzeugung auf die Umweltbelastung aus?“ von besonderem Interesse. Die Variante „Wärmepumpe mit 100% BHKW-Strom“ ist als Grenzfall in die Untersuchungen einbezogen. Für das Teilsystem „Luft/Wasser-WP mit Abluft-WP-Boiler“ und den Gebäudetyp „Leichtbau“ wurden Ökoinventare erhoben. Zur Entwicklung eines „intelligenten Regelmoduls“ wurde ein Modell in MATLAB/SIMULINK entwickelt. Das Kennfeld eines Abluft-Wärmepumpenboilers konnte anhand von Herstellerdaten als COP in Funktion von Abluftenthalpie, Luftvolumenstrom und Warmwassertemperatur beschrieben werden.

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

Ergebnisse

Ausgehend vom Niedrigenergiehaus der Phase 1 (NOAH) wurde in der Phase 2 ein optimierter Gebäudetyp mit hohem passiven Solaranteil simuliert („SIA2010“, s. Abb. 5 - Abb. 8 und Tab. 3). Bei diesem passiv-solar optimierten SIA2010-Haus wurde mit Massivbauweise gegenüber dem Leichtbau eine 13%ige Reduktion des Heizenergiebedarfs erreicht. Beim Leichtbau, wie auch beim Massivbau der ersten Optimierungsvariante mit stark vergrösserten Fensterflächen, muss zur Vermeidung von Überhitzung die Beschattungseinrichtung so oft betätigt werden, dass die damit verbundene Einschränkung der passiven Sonnengewinne zu keiner Reduktion des Heizenergieverbrauchs führt, da die noch erzielten Mehrgewinne durch die erhöhten Wärmeverluste der Fenster kompensiert werden.

Die Erdsonde wurde mit einem dynamischen Modell mit TRNSYS simuliert. Sensitivitätsuntersuchungen für die Wärmeleitfähigkeit des die Erdsonde umgebenden Erdreichs ergaben, dass im Bereich von 1..4 W/mK eine Änderung der Wärmeleitfähigkeit um $\pm 50\%$ die Soletemperatur um ca. ± 2 K verändert, was einer Änderung der Wärmepumpen-Jahresarbeitszahl von ca. 3.5% entspricht.

Eine leistungsgeregelte Luft/Wasser-Wärmepumpe mit zwei Leistungsstufen (Frequenz 29 bzw. 50Hz) erzielt in den Simulationen eine 18% höhere Jahresarbeitszahl als eine Wärmepumpe mit fixer Drehzahl. Hauptursache ist die höhere Leitungsziffer im Arbeitsbereich der 1. Stufe, weil dort die Temperaturdifferenzen in den Wärmetauschern geringer sind, als bei einer einstufigen Wärmepumpe. Die knapp 10% tiefere Schalthäufigkeit trägt auch zur Erhöhung der Jahresarbeitszahl bei. Nachteilig ist die kurze Umschaltung der Wärmepumpe auf die 2. Stufe nach Ende der EW-Sperrzeit. Hier wären noch Verbesserungen in der Regelung möglich. Rein wirtschaftlich betrachtet ist die Zusatzinvestition für eine zweistufige Wärmepumpe im Niedrigenergiehaus bei Einsparungen von ca. CHF 30.- p.a. kaum gerechtfertigt.

Der Wirtschaftlichkeitsvergleich der untersuchten Komfortwärmesysteme zeigt, dass die Kesselheizungen kombiniert mit einem Zuluft/Abluft-Wärmetauschersystem keine Kostenvorteile mehr aufweisen. Am kostengünstigsten schneidet die Luft/Luft-Wärmepumpe mit Abluftwärmerückgewinnung ab. Die Luft/Wasser-Wärmepumpe mit Abluft-Wärmepumpenboiler, der Holzofen und die Gasheizung mit Zuluft/Abluft-Wärmetauscher erreichen mit Jahreskosten von circa 3600 Franken rund 20% höhere Werte. Wesentlich höher liegen sowohl die Ölheizung wie auch die Sole/Wasser-Wärmepumpe mit Zuluft/Abluft-Wärmetauscher. Bei den letzteren wirken sich insbesondere die Kosten für die separate Wohnungslüftung stark aus. Die Kombination der Wärmequelle Erdreich mit einer Wärmeverteilung über die Zuluft dürfte somit eine wirtschaftlich wie auch energetisch interessante Kombination darstellen. Entsprechender Forschungs- und Entwicklungsbedarf ist hier vorhanden. Beim momentanen Stand der Technik stehen im Niedrigenergiehaus-Neubau mit den vorgestellten Luft-Wärmepumpen-, der Holzheizungs- und der Gasheizungsvariante (in dieser Reihenfolge) vier nachhaltige und wirtschaftliche Lösungen zur Verfügung.

Bei den Ökobilanzen stellte sich heraus, dass die Umweltbelastung durch die Gebäudeerstellung eine vergleichbare Grössenordnung erreicht, wie die der Wärmebereitstellung (Herstellung und Betrieb). Beim Betrieb schneiden bei fast allen Umwelteffekten die Varianten Öl- bzw. Elektrodirektheizung signifikant schlechter als die betrachteten Wärmepumpenvarianten ab. Die Gasheizungsvariante schnitt, ausser beim Treibhauseffekt und Sommersmog, vorteilhafter als die Wärmepumpenvariante ab. Dafür verantwortlich ist die relative Reinheit der Rohressource Erdgas und der geringe Infrastrukturanteil einer Gasheizung. Dieser liegt bei rund 3%, während er bei der Wärmepumpenvariante je nach Typ und Wirkkategorie bis zu 64% betragen kann. Eine Folge des Umstands, dass je effizienter Betriebsdaten sind, Infrastrukturaufwendungen desto wichtiger werden. Die durch das verwendete Kältemittel (R407c) verursachte Umweltbelastung spielt eine untergeordnete Rolle, wichtigere Belastungen stammen aus dem Betriebsstrom. Eine Erhöhung der Jahresarbeitszahl um 50% würde dazu führen, dass die Wärmepumpenheizung bei einigen Wirkkategorien (Überdüngung und Karzinogene) aufholt. Vergleicht man verschiedene Stromvarianten, schneidet der derzeitige CH-Strommix in den meisten Wirkkategorien besser ab, als alternative Technologien, wie zum Beispiel wärmegeführte BHKW oder Gas-Kombikraftwerke. Am augenfälligsten sind Vorteile der Wärmepumpe beim Treibhauseffekt und Nachteile bei der Radioaktivität. Bei der durch den Gebäudebau verursachten Umweltbelastung, konnten zwischen Leichtbau- und Massivbauweise keine signifikanten Unterschiede gefunden werden. Eine Absenkung der Energiekennzahl (SIA2010 oder MINERGIE) lohnt sich ökologisch vor allem bei hochbelastenden Varianten, wie Öl- und Elektrodirektheizung, wo in allen Wirkkategorien eine Verbesserung erreicht wurde. Bei den Wärmepumpen fällt dieser Vergleich uneinheitlich aus, weil bei

fünf der neun Wirkkategorien die Umweltbelastung durch den Zusatzbauaufwand grösser ist, als die infolge der Energieeinsparung vermiedene Umweltbelastung.

Das MATLAB/SIMULINK-Modell konnte das dynamische Verhalten des Gebäudes gut wiedergeben. Durch die Verwendung der beim Schliessen der Thermostatventile verursachten Druckdifferenz als zusätzliches Eingangssignal für die Regelung kann direkt auf eine Raumerwärmung reagiert werden, ohne einen separaten Raumfühler installieren zu müssen. Die Messungen auf der Testanlage mit emuliertem Gebäudeverhalten ergaben, dass aussentemperaturgeführter Zweipunkt- und modellbasierter Regler (H_{∞}) die Raumtemperatur ähnlich gut regeln können. Allerdings bietet der modellbasierte Regler interessante Möglichkeiten, Sperrzeiten und Tarife des EW im Betriebsregime zu berücksichtigen. Die zusätzliche Installation eines Sonnenfühlers ergab in den Simulationen keine signifikanten Vorteile.

Ein Vergleich der Jahresarbeitszahl eines Abluft-Wärmepumpenboilers unter verschiedenen Betriebsbedingungen zeigte, dass die Warmwassertemperatur und die bezogene Warmwassermenge wegen der Bereitschaftsverluste einen wesentlichen Einfluss haben. Die Reduktion der Luftmenge hat einen geringen Einfluss, weil der Ventilatorenergieverbrauch zwar mit der dritten Potenz des Volumenstroms abnimmt, aber der Temperaturhub zwischen Wärmequelle und -senke wegen der tieferen Verdampfungstemperatur zunimmt, wodurch der COP kleiner wird.

Abstract

Goal

In the case of low-energy houses, the water heating fraction rises to 30-40 % because of the low space heating demand, placing new requirements on the equipment. Innovative, failure tolerant solutions must therefore be found to enable the overall heating demand to be met in an efficient, ecologically compatible and economical manner. In Phase 2, new building variants are simulated, test systems measured and the ecological aspects studied in more depth.

With the system concept, the overall system "*Building & Heat Generation*" is considered as an *integral unit*. Criteria such as functionality, building skin, construction materials, comfort, installation engineering, energy efficiency, costs and ecology should be taken into account in their entirety (Fig. 1).

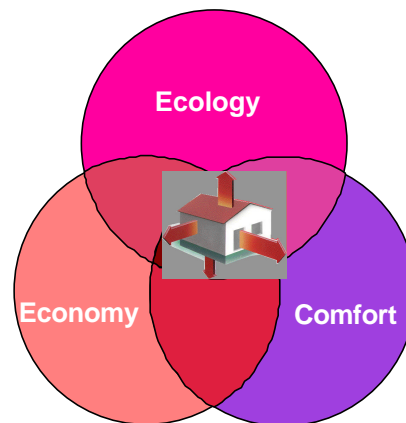


Fig. 1: *Holistic view of building and heat generation*

Work completed

The NOAH building of Phase 1 was optimized to improve passive solar utilization. For 2 variants, lightweight and massive construction with increased window area and shading devices, TRNSYS simulations were conducted. Furthermore, in collaboration with A. Huber [Huber, Schuler 97], a dynamic vertical borehole heat exchanger model was implemented in TRNSYS and a sensitivity study conducted to determine the brine temperature as a function of the thermal conductivity of the ground. Various goals were defined for the ecobalances. On the one hand, the chief polluters are to be identified; on the other hand, the selected heating systems are to be compared with systems that are in common use today, enabling an ecological positioning to be made. Of further interest are questions such as "Is the extra expense for the construction of a passive house justified with the planned heat pump heating system?" or "How does the generation of electricity affect the environmental impact?". The variant "Heat pump with 100% electricity from cogeneration plants" is included in the studies as a limiting case. Ecoaudits were made for the partial system "Air/water HP with exhaust air HP boiler" and the building type "Lightweight Construction". For the development of an "intelligent control module", a model was developed in MATLAB/SIMULINK. The performance characteristics of an exhaust air HP boiler was able to be described on the basis of manufacturer's data as a COP as a function of exhaust air enthalpy, volumetric air flow rate and hot water temperature.

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.

Results

Starting with the low-energy house of Phase 1 (NOAH), an optimized building type with high passive solar fraction was simulated in Phase 2 ("SIA2010", see Abb. 5 until Abb. 8 and Tab. 3). With this passive-solar optimized SIA2010 house, a 13% reduction in heating energy demand was attained with massive construction as compared with lightweight construction. As with the massive construction of the first optimization variant with greatly increased window area, lightweight construction demands that the shading device be operated so frequently to avoid overheating that limitation of the passive solar gain prevents any reduction of the heating demand. Any increased gain is compensated by the increased heat loss from the windows.

The ground probe was simulated by TRNSYS in a dynamic model. Sensitivity studies for the thermal conductivity of the ground surrounding the probe show that in the range of 1 to 4 W/mK, a change of conductivity of $\pm 50\%$ causes an alteration in the brine temperature of approx. ± 2 K and hence a change in the seasonal performance factor of the heat pump of approx. 3.5%.

A variable power air/water heat pump with two capacity stages (compressor frequency 29 and 50Hz) attained in the simulations a seasonal performance factor (SPF) that was 18% higher than for a fixed speed heat pump. The chief cause of this was the higher COP in the working range of the first stage, since there the temperature differences in the heat exchangers are lower than with a single stage, i.e. fixed speed heat pump. The 10% lower switching frequency of the heat pump unit also contributes to the increase in SPF. A disadvantage is the short switch-over of the heat pump into the second stage at the end of a blockage period by the electric utility. Here improvements in the control would be possible. Purely from the economic point of view, the additional investment in a two-stage heat pump for a low-energy house is hardly justified by savings of approx. CHF 30.- p.a.

The economic comparison of the comfort heating systems studied shows that oil and gas fired heating systems, combined with inlet/outlet air heat exchange systems, no longer show a cost advantage. The cheapest variant is the air/air heat pump with exhaust air heat recovery. The air/water heat pump with exhaust air heat pump boiler, the wood fired furnace and the gas fired heating system with inlet/outlet air heat exchanger resulted in about 20% higher annual costs at approx. CHF 3500.- p.a. The costs for both the oil heating system and the brine/water heat pump with inlet/outlet air heat exchanger lie substantially higher. In the latter case, the cost of a separate house ventilation system has a specially large effect. The combination of the ground as a heat source with heat distribution via the inlet air thus appears to be interesting both from an economic and from an energetic point of view. Here there is a need for further research and development. At the present state of the technology, we have at our disposal for newly constructed low-energy houses four sustainable, economic solutions: air/heat pump, wood heating and gas heating (in that order).

The ecobalances show that the environmental impact from building construction attains an order of magnitude comparable with that from heat generation (fabrication and operation). In operation, the variants oil and electric resistance heating show up significantly worse than the heat pump variants considered in almost all effects on the environment. The gas heating variant showed up better than the heat pump variants except in the greenhouse effect and summer smog. The reasons for this are the relative purity of the crude resource natural gas and the low infrastructure component in gas heating. The latter lies around 3%, whereas with the heat pump variants it can amount to up to 64%, depending on the type and impact category. This is a consequence of the fact that the more efficient the operating data are, the more important are the investments for infrastructure. The environmental impact caused by the refrigerant used (R407c) plays a minor role: more important is impact from the electricity used for operation. An increase in the seasonal performance factor by 50% would cause the heat pump heating to catch up in some impact categories (eutrophication and carcinogens). In a comparison of different electricity variants, the present Swiss electricity mix shows up better in most of the impact categories than alternative technologies such as heat-controlled combined heat and power stations or gas-fired combined cycle plants. Most easily recognized are the advantages of the heat pump regarding the greenhouse effect and the disadvantages in respect of radioactivity. In the environmental impact caused by building construction, no significant differences could be found between lightweight and massive construction. A reduction in the energy index (SIA2010 or MINENERGY) pays off ecologically primarily with high-impact variants such as oil and electric resistance heating, where an improvement is obtained in all impact categories. In the case of heat pumps, this comparison gave differing results since in five of the nine impact categories, the environmental impact caused by the additional construction effort is greater than that avoided by energy saving.

The MATLAB/SIMULINK model was able to reproduce the dynamic behaviour of the building satisfactorily. The pressure difference caused by the closing of the thermostatic valves can be used as an additional input signal to the controller, allowing a reaction to room warming without installing a separate room sensor. Measurements on the test installation with emulated building behaviour showed that ambient temperature driven two-point and model-based controllers (H_{∞}) can regulate the room temperature equally well. However, the model-based controller offers interesting possibilities of considering blockage periods and tariffs of the electric utility in the operating regime. The additional installation of a solar sensor showed no significant advantage in the simulations.

A comparison of the seasonal performance factor of an exhaust air heat pump boiler under different operating conditions showed that water consumption rate had a significant effect on account of the standby losses. Reduction of the air flow rate has a minor effect: the fan energy consumption does indeed fall with the cube of the volumetric flow rate, but the temperature lift from the heat source to the heat sink increases owing to the lower evaporation temperature, lowering the COP.

Inhaltsverzeichnis

1	ZIEL DER ARBEIT.....	1
2	LÖSUNGSWEG.....	3
2.1	TRNSYS-SIMULATION GEBÄUDE UND WÄRMEERZEUGUNG	3
2.2	GEBÄUDE	3
2.2.1	<i>Thermische Zonen</i>	<i>6</i>
2.2.2	<i>Wärmeleistungsbedarf.....</i>	<i>9</i>
2.2.3	<i>Bodenheizungsauslegung.....</i>	<i>9</i>
2.2.4	<i>Bezugsprofil Warmwasser</i>	<i>10</i>
2.2.5	<i>Benutzerverhalten</i>	<i>11</i>
2.3	BESTIMMUNG DER JAHRESARBEITSZAHL	12
2.4	MODELLBESCHRIEB TRNSYS	13
2.4.1	<i>Modellierung der Wärmepumpe</i>	<i>13</i>
2.4.2	<i>Modellierung der Erdwärmesonde.....</i>	<i>13</i>
2.4.3	<i>Modellierung der Beschattungseinrichtung.....</i>	<i>15</i>
2.4.4	<i>Regelstrategie für TRNSYS-Simulationen.....</i>	<i>15</i>
2.4.5	<i>Betriebszeiten.....</i>	<i>16</i>
2.5	KOMPONENTENKONFIGURATION	17
2.5.1	<i>Heizungswärmepumpe</i>	<i>17</i>
2.5.2	<i>Erdsonde.....</i>	<i>22</i>
2.5.3	<i>Beschattungseinrichtung.....</i>	<i>23</i>
2.6	AUFLISTUNG DER IN TRNSYS UNTERSUCHTEN SYSTEME	24
2.7	KOMFORTINDIKATOREN ALS BEWERTUNGSKRITERIUM	25
2.8	ÖKOBILANZEN	27
2.8.1	<i>Grundsätzliches</i>	<i>27</i>
2.8.2	<i>Zu beantwortende Fragen — Zieldefinition.....</i>	<i>27</i>
2.8.3	<i>Erhebung des Ökoinventars.....</i>	<i>34</i>
2.8.4	<i>Vorgehen bei der Resultatepräsentation.....</i>	<i>48</i>
2.8.5	<i>Datenqualität der Umwelteffekte.....</i>	<i>50</i>
2.9	MATLAB-SIMULATION VERSCHIEDENER REGELSTRATEGIEN	51
2.9.1	<i>Wahl der Simulationsumgebung - Warum MATLAB.....</i>	<i>51</i>
2.9.2	<i>Vergleich des MATLAB/SIMULINK-Modells mit dem TRNSYS-Modell.....</i>	<i>51</i>
2.9.3	<i>Pulsbreitenmodulation.....</i>	<i>53</i>
2.9.4	<i>H_∞-Reglerentwurf unter Einbezug der Aussentemperatur.....</i>	<i>54</i>
2.9.5	<i>Entwurf des linearen Reglers</i>	<i>54</i>
2.9.6	<i>Implementation des Reglers mit Stellsignalbegrenzung</i>	<i>57</i>
2.9.7	<i>Berechnung des Laufzeitverhältnisses.....</i>	<i>57</i>
2.9.8	<i>Implementation der Pulsbreitenmodulation.....</i>	<i>58</i>
2.9.9	<i>H_∞-Reglerentwurf unter Einbezug von Aussentemperatur und Solarstrahlung.....</i>	<i>61</i>
2.10	VERSUCHE AUF DER TESTANLAGE	63
2.10.1	<i>Anforderungen und Versuchsablauf.....</i>	<i>63</i>
2.10.2	<i>Aufbau der Testanlage</i>	<i>63</i>
2.10.3	<i>Aufbau der Emulation.....</i>	<i>65</i>
2.11	WASSERERWÄRMUNG MIT EINER ABLUFTWÄRMEPUMPE	67
2.11.1	<i>Leistungsdaten LWAZ 250.....</i>	<i>67</i>
2.11.2	<i>Bereitschaftsenergieverbrauch.....</i>	<i>68</i>
2.11.3	<i>Einfluss der Abluft-Enthalpie.....</i>	<i>68</i>
2.11.4	<i>Jahresarbeitszahl der Abluftwärmepumpe.....</i>	<i>69</i>
2.12	KOSTENVERGLEICH.....	70
2.12.1	<i>Untersuchte Systemvarianten</i>	<i>71</i>
2.12.2	<i>Detailangaben zu den Wärmepumpen-Systemen.....</i>	<i>71</i>
2.12.3	<i>Detailangaben zu den Öl- und Gassystemen</i>	<i>71</i>
2.12.4	<i>Detailangaben zum Holzheizungssystem.....</i>	<i>71</i>
2.12.5	<i>Fazit des Kostenvergleichs</i>	<i>73</i>
2.13	MARKTPOTENTIAL	73
2.13.1	<i>Einfamilienhaus-Neubau mit Niedrigenergie-Standard.....</i>	<i>73</i>

2.13.2	<i>Einfamilienhaus-Sanierung</i>	73
2.13.3	<i>Mehrfamilienhaus-Neubau</i>	74
2.13.4	<i>Mehrfamilienhaus-Sanierung</i>	74
2.13.5	<i>Fazit</i>	74
3	GEWONNENE ERKENNTNISSE	75
3.1	GEBÄUDEOPTIMIERUNG	75
3.1.1	<i>Energetische Optimierung</i>	75
3.1.2	<i>Behaglichkeitsvergleich</i>	78
3.2	ERDSONDE	78
3.2.1	<i>Optimaler Massenstrom</i>	78
3.3	WÄRMEPUMPE	80
3.3.1	<i>Erdsonden-Wärmepumpe</i>	80
3.3.2	<i>Erdsondenbetrieb mit Wasser</i>	82
3.3.3	<i>Zweistufig leistungsgeregelte Luft/Wasser-Wärmepumpe</i>	84
3.4	ÖKOBILANZEN	89
3.4.1	<i>Resultate Gesamtbetrachtungen</i>	89
3.4.2	<i>Sensitivitätsanalyse: Erhöhung der Jahresarbeitszahl</i>	106
3.4.3	<i>Sensitivitätsanalyse: Stromvarianten</i>	110
3.4.4	<i>Payoff SIA2010-Gebäude vs. NOAH-Gebäude</i>	114
3.5	REGELUNG	117
3.5.1	<i>Vergleich Regler mit/ohne Sonnenfühler</i>	117
3.5.2	<i>Vergleich des H_{∞}-Reglers mit dem 2-Punkte Regler</i>	119
3.5.3	<i>Gebäudeemulation mit modellbasiertem Regler</i>	123
3.5.4	<i>Emulation mit Zweipunkteregler</i>	125
3.5.5	<i>Vergleich der Emulationen mit den Simulationen</i>	128
3.5.6	<i>MATLAB-Listing für Regelmodul</i>	128
4	EMPFEHLUNG FÜR WEITERE UNTERSUCHUNGEN	129
4.1	ÖKOLOGIE	129
4.2	REGELUNG	130
4.3	MARKT	130
4.4	ENERGIEPOLITIK	130
5	SYMBOLVERZEICHNIS	133
6	LITERATURVERZEICHNIS	137

1 ZIEL DER ARBEIT

Zukünftige Niedrigenergiehäuser mit einer Energiekennzahl von weniger als 200 MJ/m²a stellen neue Anforderungen an das Heizsystem. Zum einen verringert sich die installierte Heizleistung auf weniger als die Hälfte, zum anderen steigt der Anteil für die Warmwasserbereitung auf 30-40%. In der Phase 2 des Projektes „Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe“ wird daher in enger Zusammenarbeit mit der Industrie eine Testanlage detailliert gemessen. Dabei werden die Anlagenkonzepte berücksichtigt, die sich während der Phase 1 am erfolgsversprechendsten erwiesen. Ein wichtiges Ziel ist, auch bei kleinen Aggregaten ähnlich hohe Jahresarbeitszahlen zu erreichen, wie sie im Testzentrum Töss bei grösseren Anlagen gemessen worden sind. Dabei wird der Aufwand zum Heizen und für die Warmwasserbereitung betrachtet.

Im weiteren müssen mit Simulationsrechnungen spezielle Problemstellungen genauer untersucht werden, wie der Einfluss grosser Fensterflächen zur Nutzung von Solargewinnen. Dabei ist auch eine ökologische Untersuchung des Gesamtsystems "Wärmeerzeugung&Gebäude" von Bedeutung, da noch nicht von vornherein klar ist, welchen Einfluss das Heizsystem und das auf niedrigen Energieverbrauch optimierte Gebäude auf die Ökobilanz haben. In diesem Zusammenhang ist auch von Interesse, mit welchen Änderungsmaßnahmen der grösstmögliche Nutzen erreicht werden kann.

Die Auswahl des Herstellers zum Bau der Testanlage erfolgte über eine Ausschreibung mit einem Pflichtenheft, in dem u.a. die Heizleistung, die Jahresarbeitszahl und eine Kostenvorstellung definiert sind. Die Wärmepumpe wird ohne Pufferspeicher und Mischventile direkt am Wärmeverteilsystem angeschlossen. Sie soll über eine intelligente Regelung verfügen, welche herstellerseitig in der Wärmepumpe integriert ist. Dabei sollen auch die Wechselwirkungen mit Thermostatventilen berücksichtigt werden, welche bei Niedrigtemperaturheizungen zur raumweisen Temperaturvorgabe Anwendung finden. Im weiteren soll der Einfluss der Sonneneinstrahlung auf die Regelung besser berücksichtigt werden.

Zur Untersuchung der genannten Problemstellungen beauftragte das Bundesamt für Energie eine Arbeitsgemeinschaft unter Leitung der INFEL. Das Projekt gliedert sich in die folgenden vier Phasen:

- I. 1/96-12/96**
Machbarkeitsanalyse, Problemanalyse und Vorbereitung zum Bau eines Funktionsmusters
- II. 4/97-11/98**
Ökologischer und ökonomischer Vergleich, Systemoptimierung, intelligente Regelung und Versuche mit Testanlagen
- III. 5/98-3/00**
Messungen von drei Pilotanlagen¹, Ausarbeitung der Anforderungen für MINERGIE-Wärmepumpen, Basisgrundlagen für ein Planungshandbuch
- IV. 9/98-6/00**
 - a) Planungshandbuch für Niedrigenergie- und Passivhäuser
 - b) Marketinghandbuch für Niedrigenergie- und Passivhäuser ²

¹ Mit Unterstützung der Schweizer Elektrizitätswirtschaft, Ressort Markt & Kunden

² Im Auftrag der Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz (FWS)

Um die neuen Effekte, die bei Niedrigenergiegebäuden zum tragen kommen, besser mit „herkömmlichen“ Gebäuden vergleichen zu können, wird nicht nur ein SIA2010-Haus untersucht, sondern auch ein Gebäude, das bezüglich Heizenergiebedarf gerade noch die gesetzlichen Anforderungen der Kantonalen Energiegesetzgebung für Neubauten des Kantons Zürich [ATAL 97] erfüllt. Die Resultate basieren auf einer Diplomarbeit des ZTL [Giger, Hermann 97], die für dieses Projekt weiter bearbeitet wurde. Dieses Gebäude wird nachfolgend mit Grenzwert-Haus bezeichnet.

Bei der Wahl des SIA2010-Hauses stellte sich die Frage, ob ein neues Niedrigenergiegebäude, das der Forderung nach passiver Solarenergienutzung gerechter wird, ausgesucht oder ob das bereits verwendete NOAH-Gebäude modifiziert werden soll. Dabei ist der Forderung nach der Vergleichbarkeit der Resultate der Projektphasen eins und zwei nachzukommen.

Als wesentlichste Merkmale von Niedrigenergiegebäuden gelten:

- gut gedämmte Gebäudehülle
- passive Sonnenenergiegewinnung (Südausrichtung der Aufenthaltszonen mit grossen Fensterflächen)
- Anbringen von thermischer Speichermasse im Gebäude zur kurzfristigen Speicherung der freien Wärme
- Nutzung von Abwärme

Um das Haustechniksystem möglichst einfach und kostengünstig zu halten, wird auf die Einbindung aktiver Solarenergiesysteme verzichtet. Die Senkung des Energiebedarfs wird primär durch eine Verbesserung der Wärmedämmung und eine Erhöhung der Süd-Fensterflächen erreicht.

Das in der ersten Phase verwendete NOAH-Gebäude eignet sich recht gut für eine Modifikation. Die Aufenthaltsräume sind bereits in der ursprünglich verwendeten Version nach Süden ausgerichtet. Das Gebäude wird daher der Forderung nach der Südausrichtung von Aufenthaltsräumen (Wohnen, Zimmer) und der Nordausrichtung untergeordneter Zonen (Bad, WC, Eingangsbereich) gerecht.

Die Wärmedämmung wurde gemäss Tab. 1 variiert. Die Dämmstärke bezieht sich auf die Konstruktionen des Leichtbaus. Beim Grenzwert-Haus wurden Fenster mit schlechteren Wärmedurchgangskoeffizienten verwendet und die Wärmedämmung derart vermindert, bis das Gebäude gerade noch den Grenzwert des Heizenergiebedarfs der Kantonalen Energiegesetzgebung für Neubauten des Kantons Zürich [ATAL 97] einhält. Die Fensterabmessungen sind beim NOAH- und Grenzwert-Haus identisch. Beim SIA2010-Haus wurde die Wärmedämmung derart erhöht, dass der Wärmeleistungsbedarf der einzelnen Zonen trotz der vorgenommenen Fenstervergrösserung etwa gleich gross ist wie im NOAH-Haus, was zu einer ähnlichen Systemauslegung führt. Im SIA2010-Haus wurden die gleichen Fenster wie im NOAH-Haus verwendet, da diese schon einen recht guten Wärmedämmstandard haben.

Das Benutzerverhalten ist bei allen Gebäuden gleich mit der Ausnahme, dass beim SIA2010-Haus eine Beschattungseinrichtung betätigt wird. Der Aussenluftwechsel wird auch wie in der ersten Phase als Funktion der Aussenlufttemperatur festgelegt (siehe Abb. 4) und die Abluft wird entweder über einen Abluftwärmepumpen-Wassererwärmer genutzt oder bei Warmwasseraufbereitung ab Sole/Wasser-Wärmepumpe ungenutzt ins Freie geführt. Die kontrollierte Wohnungslüftung über ein Zu- und Abluftsystem mit Wärmerückgewinnung ist eine interessante Option, wird in dieser Arbeit jedoch nicht weiter untersucht. Bei der Pilotanlage 3 der nächsten Projektphase wird eine Luft/Luft-Wärmepumpe mit WRG messtechnisch untersucht.

	Grenzwert-Haus (Phase 2)			NOAH-Haus (Phase 1)			SIA2010-Haus (Phase 2)		
Flächen	K-Wert [W/m ² K]	Dämmung leicht	Dämmung massiv	K-Wert [W/m ² K]	Dämmung leicht	Dämmung massiv	K-Wert	Dämmung leicht	Dämmung massiv
Aussenwand	0.55	-	5 cm	0.29	16 cm	12 cm	0.20	24 cm	18 cm
Dach	0.40	-	8 cm	0.22	20 cm	20 cm	0.15	30 cm	30 cm
Boden EG	0.46	-	6 cm	0.25	12 cm	12 cm	0.20	16 cm	16 cm
Fenster	1.4	-		1.1			1.1		

Tab. 1: Vergleich der Wärmedurchgangskoeffizienten der gegenübergestellten Gebäude

Der Heizenergiebedarf nach SIA 380/1 (Tab. 2) ist um etwa 10-20% höher als der Heizenergiebedarf, der mit den Simulationsrechnungen erhalten wurde. Die Abweichungen sind auf die Unterschiede der verschiedenen Berechnungsmethoden zurückzuführen, insbesondere auf die Solargewinne und die Ausnutzung der Fremdwärme.

	Grenzwert-Haus (Phase 2)	NOAH-Haus (Phase 1)	SIA2010-Haus (Phase 2)
Heizenergiebedarf [MJ/(m²a)] nach SIA 380/1	274 (157%)	174 (100%)	134 (77%)

Tab. 2: Heizenergiebedarf nach SIA 380/1 der gegenübergestellten Gebäude

Abb. 3 zeigt, dass die drei untersuchten Gebäude den Bereich abdecken, der mit dem SIA-Absenkpfad für die Jahre 1994 bis 2010 angepeilt wird.

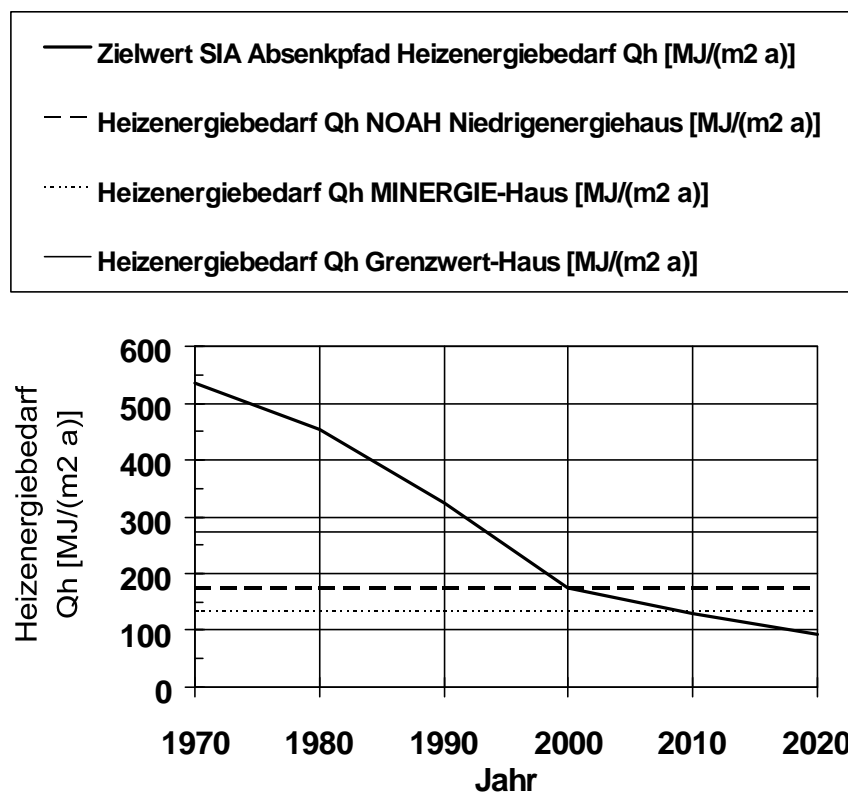


Abb. 3: Gegenüberstellung Heizenergiebedarf der untersuchten Gebäude mit SIA-Absenkpfad

Der Aussenluftwechsel ist bei allen Gebäuden nach der gleichen aussentemperaturabhängigen Funktion (Abb. 4) berechnet worden.

Aussenluftwechsel [1/h]

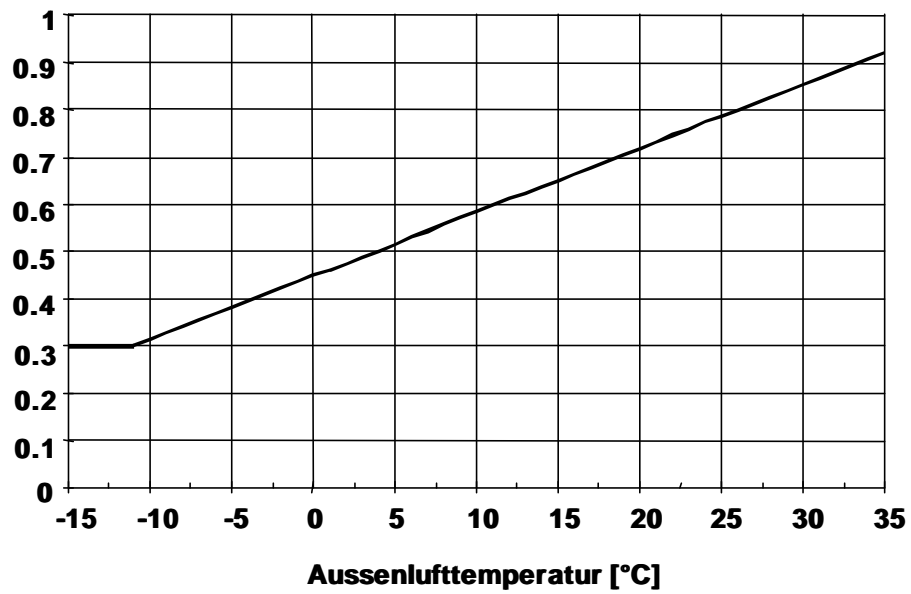


Abb. 4: Aussenluftwechsel als Funktion der Aussenlufttemperatur

2.2.1 Thermische Zonen

Für die TRNSYS Simulationen wird das Gebäude in 5 thermische Zonen eingeteilt. Alle untersuchten Gebäude haben dabei die gleiche Zoneneinteilung. Auf den folgenden Seiten ist die Gebäudezonierung ersichtlich. Dabei ist zu beachten, dass die Fenstervermassung nur für das Grenzwert- und NOAH-Haus gültig ist, nicht aber für das SIA2010-Haus. Das letzte beinhaltet zusätzliche Fenster und teilweise wurden die bestehenden vergrößert. Die neue Fenstereinteilung ist in Abb. 54 auf S. 75 ersichtlich.

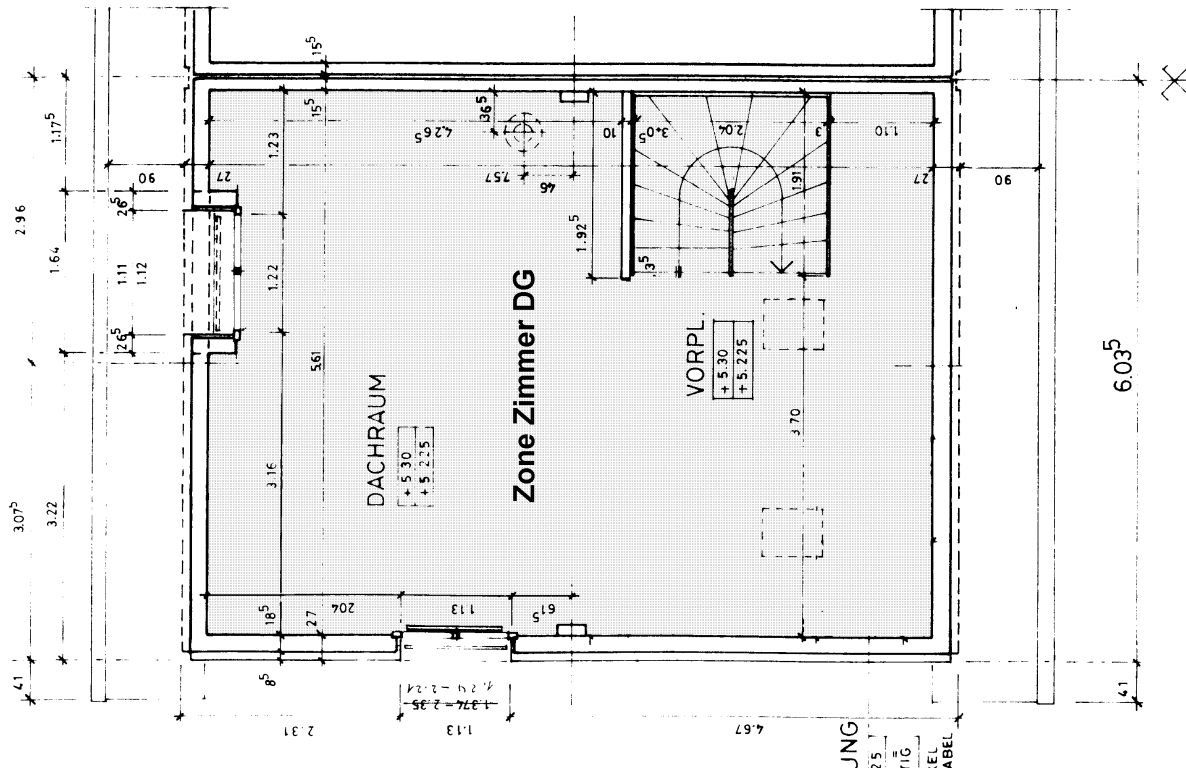


Abb. 5: Dachgeschoss als eine thermische Zone für TRNSYS-Simulation

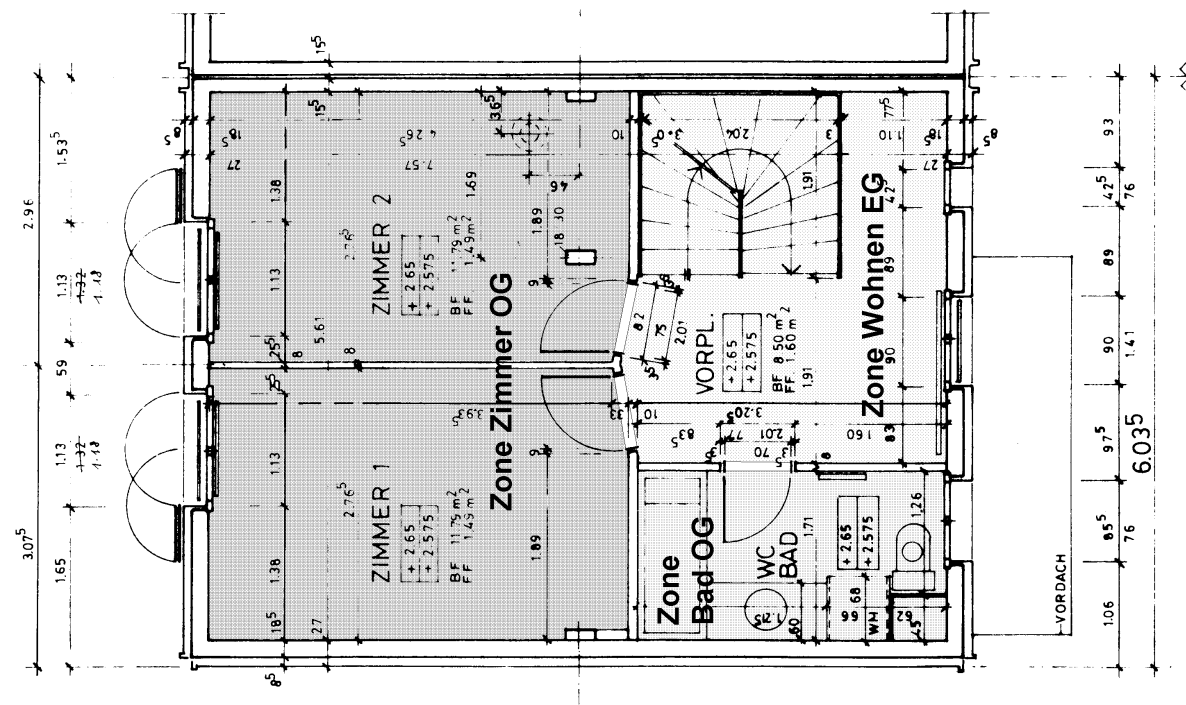
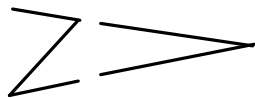
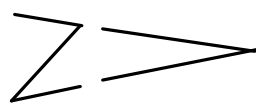


Abb. 6: Obergeschoss, aufgeteilt in zwei thermische Zonen für TRNSYS-Simulation



2.2.2 Wärmeleistungsbedarf

Der Wärmeleistungsbedarf wurde nach SIA 384/2 [SIA 82] berechnet. Aufgrund der Massenberechnung muss die Auslegungsaussentemperatur für den Leichtbau um 3 K gesenkt werden und beträgt damit -11°C. Damit die Heizsysteme der Massivbauten und jene der Leichtbauten untereinander vergleichbar sind und um Effekte, die auf der unterschiedlichen Systemauslegung basieren, eliminieren zu können, ist für die Massivbauten die massgebende Aussentemperatur ebenfalls auf -11°C belassen worden.

Wie bereits erwähnt sind die Isolationsstärken beim NOAH- und SIA2010-Haus derart angepasst worden, dass der Wärmeleistungsbedarf des Gebäudes bei beiden Bauten gleich gross ist. Unterschiede im Wärmeleistungsbedarf bestehen aber zwischen den beiden Bauten und dem Grenzwert-Haus.

		Q [W]	q * [W/m ²]
Zimmer DG	Grenzwert-Haus	1690	45
	NOAH- und SIA2010-Haus	1110	29
Zimmer OG	Grenzwert-Haus	780	33
	NOAH- und SIA2010-Haus	515	22
Bad OG	Grenzwert-Haus	320	58
	NOAH- und SIA2010-Haus	175	32
Wohnen EG	Grenzwert-Haus	1990	43
	NOAH- und SIA2010-Haus	1400 (1260**)	31 (27**)
Total	Grenzwert-Haus	4780	42
	NOAH- und SIA2010-Haus	3200	28

Tab. 3: Wärmeleistungsbedarf der verschiedenen Gebäude (*: Bezogen auf totale Bodenfläche der Zone, also mit FBH belegte und nicht belegte Fläche; **: Leistung ohne Bodenverlust gegen Keller)

2.2.3 Bodenheizungsauslegung

Bei dem NOAH- und SIA2010-Haus ist die Bodenheizung auf eine Auslegungs-Betriebstemperatur von 30/25°C bei -11°C ausgelegt worden. Diese Temperatur wurde für die Untersuchungen beim Grenzwert-Haus auf 35/30°C erhöht, um die grössere Heizleistung decken zu können. Tab. 4 gibt eine Übersicht über die verschiedenen Systemauslegungen.

Haus	Auslegungssystemtemperaturen bei Aussen-temperatur - 11°C	Panel	Anteil belegte Bodenfläche [-]	Wärmefluss nach oben [W/m²]	Wärmefluss nach unten [W/m²]	Verlegeabstand
Grenzwert	35/30	ZIDG-ZIOG	1	42.2	7.2	0.20
		ZIDG-WOEG	1	42.2	7.2	0.20
		ZIDG-BAOG	1	42.2	7.2	0.20
		ZIOG-WOEG	0.50	46.3	7.8	0.20
		BAOG-WOEG	0.62	68.7	8.0	0.05
		WOEG-WOEG	1	41.5	13.9	0.20
		WOEG-KELL	1	41.5	13.9	0.20
NOAH	30/25	ZIDG-ZIOG	1	27.3	4.7	0.10
		ZIDG-WOEG	1	27.3	4.7	0.10
		ZIDG-BAOG	1	27.3	4.7	0.10
		ZIOG-WOEG	1	20.3	3.5	0.35
		BAOG-WOEG	0.62	52.7	4.8	0.05
		WOEG-WOEG	1	26.2	4.5	0.15
		WOEG-KELL	0.89	26.1	6.4	0.15
SIA2010	30/25	ZIDG-ZIOG	1	27.3	4.7	0.10
		ZIDG-WOEG	1	27.3	4.7	0.10
		ZIDG-BAOG	1	27.3	4.7	0.10
		ZIOG-WOEG	0.70	20.3	3.5	0.35
		BAOG-WOEG	0.62	32.1	3.0	0.35
		WOEG-WOEG	1	27.3	4.7	0.10
		WOEG-KELL	1	27.2	6.5	0.10

Tab. 4: Leistung und Verlegeabstand der untersuchten Bodenheizung

2.2.4 Bezugsprofil Warmwasser

Der Warmwasserverbrauch ist für alle Gebäude gleich hoch angenommen worden und basiert auf den gleichen Grundlagen wie bereits der Verbrauch, der in der ersten Projektphase den Simulationen zu Grunde gelegt worden ist [NTH1 96]. Der Vollständigkeit halber wird das verwendete Verbrauchsprofil nach VSSH (Vereinigung Schweizerischer Sanitär- und Heizungsfachleute) [VSSH 93], das auf Messungen und Statistiken beruht, nochmals aufgeführt (Abb. 9). Es wird von einem Verbrauch (inkl. Ausstossverluste, aber ohne Wärmeverluste des Warmwasserspeichers) von 40 Liter pro Tag und Person zu 60°C ausgegangen, was dem Durchschnittsverbrauch für ein EFH oder eine Eigentumswohnung bei mittlerem Standard entspricht. Den Simulationen ist eine Belegung von 3 Personen und eine Kaltwassertemperatur von 10°C zu Grunde gelegt.

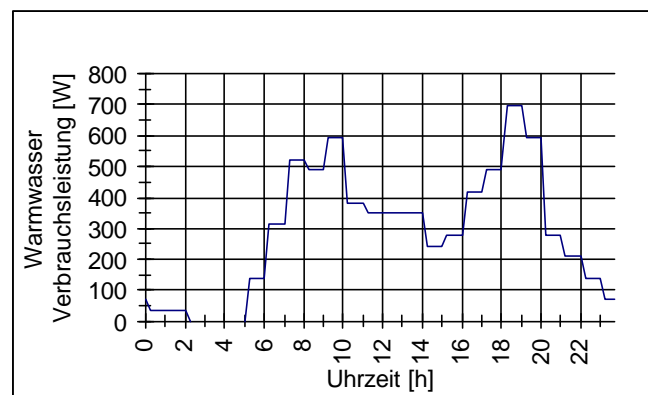


Abb. 9: Lastkurve für Warmwasserverbrauch inkl. Ausstossverluste

Vergleicht man die zu Grunde gelegte Verbrauchsleistung mit Messdaten an verschiedenen Objekten in Deutschland [Mack et al. 96], so erhält man eine recht gute Übereinstimmung. Die Messdaten geben Zirkulationsverluste von 60 W bis gar über 120 W pro Wohnung an, wobei typische Werte um 90 W pro Wohnung liegen. Für das hier betrachtete Reihen-EFH kann für die Ausstossverluste mit etwa gleich hohen Werten gerechnet werden.

Zieht man von dem den Simulationen zu Grunde gelegten Warmwasserverbrauch von 120 l/(d-Wohnung) zu 60°C, was einer mittleren Verbrauchsleistung von 290 W entspricht, 90 W für Ausstossverluste ab, so erhält man eine mittlere Verbrauchsleistung von 200 W, was 27 l/(d-Pers) Warmwasserverbrauch zu 60°C (bei Kaltwassertemperatur von 10°C) oder 82 l/(d-Wohnung) entspricht. Dieser Wert liegt im Bereich der Messung von [Mack et al. 96], wie aus Abb. 10 ersichtlich ist.

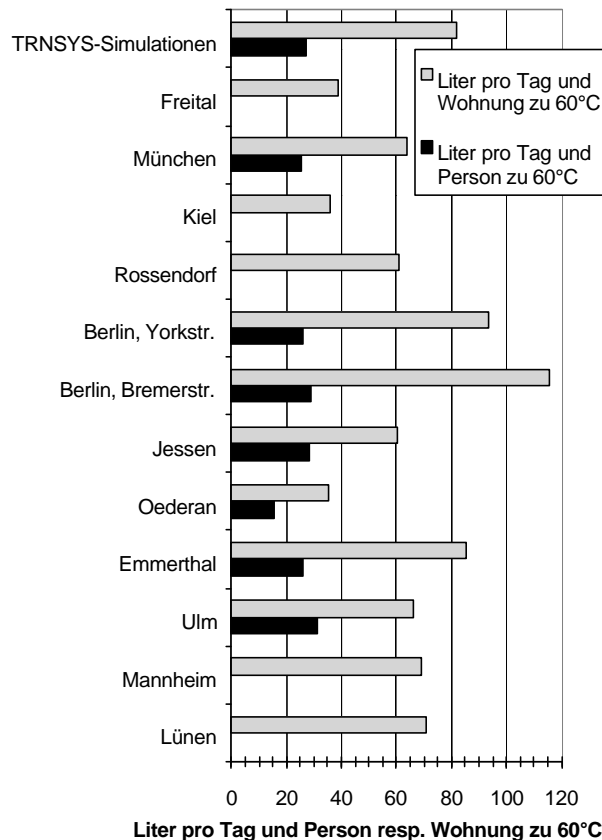


Abb. 10: Vergleich des Warmwasserverbrauchs der Simulationen mit Messdaten [Mack et al. 96]

2.2.5 Benutzerverhalten

Um die Resultate der beiden Projektphasen miteinander vergleichen zu können, wird dasselbe Benutzerprofil wie in der ersten Phase verwendet. Die elektrischen Wärmegewinne basieren auf den RAVEL Stromverbrauchserhebungen [Huser 92], die lediglich 7% unter dem Wert von SIA 380/1 [SIA 88] liegen. Der jährliche Elektrizitätsverbrauch für den Haushaltstrom beträgt bei allen untersuchten Häusern 52 MJ/(m²·a). Dieser Wert liegt um 8 MJ/(m²·a) unter der SIA2010-Kennzahl für Haushaltelektrizität.

Vollständigkeitshalber wird der Stundenfahrplan, welcher den Simulationen zu Grunde gelegt worden ist, nochmals aufgeführt. Es handelt sich dabei aber um den gleichen Fahrplan, der bereits in der ersten Phase verwendet wurde (Abb. 11).

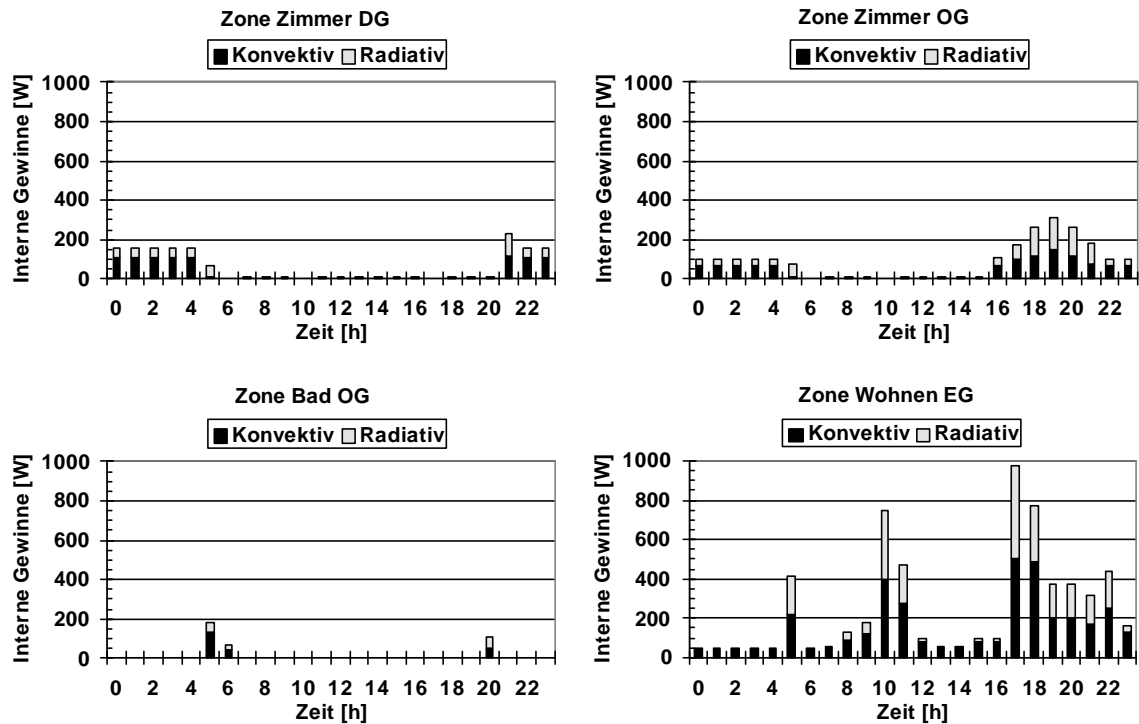


Abb. 11: Interne Wärmegewinne

2.3 Bestimmung der Jahresarbeitszahl

Die Jahresarbeitszahl beinhaltet, sofern nichts anderes erwähnt ist, immer alle Hilfsenergien, die zum Betrieb des Heizsystems notwendig sind (JAZ_{netto}). Dabei wird angenommen, dass die elektrische Wirkleistung der Umwälzpumpe auf der Kondensatorseite der Wärmepumpe 30 W beträgt. Der Anteil der Oelwannenheizung der Wärmepumpe am gesamten Stromverbrauch ist vernachlässigbar und wird daher bei der Berechnung des Stromverbrauchs vernachlässigt. Der Stromverbrauch des Verdampferventilators sowie der Umwälzpumpe des Verdampferkreislaufts bei den Erdsondensystemen ist in dem Stromverbrauch berücksichtigt.

Die Berechnung der totalen Jahresarbeitszahl für die Raumheizung *und* die Warmwasserbereitung erfolgt mit

$$JAZ_{h+WW} = \frac{1}{\frac{W_h}{JAZ_h} + \frac{W_{WW}}{JAZ_{WW}}}$$

Gl. 1

Für die Herleitung von Gl. 1 wird auf die Handrechenmethode zur Bestimmung der Jahresarbeitszahl [Zweifel, Wetter 97] im Anhang 1.1³ verwiesen.

³ Der Anhang ist als separater Berichtsteil bei ENET erhältlich

2.4 Modellbeschreibung TRNSYS

In diesem Bericht wird nur auf die Modelle eingegangen, die in der zweiten Projektphase entwickelt wurden. Für den Beschrieb der übrigen verwendeten Modelle, ob Standard TRNSYS-Types oder auch selbstentwickelte, wird auf den Bericht der ersten Projektphase verwiesen [NTH1 96].

2.4.1 Modellierung der Wärmepumpe

2.4.1.1 Heizwärmepumpe

Das in der ersten Projektphase entwickelte Modell für die Kompressionswärmepumpe wurde erweitert. Mit dem neuen Modell können nun auch Wärmepumpen mit zwei Leistungsstufen simuliert werden. Durch ein Stellsignal, das der Wärmepumpe von einem Regler zugeführt wird, kann die Wärmepumpe entweder abgeschaltet, auf der ersten oder der zweiten Leistungsstufe betrieben werden. Die beiden Leistungsstufen werden wie beim Modell der ersten Phase durch biquadratische Polynome repräsentiert. Die Leistungsabstufung wurde für das Projekt so gewählt, dass die erste Stufe 60% der Spitzenleistung decken kann.

Neu ist auch ein Skalierungsfaktor für die Wärmepumpenleistung ins Modell eingebaut. Mit diesem Faktor kann die Heizleistung und die elektrische Leistung linear geändert werden. Somit kann das Leistungskennfeld bei gleichbleibender Leistungszahl einfach geändert werden.

Für die weitere Modellbeschreibung wird auf den Anhang 1.2 verwiesen.

2.4.1.2 Wärmequelle

Als Wärmequelle wird weiterhin Aussenluft oder untiefe Geothermie⁴ verwendet. Die Aussenluft wird direkt angesaugt (nicht über ein Luft-/Erdregister) und die untiefe Geothermie wird über geschlossene Erdwärmesonden (Doppel U-Rohr) genutzt.

Bei der Erdwärmenutzung ist insbesondere die Variation der Leistungszahl und der Mediumtemperaturen des Primärkreislaufts bei ändernden Randbedingungen von Interesse. Die Variationen werden bezüglich folgender Parameter untersucht:

- Wärmeleitzahl Erdreich
- Sondenlänge
- Sondenmedium (Mischung mit 25 Vol.-% Monoäthylenglykol⁵ oder 100% Wasser)
- Auslegungstemperaturdifferenz Sondenkreislauf

Eine Übersicht über die Simulationsvarianten wird in Kapitel 2.6 gegeben.

2.4.2 Modellierung der Erdwärmesonde

In der ersten Projektphase musste aus Zeitgründen ein sehr einfacher Ansatz für die Temperatur des Erdsondenkreislaufes verwendet werden. Die Austrittstemperatur aus der Sonde wurde durch einen Linienzug, der den Jahresverlauf der Austrittstemperatur nachbilden soll, repräsentiert.

⁴ Die Grenzen der untiefen Geothermie liegen zwischen 10-20 m unter der Erdoberfläche für die obere Grenze und 400 m für die untere Grenze

⁵ Handelsname der Fa. Hoechst AG: Anitfrogen N

In der Projektphase 2 wird das Erdsondenmodul verwendet, das im BFE-Forschungsprogramm "Berechnungsmodul für Erdwärmesonden" [Huber, Schuler 97] entwickelt und validiert wird. Hierzu wurde das PASCAL-Programm in Zusammenarbeit mit A. Huber, Huber Energietechnik, auf FORTRAN umgeschrieben und ein TRNSYS-Type entwickelt. Die PASCAL- und FORTRAN-Versionen sind in Parallelsimulationen verglichen worden und die beiden Resultatsätze stimmen überein. Kleine Programmmodifikationen, deren Notwendigkeit sich in den TRNSYS-Simulationen ergeben hat, sind in beiden Programmversionen durchgeführt worden. Somit entsprechen die Resultate, welche mit dem TRNSYS-Type erreicht werden, denjenigen, die auch bei Einsatz des PASCAL-Programms erhalten worden wären.

Das Berechnungsverfahren des Erdsondenmoduls gliedert sich in drei Teile auf:

- Dynamische Berechnung des strömenden oder ruhenden Sondenfluids
- Lösung der eindimensionalen Fourier'schen Wärmeleitungsgleichung in radialen Koordinaten für das sondennahe Erdreich (etwa 1.5..2.0 m Radius)
- Analytischer Ansatz nach Werner [Werner 96] für das entfernte Erdreich

Die Lösung der Fourier'schen Wärmeleitungsgleichung erfolgt mit impliziten Differenzengleichungen nach der Methode von Crank-Nicholson. Um die Rechenzeit tief zu halten, werden das Sondenfluid, das sondennahe Erdreich und die Randbedingungen (entferntes Erdreich), die alle sehr unterschiedliche Zeitkonstanten haben, mit verschiedenen Zeitschritten berechnet. Abb. 12 und Abb. 13 zeigen die axiale und radiale Diskretisierung des Sondenbereichs. Für die weitere Modellbeschreibung wird auf den Anhang 1.3 verwiesen.

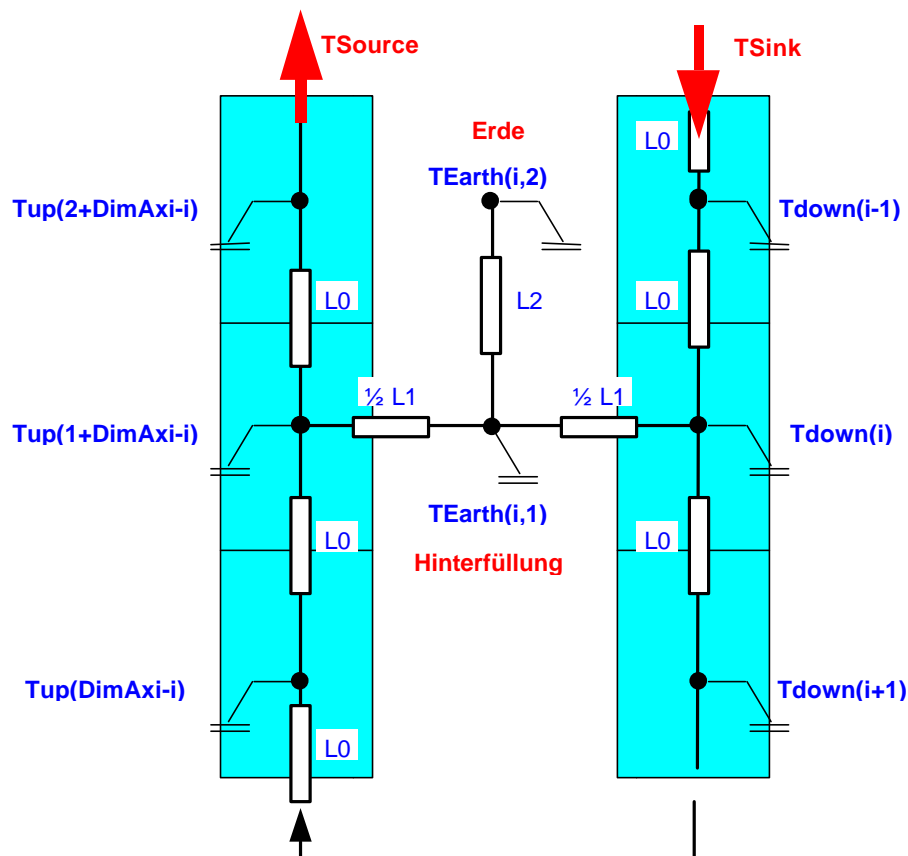


Abb. 12: Unterteilung der Doppel U-Rohr-Sonde in Kompartimente

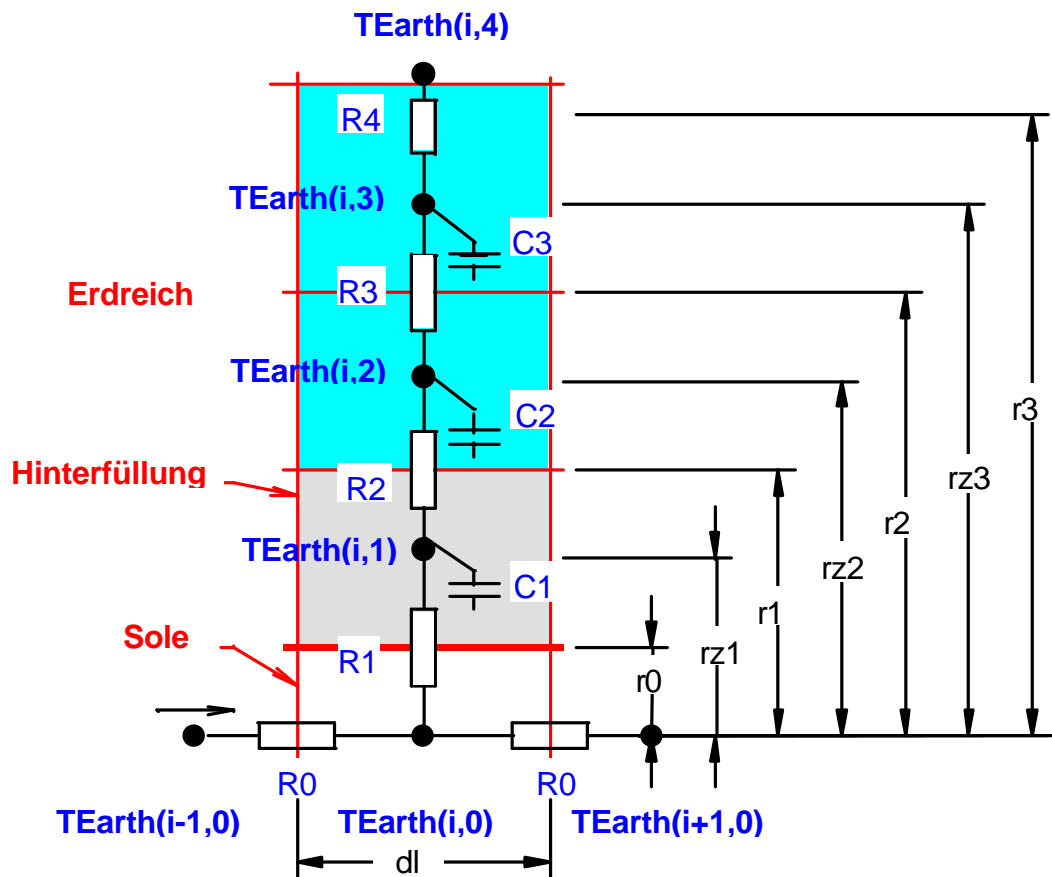


Abb. 13: Radiale Wärmeleitung im sondennahen Erdreich

2.4.3 Modellierung der Beschattungseinrichtung

Durch die Vergrößerung der Fensterflächen des Gebäudes ist im SIA2010-Haus zur Einhaltung des thermischen Komforts teilweise die Betätigung einer aussenliegenden Beschattungseinrichtung notwendig. Über die Art, wie eine Beschattung im Wohnungsbau betätigt wird, kann keine generelle Aussage getätigt werden. Das Benutzerverhalten ist zu individuell, so dass kein allgemein gültiges Verhalten über die Betätigung der Beschattungseinrichtung abgeleitet werden kann.

Das entwickelte Modell geht davon aus, dass der Benutzer immer die Beschattung betätigt, wenn die Raumtemperatur über einem wählbaren Wert liegt (z.B. 24°C) und die Direktstrahlung auf die Fensterfläche einen frei wählbaren Wert (z.B. 100 W/m^2) übersteigt. Die Beschattungseinrichtung wird unabhängig von der Raumtemperatur wieder geöffnet, sobald die Direktstrahlung auf die Fensterfläche den gewählten Wert unterschreitet. Die Funktionsweise des Modells ist ausführlich im Anhang 1.4 beschrieben.

2.4.4 Regelstrategie für TRNSYS-Simulationen

Sämtliche TRNSYS-Simulationen werden wie in der ersten Projektphase mit einer aussentemperaturgeführten Rücklauftemperaturregulierung betrieben (Abb. 14). Als Regelgröße muss bei einer Direktbindung der Wärmepumpe *zwingend* die Rücklauftemperatur verwendet werden. Die Vorlauftemperatur kann nicht als Regelgröße verwendet werden, da diese bei einer Einschaltung der Wärmepumpe sprunghaft ändert und so zu einem Taktbetrieb führen würde. Die Vorlauftemperatur kann nur in Regelsystemen, wie sie unter Kapitel 3.9 beschrieben sind, beigezogen werden.

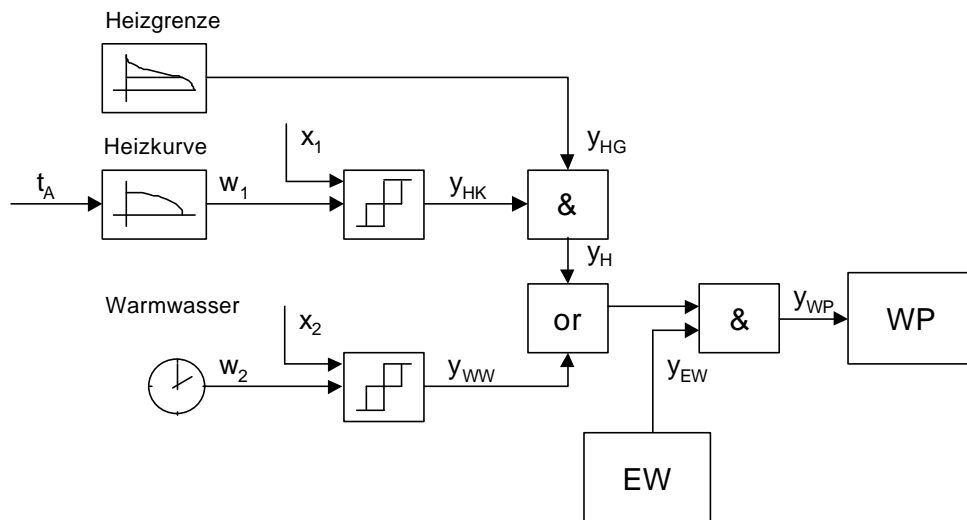


Abb. 14: Blockschaftbild aussentemperaturabhängige Rücklauftemperaturregulierung mit Warmwasseraufbereitung

Die Heizungsanlage wird in Betrieb genommen, wenn der Mittelwert der Aussentemperatur über eine definierte Zeitspanne sowie die momentane Aussentemperatur unter der Heizgrenze liegen. Die Rücklauftemperaturregulierung ermittelt den Sollwert der Systemtemperaturen über die Heizkurve nach SIA 384/2 [SIA 82]. Je nach Grösse der Abweichung zwischen Sollwert w und Istwert x der Rücklauftemperatur wird der Kompressor der Wärmepumpe auf der ersten oder der zweiten Leistungsstufe betrieben. Die Umschaltkriterien für die Stufen eins und zwei sind der Abb. 15 zu entnehmen.

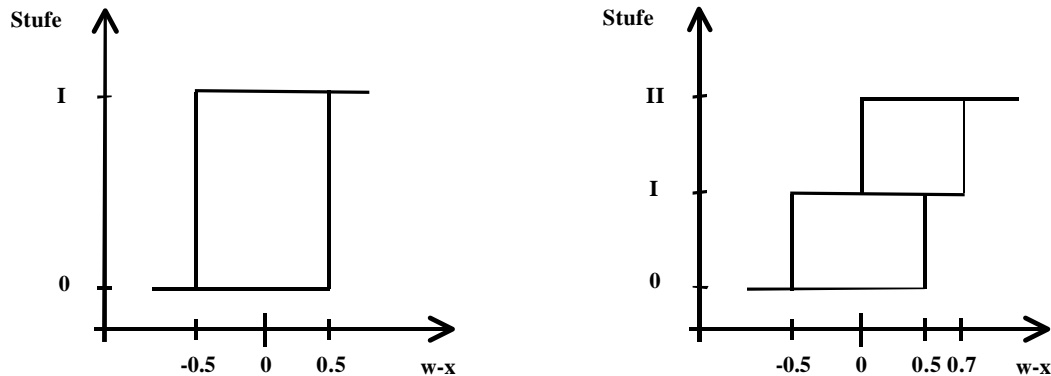


Abb. 15: Eingestellte Schaltdifferenzen für die einstufige und zweistufige Wärmepumpe

Die Heizungsumwälzpumpe hat bei allen betrachteten Varianten eine elektrische Leistungsaufnahme von 30 W. Weil für die Heizungsregulierung wie erwähnt die Rücklauftemperatur bekannt sein muss, ist die Umwälzpumpe, sofern die Heizgrenze unterschritten ist, dauernd in Betrieb.

2.4.5 Betriebszeiten

Die drei untersuchten Gebäudevarianten Grenzwert-Haus, NOAH-Haus und SIA2010-Haus weisen sehr unterschiedliche Wärmedämmstandards auf. Das bedingt auch eine unterschiedliche Einstellung der Heizgrenze und verschieden lange Betriebsperioden, die untersucht werden. Tab. 5 gibt eine Übersicht über die verschiedenen Einstellparameter der Betriebszeiten. Durch die bessere passive Solarenergienutzung im SIA2010-Haus konnte die Heizungsanlage bereits Ende April abgestellt wer-

den. Die Heizgrenze musste im Grenzwert-Haus aus Behaglichkeitsgründen von 12°C auf 15°C angehoben werden. Beim NOAH-Haus wie auch beim SIA2010-Haus ist die ideale Einstellung bei 12°C.

Gebäude	Heizgrenze [°C]	Start Heizsaison	Ende Heizsaison	Anzahl Betriebsmonate	Betriebsstunden der Heizung [h/a]
Grenzwert	15	1. Oktober	31. Mai	8	2230
NOAH	12	1. Oktober	31. Mai	8	1250
SIA2010	12	1. Oktober	30. April	7	1200

Tab. 5: Betriebsparameter der verwendeten Gebäudetypen

Um eine Spitzenleistung im Elektrizitätswerk zu vermeiden und um von günstigen Stromtarifen profitieren zu können, wird die Heizungsanlage bei allen Gebäuden zwischen 6.00 und 7.00, zwischen 11.00 und 12.00 und zwischen 22.00 und 24.00 Uhr durch eine EW-Rundsteuerung gesperrt.

2.5 Komponentenkonfiguration

2.5.1 Heizungswärmepumpe

Abb. 16 und Abb. 17 geben eine Übersicht über die für die Simulationsrechnungen eingesetzten Wärmepumpen. Für die Simulationen mit dem SIA2010-Haus wurden neue auf dem Markt vorhandene Wärmepumpen mit besseren Leistungszahlen eingesetzt (Tab. 8).

Für den Bau eines Funktionsmusters wurden über eine Ausschreibung zwei Hersteller ausgewählt, welche beauftragt wurden, Aggregate für eine kostengünstige Niedrigtemperaturheizung zu entwickeln. Damit Brauchwarmwasser ohne elektrische Zusatzheizung erzeugt werden kann, wurde Propan als Arbeitsfluid verwendet. Tab. 6 und Tab. 7 zeigen die im Wärmepumpentestzentrum Töss gemessenen Werte. Beide Aggregate werden in Pilotanlagen der Phase 3 eingesetzt, mit dem in Tab. 7 beschriebenen Aggregat wurden zusätzlich Testanlagenmessungen durchgeführt (s. Kap. 2.10).

Prüfobjekt: CTA AG Optiheat 17sc							
Prüfpunkte		B5/W35	B0/W35	B-5/W35	B5/W50	B0/W50	B-5/W50
Mittlere Heizleistung	W	5631	4886	4232	5282	4586	3929
Mittlere el. Leistungsaufnahme	W	1081	1072	1057	1579	1566	1570
COP	-	5.21	4.56	4.00	3.35	2.93	2.50
Volumenstrom Nutzer	m ³ /h	0.45					
Hydr. Druckabfall Nutzer	mbar	8	8	7	6	6	6
Volumenstrom Quelle	m ³ /h	1.70					
Hydr. Druckabfall Quelle	mbar	41	42	46	40	42	47

Tab. 6: WPZ-Messungen der Sole/Wasser-Wärmepumpe CTA Optiheat 17sc [WPZ, 02.03.98]; (Quellenfluid: Sole/Wassermischung mit 30% Monoäthylenglykol)

Prüfobjekt: Mani & Fink Soltherm 00.06.NT Whiteline											
Prüfpunkte		A20W35 (40% r.F.)	A10W35 (78% r.F.)	A7W35 (89% r.F.)	A2W35 (93% r.F.)	A-7W35 (75% r.F.)	A20W50 (40% r.F.)	A15W50 (71% r.F.)	A7W50 (89% r.F.)	A2W50 (93% r.F.)	A-7W50 (75% r.F.)
Mittlere Heizleistung	W	8942	7609	7168	5537	4626	8423	7870	6802	5340	4687
Mit. el. Leistungsaufnahme	W	1744	1789	1809	1823	1855	2331	2357	2386	2379	2415
COP	-	5.13	4.25	3.97	3.04	2.49	3.61	3.34	2.85	2.24	1.94
Volumenstrom Nutzer	m ³ /h	0.70									
Hydr. Druckabfall Nutzer	mbar	34	34	34	34	33	32	32	32	32	31
Mit. Dauer Arbeitszyklus	h				01:51:23	06:28:45				03:33:26	
Mit. Dauer Abtauzyklus	h				00:04:26	00:03:48				00:06:23	
Relative Abtaudauer	%				3.8	1.0				2.9	

Tab. 7: WPZ-Messungen der Luft/Wasser-Wärmepumpe Mani & Fink 00.06.NT Whiteline [WPZ, 03.03.98]

Haus- Typ	Wärmequelle/ Kälteträger	Fabrikat/Typ	Kältemit- tel	Skalierungsfaktor des Kennfelds
Grenzwert	Antifrogen N (Monoethylen- glykol) 30 Vol.-%	IVT Greenline 04	R407c	1.30
NOAH	Antifrogen N (Monoethylengl ykol) 30 Vol.-%	IVT Greenline 04	R407c	1.00
NOAH	Luft	Saurer WK 02.2	R 22	1.40
SIA2010	Antifrogen N (Monoäthylen- glykol) 25 Vol.-%	CTA WRHH 21 sc prop	Propan	0.65
SIA2010	Wasser	CTA WRHH 21 sc prop	Propan	0.65
SIA2010	Luft	Saurer Natura AW 108.1	R407c	0.60
SIA2010	Luft	2-stufige WP	R407c	0.60 Stufe 2: 100% bei 50 Hz Stufe 1: ~60% bei 29 Hz

Tab. 8: Übersicht über die den TRNSYS-Simulationen zu Grunde gelegten Wärmepumpen

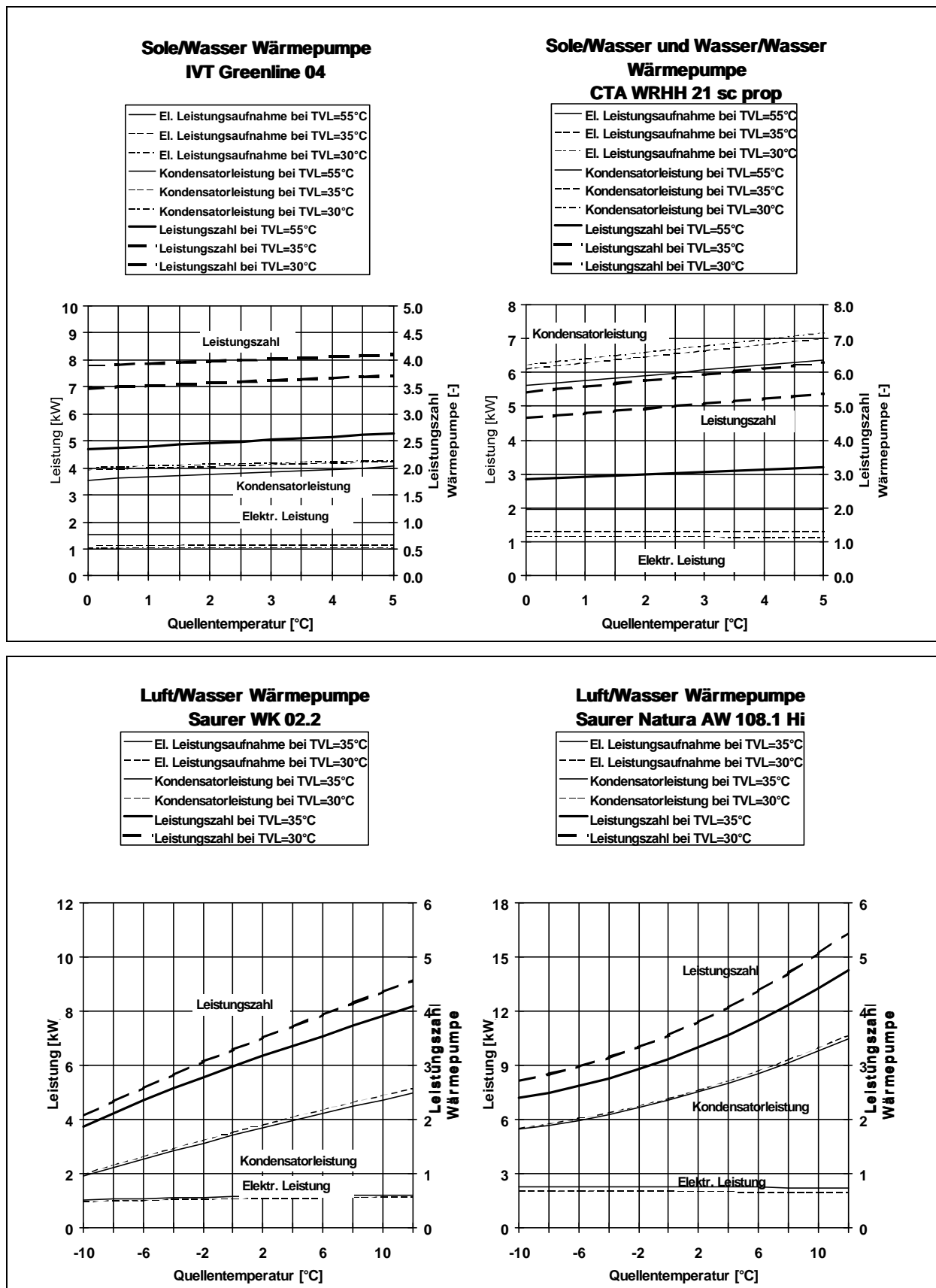


Abb. 16: Kennfelder der verwendeten Wärmepumpen vor der Leistungsskalierung

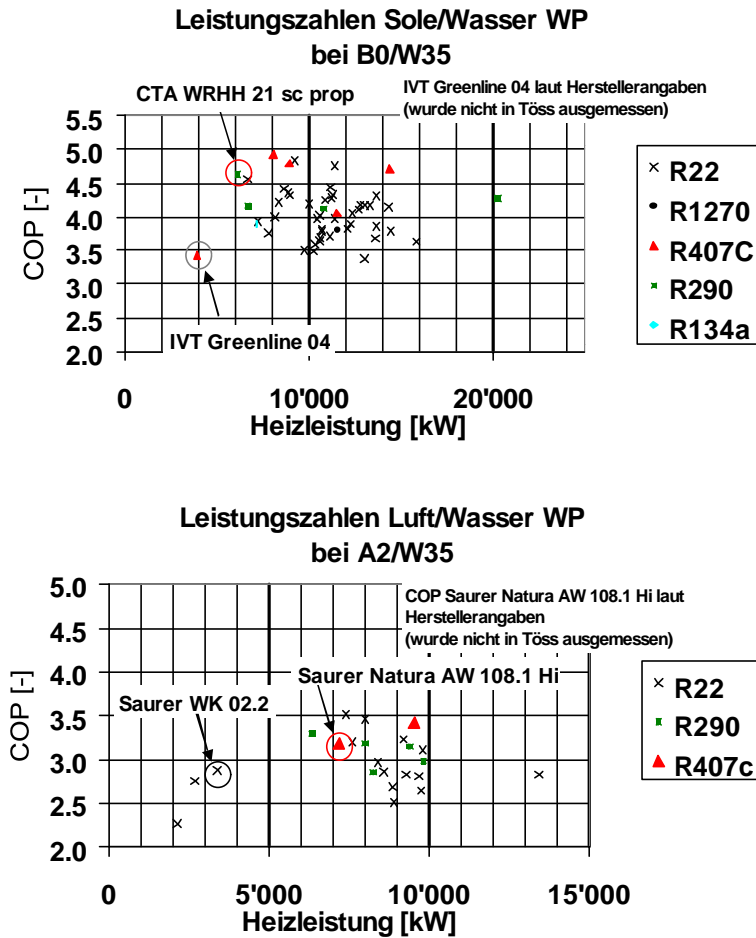


Abb. 17: Leistungszahlvergleich der simulierten Wärmepumpen mit Messdaten von Töss [WPZ 97]. Stand: 31.1.97

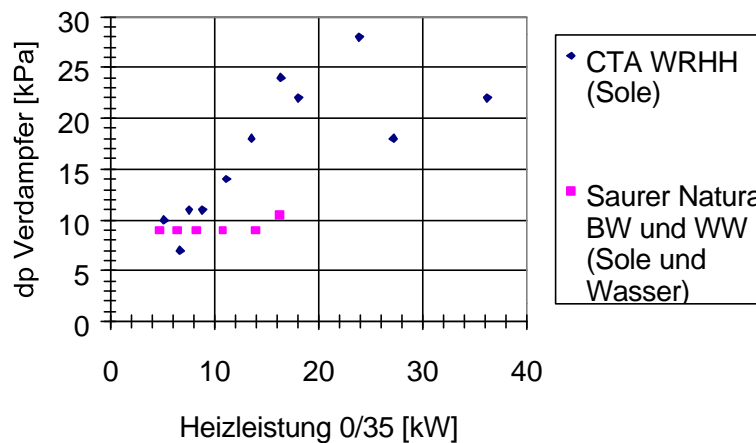


Abb. 18: Verdampferdruckverlust beim Nennvolumenstrom für verschiedene Wärmepumpen in Abhängigkeit der Heizleistung.

Der Druckverlust des Verdampfers wurde für die Erdsondensimulation beim Nennvolumenstrom und Sole als Kälteträger anlehnend an Abb. 18 mit 10 kPa angenommen. Der Nennvolumenstrom, auf den sich der Druckverlust von 10 kPa bezieht, ist für die Simulationsrechnungen der Nennvolumenstrom des Herstellers multipliziert mit dem Skalierungsfaktor des Wärmepumpenkennfelds. Der Druckverlust bleibt also bei abnehmender Wärmepumpen-Nennleistung gleich gross, da verdampferseitig bei diesen kleinen Leistungen üblicherweise Plattentaucher eingesetzt werden, deren Leistung durch eine Änderung der Anzahl *parallel* geschalteter Platten variiert werden kann, was auf den Druckverlust keinen Einfluss hat.

Wird Wasser als Kälteträger verwendet, so wird der Verdampferdruckverlust, bezogen auf den gleichen Massenstrom, ausgehend von folgenden Überlegungen durch 1.2 dividiert.

Für ein hydraulisch glattes Rohr mit

$$\text{Re} \frac{e}{d} < 65$$

Gl. 2

gilt im turbulenten Bereich mit

$$2320 < \text{Re} < 10^5$$

Gl. 3

nach Blasius für die Rohrreibungszahl

$$I = 0.3164 \text{ Re}^{-0.25}$$

Gl. 4

Und für das Druckgefälle R

$$R = \frac{I}{d} \frac{w^2}{2} r$$

Gl. 5

Gl. 4 und Gl. 5 gilt für Rohre. Nach den Ähnlichkeitsgesetzen ist der Druckabfall bei gleicher Geschwindigkeit für ein Rohr und ein beliebiger Querschnitt gleich, wenn für das Rohr der Druckverlust auf den hydraulischen Durchmesser nach

$$d_h = \frac{4 A}{U}$$

Gl. 6

bezogen wird. Da die Geometrie des Plattentauchers bei Sole- wie auch bei Wasserbetrieb die gleiche ist, ist die Umrechnung auf den hydraulischen Durchmesser für diese Betrachtungen nicht notwendig.

Mit Hilfe von Gl. 4 kann nun die Änderung der Rohrreibungszahl bei Einsatz von Wasser anstelle von Monoethylglykol 25 Vol.-% bestimmt werden.

Wird dabei als Randbedingung

$$\dot{m}_w = \dot{m}_s$$

Gl. 7

angenommen, das heisst der Massenstrom für Wasser und Sole ist gleich gross, so erhält man für die Änderung der Rohrreibungszahl

$$\frac{R_s}{R_w} = \left(\frac{n_s}{n_w} \right)^{1/4} \left(\frac{r_w}{r_s} \right)^{3/4}$$

Gl. 8

und mit den Stoffwerten nach Tab. 9 auf S. 23

$$\frac{R_s}{R_w} = 1.20$$

Gl. 9

Der Druckverlust des Verdampferwärmetauschers kann also bei gleichem Massenstrom für Wasser um den Faktor 1.20 tiefer angenommen werden wie für Monoethylenglykol 25 Vol.-%.

2.5.2 Erdsonde

Die Austrittstemperatur aus der Erdsonde ist sehr stark von der Wärmeleitzahl des Erdreiches abhängig. Die Wärmeleitzahl des Erdreiches kann zwischen etwa 1.5 W/(m·K) bis über 4.0 W/(m·K) liegen. Wesentlichste geologische Faktoren sind dabei allfällige Grundwasserströme und der Erdreichaufbau (Material, Feuchtegehalt, Porenraumvolumen). Für die Grundvarianten der Simulationsrechnungen wird von einem eher konservativen Wert der Wärmeleitfähigkeit von 2.0 W/(m·K) ausgegangen. Mittels Sensitivitätsbetrachtungen wird aufgezeigt, wie stark die Jahresarbeitszahl und die Erdsonden-temperaturen in Abhängigkeit der Wärmeleitzahl variieren. Abb. 19 und Abb. 20 zeigen eine Übersicht über den Bereich der Wärmeleitfähigkeit von Erdreich. Auf die Betrachtung von Grundwasserströmen wird in dieser Arbeit nicht eingegangen.

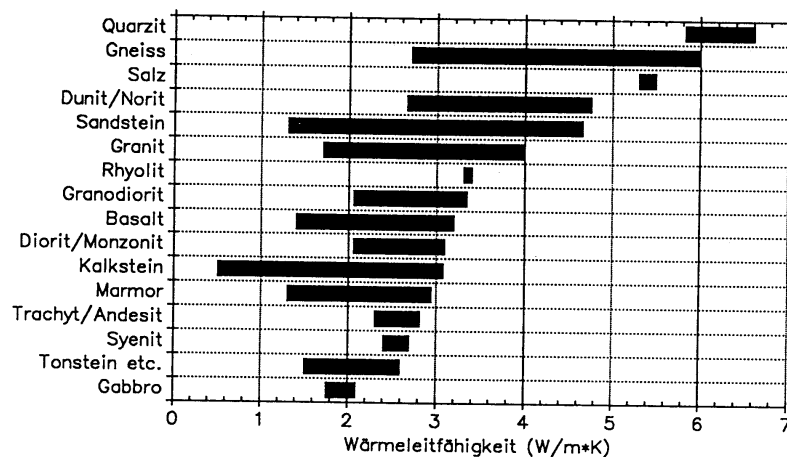


Abb. 19: Wärmeleitfähigkeit der wichtigsten Festgesteine [Sanner 92]

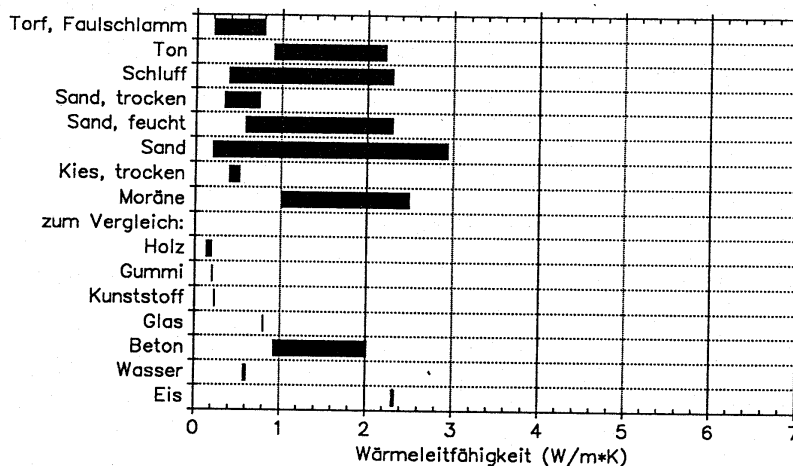


Abb. 20: Wärmeleitfähigkeit der wichtigsten Lockergesteine [Sanner 92]

Für den vertikalen Temperaturverlauf im Erdreich bei Simulationsbeginn wird von einem Temperaturgradient im Erdreich von 0.03 K/m ausgegangen [Sanner 92], wobei der Jahresmittelwert der Oberflächentemperatur mit 10.1°C um 1K über dem Jahresmittelwert der Lufttemperatur am verwendeten Klimastandort Zürich-Kloten liegt.

Tab. 9 gibt eine Übersicht über die Parameter für die Erdsondensimulation:

Sondentyp	Doppel-U-Rohr
Rohrdimension (Aussendurchmesser x Wandstärke)	32.0x3.0 mm
Durchmesser Bohrloch	0.11 m
Vertikaler Temperaturgradient im Erdreich	0.03 K/m
Jahresmittelwert der Lufttemperatur	9.1 °C
Bodenerwärmung	1.0 K
Hinterfüllung Wärmeleitzahl spez. Wärmekapazität Dichte	0.8 W/(m·K) 850 J/(kg·K) 2000 kg/m ³
Erdreich Wärmeleitzahl spez. Wärmekapazität Dichte	2.0 W/(m·K) 800 J/(kg·K) 2700 kg/m ³
Antifrogen N (Monoethylenglykol) 25 Vol.-% Wärmeleitzahl spez. Wärmekapazität Dichte kinematische Zähigkeit	0.49 W/(m·K) 3800 J/(kg·K) 1053 kg/m ³ 4.3E-6 m ² /s
Wasser Wärmeleitzahl spez. Wärmekapazität Dichte kinematische Zähigkeit	0.555 W/(m·K) 4220 J/(kg·K) 1000 kg/m ³ 1.8E-6 m ² /s

Tab. 9: Konfigurationsparameter für die Erdsondensimulation

2.5.3 Beschattungseinrichtung

Mit der in Kapitel 2.4.3 vorgestellten Beschattungseinrichtung wird versucht, das Benutzerverhalten bei Sonneneinfall und damit verbundenem Raumtemperaturanstieg abzubilden. Als zweckmässigste Einstellparameter haben sich eine Raumtemperatur von 24°C und eine Direktstrahlung auf die Südfassade von 100 W/m² erwiesen. Das heisst, dass die Süd-Fenster in den einzelnen Zonen nur dann beschattet werden, wenn die Raumtemperatur der entsprechenden Zone über 24°C *und* die Direktstrahlung auf die Fassade mehr als 100 W/m² beträgt. Sobald die Direktstrahlung auf die Südfassade unter 100 W/m² fällt, wird die Beschattung wieder deaktiviert.

2.6 Auflistung der in TRNSYS untersuchten Systeme

Tab. 10 gibt eine Übersicht über die Gebäudeklassifizierung. Die Südfenster werden nur in denjenigen Gebäuden beschattet, die eine Beschattung erfordern.

Abkürzung	Haus-Typ	Gebäude-masse	Fenster gegenüber NOAH-Haus vergrössert	Südfenster beschattet?	Ausle-gungstem-peratur Heizung [°C]
GMU35	Grenzwert	massiv	nein	nein	35/30
GLU35	Grenzwert	leicht	nein	nein	35/30
NMU30	NOAH	massiv	-	nein	30/25
NLU30	NOAH	leicht	-	nein	30/25
MMU30	SIA2010	massiv	ja	nein	30/25
MLU30	SIA2010	leicht	ja	nein	30/25
MMB30	SIA2010	massiv	ja	ja	30/25
MLB30	SIA2010	leicht	ja	ja	30/25

Tab. 10: Klassifizierung der untersuchten Gebäude

Bei der Systemuntersuchung nach Tab. 11 muss darauf hingewiesen werden, dass die Jahresarbeitszahl und der Stromverbrauch der Wärmeerzeugung nicht ohne Vorbehalt unter allen dargestellten Systemen verglichen werden kann. Den Simulationsrechnungen des SIA2010-Hauses wurden andere Wärmepumpenfabrikate zu Grunde gelegt. Daher ist ein direkter Vergleich der Jahresarbeitszahl und des Stromverbrauchs der Simulationen des SIA2010-Hauses mit den Daten des NOAH- oder des Grenzwert-Hauses nicht sinnvoll.

Ferner wurde ein Modell für die Berechnung einer Erdsonde entwickelt, mit dem detaillierte Untersuchungen über das Betriebsverhalten durchgeführt werden können. Durch den Einsatz des neuen Modells für die Erdsonde werden andere, d.h. aktuell berechnete Kälte-träger-temperaturen im Simulationsmodell verwendet, was zu einem anderen Betriebspunkt der Wärmepumpe und somit auch zu einer anderen Jahresarbeitszahl führt.

Ausser der Jahresarbeitszahl und des Stromverbrauchs können alle anderen angegebenen Grössen der verschiedenen Systemvarianten miteinander verglichen werden. Zwischen dem Grenzwert- und dem NOAH-Haus ist ein direkter Vergleich aller Resultate zulässig.

Abkürzung	Abkürzung Haus- Typ	Kälteträger	Leistungsstufen Wärmepumpe	Art der Brauchwarmwasseraufbereitung (*)
GMU35-SL-S	GMU35	Sole Linienzug-Modell	1	S
NMU30-SL-H	NMU30	Sole Linienzug-Modell	1	H
NMU30-SL-S	NMU30	Sole Linienzug-Modell	1	S
NMU30-L1-S	NMU30	Luft	1	S
MMB30-SE-S	MMB30	Sole EWS-Modell	1	S
MMB30-SE-H	MMB30	Sole EWS-Modell	1	H
MMB30-WE-S	MMB30	Wasser EWS-Modell	1	S
MMB30-L1-S	MMB30	Luft	1	S
MMB30-L2-S	MMB30	Luft	2	S

Tab. 11: Klassifizierung der untersuchten Systeme
 (*) S: separater Abluftwärmepumpen-Wassererwärmer
 H: über Heizungswärmepumpe

2.7 Komfortindikatoren als Bewertungskriterium

Die untersuchten Gebäude variieren in ihrem thermischen Verhalten sehr stark untereinander. Zum einen sind die statischen Kennwerte wie Gewinn-zu-Verlust-Verhältnis durch die verschiedenen Fenstergrößen und Isolationsstärken stark verschieden, zum anderen weichen auch die dynamischen Kennwerte wie beispielsweise die Gebäudezeitkonstante voneinander ab. Da Niedrigenergiegebäude gegenüber herkömmlichen Gebäuden tendenziell ein grösseres Gewinn-zu-Verlust-Verhältnis aufweisen, weisen sich Fremdwärmeeinflüsse viel stärker auf den Raumtemperaturverlauf aus. Nebst dem Gewinn-zu-Verlust-Verhältnis ist auch die Wärmespeicherfähigkeit des Gebäudes eine wichtige Kenngrösse für das dynamische Verhalten des Gebäudes. Die Wärmespeicherfähigkeit kann über die Gebäudezeitkonstante beschrieben werden. Die Zeitkonstante ist sehr stark von der Baumasse abhängig: Massivbauten weisen hohe Gebäudezeitkonstanten auf, was zu kleineren Raumtemperaturschwankungen bei Fremdwärmeeinflüssen führt.

Mit den hier simulierten Gebäudetypen kann der Einfluss der Dämmstärke, der Gebäudemasse und der Fremdwärmegewinn auf die Behaglichkeit untersucht werden. Die Gebäude variieren stark in ihrem Dämmstandard wie auch in der Baumasse, so dass ein breites Band von Gebäudetypen abgedeckt werden kann.

Um die verschiedenen Gebäudecharakteristiken bewerten zu können, müssen repräsentative Vergleichsgrößen gewählt werden. Der Vergleich der Gebäude wird durch eine Gegenüberstellung der Raumtemperaturverläufe an repräsentativen Tagen wie auch des PPD-Werts (Predicted Percentage of Dissatisfied) nach Fanger [Fanger 70] vorgenommen.

Folgende Grunddaten werden für die Berechnung des PPD-Wertes und des PMV-Wertes (Predicted Mean Vote) herangezogen:

1. Berechnung der operativen Temperatur als gewichteter Mittelwert von $0.57 \cdot \text{Raumlufttemperatur}$ und $0.43 \cdot \text{Strahlungstemperatur}$
2. Relative Luftfeuchtigkeit konstant 50%
3. Luftgeschwindigkeit konstant 0.08 [m/s]
4. Stoffwechselwert konstant 1.2 (Metabolic Rate: $1 \text{ met} = 58 \text{ W/m}^2$)
5. Isolierwert der Bekleidung konstant 1 (Clothing Value: $1 \text{ clo} = 160 \text{ (m}^2\text{K)/kW}$)

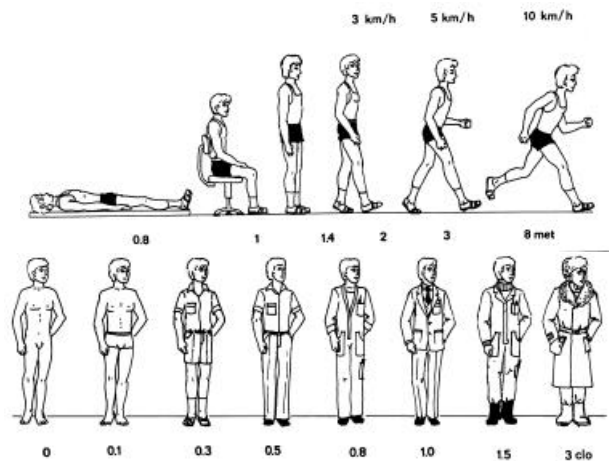


Abb. 21: Stoffwechsel- und Isolierwerte nach [Fanger 70]

Damit alle Gebäude repräsentativ verglichen werden können, wird bei allen Varianten die Heizungsregelung derart eingestellt, dass die Raumtemperaturen zwischen 7.00 Uhr und 23.00 Uhr nur in sehr seltenen Fällen, d.h. während weniger als etwa 3%, unter 20°C liegen. Diese Massnahme wird dadurch begründet, dass der Benutzer üblicherweise die Heizkurve solange erhöht, bis er keine zu kalten Raumtemperaturen mehr hat. Die Grenztemperatur von 20°C wird aus Abb. 22 abgeleitet. Daraus geht hervor, dass die optimale Raumtemperatur bei 21.5°C liegt und der Toleranzbereich $\pm 2.0 \div \pm 2.5 \text{ K}$ beträgt. Bei einer Temperatur von beispielsweise 19.5°C beträgt der PPD-Wert immer noch unter 10% (siehe Abb. 23), was noch als zulässige Grenze angesehen werden kann.

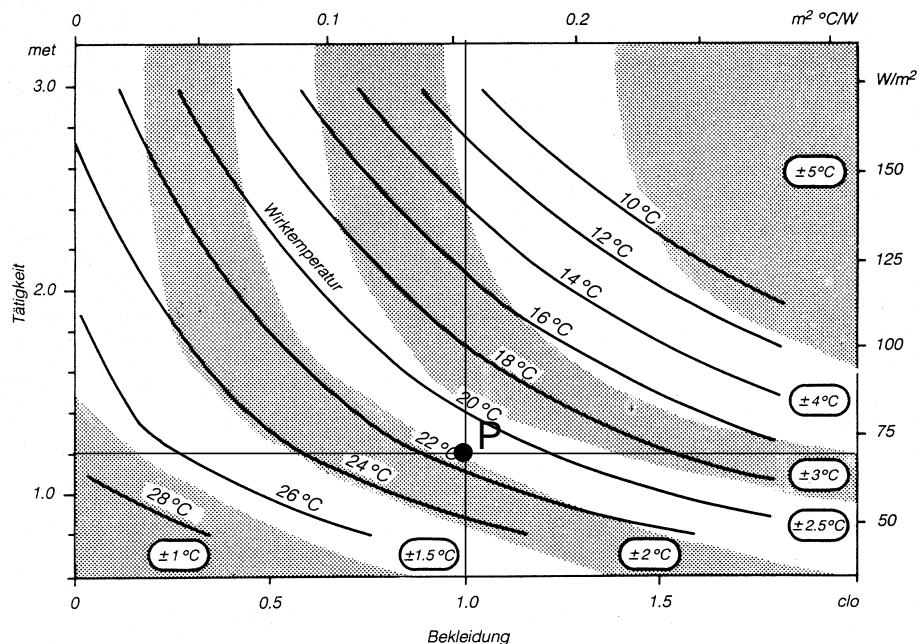


Abb. 22: Optimale Raumtemperatur in Abhängigkeit der Tätigkeit und der Bekleidung nach [Fanger 70]

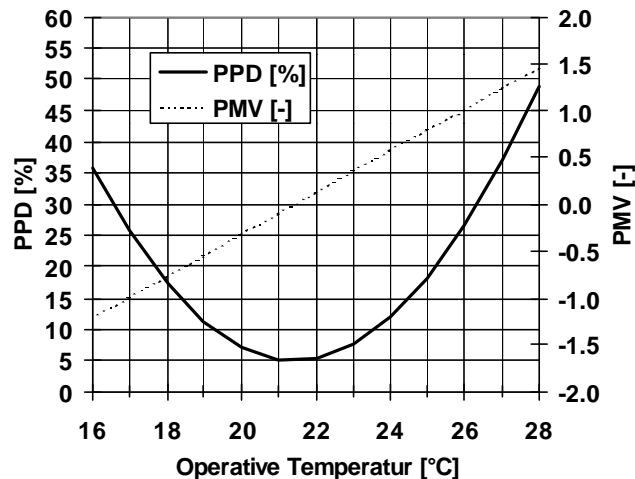


Abb. 23: PPD-Wert und PMV-Wert als Funktion der operativen Temperatur

2.8 Ökobilanzen

2.8.1 Grundsätzliches

Eine Ökobilanz soll Auskunft geben über die gesamten ökologischen Belastungen, die mit einem bestimmten Prozess oder Produkt verknüpft sind. In der vorliegenden Studie sollen verschiedene Wärmepumpensysteme betrachtet werden. Dabei interessieren nicht nur die direkt, d.h. am Anwendungsort durch diesen Prozess verursachten Belastungen, sondern auch die indirekten, vor- oder nachgelagerten Belastungen, die durch diesen Prozess entstehen. Indirekte Belastungen entstehen z.B. durch den Energieverbrauch, Materialproduktion, Entsorgungsprozesse etc. Sie werden auch als "graue" Belastungen bezeichnet. Die Summe der direkten und indirekten, "grauen" Belastungen werden als *kumulierte Belastungen* bezeichnet. Weiteres zum methodischen Vorgehen siehe im Kapitel 2.8.3 Erhebung des Ökoinventars.

Sollen verschiedene Prozesse miteinander verglichen werden, ist darauf zu achten, dass sie einen vergleichbaren Nutzen erbringen. Dieser erbrachte Nutzen wird in einer Ökobilanz als "funktionale Einheit" bezeichnet. Für die vorliegende Studie sollen verschiedene Heizsysteme miteinander verglichen werden. Der erbrachte Nutzen der Heizsysteme ist die abgegebene Nutzwärme. Die Bilanz muss realistischerweise den Betrieb während eines durchschnittlichen Jahres abbilden.

2.8.2 Zu beantwortende Fragen — Zieldefinition

Die Zieldefinition einer Ökobilanz umschreibt, welche Prozesse betrachtet werden und welche Fragestellungen mit der Ökobilanz beantwortet werden sollen. Je nach Fragestellung können enger gefasste Betrachtungen genügen oder müssen umfassendere Grenzen der Ökobilanz gezogen werden (sog. Systemgrenzen).

In erster Linie geht es in der vorliegenden Bilanzierung darum, die ökologischen Belastungen von zwei verschiedenen Heizwärmepumpen (Luft/Wasser- resp. Sole/Wasser-WP) zu vergleichen. Da neben der Heizenergie auch der Brauchwarmwasserverbrauch betrachtet werden soll, werden in der Bilanz auch zwei zu den Heizsystemen passende Varianten der Warmwasserbereitstellung berücksichtigt.

Die Bilanzierungen der obigen Wärmesysteme werden für vier verschiedene Gebäudevarianten mit unterschiedlichen Heizenergieansprüchen durchgeführt. In diesem Kapitel geht es darum, die *Vergleichbarkeit der verschiedenen Systeme* zu garantieren. Es soll ein äquivalenter Nutzen dieser Systeme definiert werden, sodass faire Vergleiche zwischen den verschiedenen Varianten möglich sind. Als vergleichbarer Nutzen ("funktionale Einheit") der verschiedenen Systeme drängt sich folgende Definition auf:

Funktionale Einheit (vorläufige Definition)

Wärmebereitstellung (Heiz- sowie Brauchwarmwasser) für ein Gebäude während eines durchschnittlichen Betriebsjahres

Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten müssen die verschiedenen betrachteten Häuser dieselbe Energiebezugsfläche (EBF) aufweisen. Das Brauchwasser soll für dieselbe Anzahl Personen ausreichen. Im folgenden wird gemäss den TRNSYS-Simulationen von einer Energiebezugsfläche von 147m² und einer Belegung mit drei Personen ausgegangen. Die funktionale Einheit wird unten noch erweitert werden.

2.8.2.1 Optimierungsanalyse

Durch eine differenzierte Analyse der Ökobilanzresultate können diejenigen Systemteile identifiziert werden, welche massgeblich zur ökologischen Belastung durch den betrachteten Gesamtprozess beitragen (sog. Dominanzanalyse). Ökologische Optimierungen sollten entsprechend ihrer Relevanz an diesen "Löwenanteilen" ansetzen. Es kann auch ermittelt werden, um wieviel die Belastungen relativ abnehmen, wenn gewisse Aufwendungen reduziert werden können (sog. Marginalanalyse). Eine Optimierungsanalyse verhindert, dass ein unverhältnismässiger Aufwand zur Optimierung eines ökologisch wenig einflussreichen Systemteils getrieben wird.

3.8.2.2. Marktvergleich

Durch Vergleiche der Wärmepumpensysteme mit anderen Heizsystemen können Schlüsse gezogen werden, wie die Wärmepumpensysteme im heutigen Wärmemarkt ökologisch positioniert sind (*Marktvergleich*). Es sollen hier daher nicht nur die Wärmepumpensysteme untereinander verglichen werden, sondern auch Vergleiche mit heute gängigen, alternativ zu Wärmepumpen einsetzbaren Heizsystemen gezogen werden können. Dazu werden sogenannte Referenzsysteme bilanziert.

Wenn verschiedene Systeme miteinander verglichen werden, ist darauf zu achten, dass der erbrachte Nutzen gleichwertig ist. D.h. die Referenzanlagen sollen im Bezug auf die erbrachte Dienstleistung gleichwertige Alternativoptionen bieten. Folgende Referenzsysteme (Alternativoptionen zu Wärmepumpensystemen) werden betrachtet:

- **Ölheizung**

Es wird eine moderne Ölheizung mit Brennwertkessel betrachtet. Dabei wird von einem Jahresnutzungsgrad (JNG) von 94% ausgegangen [ESU 96, p.IV.202]. Der Elektrizitätsverbrauch für Hilfsaggregate, wie z.B. Umwälzpumpen, ist im JNG nicht enthalten. Es gibt zur Zeit keine Niedrigtemperatur-Ölheizungen mit genügend kleinen Leistungen, wie sie den bilanzierten Gebäuden entsprechen würden. Eine Ölheizung stellt daher keine völlig gleichwertige Alternativoption zu Wärmepumpen dar. Eine Ölheizung ist jedoch eine weit verbreitete Heizvariante.

- **Gasheizung**

Es wird eine moderne Gasheizung mit Brennwerttherme betrachtet. Dabei wird von einem Jahresnutzungsgrad (JNG) von 97% ausgegangen [ESU 96, p.V.61]. Der Elektrizitätsverbrauch für Hilfsaggregate, wie z.B. Umwälzpumpen, ist im JNG nicht enthalten. Grundsätzlich ist zu beachten, dass die Gasversorgung nicht in allen Gegenden der Schweiz gleich gut ausgebaut ist. Im Gegensatz zu Netzstrom und Heizöl, die fast überall eine Option darstellen, ist bei Gassystemen unter Umständen mit hohen Investitionen für eine neue Gasleitung zu rechnen. Investitionskosten müssen bei einer standortspezifischen, ökonomischen Analyse gewürdigt werden. Im Rahmen einer Ökobilanzierung, die Produktlebenszyklen betrachtet, spielen jedoch finanzielle Investitionen keine Rolle, d.h. Für die Ökobilanzierung ist es egal, ob das Gas aus einer neuen oder einer alten Leitung stammt. Es wird mit üblichen, durchschnittlichen, schweizerischen Kapazitäten und Auslastungen gerechnet. Die Aufwendungen für eine neue Leitung werden also nicht dem *ersten* Verbraucher an der Leitung allein angelastet, sondern gleichsam allen Verbrauchern, die während der Lebensdauer der Leitung Gas beziehen.

Trotzdem muss gesagt werden, dass eine Gasheizung aufgrund des unterschiedlichen Ausbaustandards der Gasversorgung eine weitgehende, aber nicht hundertprozentig gleichwertige Alternativoption zu Wärmepumpen darstellt.

- **Elektroheizung**

Die Betriebsenergie von Wärmepumpen ist Netzstrom. Sollen Wärmepumpen mit anderen Heizsystemen verglichen werden, kann es interessant sein, sie anderen strombetriebenen Heizsystemen gegenüberzustellen.

Eine Elektroheizung ist – je nach kant. Energiegesetzgebung – bewilligungspflichtig oder sogar verboten. Streng genommen stellt daher auch eine Elektroheizung – jedoch nicht aus technischen, sondern energiepolitischen Gründen – keine hundertprozentige Alternativoption zu Wärmepumpen dar.

2.8.2.2 *Belastungen aus dem Gebäude und der Wärmeerzeugung*

Bei Niedrigenergiehäusern können gegenüber konventionellen Bauten unter anderem die Dämmstärken und die Fensterflächen sowie die Speichermassen (Wände, Böden) vergrößert werden, um Solarenergie als passive Heizenergie zu nutzen. Allgemein herrscht die – im Einzelfall oft unüberprüfte – Meinung, dass dieser Aufwand gerechtfertigt ist, da eine Bereitstellung von Heizwärme ökologisch belastender sei. Wärmepumpen sind aber vergleichsweise ökologisch sehr gering belastende Technologien. Folgende Frage soll daher beantwortet werden:

"Lohnt sich aus ökologischer Sicht die Einsparung von Wärmepumpenenergie durch eine Niedrigenergie-Architektur gegenüber einem konventionellem Haus?"

oder anders formuliert

"Kann der ökologische Mehraufwand eines Niedrigenergiehauses die ökologischen Entlastungen durch die Einsparung von Wärmepumpenenergie möglicherweise kompensieren?"

Um diese Frage beantworten zu können muss die funktionale Einheit erweitert werden. Sie soll nicht nur die Belastungen und Aufwendungen für die Bereitstellung von Wärmeenergie umfassen, sondern auch die Belastungen und Aufwendungen durch das Gebäude selbst. Folgende Definition wird verwendet:

Funktionale Einheit (erweitert)
<i>Gebäude und dessen Wärmebereitstellung (Heiz- und Brauchwasser) während eines durchschnittlichen Betriebsjahres</i>

Es werden je zwei Gebäudevarianten mit unterschiedlichen Fensterflächen und Isolations-Dämmstärken in je einer Holzleichtbau- und einer Massivbauweise, insgesamt also vier Gebäudevarianten betrachtet (s. Tab. 12). Diese Varianten wurden bereits in der ersten Phase des Forschungsprogrammes mit TRNSYS simuliert [NTH1 96].

	Bauweise Leichtbau (LB)	Bauweise Massivbau (MB)
Standard-Varianten (NOAH)	<ul style="list-style-type: none"> • NOAH Holz-Leichtbauhaus (NLU) 	<ul style="list-style-type: none"> • NOAH Massivbauhaus (NMU)
Niedrigenergie-Varianten (SIA2010)	<ul style="list-style-type: none"> • SIA2010 Holz-Leichtbauhaus (MLB) 	<ul style="list-style-type: none"> • SIA2010 Massivbauhaus (MMB)

Tab. 12: *Bilanzierte Varianten der Gebäude*

2.8.2.3 *Varianten bei der Betriebsstrombereitstellung*

Die Wahl des Strommixes ist wesentlich für die Bilanz der Wärmepumpen, da ein wichtiger Beitrag der ökologischen Belastungen aus der Bereitstellung des Betriebsstromes stammt. Je nach Auffassung können verschiedene Strommixe berücksichtigt werden, die mehr oder weniger gerechtfertigt und subjektiv erscheinen. Eine "objektiv richtige" Wahl des Strommixes gibt es nicht. Die Überlegungen und Argumente, die zur Wahl des einen oder anderen Strommixes führen werden im folgenden skizziert.

1) Das generalisierte Netzverbund-Argument (UCPTE-Durchschnitt)

Bei Stromkreisen, die zusammengeschlossen werden, besteht keine Möglichkeit mehr, festzustellen, wo die nutzbaren Potentialgefälle geographisch entstanden sind. Die Spannung (Potentialgefälle), die in einem Leiter erzeugt wird, ist additiv und nur die resultierende Summe zählt. In Europa besteht ein grosser, frequenzsynchronisierter Netzverbund der Elektrizitätsgesellschaften von 15 Ländern, inklusive der Schweiz: der sogenannte 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 daher keine Rolle, ob dies in Oslo oder Madrid geschieht. Der UCPTE-Mix wurde in Ermangelung an differenzierteren Daten bei früheren Ökobilanzstudien oft angewendet v.a. wenn die geographische Position eines Stromkonsums nicht bekannt war. In [ESU 96, p.XVI.1] wird jedoch empfohlen nach Möglichkeit differenzierte Strommixe zu verwenden. Ein Vorteil bei der Anwendung des UCPTE-Mixes ist, dass die Resultate der Ökobilanz eher *länderunabhängig* i.e. nicht spezifisch für die Schweiz werden⁶. Es wird dabei eine Durchschnittsaussage generiert, die das betrachtete System bei *durchschnittlichen europäischen* Versorgungs-Verhältnissen berücksichtigt. Als Nachteil muss aber eine grössere Unschärfe aufgrund der Verwendung von Durchschnittsdaten in Kauf genommen werden. Ist aber – wie in der vorliegenden Studie – eine Aussage für ein spezifisches Land bzw. Klima beabsichtigt, bewirkt die Verwendung des durchschnittlichen europäischen Strommixes eine vermeidbare Unbestimmtheit im Endresultat.

2) Das differenzierte Netzverbund-Argument (CH mit Importanteilen, Transitgeschäfte = 0%)

Es bestehen separate, vertraglich geregelte Handelsbeziehungen zwischen den Elektrizitätsgesellschaften der UCPTE (s.o.). Strom wird in Nachbarländer exportiert und aus Nachbarländern importiert. Es besteht eine ökonomische Freiheit (Markt) Handelspartner zu wählen und somit deren Stromangebot zu nutzen und abzugelten. Bezugsverträge führen nur beim vertraglichen Lieferanten (Exporteur) dazu, dass dort die nötigen Kapazitäten bereitstehen und einsatzfähig sind und nicht gleichermassen bei allen Ländern im ganzen Netz. Der Exporteur kann natürlich die Angebote seiner Nachbarländer nutzen ("Handelsbeziehungen Zweiter Ordnung"), wodurch eine Zuordnung der Verantwortlichkeit erschwert wird.

Bei einem Netzstrombezug ist bei dieser Betrachtungsweise also wesentlich in *welchem* Land der Bezug stattfindet. Wird ein Importstrommix eines Landes bilanziert, sind die (nicht exportierte) Inlandproduktion des Landes sowie die von den verschiedenen ausländischen Handelspartnern bezogenen Strommengen zu berücksichtigen. Da die einzelnen vertraglichen Beziehungen zwischen den Elektrizitätsgesellschaften der UCPTE nicht oder nur teilweise offiziell bekannt sind, wurden in [ESU 96] summarische länderspezifische Importstatistiken zur Berücksichtigung der grenzüberschreitenden Strombezüge verwendet. Bei der Berücksichtigung eines Stromimports aus dem Land X wurde in [ESU 96] der *Inlandmix* des Landes X verwendet.

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

Bei obigen Argument (2) wird von den in die Schweiz importierten Elektrizitätsmengen angenommen, dass sie vollständig in der Schweiz konsumiert werden. Dies entspricht jedoch nicht der Realität. Ein Teil des berücksichtigten Import-Stroms bezieht sich auf vertraglich geregelte Transitgeschäfte. Bei Transitgeschäften wird eine dem importierten Strom entsprechende Menge *zeitgleich* exportiert bzw. die importierte Strommenge lediglich durchgeleitet. Dies kann so aufgefasst werden, dass dieser importierte Strom in der Schweiz gar nicht benötigt wird resp. nicht konsumiert wird und deshalb in der Ökobilanz nicht angelastet werden darf. So gesehen sind also nicht alle in die Schweiz importierten Strommengen dem Schweizer Strommix anzulasten, sondern nur derjenige Teil, der sich nicht auf Transitgeschäfte bezieht. Den Anteil der Transitgeschäfte an Stromimporten festzustellen ist schwierig, da die entsprechenden Verträge nicht öffentlich zugänglich sind. Eine Studie des PSI ermittelte durch Analyse der zeitgleichen Stromimporte und -exporte einen geschätzten Transitanteil von 80%. Die Schätzung stützte sich dabei auf eine physikalische Basis (zeitgleiche Bewegungen) und nicht auf eine Analyse der existierenden Transitverträge [PSI 98]. In [ESU 96, p.XVI.7] wird der Transitanteil al-

⁶Da in der vorliegenden Studie Raumheizungswärme für Schweizerische Klimabedingungen bilanziert wird, sind die Resultate nicht direkt auf andere Klimazonen übertragbar.

ternativ auf nur 35% geschätzt⁷. Der Transitanteil bei den Importen muss daher bis auf weiteres als unbekannte Grösse verstanden werden. Es kann lediglich darauf hingewiesen werden, dass sowohl die Variante mit 0% Transitanteil, als auch diejenige mit 100% Transitanteil Extrembetrachtungen darstellen und die Wahrheit zwischen diesen Extrema liegen. Bei einem Transitanteil von 100% entspräche der Strommix der reinen inländischen Produktion (keine Importe für die Schweiz). Bei einem Transitanteil von 0% entspräche der Strommix der Betrachtung in Argument (2).

4) Das Argument der koordinierten Förderung (Kraft-Wärme-Kopplung + Elektro-WP)

Im Zusammenhang mit Wärmepumpen wird oft die Frage gestellt, woher bei einer zukünftigen grossen Verbreitung von Wärmepumpen die *zusätzlich* benötigte Elektrizität stammen soll. Dies ist eine Frage nach einer *zukünftigen* Versorgungssituation, in der die Installation von neuen Wärmepumpen zu einem *wesentlichen Mehrbedarf* innerhalb der Schweizer Stromversorgung führt. Zur Zeit ist dieser wesentliche Mehrbedarf nicht real. Selbst wenn Wärmepumpen zukünftig zu einem Mehrbedarf führen sollten, führt dies lediglich zu einer *graduellen* Änderung des gesamten Strommixes z.B. mit 2% statt 0.1% BHKW-Strom in der Schweiz. Es gibt keine technische Begründung dafür, dass neue Kraftwerke ausschliesslich für neue Verbraucher betrieben werden. Eine derartige Zuweisung wäre nur zulässig, wenn eine Standleitung zwischen den neuen Kraftwerken und den neuen Verbrauchern bestehen würde. Bei Wärmepumpen gibt es aber eine Argumentationsweise, welche die Wärmepumpen mit einer bestimmten Elektrizitätserzeugungsanlage verknüpft: Nach der Argumentationsweise des BFE (Bundesamt für Energie) sollen Wärmepumpen als thermodynamisch sinnvolle Variante gefördert werden, um fossile Ressourcen zu schonen und den Kohlendioxidausstoss im Heizsektor zu verringern. Diese sollen in erster Linie mit Strom, der durch den Ersatz von Elektrowiderstandsheizungen durch Wärmepumpen verfügbar wird, und mit Strom aus Kehrlichtverbrennungsanlagen (aber auch aus Deponiegas, Vergärungsanlagen etc.) betrieben werden. Für die Produktion des darüber hinausgehenden Strombedarfs (s. einleitende Fragestellung oben) sollen BHKW-Anlagen in dem Masse gefördert, wie sie für den Betrieb von Elektrowärmepumpen benötigt werden. Dieser Umstand führt zum Argument des kombinierten und aufeinander abgestimmten Betriebs von BHKWs und Wärmepumpen (d.h. diese Wärmepumpen verbrauchen Strom aus BHKWs) [Zogg 97]. So gesehen würden gewisse Wärmepumpen mit 100% BHKW-Strom betrieben werden und eine entsprechende Bilanzierung ist denkbar. Es gilt jedoch zu bedenken, dass diese Verflechtung eine *energiepolitische Absicht* ist und keine *technische Realität* sein kann: Auch in Zukunft werden BHKWs Strom ins Netz einspeisen können, selbst wenn keine Wärmepumpe zeitgleich den Strom verbraucht und umgekehrt.

5) Argument der Marginal-Technologien

Es kann – entgegen Argumenten 1) bis 3) – die Auffassung vertreten werden, dass für Zubaufragen nur *Veränderungen* von ökologischen Belastungen betrachtet werden müssen (Marginal- oder Grenzprozessbetrachtung). Dies entspricht einer Aussage zur *Steigung* der Kurve 'Umweltbelastung pro gewünschte Dienstleistung'⁸, statt einer Aussage über die Höhe der Belastungen aus der durchschnittlichen, gesamten Energieproduktion (s. Abb. 24). Wenn 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 Kraftwerksparkmix⁹. Als Vorteil der Marginalbetrachtung werden die durch den Zubau-auslösenden Entscheid resultierenden Verbesserungen bzw. Verschlechterungen so viel deutlicher sichtbar und gehen nicht in einer Durchschnittsbetrachtung unter. Als Nachteil – im Sinne einer weiteren Unsicherheit in der Strommixbestimmung – muss die Prognoseabhängigkeit (Einbettung in sinkenden oder steigenden Stromkonsum) und die eher subjektive Wahl der zu betrachtenden Marginaltechnologie genannt werden. Die obige Berücksichtigung von 100% BHKW-Strom (Argument 4) 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 anstatt mit BHKW-Anlagen auch mit neu zu bauenden Kombikraftwerken (GuD-Kraftwerke) ohne Abwärmenutzung produziert werden

⁷ Es wird dabei – ebenfalls lediglich auf physikalischer Basis – angenommen, dass der Transitanteil dem Anteil der Stromexporte am gesamten Brutto-Stromumsatz (Eigenproduktion plus Brutto-Importe) entspricht.

⁸ Diese Betrachtungsweise ist analog zu derjenigen von Grenzkosten in ökonomischen Analysen.

⁹ Wenn der gesamte Stromkonsum *sinkt*, wären die *als nächstes abgestellten Kraftwerke* zu verbuchen, da neu installierte Stromkonsumenten deren Abschaltung hinauszögern.

[Zogg 97]. Bei *sinkendem* Stromverbrauch wären französische AKW oder deutsche Braunkohlekraftwerke (Importverträge) als Marginal- oder Grenztechnologien anzusehen.

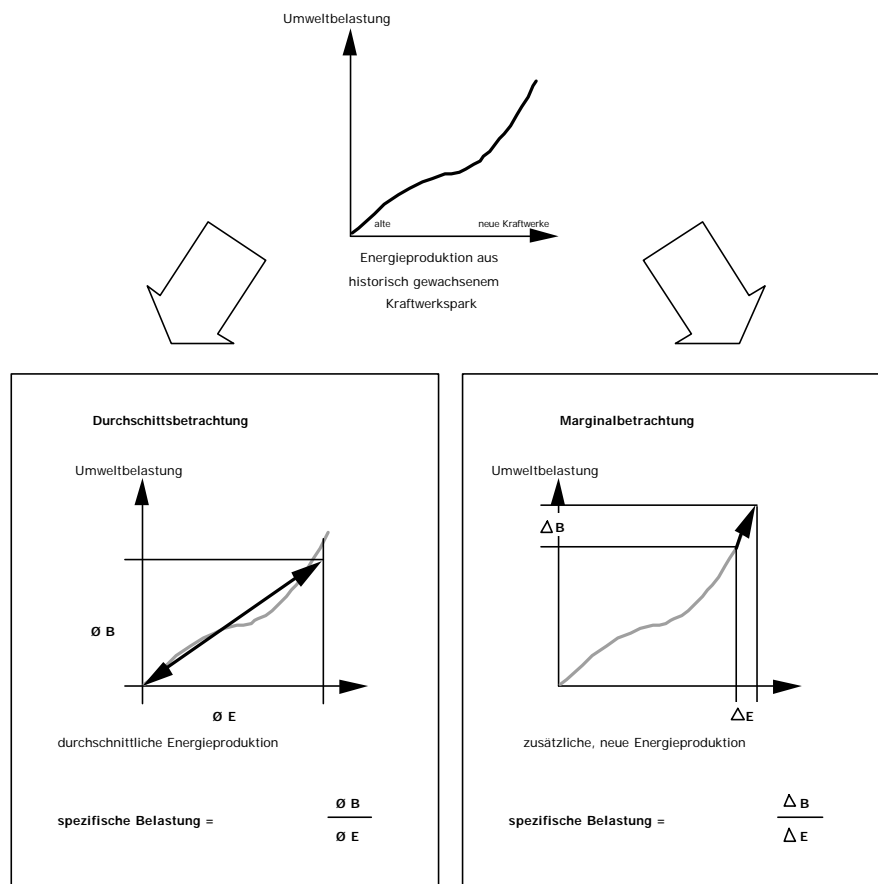


Abb. 24: Darstellung des Bilanzierungsvorgehens bei einer Betrachtung der aktuellen, durchschnittlichen Energieproduktion aus bestehenden Kraftwerken (links) und bei einer Betrachtung der zusätzlichen Energieproduktion bei steigendem Energiekonsum aus zusätzlich zu bauenden, neuen Kraftwerken (Marginalbetrachtung, rechts).

Verwendeter Strommix

Für die meisten Bilanzvarianten wird in der vorliegenden Studie grundsätzlich der *schweizerische Importstrommix* (vergl. Argument 2, 0% Transitanteil) als Basisfall verwendet. Um die Tragweite der Diskussion um die Transitanteile beim importierten Strom zu illustrieren und den Basisfall zu relativieren, wird eine Systemvariante mit 100% Transitanteil (reine Inlandproduktion, vergl. Argument 3) als Sensitivitätsanalyse gerechnet. Die Realität für den durchschnittlichen Schweizer Strommix liegt zwischen den Varianten 0% Transitanteil und 100% Transitanteil. Eine Betrachtung mit UCPT-E-Strom, welcher vergleichsweise ökologisch stark belastet ist, wird nicht vorgenommen.

Als Marginalbetrachtung wird eine Variante auch mit Strom ab BHKW bzw. ab GuD berechnet (Argument 4 resp. 5).

Verwendeter Strommix	Steht für:	Verwendet für:	Kürzel
durchschnittlicher Strommix CH inkl. Importanteil (0% Transitanteil)	durchschnittliche Situation	Standardmix	Ø CH Import
durchschnittlicher Inland-Strommix CH ohne Importanteil (= 100% Transitimporte)	durchschnittliche Situation	Sensitivitätsanalyse	Ø CH
Strom ab BHKW	Marginalbetrachtung	Marginalanalyse	BHKW
Strom ab moderner Gas- und Dampfturbine	Marginalbetrachtung	Marginalanalys	GuD

Tab. 13: Überblick über die verwendeten Strommixe
Das Symbol "Ø" steht für "Durchschnitt", " " steht für das Inkrement einer Marginalbetrachtung.

2.8.2.4 Sensitivität Jahresarbeitszahl JAZ

Um den wichtigen Einfluss der Jahresarbeitszahl deutlich zu machen und um die Tendenzen bei einer zukünftigen Jahresarbeitszahlerhöhung zu erkennen, werden für die Luft/Wasser-Wärmepumpenvariante auch Bilanzierungen mit einer erhöhten JAZ von 4.5 durchgeführt.

2.8.2.5 Überblick Varianten Teilsysteme

In Tab. 14 werden die bilanzierten Teilsysteme im Überblick dargestellt. Bei den verschiedenen Brauchwarmwassersystemen ist zu bemerken, dass sie fix den einzelnen Heizungssystemen zugeordnet werden.

Raumheizungssystem		L/W-WP	S/W-WP	Ölheizung	Gasheizung	Elektroheizung
Brauchwarmwassersystem		Separate L/W-WP	Heizungsgespiesener Beistellboiler	Elektroboiler und heizungsgespiesener Boiler	Gas-Durchlauf-erhitzer	Elektroboiler
Gebäude						
NLU	NOAH Leichtbau	x*	x**	x	x	x
NMU	NOAH Massivbau	x	x	x	x	x
MLB	SIA2010 Leichtbau	x	x	x	x	x
MMB	SIA2010 Massivbau	x	x	x	x	x

Tab. 14: Überblick über die ökobilanzierten Kombinationen der verschiedenen Teilsysteme.
Betriebsstrommix ist der schweizerische Strommix inkl. Importanteile mit 0% Transitanteil
x : bilanziertes Gesamtsystem "Heizung & Gebäude"
* : Für diese Kombination wird zusätzlich eine Sensitivitätsanalyse der Jahresarbeitszahl JAZ durchgeführt ($JAZ_{\text{netto}} = 4.5$)
** : Für diese Kombination wird zusätzlich eine Sensitivitätsanalyse des bezogenen Strommixes durchgeführt (BHKW-Strom, GuD-Strom, reine Inlandproduktion)

2.8.3 Erhebung des Ökoinventars

2.8.3.1 Methodische Bemerkungen

Wie einleitend erläutert, sollen in einer Ökobilanz nicht nur die direkt (d.h. am Anlagenstandort) auftretenden Umweltbelastungen erfasst werden, sondern auch alle indirekten Belastungen. Zur Ermittlung der sogenannten kumulierten Belastungen, die mit der Verwendung eines bestimmten Materials oder der Beanspruchung einer gewissen Dienstleistung einhergehen, wird in der vorliegenden Studie auf das Standardwerk [ESU 96] zurückgegriffen. Darin werden folgende wichtigen methodischen Randbedingungen beachtet:

- Umweltbelastungen werden ohne geographische oder zeitliche Einschränkungen erfasst. Auch Belastungen durch zeitlich weit in der Zukunft liegende Prozesse, wie z.B. Endlagerung radioaktiver Abfälle oder Emissionen aus Reaktordeponien nach Ende der überwachten Phase von 150 Jahren werden erfasst.
- Ziel ist es, den Normalbetrieb von Prozessen zu erfassen. Es werden nur häufige Unfälle von Energiesystemen gemäss eines Grenzwertkriteriums berücksichtigt. Als Kriterium wurde festgelegt, dass Unfälle nur berücksichtigt werden, die häufiger als $1 \cdot 10^{-3}$ pro GWh Primärenergiebedarf sind. Grosse Tankerunglücke und Kernkraftwerksunfälle sind dadurch ausgeschlossen. Grossrisiken müssen mit einer gesonderten Risikoanalyse erfasst werden.
- Bei Prozessen mit mehreren wertvollen Outputs werden die entstehenden Belastungen auf die verschiedenen Produkte verteilt (sog. Allokation). Vergl. dazu Kapitel Strom ab Blockheizkraftwerk.
- Es werden keine Gutschriften vergeben. Negative Emissionen werden nur erfasst, wenn sie einer physikalischen Realität entsprechen (z.B. CO₂-Absorption durch Holzwachstum). Vergl. dazu auch untenstehenden Exkurs.

Exkurs Recycling

Aus Konsistenzgründen müssen rezyklierbare Abfälle gleich bilanziert werden wie in [ESU 96] und [ESU 95], aus denen Ökobilanzdaten übernommen werden. Dort werden Abfälle ins Recycling mit keinerlei Umweltbelastung oder -entlastung verbucht. Allenfalls können je nach Situation Transportaufwendungen zum Rezyklierort verbucht werden.

Es werden ausdrücklich keine Gutschriften oder Bonusse¹⁰ für die Produktion von rezyklierbaren Abfällen vergeben. Bei einer Vergabe von Gutschriften wird nicht *ein* Prozess bilanziert, sondern – meist unausgesprochen – der *Unterschied* zwischen zwei Szenarien eines Prozesses (z.B. Stahl in Entsorgung vs. Stahl ins Recycling). Der effektiv Recyclingstahl-konsumierende Prozess z.B. die Konservendosenherstellung liegt dabei notabene ausserhalb der Systemgrenzen des eigentlich betrachteten Prozesses (z.B. des Lebenszyklus' einer Wärmepumpe, wie in dieser Studie). Eine solche Vorgehensweise würde gesamthaft zu irreführenden Doppelzählungen führen. So würde nämlich auch der Konservendosenhersteller im angeführten Beispiel argumentieren, dass *sein* Prozess, der Recyclingstahl *bezieht*, die Herstellung von Neustahl vermeidet und somit eine Gutschrift verdient hätte. Zwei verschiedene Prozesse würden so gleichzeitig denselben Bonus beanspruchen. Würde dieses Vorgehen bei Ökobilanzierungen generell zugelassen, führte dies zu irreführenden Doppelzählungen.

Um diese Problematik zu vermeiden, werden in [ESU 96] die Systemgrenzen für einen Prozess, bei dem rezyklierbare Abfälle *anfallen*, vor dem eigentlichen Recycling gezogen (s. Prozess A2 in Abb. 25). Der Prozess A2 profitiert dadurch, dass ihm keine Belastungen aus einer Entsorgung angelastet werden müssen (ungleich wie bei Prozess A1, der seine Abfälle entsorgen muss). Ein Prozess B2 der hingegen Rezyklatmaterial *bezieht*, wird mit den allfälligen Aufwendungen für die Rezyklataufbereitung (Trennen, Reinigung o.ä.) belastet. Prozess B2 profitiert jedoch vergleichsweise davon, dass ihm keine vorgelagerten ("grauen") Belastungen aus einer Produktion von Neumaterial angerechnet werden (wie das hingegen bei Prozess B1, der Neumaterial bezieht, der Fall ist).

¹⁰Unter einer Bonusvergabe wird folgendes Vorgehen verstanden: "Da ein Prozess beispielsweise x kg Stahl ins Recycling gibt, kann dafür irgendwo die Produktion von x kg Neustahl eingespart werden. Dem Prozess dürfen daher die Umweltbelastungen aus der Produktion von x kg Neustahl als Bonus gutgeschrieben (d.h. abgezogen) werden".

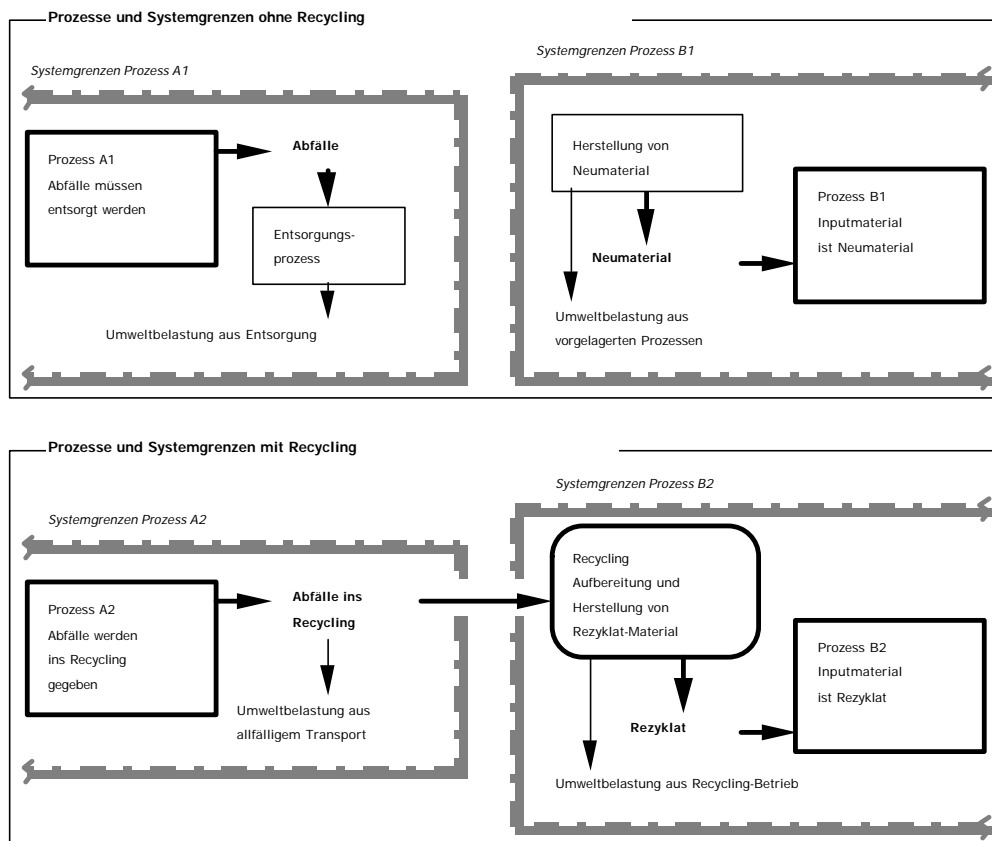


Abb. 25: Im vorliegenden Projekt, in [ESU 96] sowie [ESU 95] angenommene Systemgrenzen (Ausschnitte) der Ökobilanzierung bei Prozessen ohne Recycling (oben) und mit Recycling (unten).

2.8.3.2 Heizsysteme

Im folgenden werden die Bilanzierungsannahmen für die Heizsysteme vorgestellt. Die Bilanzierung der Wärmeverteilung (Fussbodenheizung) wird bei der Bilanzierung der Gebäudevarianten erläutert.

Allgemeine Annahmen

- Kältemittel**

Bei beiden Heizwärmepumpen wird das Kältemittel R 407c eingesetzt, welches im Gegensatz zu R 22, kein Ozonzerstörungspotential besitzt. Beide Substanzen wirken jedoch als Treibhausgas.

Da Kältemittel leichtflüchtig sind, können sie leicht entweichen. Als Leckagerate über den gesamten Produktlebenszyklus werden von Herstellern und in der Literatur Werte von 17% bis 24% angegeben [Hohl 97, Weibel 96]. Im Sinne eines worst-case-Szenarios wird für die vorliegende Studie eine Leckage von 100% angenommen. Diese Annahme beeinflusst das Gesamtergebn der Bilanz jedoch nur in geringem Masse.

- Luft/Wasser-Wärmepumpe**

Die bilanzierte Wärmepumpe ist eine modifizierte Luft/Wasser-Wärmepumpe vom Typ WK 02.2 der Fa. Saurer Thermotechnik AG mit erhöhter Nennleistung. Dabei wird das Kennfeld des handelsüblichen Aggregats mit 3.4 kW Nennleistung linear auf eine 40% höhere Nennleistung (4.8 kW) extrapoliert. Die bilanzierte JAZ_{brutto} beträgt 3.1 (JAZ_{netto} inkl. Heizungsumwälzpumpe: 2.9).

Zur Erstellung der Ökobilanz konnte der Hersteller sehr detaillierte Angaben über das handelsübliche Aggregat und die extrapolationsbedingten Mehraufwendungen machen [Hohl 97]. Zur Extrapolation

werden alle Material- und Energieaufwendungen linear um +40% erhöht, mit Ausnahme von den in Tab. 15 aufgeführten Beiträgen.

Beitrag	Pauschal-Zuschlag für Extrapolation von 3.4kW auf 4.8kW Nennleistung
Kompressor	+ 10%
Herstellungenergie	+ 20%
Verschnitte	+ 20%
Materialien für Montage	+ 20%
Energie für Montage	+ 10%
Unterhalt	kein Zuschlag
Rest	+ 40%

Tab. 15: Zuschläge für die 40%ige Erhöhung der Nennleistung der betrachteten Luft/Wasser-Wärmepumpe

Die Bilanz umfasst Materialien, Herstellungsgenergien, Transport der Anlagenteile (Kompressor, Kondensator, Verdampfer, Ventilkörper, Ventilator) sowie Verschaltungsbleche, Rohre, Nippel, verklebte Isolation, Elektrobox, Verkabelung, Printplatte mit elektronischen Bauteilen, Schrauben, Muttern, Verpackung, Energien für Fertigung und Prüflauf, Beleuchtungsenergie, Transport zur Montagestelle, Montageenergien, Anschlussschläuche, alle zwei Jahre Wartung (Hochdruckreinigung), Kältemittlemissionen und die Abbruchenergie (Trennschere). Als Lebensdauer werden 16 Jahre angenommen.

Die Wärmepumpe wird – anstelle des Kältemittels R22 im handelsüblichen Aggregat – mit einer entsprechenden Menge R407c (2.66 kg) bilanziert, was gemäss Herstellerangaben keine technischen Einschränkungen ergibt [Hohl 97]. Das Gesamtgewicht der extrapolierten Anlage beträgt 133 kg.

• Sole/Wasser-Wärmepumpe

Zur Bilanzierung der Sole/Wasser-Wärmepumpe wurde ein Aggregat mit der Modellbezeichnung "Greenline" der schwedischen Firma IVT verwendet. Vom Hersteller konnten auch nach mehrmaligem Anfragen keine Inventardaten erhalten werden. Der Händler konnte zu den wichtigsten, inventarrelevanten Anlagendaten grobe Angaben machen [Durena 97], die mit Daten der inventarisierten Luft/Wasser-Heizwärmepumpe ergänzt werden. Das Gesamtgewicht wird korrekt abgebildet. Zur Materialaufteilung werden Daten aus der Erdwärme-Bilanzierung in [ESU 96, p.X.10] herangezogen. Für den Transport in die Schweiz werden 1250 km Bahntransport angenommen. Im Gegensatz zur Luft/Wasser-Wärmepumpe ist für die Sole/Wasser-Wärmepumpe keine Unterhaltsreinigung notwendig [Durena 97]. Als Lebensdauer werden 15 Jahre angenommen. Als Kältemittel werden 680 Gramm R 407c pro Aggregat angenommen. Das Gesamtgewicht der Wärmepumpe beträgt 75 kg.

• Erdwärmesonde

Die Sondenbohrung wird gemäss Angaben in [ESU 96, p.X.10] inventarisiert. Bezüglich Art der Bohrung (Hammer- resp. Spülbohrung) wird die durchschnittliche Situation in der Schweiz abgebildet (60% resp. 40%). Die Lebensdauer der Bohrung wird auf 30 Jahre geschätzt.

Für die bilanzierte Wärmepumpe (IVT greenline) wurden keine Erdsondensimulationen durchgeführt. Die benötigte Sondenlänge muss daher abgeschätzt werden. Die Sondenlänge ist abhängig von der Kälteleistung und der Arbeitszahl der Wärmepumpe. Die betrachtete Sole/Wasser-Wärmepumpe hat eine Nennleistung von 3.8 kW und eine JAZ_{netto} von 3.7 (inkl. Hilfsenergien und Brauchwassererwärmung). Bei einer spezifischen Entzugsleistung der Erdsonde von maximal 50 W/m resultiert eine Sondenlänge von etwa 60 bis 70 Meter.

Schlechtere Arbeitszahlen der Wärmepumpen führen wegen des geringeren Energieanteils aus der Erde zu *kleineren* Sondenlängen. Da die Erdsonde mit 30 Jahren eine rund zweimal längere Lebensdauer als die WP hat, ist es sinnvoll die Sondenlänge so zu wählen, dass eine nachfolgende Ersatz-WP – erwartungsgemäss mit einer höheren JAZ – immer noch problemlos an derselben Erdsonde betrieben werden kann. *Für die Ökobilanzierung wird daher eine Sondenlänge von 75 m angenommen.* Für die Sondenfüllung werden 25% Frostschutzmittel (Monoethylenglykol, Handelsname: *Antifrogen*

N) verwendet. Bei einer Länge von 75 Metern beträgt das Gesamtgewicht der Sondenmaterialien 150 kg sowie rund 180 kg für Bentonit und Zement.

Zu beachten ist, dass die angenommene Entzugsleistung nur bei Verwendung eines Frostschutzmittels in der Sondenflüssigkeit zutrifft. Ohne Frostschutzmittel wären hingegen nur Entzugsleistungen von 35-40W/m möglich. Die Sonde würde in einem solchen Fall 80 bis 90 m lang.

Vergleichsheizsysteme (Referenzen)

Da *moderne* Wärmepumpen bilanziert werden, sollen für den Marktvergleich auch *moderne Referenzheizsysteme* bilanziert werden. Die Bilanzierung wird somit vom Standpunkt des *Käufers einer neuen Heizung* aus betrachtet, der sich zwischen verschiedenen Heizsystemen entscheiden will.

• Ölheizung

Moderne Brennwertheizungen haben durch erhöhte Effizienz ökologische Vorteile. In Zukunft müssen aber in Ölraffinerien höhere Aufwände geleistet werden¹¹, da die Nachfrage nach leichten Raffinerieprodukten steigt. Eine Sensitivitätsanalyse zum Raffineriebetrieb im Jahre 2000 wurde in [ESU 96, p.IV.35] durchgeführt. *Aufgrund des höheren Aufwandes in zukünftigen Raffinerien werden die ökologischen Vorteile von Brennwertölheizungen bei ganzheitlicher Sicht mehr als kompensiert.* Eine Brennwertheizung Stand 2000 wurde in [ESU 96] nicht bilanziert. Die ökologische Rangfolge lautet:

1. Brennwertheizung Stand 1990
2. Nichtbrennwertheizung Stand 1990
3. Nichtbrennwertheizung Stand 2000

Gemäss den Angaben in [ESU 96] wird eine Brennwertheizung Stand 2000 neu bilanziert. In [ESU 96] werden aufgrund des geringen Einflusses der Infrastruktur auf die Ökobilanz nur drei grobe Leistungsklassen von Feuerungen bilanziert: 10kW, 100kW und 1MW. Es wird für die vorliegenden Studie von einer Leistungsklasse 10kW ausgegangen.

Die Bilanzierung enthält die Aufwendungen für Betrieb und Infrastruktur der Ölheizung inklusive Kamin, Stahl-Heizöltank, Umwälzpumpe, Ventile, Mischventil, Rohrleitung Öl und Regelung. Da die Wärmeverteilung in der vorliegenden Studie separat bilanziert wird, werden die Aufwendungen für das Verteilungssystem, wie es in [ESU 96] bilanziert wird, vom existierenden Datenmodul abgezogen. Die Kessellebensdauer beträgt 20 Jahre. Der Jahresnutzungsgrad beträgt 94%.

Der Brauchwarmwasserbedarf wird bei der Variante mit Ölheizung im Winterhalbjahr aus dem Ölkessel gedeckt. Im Sommer wird das Brauchwarmwasser in einem Elektroboiler erzeugt (s. Kap. 2.8.3.4 Warmwassersysteme).

• Gasheizung

Gasheizungen wurden in [ESU 96] bilanziert und werden hier unverändert übernommen. Es wird eine Low-NO_x-Brennwertheizung betrachtet. In [ESU 96] werden aufgrund des geringen Einflusses der Infrastruktur auf die Ökobilanz nur zwei grobe Leistungsklassen von Feuerungen bilanziert: „< 100 kW“ und „> 100 kW“. Es wird für die vorliegenden Studie von einer Leistungsklasse "< 100 kW" ausgegangen.

Die Bilanzierung enthält die Aufwendungen für Betrieb und Infrastruktur der Gasheizung inklusive Kamin, sämtliche Vorleistungen für einen Niederdruck-Erdgasanschluss, Umwälzpumpe, Ventile, Mischventil und Regelung. Da die Wärmeverteilung separat bilanziert wird, werden die Aufwendungen für das Verteilungssystem wie es in [ESU 96] bilanziert wird vom existierenden Datenmodul abgezogen. Die Kessellebensdauer beträgt 20 Jahre. Der Jahresnutzungsgrad beträgt 97%.

Der Brauchwarmwasserbedarf wird bei der Variante mit Gasheizung ganzjährig aus einem Gasdurchlauferhitzer gedeckt (s. Kap. 2.8.3.4).

¹¹ Dies ist die antizipierte europäische Tendenz in den Raffinerien, welche hier zugrundegelegt wird. In der Schweiz existiert aber bereits ein spezielles Heizöl extra leicht, bei welchem der Schwefel- und Stickstoffgehalt wesentlich reduziert wurde und welches gemäss Hersteller weniger Energie bei der Raffinierung benötigt [Shell 96]. Dieses Einzelprodukt kann aber (noch?) nicht als repräsentativ betrachtet werden.

- **Elektroheizung**

Die Elektroheizung wird als Direktheizung für jeden Raum bilanziert. Die – geringen – Infrastruktur-aufwendungen werden abgeschätzt. Da der Einfluss der Infrastruktur gegenüber den Betriebsaufwendungen bei Elektroheizungen gering ist, bedeutet dies keinen wesentlichen Qualitätsverlust. Eingeschlossen sind lackierte Heizkörper, Stromzuführung sowie Transportaufwendungen. Es wird keine Bodenheizung zur Wärmeverteilung betrachtet. Die entsprechenden Aufwendungen bei der Gebäudeinfrastruktur werden daher bei dieser Heizungsvariante jeweils weggelassen. Als Lebensdauer werden 20 Jahre angenommen. Der Jahresnutzungsgrad beträgt 99%.

Datenqualität der Heizsystemvarianten

Die Datenqualität der L/W-Wärmepumpe kann als sehr gut bezeichnet werden. Vom Hersteller konnten sehr ausführliche Inventardaten erhalten werden. Es muss aber daran erinnert werden, dass die betrachtete Infrastruktur ein rechnerisch extrapoliertes Modell und keine real existierende Anlage darstellt.

Die Datenqualität der S/W-Wärmepumpe ist genügend. Der Hersteller konnte zur Infrastruktur keine Inventardaten angeben. Die Bilanz stützt sich vornehmlich auf detailliertere Drittquellen [Hohl 97, ESU 96]. Die Bilanzierung der zugehörigen Erdwärmesonde ist hingegen als gut einzustufen.

Die Referenzanlagen Öl- und Gasheizung werden gemäss Daten in [ESU 96] bilanziert, welche die Schweizerische Versorgungssituation mit modernen Brennwert-Heizanlagen darstellen. Die Datenqualität ist sehr gut.

Die Infrastruktur der Referenzanlage Elektroheizung wird abgeschätzt, was aber von untergeordneter Bedeutung ist. Die Datenqualität von Betrieb und Infrastruktur ist gesamthaft als gut einzustufen.

2.8.3.3 Strommix für Betriebsstrom

Zur Berücksichtigung der Umweltbelastungen aus der Stromproduktion für den Betriebsstrom der Wärmepumpen wird im allgemeinen auf den *schweizerischen Strommix inklusive Importstromanteil mit 0% Transitanteil* zurückgegriffen. Als Sensitivitätsanalyse werden auch Varianten mit einem CH-Strommix mit 100% Transitanteil resp. 100% BHKW- bzw. GuD-Strom gerechnet.

Zusätzlich zu den Aufwendungen bei den versorgenden Kraftwerken, die im jeweiligen Strommix berücksichtigt werden, müssen auch die Aufwendungen der Infrastruktur und die Verluste bei der Stromverteilung berücksichtigt werden. Die Übertragungsverluste im Niederspannungsnetz sind nicht vernachlässigbar und betragen vom Kraftwerk bis zur Steckdose rund 12%.

Strommix Schweiz inkl. Importanteile

In [ESU 96] wurden die entsprechenden Belastungen eruiert, die der durchschnittlichen Versorgungssituation der Schweiz im Jahre 1990 bis 1994 entsprechen. Die im Strommix berücksichtigten Anteile der verschiedenen Kraftwerkstypen sind in Tab. 16 wiedergegeben.

Kraftwerkstyp	gerundete Anteile am CH Strommix in %
Wasserkraft (inkl.Umwälzkraft)	40%
Kernkraft	48%
Kohlekraftwerke	6.9%
Erdölkraftwerke	2.2%
Erd- und Brenngaskraftwerke	2%
andere	0.7%
Teilsomme konventionell-thermisch	11.1%

Tab. 16: *Anteile der verschiedenen Kraftwerkstypen im durchschnittlichen Schweizerischen Strommix inklusive Importstromanteile mit 0% Transitanteil. Aus [ESU 96, p.XVI.8].*

Strommix Schweiz ohne Importanteile

Wird angenommen, dass der Transitanteil bei den importierten Strommengen 100% ist, würde in der Schweiz nur inländisch produzierter Strom konsumiert, d.h. alle Importe aus dem Ausland würden zeitgleich exportiert.

Kraftwerkstyp	gerundete Anteile am CH Strommix in %
Wasserkraft	58.7%
Umwälzwasserkraft	0.9%
Kernkraft	38.3%
Kohlekraftwerke	–
Erdölkraftwerke	1%
Erd- und Brenngaskraftwerke	–
andere	1.1%
Teilsomme konventionell-thermisch	1%

Tab. 17: Anteile der verschiedenen Kraftwerkstypen im durchschnittlichen Schweizerischen Strommix bei 100% Transitgeschäften beim Import. Aus [ESU 96, p.XVI.10].

Strom ab Blockheizkraftwerk

BHKWs produzieren im Gegensatz zu den meisten Grosskraftwerken Strom und Wärme zugleich (Koppelproduktion). Um nur die Belastungen aus der *Stromproduktion allein* zu bilanzieren, existieren verschiedene Lösungen. Bei der Allokation (Auftrennung und Zuweisung) werden Aufwendungen und Anlagenteile, welche nicht eindeutig der Wärme- oder der Stromproduktion zuzuordnen sind, gemäss einem zu wählenden sogenannten *Allokationsschlüssel* aufgetrennt (z.B nach Energie-, Exergieinhalt, Marktpreisen).

Da in der Wahl des Allokationsschlüssels eine gewisse Willkür liegt, wurde hier die *Erweiterung der Systemgrenzen* gewählt. Das heisst, dass die Stromproduktion des BHKWs nicht rechnerisch von der Wärmeproduktion abgetrennt wird, um allein den Strom für die Wärmepumpe zu verbuchen. Das BHKW wird vielmehr als integraler Prozess belassen: Der produzierte Strom wird in den betrachteten Wärmepumpen verwendet, die produzierte Wärme des BHKWs wird über ein Nahwärmenetz ebenfalls für Heizzwecke verwendet. Die resultierende betrachtete Gebäudeheizung besteht also nicht mehr zu 100% aus Wärmepumpenwärme, sondern aus einer Mischrechnung zwischen Wärmepumpen- und BHKW-Nahwärme. Die Anteile in der Mischrechnung werden durch die Leistungsdaten des BHKW-Systems bestimmt. Es werden Wirkungsgrade von 57% für Wärme und 33% für Strom angenommen¹². Bei wärmegeführten BHKWs werden zur Wärmeproduktion auch Spitzenkessel benötigt. In [ESU 96] wurde als Spitzenkessel ein Heizölkessel bilanziert. Hier wird alternativ dazu ein Gas-Spitzenkessel mit 97% Jahresnutzungsgrad betrachtet, der 29% der Gesamtwärme ab BHKW beisteuert¹³. Gesamthaft werden anteilmässig 53% des Gebäudes mit Wärmepumpen und 47% mit BHKW-Nahwärme geheizt.

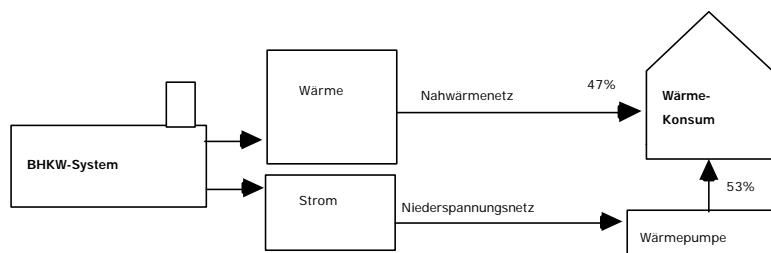


Abb. 26: Schema der Systemerweiterung bei Betrachtung des Wärmepumpenbetriebs mit 100% BHKW-Strom. Die gekoppelt produzierte BHKW-Wärme wird via Nahwärmenetz anteilig zur Deckung des Wärmekonsums im Gebäude herangezogen.

¹² ohne BHKW-interne Abwärme-Wärmepumpe

¹³ Bei existierenden Anlagen findet man Werte zwischen 16% und 60%.

In der Sensitivitätsanalyse wird als funktionale Einheit die gesamte Wärmeproduktion für ein Gebäude (Heizwärme und Brauchwarmwasser für NOAH Leichtbau) pro Jahr betrachtet. Die Wärmepumpe erzeugt sowohl Heizwärme als auch Brauchwarmwasser über einen Beistellboiler. Die Nahwärme wird ebenfalls für Heiz- und Brauchwarmwasserwärme verwendet. Für das anteilig mit Nahwärme geheizte Gebäude wird zusätzlich ein gebäudeseitiger Warmwasserspeicher benötigt. Im Sommer wird Brauchwarmwasser für diese Gebäude über einen gasbetriebenen Durchlauferhitzer erzeugt.

Die Emissionen aus dem BHKW werden für Kohlenmonoxid (CO) und Stickoxide (NO_x) auf den Grenzwert der LRV92 festgelegt. Die inventarisierten Aufwendungen befinden sich im Anhang 1.5.

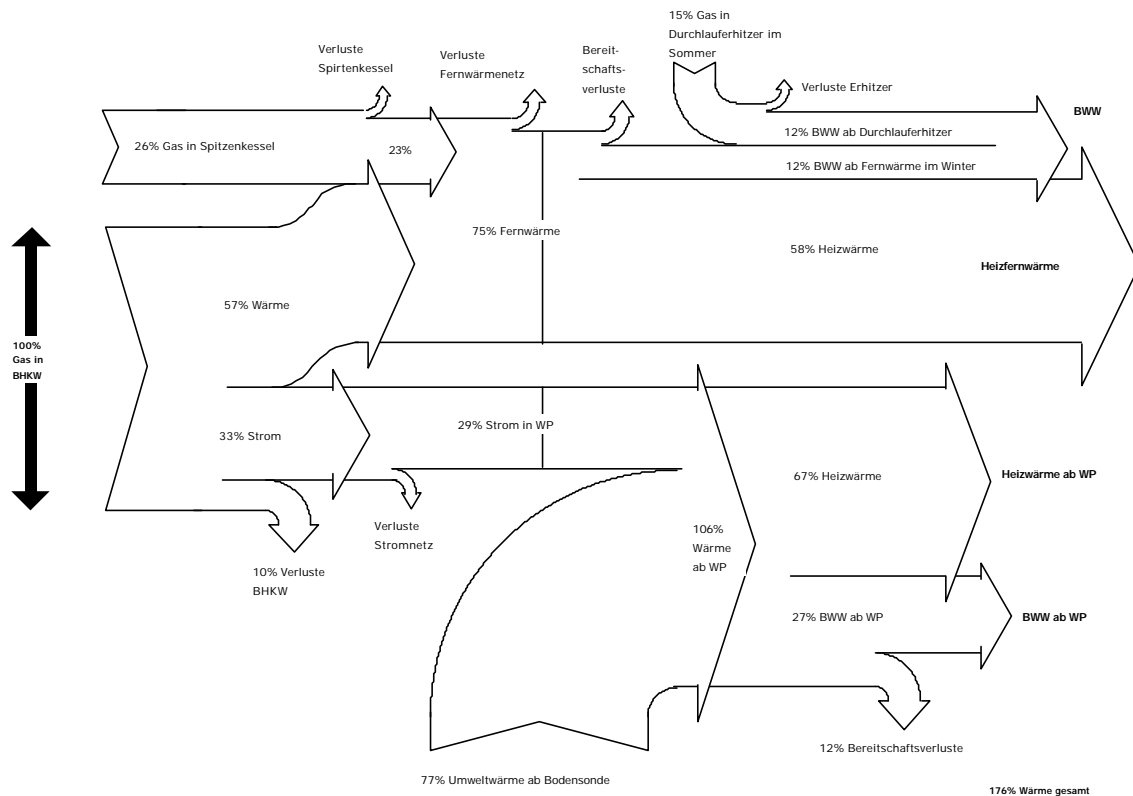


Abb. 27: Vollständiges Energieflussdiagramm für die Kombination von BHKW und Wärmepumpe für Heiz- und Brauchwarmwasserwärme. Alle Angaben beziehen sich auf den Erdgasinput ins BHKW (= 100%). Aus insgesamt 141 Teilen Endenergie (Erdgas) werden 176 Teile Nutzwärme bereitgestellt.

Stromproduktion ab GuD-Kraftwerk

Bei einem Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerk, wird der Brennstoff zuerst in einer Gasturbine verbrannt. Aus der entstehenden Wärme wird Dampf erzeugt, welcher in eine Dampfturbine geleitet wird. Beide Turbinen treiben Generatoren an. Ein GuD-Kraftwerk erreicht so hohe Wirkungsgrade von 55 – 61%. Als Brennstoff kann Erdgas aber auch Erdöl eingesetzt werden. Es ist sowohl Bandlast- als auch Spitzenlastproduktion möglich. Der GuD-Technologie wird ein grosses Marktpotential zugesprochen, was sie zu einer wichtigen Technologie bei Marginalbetrachtungen macht.

Für die vorliegende Studie wird von einem Wirkungsgrad von 58% (ab Klemme Kraftwerk) und Erdgasspeisung ausgegangen. Die Inventardaten wurden aus [PSI 96] übernommen, welche u.a. auf Herstellerangaben (ABB) basieren. Die inventarisierten Aufwendungen befinden sich im Anhang 1.5.

Datenqualität der Betriebsstromvarianten

Die Betriebsstromvarianten werden direkt oder umgerechnet aus Angaben in [ESU 96] übernommen, welche bei den Landesstrommischen die durchschnittliche Versorgungssituation 1990-1994 repräsentieren. Insbesondere enthalten diese Daten nicht nur die Aufwendungen in den stromproduzierenden

Kraftwerken, sondern auch die nicht unerheblichen Belastungen und Verluste durch die Stromverteilung im Niederspannungsnetz. Die Datenqualität ist für alle Varianten als gut bis sehr gut zu beurteilen.

2.8.3.4 Warmwassersysteme

Allgemeines

Bei den Referenzvarianten werden möglichst realitätsnahe Heizsystem/Warmwassersystem-Varianten betrachtet. Selbstverständlich sind aber auch andere Kombinationen denkbar. In der vorliegenden Bilanzierung wird jedoch jeder Heizungssystemvariante die in Tab. 18 aufgeführte Brauchwarmwasservariante fix zugeordnet.

Variante Heizsystem	zugehörige Warmwasserbereitstellung
Luft/Wasser-WP	100% separate Luft/Wasser-Warmwasser-WP
Sole/Wasser-WP	100% über Heiz-WP gespiesener Beistellboiler
Ölheizung	50% über Ölheizung gespiesener Boiler (Winter) 50% Elektroboiler (Sommer)
Gasheizung	100% Gasdurchlauferhitzer
Elektroheizung	100% Elektroboiler

Tab. 18: Varianten für die Brauchwarmwasserbereitstellung, wie sie bei den verschiedenen Heizsystemen bilanziert wurden.

Bei allen Varianten wird derselbe Warmwasserbedarf von 9166 MJ genutzter Brauchwasserwärme pro Jahr für drei Personen angenommen. Bei allen Warmwasserboilern¹⁴ wurden dieselben Bereitschaftsverluste von 31% berücksichtigt. Der totale Endenergiebedarf "Warmwasser" beträgt somit bei Bereitschaftsboilern 13'288 MJ/a.

Wärmepumpen-Wassererwärmer zur Luft/Wasser-Heiz-Wärmepumpe

Als Wärmepumpen-Wassererwärmer wird ein Aggregat mit der Typenbezeichnung 2WP2 846 der Fa. Siemens bilanziert. Dieses besitzt eine Nennleistung von 2.15 kW und ein Speichervolumen von 300 Litern. Die bilanzierte JAZ beträgt brutto 3.1. Der Hersteller lieferte Inventardaten für die wichtigsten Anlageteile [KKW 97], die mit Angaben der inventarisierten Luft/Wasser-Heizwärmepumpe ergänzt werden. Es wird eine Lebensdauer von 15 Jahren angenommen. Das Gesamtgewicht der Anlage beträgt leer rund 190 kg.

Als Kältemittel wird pro Anlage 450 Gramm R 290 (Propan) eingesetzt. Analog zu den Annahmen bei den Heizwärmepumpen, wird für die Warmwasserwärmepumpe im Sinne eines worst-case-Szenarios eine Leckage des Kältemittels von 100% angenommen (statt 14% [Weibel 96, p.3.2]). Das heisst, während der gesamten Lebensdauer inklusive Abbruch wird eine gesamte Kältemittelfüllung vollständig in die Luft emittiert. R 290 besitzt nur ein indirektes, nichtquantifiziertes Treibhausgaspotential und keinerlei Ozonzerstörungspotential, trägt aber als flüchtige organische Verbindung (VOC) zum Sommersmog bei (troposphärische Ozonbildung).

Beistellboiler zur Sole/Wasser-Heiz-Wärmepumpe

Bei der Variante mit Sole/Wasser-WP wird das Brauchwarmwasser über einen durch die Heizwärmepumpe gespiesenen Boiler, den sogenannten Beistellboiler, bereitgestellt. Zum Beistellboiler konnten vom Hersteller keine Inventardaten angegeben werden. Der Beistellboiler wird daher gemäss einem 450l-Warmwasserspeicher aus [ESU 96, p.XI.15] auf 300l extrapoliert. Zur Extrapolierung werden unter Beibehaltung der Speichergeometrie die Verhältnisse der Speicheroberflächen verwendet, d.h. um den 300l-Speicher zu bilanzieren, werden rund 76% ($= 300^{2/3} / 450^{2/3}$) der Aufwendungen des 450l-Speichers verrechnet. Der 300l-Beistellboiler wiegt leer rund 210 kg.

¹⁴ Die einzige Ausnahme davon ist der Gas-Durchlauferhitzer, der Warmwasser unmittelbar bei Bedarf erzeugt. Es werden jedoch auch hier Leitungs- und Ausstossverluste von 10% berücksichtigt.

Boiler mit Ölheizung

Bei der Variante mit Ölheizung wird das Brauchwarmwasser auf zwei verschiedene Arten bereitgestellt. Im Winter wird das Warmwasser über einen durch die Ölheizung gespeisten Boiler erzeugt. Im Sommer ist die Heizung nicht in Betrieb und das Warmwasser wird über eine elektrische Zusatzheizung im Boiler erzeugt. Die Infrastruktur und der Stromverbrauch für den Boiler und Zusatzheizung werden aus der Bilanzierung des Elektroboilers (s.u.) übernommen. Die erforderliche Endenergie für die Warmwasserbereitstellung im Winter wird als Nutzwärme ab Ölheizung verbucht.

Gaserhitzer

Für die Variante mit Gasheizung wird die Brauchwarmwasserbereitstellung mit einem erdgasbetriebenen, atmosphärischen Durchlauferhitzer bilanziert.

Es konnten keine Angaben über den Infrastrukturaufwand für Gasdurchlauferhitzer gefunden werden. Da der ökologische Beitrag des Infrastrukturaufwandes bei Gasfeuerungsanlagen im Bereich von 5% liegt, muss die Infrastruktur nicht vollständig genau bekannt sein, da deren Einfluss auf das Schlussresultat der vorliegenden Studie von untergeordneter Bedeutung ist.

Wichtig ist hingegen die korrekte Bilanzierung des Erdgasverbrauches und der durch die Verbrennung hervorgerufenen Emissionen. Deshalb wird der Erhitzer unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Wirkungsgrade als *atmosphärische Gasheizung* gemäss [ESU 96] bilanziert. Die atmosphärische Gasheizung hat einen Wirkungsgrad von 87%. Beim Erhitzer werden 88% Apparatewirkungsgrad sowie 10% Leitungs- und Ausstossverluste, somit ein Gesamtwirkungsgrad von 80% angenommen. Da das Warmwasser in dem Moment erzeugt wird, in dem es gebraucht wird, entstehen keine Bereitschaftsverluste sondern nur Ausstossverluste. Die Infrastruktur der Gasheizung wird pauschal aus der Bilanz der Gasheizung übernommen, d.h. die Infrastruktur des Gasdurchlauferhitzers wird durch diejenige der atmosphärischen Gasheizung approximiert.

Elektroboiler

Die Bilanzierung wird aus [ESU 96, p.XI.17] übernommen, wo ein 5 kW Elektroboiler mit einem 450l-Speicher bilanziert wurde. Das Speichervolumen wird jedoch auf 300l extrapoliert. Die Materialmengen werden proportional zur Oberfläche mit einem Skalierfaktor von 76% übernommen (vergl. Vorgehen beim Beistellboiler der Sole/Wasser-WP).

Datenqualität der Warmwassersystemvarianten

Die Datenqualität für die separate Luft/Wasser-Warmwasser-Wärmepumpe ist gut; die wesentlichen Infrastrukturkomponenten konnten spezifisch bilanziert werden. Die Datenqualität des Bestellboilers ist schlecht bis genügend, da keine Angaben über die Infrastruktur erhalten werden konnten. Der Betrieb über die S/W-Wärmepumpe wurde korrekt abgebildet. Für die Brauchwarmwasservarianten der Referenzheizungen wurden approximative Daten verwendet, die die wesentlichen Belastungen zutreffend berücksichtigen.

2.8.3.5 Gebäudevarianten

Allgemeines

Es werden folgende vier Gebäudevarianten mit einer EBF von je 147m² unterschieden.

Var.	TRNSYS-Kürzel	Name	Beschreibung	Heizenergiebedarf [MJ/a]	Totale Fensterglasfläche [m ²]
1.	NLU	NOAH Holz-Leichtbauhaus	Leichtbauhaus mit Wänden aus Holz/Gipsfaserplatten mit Iso-cell-Isolation	22'785	9.9
2.	NMU	NOAH Massivbauhaus	heiztechnisch gleichwertiges Haus wie Variante 1 aber mit Backsteinwänden/Steinwolle	22'785	9.9
3.	MLB	SIA2010 Holz-Leichtbauhaus	gegenüber Variante 1 zusätzlich isoliertes Holzleichtbauhaus mit vergrösserten Fensterflächen	18'522	17.1
4.	MMB	SIA2010 Massivbauhaus	gegenüber Variante 2 zusätzlich isoliertes Backsteinhaus mit vergrösserten Fensterflächen	16'170	17.1

Tab. 19: Überblick über die vier bilanzierten Gebäudevarianten

Von Variante 1 (unverändertes Leichtbauhaus) konnte ein Inventar beim Hersteller erhoben [Piatti 97] werden. Die Gebäudevarianten 2, 3 und 4 sind hypothetisch; deren Baumassen werden rechnerisch aus der ersten Variante abgeleitet.

Systemgrenzen

Der Bilanzrahmen umfasst jeweils das schlüsselfertige Haus. Eingeschlossen sind Aushub, Fundament, Stockwerkböden, Aussen- und Innenwände, Dach, Wand-, Boden- und Dachisolationen, Fenster, Türen, Treppen, Anstriche innen und aussen, Parkette, Sanitärrohre sowie Energieverbrauch und Transporte bei Vorfertigung und Baustelle. Nicht bilanziert werden folgende Beiträge: Sanitär- und Küchenapparate, die Rafflamellenstoren der Lukarnen- und Giebfenster im Dachstockwerk (Datenmangel), Transport der Bauarbeiter (methodische Konvention).

Die Aufwendungen für Kamine werden nicht hier, sondern wo nötig als Teil der Heizsysteme bilanziert, d.h. bei Öl- und Gasheizung (Referenzsysteme). Bei der Elektrodirektheizung werden die Aufwendungen für die nicht benötigte Wärmeverteilung (Bodenheizung) weggelassen.

Materialien

Die Baumaterialien werden gemäss [Weibel 95] bilanziert. Dabei wird die Versorgungssituation in der Schweiz abgebildet. In Anlehnung an [ESU 96, p.III.30] werden pauschale Transportdistanzen zur Baustelle angenommen (s. Tab. 20). Für alle vorgefertigten Bauteile beim NOAH- resp. SIA2010-Leichtbauhaus wird zusätzlich eine durchschnittliche, pauschale Transportdistanz von 50 km vom Ort der Vorfertigung zur Baustelle angenommen.

Transportdistanzen zur Baustelle	Bahntransport	LKW-Transport
Holz	—	70
Beton	—	20
Stahl	600	50
Kupfer	600	80
Kunststoffe	200	50
Gipsfaserplatte (Fermacell)	800	70
Ziegel, Isocell, Steinwolle	—	50
zusätzlich für vorgefertigte Bauteile bei Leichtbauhausvarianten	—	50

Tab. 20: Verbuchte Transportdistanzen vom Hersteller zur Vorfabrikation resp. zur Baustelle für Baumaterialien

Fenster

Es werden jeweils dreifachverglaste Fenster (4 mm + 5 mm + 4 mm) mit Holzrahmen bilanziert. Angaben zu Rahmenprofilen konnten nicht erhoben werden und werden vernachlässigt. Die Glasscheiben werden als beschichtetes Flachglas bilanziert. Isolationsglasfenster müssen in der Schweiz zur Zeit als Sondermüll entsorgt werden [Metron 97]. Genaue Angaben zur Entsorgung konnten jedoch nicht erhoben werden.

Fussbodenheizung

Bei allen Gebäudevarianten wird eine Wärmeverteilung über eine Fussbodenheizung angenommen. Die Aufwendungen für die Fussbodenheizung konnten separat bei Bircher und Keller AG, Sissach, erhoben werden [Bircher 97]. Die Fussbodenleitungen bestehen aus einem Aluminium/PE-Verbundrohr (Mepla). In der Bilanz eingeschlossen sind Dampfbremse-Folie aus PE, Verteiler, Verteilerkasten, Handtuchradiator, Leitungsrohre aus Stahl sowie die Rohrisolation. Als Montageenergie werden 4kWh Strom und 650 g Schweissacetylen pro Haus bilanziert. Die Lebensdauer des Wärmeverteilungssystems wird gemäss Hersteller mit 40 Jahren angenommen.

Die Entsorgung des Alu/PE-Verbundrohres wird als Verbrennung in einer KVA bilanziert. Die restlichen Komponenten gelangen ins Metallrecycling. Die einzelnen bilanzierten Materialien und Prozesse sind im Anhang 1.5.2 angegeben.

Lebensdauern

Die Lebensdauer des Leichtbaus wird vom Hersteller mit "mindestens 50 Jahren" angegeben. Die bilanzierte technische Lebensdauer aller Gebäudevarianten wird in Übereinstimmung mit [Potyka et al. 85] auf 80 Jahre angenommen. Wichtige Ausnahmen sind die Bauteile in Tab. 1, die in kürzeren Zeitabschnitten erneuert werden müssen, was in der Bilanz entsprechend berücksichtigt wird.

Komponente	Lebensdauer [a]	Quelle
Fenster inkl. Läden	40	[Potyka et al. 85]
Gipsfaserplatten	40	[Piatti 97]
Steinwolleisolation Wände	27	[ESU 96, p.XV.6]
Steinwolleisolation Dach	40	[ESU 96, p.XV.6]
mineralischer Innen- und Aussenputz	40	[Potyka et al. 85]
Parkett	40	[Potyka et al. 85]
Kupfer auf Dach	40	[Potyka et al. 85]
Schneefänger Stahl	16	[Potyka et al. 85]
Vordach Stahl	27	[Potyka et al. 85]
Anstriche Aussen	20	[Piatti 97]
Anstriche Innen	10	[Piatti 97]
PVC-Rohre Kanalisation	40	[Potyka et al. 85]

Tab. 21: Baumaterialien und Hauskomponenten mit kürzerer Lebensdauer als die Hauslebensdauer von 80 Jahren

Entsorgung

Es sind zwei Entsorgungsschritte zu unterscheiden: Zum einen die Entsorgung von Abfällen der Baustelle (Verschutte etc.); zum anderen Entsorgungsprozesse beim zukünftigen Rückbau des Gebäudes (Bauschutt etc.). Vom Hersteller wurden brutto benötigte Baumaterialien und Verlustraten angegeben, sodass die anfallenden Baustellenabfälle bilanziert werden konnten.

Baustellenabfälle: Verschnitte beim Bau können meist leicht sortenrein getrennt werden und zum Recycling dem Hersteller zurückgeführt werden (z.B. bei Gipsfaserplatten und Holzzementplatten). Gewichtsmässig dominanter Baustellenabfall ist der Aushub (2650 kg), für den eine Verwertung als Auffüllmaterial bilanziert wird. Massivholzreste werden zur Verbrennung einer KVA zugeführt. Reste von Klebstoffen und ähnlichem werden als Sondermüll einer Verbrennung zugeführt.

Rückbau: Beim Rückbau der Gebäude werden massive, gut demontierbare Metallteile (Kupferbleche und -rinnen, Leitungsrohre, Stahlvordach) als recycelbar angenommen (vergl. Kap. Exkurs Recycling). Für brennbare Holzteile sowie PVC-Rohre wird eine Verbrennung in der KVA angenommen. Die meisten Holzteile sind verklebt oder bestrichen, sodass eine Verwertung kaum möglich ist.

Ein Grossteil der Bauteile muss jedoch beim Rückbau in 80 Jahren als Bauschutt entsorgt werden. Von diesem wird angenommen, dass er zukünftig in die Fraktionen Metalle, Mineralisches, Holz, Kunststoffe, und Gipsfaserplatten getrennt werden kann. Eine Prozessenergie oder allfällige direkte Prozessmissionen konnten dafür aber nicht abgeschätzt werden, was aber das Schlussresultat nicht massgebend beeinflussen dürfte.

- Von den Fraktionen Holz und Kunststoffe wird eine Entsorgung in der KVA angenommen.
- Für Metalle und Mineralisches (z.B. Backsteinmauerwerk bei den Massivbauhäusern) wird ein Recycling resp. Verwendung/Verwertung als Inertstoff angenommen, welche keine weiteren wesentlichen Umweltbelastungen nach sich ziehen, die hier berücksichtigt werden müssten.
- Gipsfaserplatten, welche beim Leichtbauhaus rund die Hälfte des Bauschuttes ausmachen, sind aufgrund ihres hohen Gipsanteils von 80% nicht brennbar und können daher nicht in der KVA entsorgt werden. Aufgrund ihres Kohlenstoffgehaltes durch den Papieranteil von 15% können sie auch nicht als Inertstoff entsorgt werden. Ein Recycling zu neuen Gipsfaserplatten ist gemäss Hersteller nur bei unverklebten bzw. verfugten Platten möglich [Schubiger 97]. Im NOAH-Haus werden die Platten jedoch verklebt und sind somit nicht rezyklierbar. Es wird idealisierend angenommen, dass bis in 40 Jahren (= Lebensdauer der Platten) eine Verwertung für alte, verklebte Gipsfaserplatten gefunden werden kann (z.B. Herstellung alternativer Baustoffe). Bei einer Verwertung müssen keine Umweltbelastungen bilanziert werden (vergl. Kap. Exkurs Recycling).

NOAH Leichtbauhaus

Das NOAH-Haus wird beim Hersteller vorgefertigt und auf der Baustelle fertiggestellt. Vom Hersteller konnten Angaben über Aufwendungen bei der Vorfabrikation sowie auf der Baustelle erhoben werden.

Es wird gemäss Hersteller ausschliesslich schweizerisches Holz verwendet. Die Holzkonstruktion der Aussenwände wird auf der Innen- und Aussenseite mit Gipsfaserplatten (Fermacell) ausgebaut. Auf der Aussenseite werden Holzlamellen als Stülpschalung montiert. Die Zwischenräume der Holzkonstruktion werden zur Wärmeisolation mit Borax-imprägnierten Papierschnitzeln (Isocell) ausgefüllt. Das Haus besitzt ein Betonfundament und Zwischenböden aus Holz. An beachtenswerten Metallteilen werden Kupfer für die Regenwasserableitung und die Lukarnenkonstruktion, sowie ein verzinktes Stahlblech als Vordach verwendet. Kleine Mengen von Holzzementplatten werden für die Dachlukarnen verwendet.

NOAH Massivbauhaus

Das hypothetische NOAH-Massivbauhaus wird gemäss den Vorgaben im Schlussbericht der ersten Phase dieser Studie [NTH1 96, p.71] aus den Inventar-Angaben des NOAH Leichtbauhauses rechnerisch extrapoliert.

Im Gegensatz zu den Leichtbauhäusern werden die Massivbauhäuser nicht vorfabriziert, sondern vollständig am Ort gebaut. Die Aussenwände bestehen aus einer steinwolleisolierten Backsteinmauer mit 15 cm dicken Klinkern. Der Boden des Obergeschosses wird als Stahlbetonkonstruktion bilanziert.

SIA2010-Leichtbauhaus

Das hypothetische SIA2010-Leichtbauhaus wird weitestgehend identisch zum NOAH-Leichtbauholzhaus bilanziert. Es wird wie beim NOAH-Haus angenommen, dass es beim Hersteller vorgefertigt und auf der Baustelle fertiggestellt wird.

Als wichtige Unterschiede werden zum einen die Wanddicken sowie die Dämmstärken der Wand- und Bodenisolierungen vergrössert. Zum anderen werden die Fensterflächen vergrössert, um mehr Solar-energie passiv nutzen zu können.

In Tab. 22 sind die erhöhten Dämmstärken des SIA2010-Leichtbauhauses und die davon betroffenen Baumaterialien angegeben. Die Massen der Buchenbalkenkonstruktionen in den Aussenwänden und im Dachstock sind nicht direkt proportional zu den Dämmstärken (Boden/Wand-Ecken). Es wird angenommen, dass eine Erhöhung der Dämmstärken sich zu 80% auf die benötigten Buchenbalkenmassen auswirkt. Eine Erhöhung der Dämmstärke von 16 cm auf 24 cm in den Aussenwänden hat daher eine 40%ige Erhöhung der Balkenmasse zur Folge.

Veränderte Dämmstärken	NOAH-Leichtbau	SIA2010-Leichtbau
Isocell/Buche in Aussenwänden	16 cm	24 cm
Bodenisolation Styropor im Erdgeschoss ¹⁵	4 cm	16 cm
Steinwolle/Buche in Dachkonstruktion	20 cm	30 cm

Tab. 22: *Veränderte Dämmstärken beim SIA2010-Leichtbauhaus im Vergleich zum NOAH-Leichtbauhaus und davon betroffene Baumaterialien.*

Die rechnerische Erhöhung der Dämmstärken wird gleichzeitig kombiniert mit der rechnerischen Erhöhung der Fensterflächen. Durch die Fenstervergrösserung werden beim SIA2010-Haus zwar mehr Materialien für die Fensterteile (Glas, Rahmen), jedoch weniger Materialien für die Aussenwände und das Dach benötigt (Gipsfaserplatten, Anstriche, Balken etc.). Dies wird über eine direkt proportionale, rechnerische Anpassung entsprechend den Fensterflächen vs. Fassaden- resp. Dachflächen berücksichtigt. Die Glasflächen betragen beim NOAH resp. beim SIA2010-Haus 9.9m² resp. 17.1m². Dies sind die transparenten Flächen ohne die Fensterrahmen. Zur Umrechnung werden aber die Fensterflächen inklusive Rahmen verwendet (s. Tab. 23).

Bauteile	Gesamtflächen der Bauteile [m ²]	Fensterflächen NOAH [m ²]	Fensterflächen SIA2010 [m ²]	Umrechnungsfaktor NOAH / SIA2010
Nordfassade ohne Dach	28.9	4.81	4.81	1
Südfassade ohne Dach	28.1	7.22	14.4	0.654
Ostfassade	64	1.95	4.23	0.963
Brandwand (Westseite)	60	0	0	1
Dach	81.2	1.22	3.66	0.969
Fensterflächen Glasflächen		15.2	27.1	
		9.9	17.1	

Tab. 23: *Datengrundlage zur Berechnung der Umrechnungsfaktoren für fassadenflächenabhängige Bilanzierungsgrössen durch die Fenstervergrösserung beim SIA2010-Haus. Der Umrechnungsfaktor errechnet sich aus dem Quotienten von (Gesamtfläche minus Fensterflächen NOAH) und (Gesamtfläche minus Fensterflächen SIA2010).*

¹⁵ Ohne zusätzliche Holzfaserplatte (s. Tab. 1)

SIA2010-Massivbauhaus

Das hypothetische SIA2010-Massivbauhaus wird mit derselben Konstruktionsweise wie das NOAH Massivbauhaus bilanziert, d.h. mit Mauerwerkswänden. Wie beim SIA2010-Leichtbauhaus werden die Dämmstärken und Fensterflächen vergrössert. Die Backsteine der Aussenmauern werden jedoch mit gleicher Dicke (15 cm) bilanziert. Die Fenstervergrösserung führt aber wie beim SIA2010-Leichtbauhaus zu einer Verminderung der Baumaterialien für die Aussenwände.

In Tab. 24 sind die erhöhten Dämmstärken des SIA2010-Massivbauhauses und die davon betroffenen Baumaterialien angegeben. Die Massen der Buchenbalkenkonstruktionen im Dachstock sind nicht direkt proportional zu den Dämmstärken. Es wird angenommen, dass eine Erhöhung der Dämmstärken sich zu 80% auf die benötigten Buchenbalkenmassen auswirkt. Bei einer Erhöhung der Dämmstärken von 20 cm auf 30 cm erhöht sich die Balkenmasse also um 40%.

Veränderte Dämmstärken	NOAH-Massivbauhaus	SIA2010-Massivbauhaus
Steinwolle in Aussenwänden	12 cm	18 cm
Bodenisolation Styropor im Erdgeschoss ¹⁶	4 cm	16 cm
Steinwolle/Buche in Dachkonstruktion	20 cm	30 cm

Tab. 24: *Veränderte Dämmstärken beim SIA2010-Massivbauhaus im Vergleich zum NOAH-Massivbauhaus und davon betroffene Baumaterialien.*

Die Anpassung der Fensterflächen ist identisch zur Anpassung beim SIA2010-Leichtbauhaus (vergl. Tab. 23).

Datenqualität der Gebäudevarianten

Das NOAH-Leichtbauhaus konnte mit grossem Detaillierungsgrad und einem geringem Aggregationsniveau inventarisiert werden (rund 150 Inventarangaben zu 110 Materialien/Prozessen). Aufgrund der hohen Heterogenität von Gebäuden müssen im Vergleich zu anderen Infrastruktur-Objekten mehr Materialien berücksichtigt werden, um den Grossteil der Umweltbelastungen berücksichtigen zu können. Beim NOAH-Leichtbauhaus kann von einer guten bis sehr guten Datenqualität der Inventarisierung gesprochen werden. Bemerkenswerte Datenunsicherheiten betreffen die Herstellungsenergie der Gipsfaserplatten (wird in Analogie approximiert), die genaue Bilanzierung von Klebern und einigen Kunststoffen (wird ersatzweise durch andere, ähnliche Kunststoffe approximiert), unbekannte Konstruktion von Kellerfenster und Lichtschacht-Fertigteil (wird abgeschätzt) sowie die unbekannte Entsorgung von Isolationsglasfenstern.

Bei dem SIA2010-Haus werden die Wandmaterialeinsparungen durch die Fenstervergrösserungen proportional zu den eingesparten Wandflächen gerechnet. Dieses Vorgehen ist richtig für das Massivbauhaus. Für das Leichtbauhaus, welches eine inhomogene Wandstruktur von Balken und Isolation aufweist können hier Verzerrungen für die Balkenmassen entstehen.

Gesamthaft kann für die hypothetischen, extrapolierten Gebäudevarianten (NOAH Massiv, SIA2010 Leichtbau, SIA2010 Massiv) von einer gegenüber dem NOAH Haus verringerten, aber immer noch guten Datenqualität gesprochen werden.

Entsorgungsprozesse insbesondere Verbrennung in der KVA werden aufgrund der *heutigen* Situation und Ausbaustandard in der Schweiz angenommen. Da die Entsorgung der Gebäude erst nach Ablauf der Lebensdauer stattfindet, d.h. nach 80 Jahren, müssten korrekterweise *zukünftige* Entsorgungsprozesse bilanziert werden. Neben den Prognoseunsicherheiten spricht auch die Verhältnismässigkeit von Aufwand und Nutzen gegen eine genaue Bilanzierung zukünftiger Entsorgungsprozesse. Ähnliches lässt sich auch sagen im Bezug auf die *Herstellung* derjenigen Bauteile, welche vor Ablauf der Gebäudelebensdauer erneuert werden müssen.

¹⁶ Ohne zusätzliche Holzfaserplatte (s. Tab. 1)

2.8.4 Vorgehen bei der Resultatepräsentation

Bei einem Ökoinventar können so verschiedene Umwelteinwirkungen wie Luftemissionen, Wasseremissionen, Radioaktivität, Abwärme, Flächenbeanspruchung und Ressourcenverbrauch errechnet werden. Dabei fällt eine kaum überblickbare Fülle von Daten an. In [ESU 96] werden ca. 150 Luft- und 100 Wasseremissionen für über 2000 technische Teilprozesse ausgewiesen.

Die jeweiligen Emissionen können zwar gemäss ihrer Wirkung quantitativ mehreren, verschiedenen Umwelteffekten wie z.B. Treibhausproblematik, Ozonloch, Sommersmog etc. zugeordnet werden (sog. Charakterisierung). Beim Vergleich von verschiedenen Systemen ist auf dieser Stufe Indikatoren aber oft noch nicht eindeutig entscheidbar, welches System ökologisch besser abschneidet.

Um eine einzige Aussagegrösse zu erhalten, ist es nötig, die verschiedenen Umwelteffekte gegeneinander zu gewichten. So können diese Umweltbelastungen zu einer einzigen "Umweltbelastungszahl" addiert werden. Es wird damit eine sogenannte *Vollaggregation* der Umweltauswirkungen ermöglicht. Vollaggregierende Bewertungsmethoden sind z.B. die Methode der ökologischen Knappheit (Umweltbelastungspunkte) [BUWAL 98] oder Ecoindicator95 [Goedkoop 95].

Zur Gewichtung von verschiedenen Umwelteffekten gegeneinander sind *subjektive Werturteile* unumgänglich. Für eine Gewichtung muss bezeichnet werden, welche ökologischen Auswirkungen überhaupt betrachtet und als wie schlimm diese relativ zueinander empfunden werden. Dazu, wie dies zu leisten ist, gibt es mehr oder weniger strukturierte bzw. transparente Vorschläge. Diese Fragen sind jedenfalls nur wertebefahet zu beantworten. Es gibt keine objektiv eindeutig korrekte Werthaltung. Die Wahl der Bewertungsmethode ist daher immer diskutabel und muss zusammen mit der zugrundeliegenden Werthaltung begründet werden.

Auf Wunsch der Auftraggeber wird im vorliegenden Bericht auf eine Vollaggregation verzichtet. Es werden neun charakterisierte Umwelteffekte der Bewertungsmethode "Ecoindicator95rf" aus der Dissertation von Rolf Frischknecht [Frischknecht 98] berechnet. Eine weitere Aggregation wird nicht vorgenommen. In [Frischknecht 98] wurden die im Ecoindicator95 [Goedkoop 95] vorgestellten Charakterisierungen der Umwelteffekte aufgrund neuer Erkenntnisse aktualisiert, teilweise korrigiert und durch eine Charakterisierung für radioaktive Emissionen ergänzt.

Die Umwelteffekte wurden aufgrund ihrer Wichtigkeit an der Schädigung der menschlichen Gesundheit sowie der Beeinträchtigung von Ökosystemen ausgewählt [Goedkoop 95]. Die Berücksichtigung von radioaktiven Emissionen ist motiviert durch den Wunsch, die Bewertung der in der nuklearen Brennstoffkette erzeugten Belastungen besser abzubilden [Frischknecht 98, p.129].

Charakterisierter Umwelteffekt	berücksichtigte Emissionen bei der Charakterisierung
Treibhauseffekt	CO ₂ , Methan, Lachgas, div. Halone, SF ₆
Ozonloch	div. Freone, Halone, chlorierte/bromierte Verbindungen
Sommersmog	div. Organika (VOC), NO _x
Versauerung	NO _x , SO _x , NH ₃ , HCl, HF
Überdüngung	Phosphate, NH ₄ , NO ₃ , COD
Schwermetalle	Sb, As, Ba, Pb, B, Cd, Cr, Mn, Mo, Ni, Hg
Karzinogene	Benzol, Benzo(a)pyren, Polyzyklische Aromaten, As, Ni, Cr
Wintersmog	NO _x , SO _x , Partikel
Radioaktivität	radioaktive Isotope wie z.B. ²²² Rn, ¹⁴ C, ¹²⁹ I, ³ H, ⁸⁵ Kr

Tab. 25: Berücksichtigte Umwelteffekte und zugehörige Schadstoffe aus der Bewertungs-Methode "Ecoindicator95rf" [Frischknecht 98]

Im folgenden seien die betrachteten Umwelteffekte kurz vorgestellt.

Treibhauseffekt: Muss kaum vorgestellt werden. Hier werden alle Emissionen gemäss ihrer Wirkung gewichtet zusammengefasst, die das Wärmerückhaltevermögen der Atmosphäre erhöhen und so den natürlichen Treibhauseffekt verstärken. Der betrachtete Zeitraum der Wirkung beträgt hierbei 100 Jahre.

Ozonloch: Hier werden die Substanzen zusammengefasst, welche das stratosphärische Ozon abbauen und so die UV-absorbierende Ozonschicht ausdünnen.

Sommersmog: bezeichnet die Bildung von bodennahem Ozon in der Troposphäre, die lichtinduziert ist und daher v.a. im Sommer auftritt (Photosmog). Sommersmog verursacht Atemwegserkrankheiten.

Versauerung: Säuren oder Substanzen, die in der Atmosphäre zu Säuren umgewandelt werden und so Pflanzen und Boden schädigen, werden hier zusammengefasst (Acidification, saurer Regen).

Überdüngung: Luft- und Wasserschadstoffe, die in Gewässern die Nährstoffbilanz erhöhen, werden hier zusammengefasst (Eutrophierung). Überdüngung vermindert Biodiversität.

Schwermetalle: Hier werden Schwermetallemissionen in Luft und Wasser zusammengefasst, welche verschiedene Schädwirkungen auf Organe haben.

Karzinogene: Krebsauslösende Substanzen werden hier gewichtet zusammengefasst.

Wintersmog: Wintersmog ist im Gegensatz zu Sommersmog nicht lichtinduziert und wird von Aerosolen und Partikeln bzw. deren Vorgängern verursacht. Diese werden verstärkt bei Inversionslagen im Winter über Ballungsgebieten konzentriert. Wintersmog verursacht Atemwegserkrankheiten.

Radioaktivität: Radioaktive Strahlung von diversen Isotopen werden hier gemäss ihrer Schädwirkung auf den Menschen bezüglich tödlicher Krebserkrankungen gewichtet zusammengefasst.

Die Zusammenfassung verschiedener Emissionen zu einem Umwelteffekt oder Wirkungskategorie erfordert eine *quantitative Gewichtung* der Emissionen relativ zueinander. In der Praxis wird dies am besten so gelöst, dass eine Leitsubstanz bezeichnet wird, z.B. Kohlendioxid für den Treibhauseffekt, Ethan für den Sommersmog etc. Die Wirkungen der übrigen Emissionen derselben Kategorie werden in Einheiten *relativ zu dieser Leitsubstanz* ausgedrückt. Also z.B. Kohlendioxid-Äquivalente für den Treibhauseffekt (sog. Charakterisierungswerte). Die benötigten Wirkungen pro Einzelsubstanz werden meist aus Modellen der Ökosphäre abgeleitet.

Für Treibhausgase und ozonabbauende Substanzen existieren international abgestimmte Charakterisierungswerte der IPCC und WMO¹⁷ aus globalen Atmosphärenmodellierungen. In der sogenannten CML¹⁸-Methode der NOH¹⁹ sind daneben weitere Charakterisierungswerte u.a. für Sommersmog, Versauerung, Überdüngung aufgeführt [Heijungs et al. 92]. Die Werte für Sommersmog basieren auf Modellen der UNECE²⁰ für Europa. Die Werte für Versauerung und Überdüngung basieren auf Überlegungen zum chemischen-biologischen Verhalten der Substanzen. Die Klassifizierung und die Charakterisierungswerte für Schwermetalle, Karzinogene und Wintersmog gehen auf die Ecoindicator95-Methode zurück [Goedkoop 96], welche ebenfalls Teil des holländischen NOH-Programmes ist. Diese basieren auf den 'Air Quality Guidelines' und den 'Quality Guidelines for Drinking Water' der WHO²¹, welche Grenzwerte für langanhaltende, niedrigkonzentrierte Belastungen präsentieren. Die Charakterisierungswerte wurden aufgrund neuer Erkenntnisse in [Frischknecht 98] ergänzt und teilweise angepasst. Die Wirkungspotentiale von radioaktiven Nukliden in [Frischknecht 98] stützt sich auf regionale Atmosphärenmodellierungen über Ausbreitung und Exposition in den ExternE-Untersuchungen des JOULE-Programms der EC²² [ExternE 95].

¹⁷Intergovernmental Panel on Climate Change und World Meteorological Organisation.

¹⁸Centrum voor Milieukunden, Leiden (Zentrum für Umweltforschung), Holland.

¹⁹Netherlands National Reuse of Waste Research Programme, Holland

²⁰United Nations Economic Commission for Europe

²¹World Health Organisation

²²Commission of the European Communities, Directorate General XII Science, Research and Development

2.8.5 Datenqualität der Umwelteffekte

Die Datenqualität der Gewichtungsfaktoren für Treibhausgase und ozonzerstörende Substanzen entspricht internationalen Standards und wird in Zukunft voraussichtlich wenig ändern. Beim Treibhauseffekt ist anzufügen, dass ein Integrationshorizont der Wirkungen von 100 Jahren gewählt wurde. Datensätze mit kürzeren (20 Jahre) oder längeren (500 Jahren) Horizonten haben gewisse Abweichungen.

Die Ökoinventare von ozonzerstörenden Substanzen sind nicht in allen Prozessketten gleichermassen vollständig, sodass bei der Interpretation der Resultate nicht zuviel Gewicht auf den Umwelteffekt Ozonzerstörung gelegt werden soll.

Die Gewichtungsfaktoren für Schwermetalle, Karzinogene und Wintersmog beinhalten keine Information über die Herkunft von Schadstoffen in der Umwelt (*fate analysis, exposure*), sondern wurden aus Immissions-Grenzwerten abgeleitet. Hier könnten wesentliche Veränderungen einzelner Faktoren noch möglich sein.

Die Gewichtungsfaktoren für Radionuklide beinhalten eine *fate analysis*, die allerdings für spezifische Standorte in Europa gemacht wurde. Abweichungen gegenüber der durchschnittlichen globalen Situation sind denkbar, aber vermutlich wenig relevant.

Die Gewichtungsfaktoren für Versauerung und Überdüngung schliessen nur chemisch-biologische Überlegungen ein (Säurebildung resp. Nährstoffangebot). Die Werte sind daher recht theoretisch und können sich noch stark ändern.

Es muss hier betont werden, dass nicht alle betrachteten Umwelteffekte als gleich gravierend verstanden werden dürfen. Für eine abschliessende Beurteilung, müssen die Umwelteffekte gegeneinander gewichtet werden. Diese Vollaggregation wird hier auf Wunsch der Auftraggeber nicht durchgeführt, um subjektive Bewertungen bei der Beurteilung zu vermeiden.

Falls nicht anders erwähnt, wurde bei der Bilanzierung für den Betriebsstrom der WP vom schweizerischen Strommix inkl. Importstromanteil ausgegangen. Bei den Importgeschäften wurden 0% Transitgeschäfte angenommen. Der so resultierende Strommix ist somit ökologisch belastender als der reine Inlandstrommix der Schweiz, aber wesentlich besser als der durchschnittliche europäische UCPT-Strømmix²³. Die Leckage der Kältemittel wurde zu 100% angenommen (worst case).

Zur Genauigkeit von Ökobilanzen

Zur Abschätzung einer Fehlerschranke im üblichen Sinn kann die Angabe dienen, dass die aus Atmosphärenmodellen abgeleiteten, international verwendeten Gewichtungsfaktoren für Treibhausgase und ozonabbauende Substanzen mit einer Genauigkeit von +/- 35% angegeben werden. Dazu kommen aber auch Ungenauigkeiten bei der Inventarisierung (Datenlücken, Repräsentativitätsprobleme), die jedoch ohne enormen Aufwand nicht fundiert quantifizierbar sind. Diese Probleme treten zur Zeit aber bei allen Ökobilanzen auf. Bei jedem Inventarschritt wird in der vorliegenden Studie eine kurze, qualitative Einschätzung der Datenqualität gegeben.

Als wichtigste Konsequenz ist herauszuheben, dass aufgrund der Unsicherheiten in Ökobilanzen Schlussfolgerungen nicht auf kleinsten Unterschieden in den Resultaten basieren dürfen. Relative Unterschiede im Bereich unter 20% sind als nicht signifikant anzusehen.

²³ Die Resultate der Studie sind nur für die Situation in der Schweiz gültig (und nur für die betrachteten Fallbeispiele) und können nicht auf andere Länder übertragen werden.

2.9 MATLAB-Simulation verschiedener Regelstrategien

Die Regelung soll unabhängig von äusseren und inneren Störungen die Innenlufttemperatur innerhalb eines gewissen Bereichs halten. Diese Lufttemperatur kann aber nicht gemessen werden, ebenso wenig wie die Wärmezuflüsse der Störungen. Ein reiner Zustandsregler kann für diese Aufgabe nicht verwendet werden, da nur die wenigsten Zustandsgrössen gemessen werden (Vor- und Rücklauftemperatur, Aussentemperatur und z.T. Sonnenstrahlung, jedoch keine Innenluft-, Wand- oder Bodentemperatur). Ein Beobachterentwurf drängt sich daher zwingend auf. Mit Hilfe dieses Beobachters und eines Modellansatzes soll auf der Basis einer Bilanzierung der Energieflüsse eine Schätzung der gemittelten Lufttemperatur berechnet werden. Darauf aufbauend soll ein Regler die Wärmepumpe ein- und ausschalten.

Die Synthese solcher Beobachter-Regler-Kombinationen sind seit einiger Zeit in der linearen Regelungstheorie bekannt [Doyle 89], und ein am Institut für Mess- und Regelungstechnik häufig eingesetzter Algorithmus, die H -Methode [Raisch 92], wird in der Folge für die Regelung der Wärmepumpe verwendet.

2.9.1 Wahl der Simulationsumgebung - Warum MATLAB

Wenn in ein und derselben Programmumgebung ein Regler entwickelt, in ein System integriert, mittels Simulationen getestet und auf einer Zielplattform implementiert werden soll, kommen hauptsächlich zwei Programme zur Anwendung. Neben MATLAB [MATLAB] wird ein Paket namens Matrix/XMath [Xmath] angeboten, das jedoch in Bezug auf Benutzerfreundlichkeit und Umfang der zusätzlichen Routinen ("Toolboxes") wesentlich schlechter abschneidet. Am Institut für Mess- und Regeltechnik wird deshalb MATLAB breit eingesetzt. Dass dies nach wie vor vorteilhaft ist, hat sich anlässlich einer Evaluation der neuesten Version von XMath bestätigt.

Während in der ersten Phase der endgültige Regler in TRNSYS implementiert wurde, musste in der Folge auf diesen Schritt aus Zeitgründen verzichtet werden, da allein die Implementierung in TRNSYS mehr Zeit in Anspruch nimmt, als die gesamte Reglerentwicklung in MATLAB inklusive Simulation in SIMULINK.

2.9.2 Vergleich des MATLAB/SIMULINK-Modells mit dem TRNSYS-Modell

Ausgehend von Simulationsdaten des TRNSYS-Modells der Leichtbauvariante wurde ein MATLAB/SIMULINK-Modell parametrisiert, um ein vergleichbares dynamisches Verhalten zu erreichen. Die Parameter wurden vorerst manuell eingestellt. Damit konnte in Simulationen bereits eine gute Übereinstimmung mit dem TRNSYS-Modell erzielt werden. Ziel war die Angleichung der Temperaturverläufe von Vor- und Rücklauftemperatur sowie einer gemittelten Raumlufthtemperatur in einer Simulation über 450 Stunden (18. November 22 Uhr bis 7. Dezember 16 Uhr). Der Verlauf der Aussentemperatur und der Sonnenstrahlung ist in Abb. 28 gezeigt. In Abb. 29 sind die Temperaturverläufe der TRNSYS-Simulation zu sehen, die als Referenz für die Parameteroptimierung dienten. Der zeitliche Verlauf des Stellsignals des TRNSYS-Reglers wird direkt für die Ansteuerung der Wärmepumpe in der Vergleichssimulation verwendet.

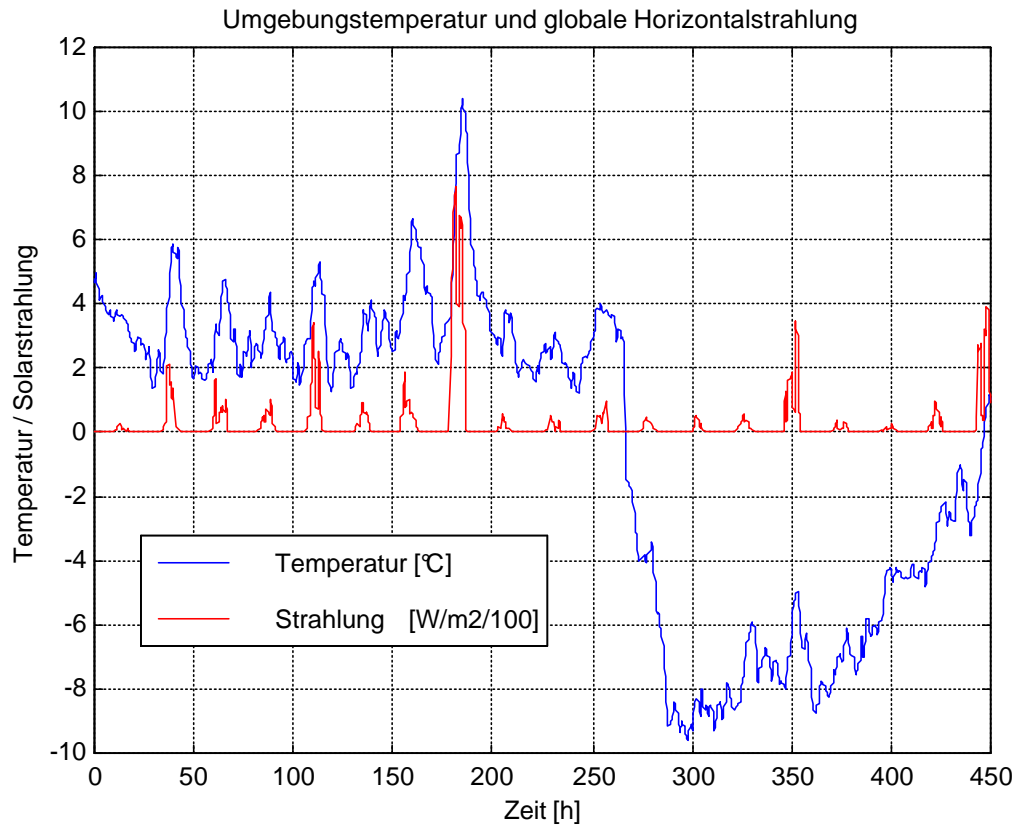


Abb. 28: Wetterverlauf für die Simulationszeit

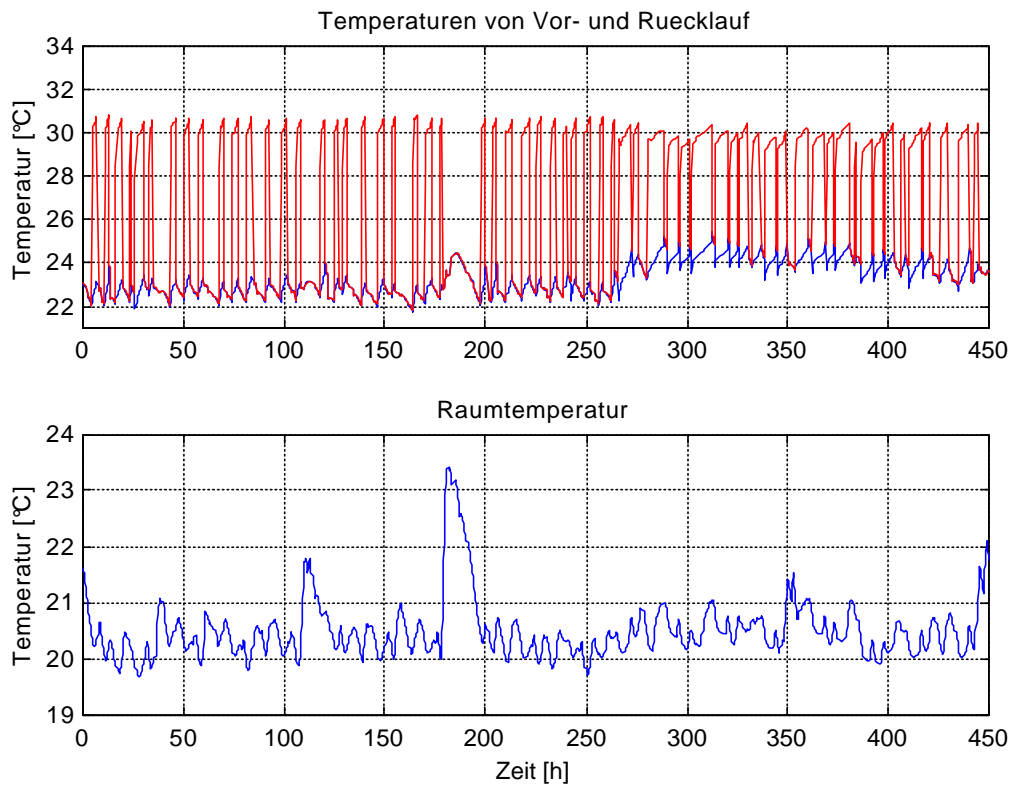


Abb. 29: Temperaturverlauf der TRNSYS -Referenzsimulation

Ausgehend von den manuell gefundenen Parametern wurde mittels einer Optimierungsroutine der Fehler zwischen den Referenzdaten und denjenigen der Vergleichssimulation in MATLAB/SIMULINK minimiert. Zeit [h]

Abb. 30 zeigt die Simulation mit dem optimalen Parametersatz. Dabei wird die Simulation mit geöffnetem Regelkreis durchgeführt. Das heisst, dass die Wärmepumpe zu denselben Zeitpunkten ein- und ausschaltet wie in der TRNSYS-Simulation, unabhängig davon, wie sich das Gebäude verhält. Da sich selbst kleinste Parameterfehler stark auswirken können, ist diese Art der Optimierung von Hand nicht machbar.

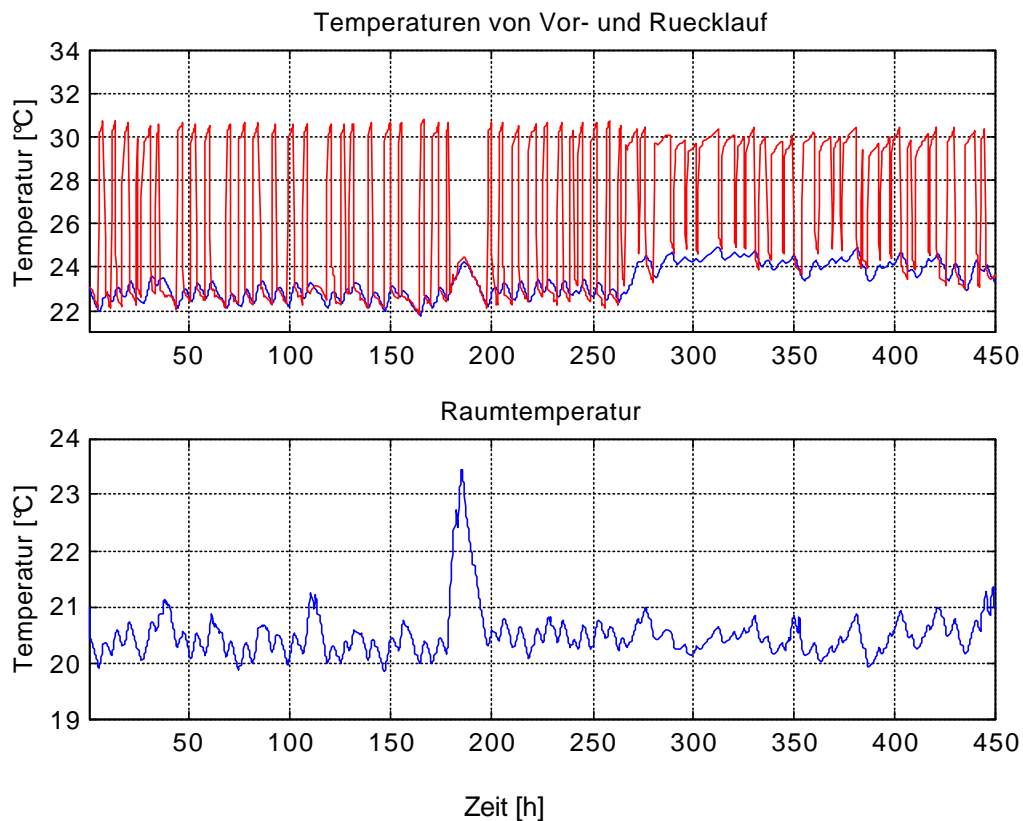


Abb. 30: MATLAB/SIMULINK-Simulation mit optimalen Parametern

2.9.3 Pulsbreitenmodulation

Eine der Voraussetzungen, damit ein linearer Regler funktionieren kann, besteht darin, dass der Regler dem zu regelnden Prozess ein wertkontinuierliches Stellsignal zur Verfügung stellt. Die Wärmepumpe jedoch verlangt ein binäres Stellsignal. Die Pulsbreitenmodulation bietet eine Lösung, um aus dem wertkontinuierlichen Signal des zeitdiskreten arbeitenden Reglers ein binäres Signal umzuformen, so dass im Mittel über der Zykluszeit das Verhältnis zwischen Einschalt- und Zykluszeit dem zeitdiskreten Stellsignal des Reglers entspricht. Der zeitdiskrete Regler berechnet zu jedem Taktzeitpunkt das Stellsignal als Wert zwischen 0 und 1. Werte kleiner als ein gewisser Schwellwert werden anschliessend in einer Korrektur auf 0 ab- und Werte über dem komplementären Schwellwert auf 1 aufgerundet. Damit wird verhindert, dass die Wärmepumpe für eine zu kurze Zeit ein- oder ausgeschaltet werden muss. Die Anzahl Einschaltungen kann so ohne relevanten Einfluss auf das Raumklima reduziert werden.

Die Hauptschwierigkeit bei der Implementation der Pulsbreitenmodulation für die Wärmepumpenregelung ist die Wahl der Zykluszeit. Eine zu gross gewählte Zeit zwingt dem Heizungssystem eine zu grosse Trägheit bezüglich Störkompensation auf. Zusätzlich schwankt die Raumtemperatur stärker. Wird die Zykluszeit zu klein gewählt, wird die Wärmepumpe zu häufig eingeschaltet, so dass sie schneller abgenützt wird. Zudem fallen die Einschaltverluste stärker ins Gewicht; die Arbeitszahl wird reduziert.

reduziert. Allerdings kann nur schon durch die Wahl der Pulsbreitenmodulation am Reglerausgang ausgeschlossen werden, dass die Wärmepumpe taktet.

Eine Verbesserung der Pulsbreitenmodulation kann erreicht werden, wenn das Reglerausgangssignal ständig ausgewertet wird und von der strikten Periodenlänge abgewichen wird. Die Laufzeit der Wärmepumpe berechnet sich als Produkt des Reglerausgangs mit der Zykluszeit. Falls die effektive Laufzeit der berechneten entspricht, wird die Wärmepumpe ausgeschaltet. Anschliessend wird das zu eins komplementäre Signal des Reglers verwendet, um die Ausschaltzeit der Wärmepumpe zu berechnen. Falls die Wärmepumpe die Ausschaltzeit erreicht hat, wird sie wieder eingeschaltet. Bei einem konstanten Reglersignal entspricht die Summe von Laufzeit und Ausschaltzeit genau der Periodendauer. Bei einer Störung ist damit eine sofortige Abschaltung der Wärmepumpe möglich.

2.9.4 Hy-Reglerentwurf unter Einbezug der Aussentemperatur

Der Regler besteht gemäss Abb. 31 aus drei Teilen. Ein modellbasiert entworfener linearer Teil berechnet den zum Erreichen der gewünschten Raumtemperatur nötigen Wärmestrom u_{in} . Aus dem Wärmestrom wird in einem zweiten Teil das im aktuellen Betriebspunkt notwendige Verhältnis u_{per} der Laufzeit der Wärmepumpe zur Periodendauer berechnet. Der dritte Teil setzt das Verhältnis in das eigentliche Stellsignal u_{WP} für die Wärmepumpe um. Zwei interne Rückführungen verbessern den linearen Regler Teil markant. Mit u_{beg} wird die Begrenzung der momentanen Leistung für ein sog. „Anti-Windup“ (Begrenzung 0÷1) verwendet, da die Wärmepumpe nicht weniger als „nicht laufen“ und nicht mehr als „konstant durchlaufen“ kann. Anstatt des im Entwurf direkt zurückgeführten linearen Stellsignals wird dem Beobachter u_{eff} als die momentan effektiv von der Wärmepumpe erzeugte Wärmeleistung eingegeben.

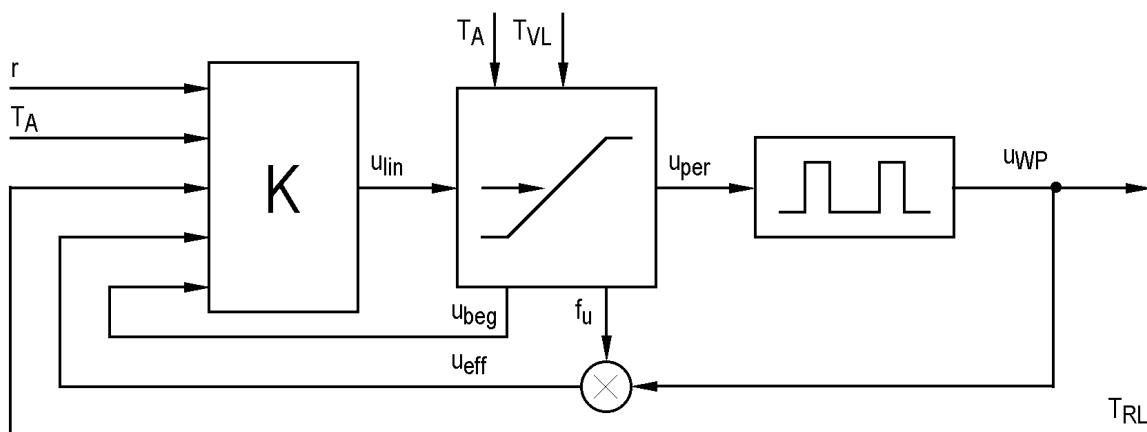


Abb. 31: Gesamtstruktur des Reglers

2.9.5 Entwurf des linearen Reglers

Beim Entwurf des linearen Regler teils werden drei Teilaufgaben unterschieden: eine Vorsteuerung, eine Störgrössenkomensation und eine Rückführung. Eingangsgrössen sind der Sollwert der Referenzraumtemperatur, die Aussentemperatur und die Rücklauf temperatur. Im Entwurf des Rückführreglers wird auf die Kompensation des nicht messbaren Wärmestromes durch Solarstrahlung besonderen Wert gelegt. Abb. 32 zeigt das Entwurfsschema mit den Erweiterungen der dynamischen Gewichtungen. G ist das lineare Gebäudemodell, mit drei Eingangsgrössen u (Wärmeleistung der Wärmepumpe u_{in}), d (Aussenlufttemperatur T_A) und s (Solarer Wärmegewinn Q_S) und den zwei Ausgangsgrössen y (nichtmessbare Zielgrösse Raumlufttemperatur T_R) und m (Messgrösse Rücklauf temperatur T_{RL}).

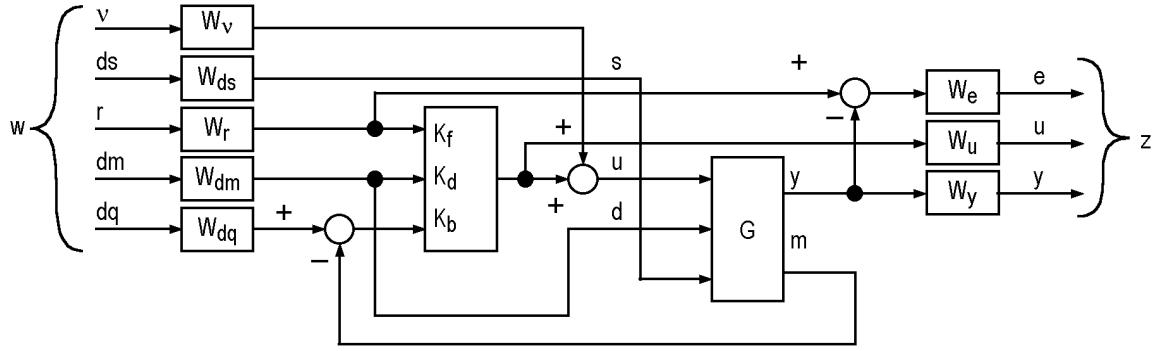


Abb. 32: Entwurfsschema des linearen Reglers

Die Gesamtübertragungsfunktion T_{zw} der erweiterten Strecke (Modellstrecke mit Gewichtungen) lautet demnach:

$$T_{zw} = \begin{bmatrix} W_e \\ W_u \\ W_y \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -G_{yu} \cdot S - G_{ys} + G_{yu} \cdot K_b \cdot S \cdot G_{ms} & 1 - G_{yu} \cdot S \cdot K_f - G_{yd} - G_{yu} \cdot S \cdot K_d - G_{yu} \cdot S \cdot K_b \\ S & -G_{ys} \cdot S \cdot K_f & S \cdot K_d & S \cdot K_b \\ G_{yu} \cdot S & G_{ys} - G_{yu} \cdot K_b \cdot S \cdot G_{ms} & G_{yu} \cdot S \cdot K_f & G_{yd} + G_{yu} \cdot S \cdot K_d & G_{yu} \cdot S \cdot K_b \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} W_n \\ W_{ds} \\ W_r \\ W_{dm} \\ W_{dq} \end{bmatrix}$$

Gl. 10

wobei die Sensitivität S

$$S = \frac{1}{1 + K_b \cdot G_{mu}}$$

Gl. 11

eingesetzt wurde. Der Sinn und Zweck der Gewichtungen ist es, durch eine zusätzliche Multiplikation der Übertragungsfunktionen gezielt Einfluss auf das Verhalten des Gesamtsystems nehmen zu können. Die Reglersynthese wird versuchen, einen Regler zu finden, so dass der Einfluss aller Übertragungsfunktionen bei allen Frequenzen unter einem Schwellwert γ bleiben.

Mathematisch formuliert bedeutet das, dass

$$\|T_{zw}(w)\|_{\infty} \leq g$$

Gl. 12

gelten muss. Je grösser eine Gewichtung in einem bestimmten Frequenzbereich gewählt wird, umso kleiner wird die Abweichung der gewichteten Übertragungsfunktion in diesem Frequenzbereich sein. Damit die Raumtemperatur trotz nicht messbaren Solargewinnen in einem begrenzten Band gehalten werden kann, muss vor allem die Übertragungsfunktion von der Störung ds zum Regelfehler e mit W_e und W_u in

$$T_{eds} = W_e \cdot (-G_{ys} + G_{yu} \cdot K_b \cdot S \cdot G_{ms}) \cdot W_{ds}$$

Gl. 13

stark gewichtet werden. Der Rückführregler wird so gezwungen, bereits bei kleinen Abweichungen der beobachteten Raumtemperatur vom Sollwert stark einzugreifen. Damit die drei Subregler unabhängig voneinander eingestellt werden können, werden vorerst W_y und W_u klein gewählt und W_e auf 1 gesetzt. Es hat sich gezeigt, dass eine Forderung an die Sensitivität S immer eine Verschlechterung von T_{eds} mit sich bringt. Es wurde deshalb $W_v = 0$ gesetzt. Da keine Forderungen an die Rücklauf-temperatur gestellt werden sollen, weil eine Raumlufttemperaturregelung gewünscht ist, wird $W_{dq} = 0$ gewählt. Anschliessend kann durch Veränderung der verbleibenden Gewichtungen W_{ds} , W_r und W_{dm} ein Kompromiss der Reglerdynamik gesucht werden. Da die komplementäre Sensitivität in diesem

Schema nicht vorkommt, musste eine andere Art der Bandbreitenbeschränkung gesucht werden. Es hat sich gezeigt, dass die Bandbreite des Reglers am einfachsten durch Wahl der Eckfrequenz eines realen Differentiators in W_u eingestellt werden kann. In Abb. 33 sind die Gewichtungen aufgezeigt.

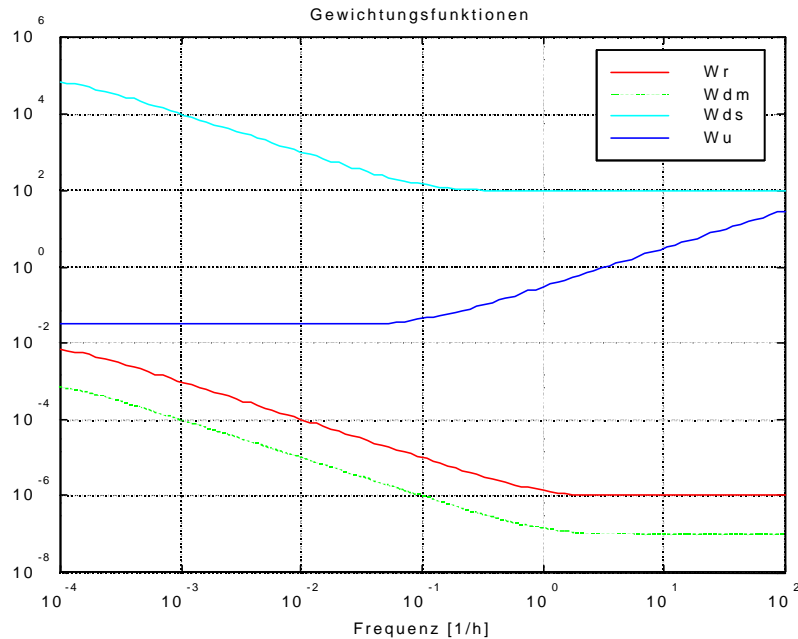


Abb. 33: Gewichtungsfunktionen des Reglerentwurfes ohne Sonnenfühler

Der so entstandene Regler funktioniert in einer linearen Simulation hervorragend wie die Übertragungsfunktionen des geschlossenen Regelkreises in Abb. 34 zeigen. Bei kleinen Frequenzen ist der Einfluss sowohl der Solarstrahlung (T_{yds}) als auch der Aussentemperatur (T_{ydm}) auf die Regelgröße (Raumlufthtemperatur) klein. Dies bedeutet, dass Störungen ohne bleibenden Regelfehler wegkompensiert werden. Die Folgeregelung vom Soll- auf den Istwert der Raumlufthtemperatur (T_{yr}) arbeitet ohne Nachlauffehler.

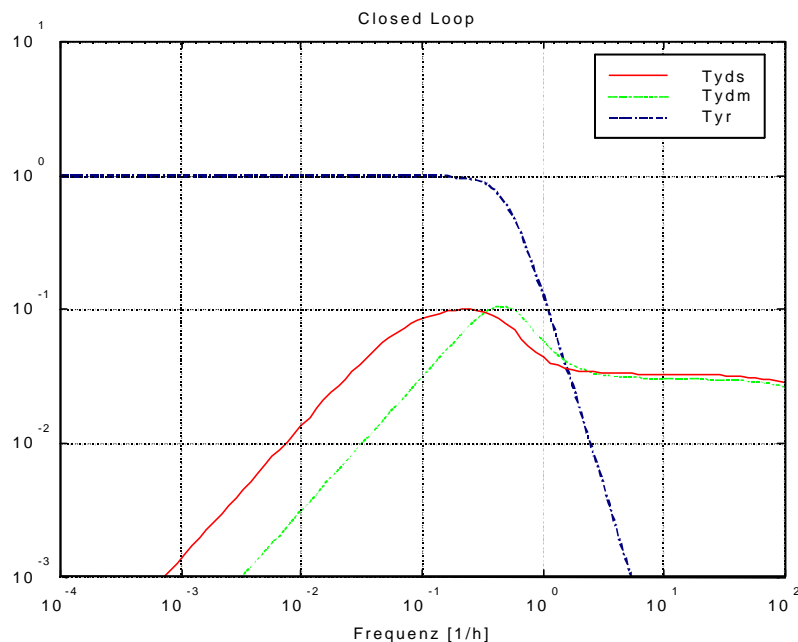


Abb. 34: Übertragungsfunktionen des geschlossenen Regelkreises ohne Sonnenfühler

2.9.6 Implementation des Reglers mit Stellsignalbegrenzung

Für die Implementation mit der pulsbreitenmodulierten Wärmepumpe drängen sich noch zwei Zusätze des Reglers auf. Zuerst muss dem Beobachter das effektive Stellsignal der Pulsbreitenmodulation anstelle des linearen Stellsignals der internen Rückführung zugeführt werden. Ausgehend von der Zustandsraumdarstellung des Reglers

$$\dot{z} = A_c \cdot z + B_c \cdot y$$

$$u = C_c \cdot z$$

Gl. 14

mit

$$A_c = A_p - H \cdot C_p - B_p \cdot G$$

$$B_c = H$$

$$C_c = G$$

Gl. 15

kann die neue Zustandsrückführmatrix

$$\tilde{A}_c = A_c + H \cdot C_p = A_c + B_c \cdot C_p$$

Gl. 16

und die erweiterte Eingangsmatrix

$$\tilde{B}_c = [B_c \quad B_{p,u}]$$

Gl. 17

mit

$$\tilde{y} = \begin{bmatrix} y \\ u_{eff} \end{bmatrix}$$

Gl. 18

verwendet werden, wobei u_{eff} der momentanen Leistung der Wärmepumpe entspricht. Das neue Differentialgleichungssystem des Reglers lautet nun:

$$\dot{z} = \tilde{A}_c \cdot z + \tilde{B}_c \cdot \tilde{y}$$

Gl. 19

Der zweite Zusatz ist die Implementierung eines Anti-Windup des Stellsignals. Dabei ist es besonders wichtig, dass die Beobachterdynamik durch eine Begrenzung des Stellsignals nicht beeinträchtigt wird. Mit der gewählten Methode [Christen 96a, Christen96b] konnte dies erreicht werden. Gl. 10 wird mit dem Begrenzungsregler K_a folgendermassen ergänzt.

$$\dot{z} = \tilde{A}_c \cdot z + \tilde{B}_c \cdot \tilde{y} + K_a \cdot u_{beg}$$

Gl. 20

2.9.7 Berechnung des Laufzeitverhältnisses

Da die Wärmepumpe bei verschiedenen Betriebspunkten ganz unterschiedliche Wärmeleistungen erbringt, wurde bei der Linearisierung der Heizungsanlage nicht von einer mittleren Leistung in einem Betriebspunkt ausgegangen, sondern von einer hypothetischen Widerstandsheizung von 10 kW, deren aktuelle Wärmeleistung vom Regler kontinuierlich eingestellt werden kann. Der Ausgang des linearen Reglers entspricht damit der geforderten Wärmeleistung. Unter Verwendung der Herstelleranga-

ben kann nun aus dem Quotient zwischen der geforderten und dem momentan erreichbaren Wärmeleistung das Verhältnis u_{per} der Laufzeit zur Zykluszeit berechnet werden, wie in Abb. 35 gezeigt. Weiter wird die Differenz zwischen gefordertem und erfüllbarem Wärmestrom als u_{beg} und der Faktor f_u zwischen momentaner Leistung der Wärmepumpe und der Konstanten des linearen Entwurfes ausgegeben.

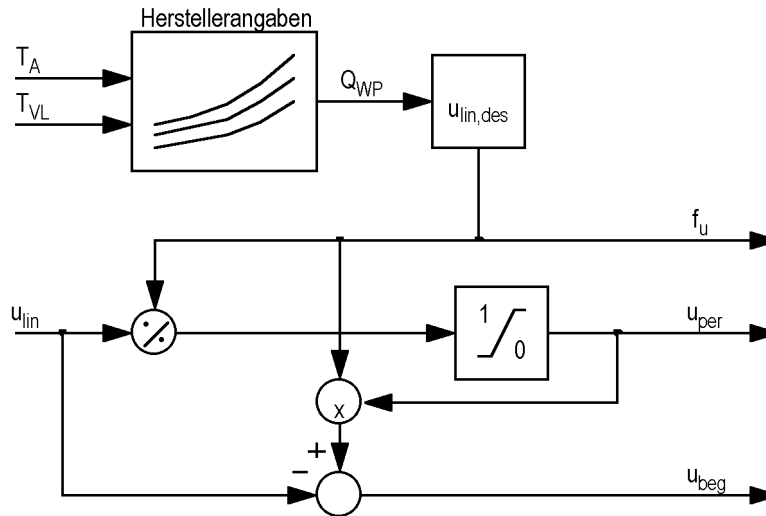


Abb. 35: Signalflussbild der Pulsbreitenberechnung

2.9.8 Implementation der Pulsbreitenmodulation

Die Pulsbreitenmodulation berechnet aus dem Verhältnis u_{per} und der Zykluszeit (τ_z) wieder die geforderte Lauf- (τ_L) und Ausschaltzeit (τ_A) der Wärmepumpe gemäß Gl. 12 resp. 13.

$$t_L = u_{per} \cdot t_z$$

Gl. 21

$$t_A = (1 - u_{per}) \cdot t_z$$

Gl. 22

Die Umsetzung in effektive Ein- und Ausschaltbefehle der Wärmepumpe wird über den Vergleich der jeweiligen Sollzeit mit einem Timer realisiert. Das Signalflussbild dieser Schaltung ist in Abb. 36 gezeigt.

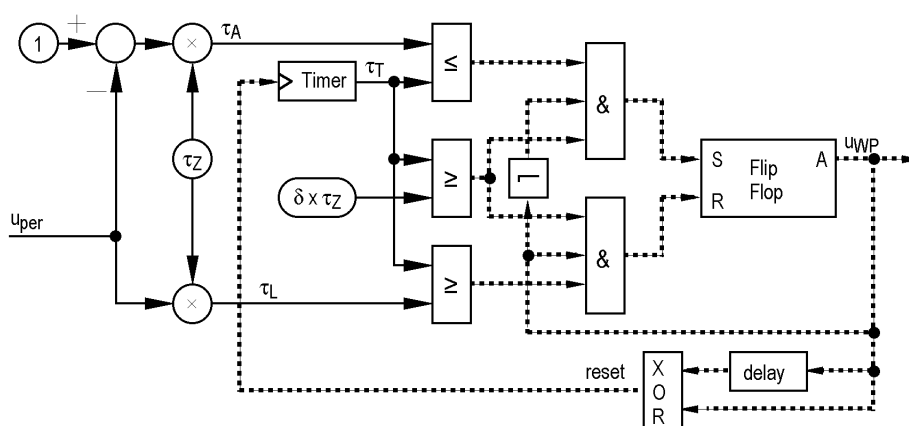


Abb. 36: Signalflussbild der Pulsbreitenmodulation

Damit die Wärmepumpe einschaltet, muss die effektive Ausschaltzeit die vorgegebene Sollzeit überschreiten. Zusätzlich muss die erwartete Laufzeit eine vordefinierte minimale Zeitspanne überschreiten. Die Auschaltbedingung ist analog definiert.

Diese Schaltung funktioniert nur zufriedenstellend, solange das Elektrizitätswerk die berechneten Laufzeiten nicht zwangsunterbricht. Damit die Laufzeiten mit den EW-Sperrzeiten koordiniert werden können, ist die Schaltung wie in Abb. 37 ff. zu erweitern.

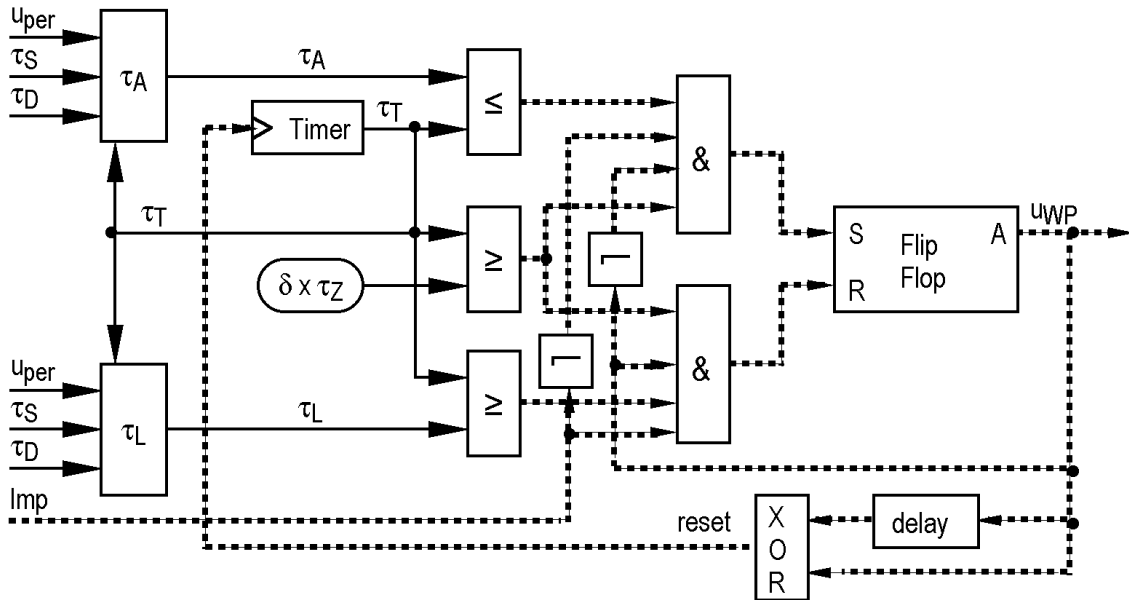


Abb. 37: Signalflussbild der Pulsbreitenmodulation mit Sperrzeitenkorrektur

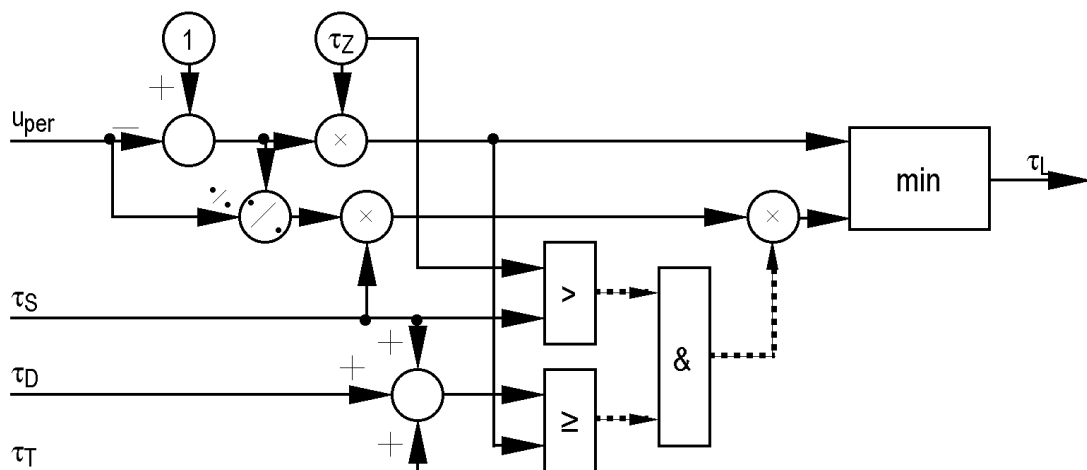


Abb. 38: Signalflussbild der Laufzeitberechnung

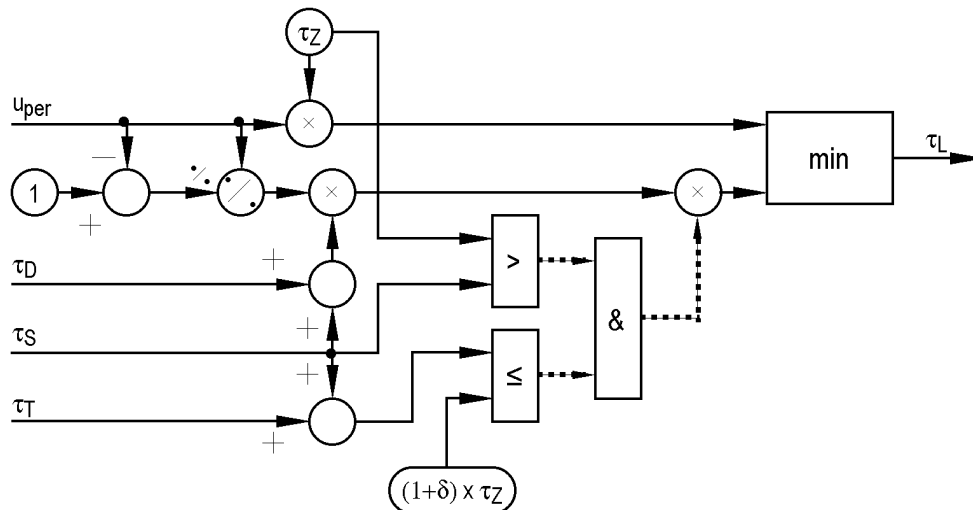


Abb. 39: Signalfussbild der Ausschalzeitberechnung

Das Eingangssignal τ_s ist die Dauer bis zur nächsten EW-Sperre und τ_D die Dauer der nächsten Sperre und Imp das EW-Sperrsignal selber (Abb. 37). Die Einschaltbedingung wurde dabei mit der Bedingung erweitert, dass nicht eingeschaltet werden darf, falls der Beginn der Sperrzeit in die Periode der minimalen Laufzeit fällt und dass nicht innerhalb einer Sperrzeit eingeschaltet werden kann. Die Zeit des Timers wird weiter nicht nur mit der Sollausschalzeit verglichen, sondern auch mit der proportional hochgerechneten Laufzeit bis zum Beginn der Sperrzeit. Die Ausschalbedingung wurde mit dem Impuls der EW-Sperre ergänzt. So wird die Ausschalzeit mit der Sperrzeit synchronisiert, falls die Wärmepumpe zum Beginn der Sperrzeit noch läuft. Weiter wird bei der Berechnung der Laufzeit die Zykluszeit um die voraussichtliche Sperrzeitdauer erweitert, falls eine Sperrzeit ansteht. In Abb. 40 wird die Anpassung der Zykluszeit dargestellt. Der Verlauf a) zeigt Zyklen ohne Sperrzeit. Bei b) fällt bei unveränderten Zykluszeiten der Beginn der Laufzeit der Wärmepumpe in die minimale Laufzeit vor der Sperrzeit hinein. Falls die Wärmepumpe dennoch eingeschaltet wird, läuft sie nur sehr kurz, was mehr Einschaltungen und eine schlechtere Arbeitszahl mit sich bringt. Falls der Einschaltimpuls bis zum Ende der Sperrzeit unterbrochen wird, muss mit einer Abkühlung des Gebäudes gerechnet werden. Abhilfe schafft eine Verlängerung der Zykluszeit bis zum Ende der Sperrzeit. Im Mittel wird die notwendige Wärmemenge zugeführt und eine Abkühlung kann vermieden werden. Der Verlauf c) zeigt das Verhalten der Schaltung, wenn die Wärmepumpe vor einer Sperrzeit ausgeschaltet ist. In diesem Fall kann durch eine Verkürzung der Zykluszeit noch eine Laufzeit vor der Sperre eingeschoben werden.

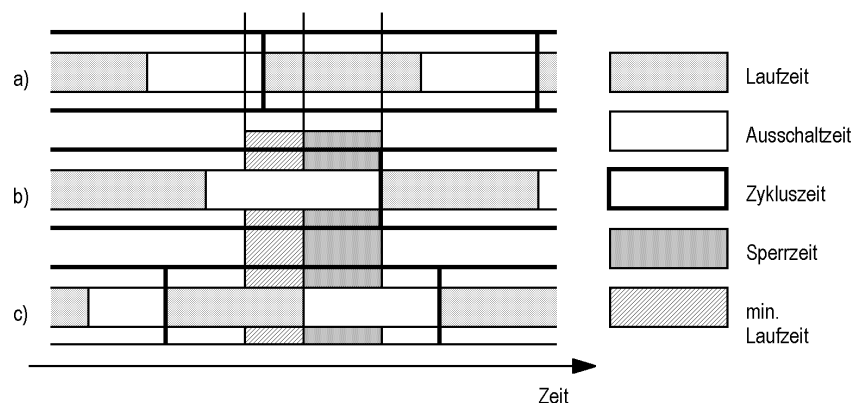


Abb. 40: Anpassung der Zykluszeit für Sperrzeiten

2.9.9 H_∞ -Reglerentwurf unter Einbezug von Aussentemperatur und Solarstrahlung

Der Entwurf wurde grundsätzlich analog zum obigen Kapitel durchgeführt. Deshalb wird an dieser Stelle nur auf Änderungen eingegangen.

Abb. 41 zeigt das Entwurfsschema für den linearen Regler und Gl. 12 die Gesamtübertragungsfunktion T_{zw} der erweiterten Strecke. Die Störgrößenkompensation wird für die Aussentemperatur und die Solarstrahlung separat durchgeführt, damit auf die unterschiedliche Dynamik des Störeinflusses Rücksicht genommen werden kann. Bei diesem Entwurf wird nicht darauf eingegangen, dass es neben der Solarstrahlung noch weitere (nichtmessbare) Wärmeströme gibt, die auf die Raumtemperatur Einfluss haben.

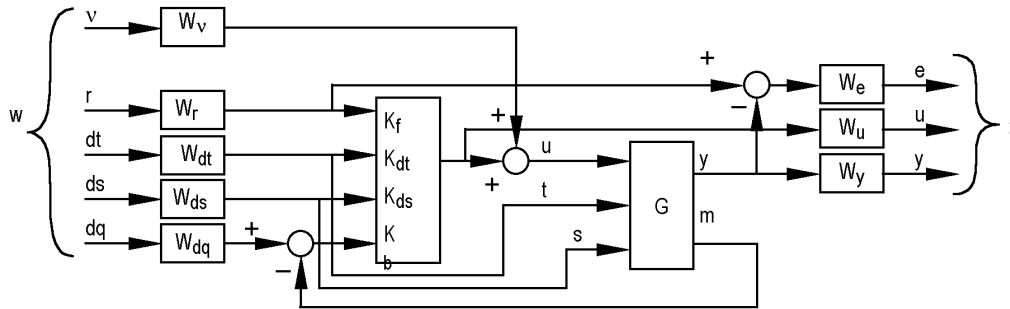


Abb. 41: Entwurfsschema des Reglers mit Solarfühlers

$$T_{zw} = \begin{bmatrix} W_e \\ W_u \\ W_y \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -G_{yu} \cdot S & 1 - G_{yu} \cdot S \cdot K_f & -G_{yt} - G_{yu} \cdot S \cdot K_{dt} & -Gs - G_{yu} \cdot S \cdot K_{ds} & -G_{yu} \cdot S \cdot K_b \\ S & S \cdot K_f & S \cdot K_{dt} & S \cdot K_{ds} & S \cdot K_b \\ G_{ys} \cdot S & G_{yu} \cdot S \cdot K_f & G_{yt} + G_{yu} \cdot S \cdot K_{dt} & G_{ys} + G_{yu} \cdot S \cdot K_{ds} & G_{yu} \cdot S \cdot K_b \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} W_n \\ W_r \\ W_{dt} \\ W_{ds} \\ W_{dq} \end{bmatrix}$$

Gl. 23

Die Gewichtungen W_y und W_v wurden klein gewählt. Damit alle Subregler mittels integrierendem Verhalten Regelfehler bis auf null ausregeln, wurde W_u als realer Differentiator ausgelegt. In Abb. 42 sind die Gewichtungsfunktionen und in Abb. 43 die Übertragungsfunktionen des geschlossenen Regelkreises aufgetragen.

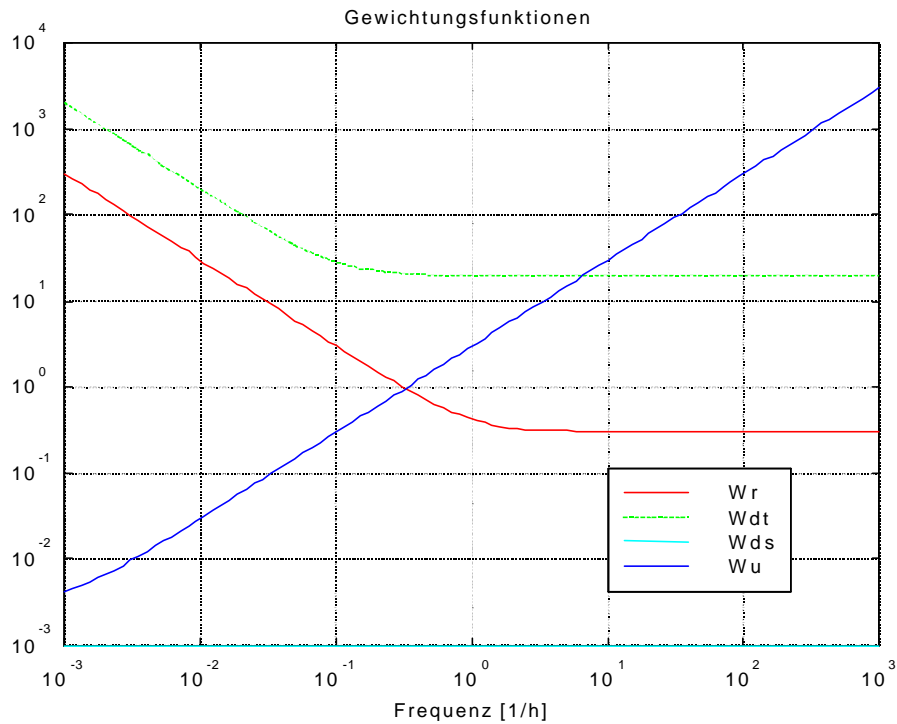


Abb. 42: Gewichtungsfunktionen des Reglerentwurfes mit Sonnenfühler

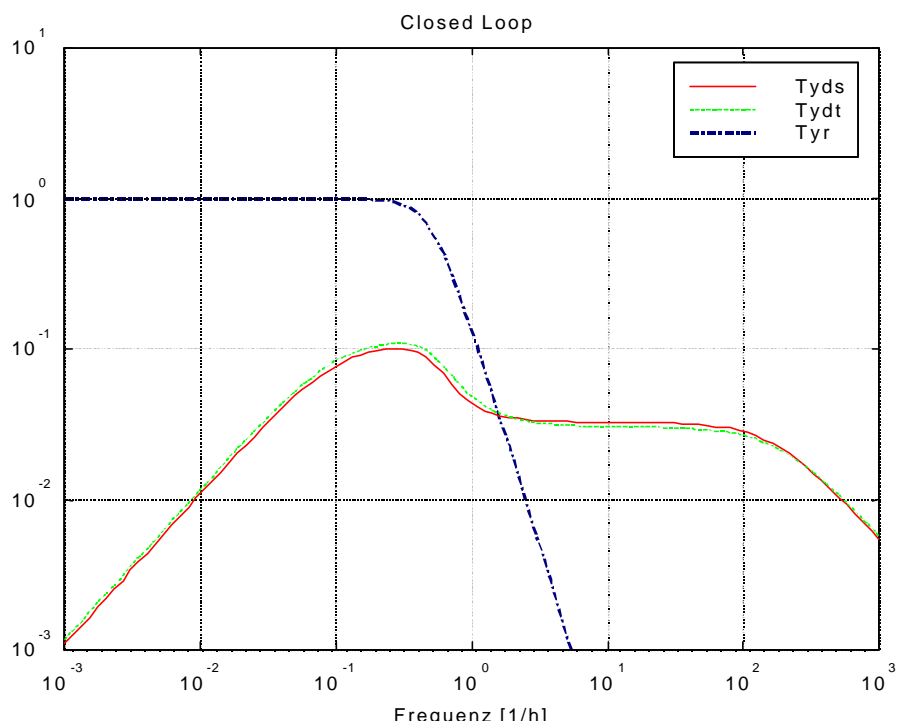


Abb. 43: Übertragungsfunktionen des geschlossenen Regelkreises mit Sonnenfühler

Dass der Regler trotz der zusätzlichen Information nicht im gesamten Frequenzbereich besser wird, ist darauf zurückzuführen, dass die Solarstrahlung schneller stören kann als eine noch so schnell reagierende Wärmepumpe zu kompensieren im Stande ist.

2.10 Versuche auf der Testanlage

2.10.1 Anforderungen und Versuchsablauf

Für die Simulationen wurde ein dynamisches Modell der Wärmepumpe eingesetzt. Um zu prüfen, ob die Regelung auch mit der realen Wärmepumpe wie vorgesehen funktioniert, wurde auf dem Prüfstand der Firma Mani & Fink AG die Wärmepumpe in einer emulierten Umgebung eingesetzt. Dabei wird die reale Umgebung der Wärmepumpe so geregelt, dass sie derjenigen im simulierten Gebäude entspricht. Auf der Seite der Wärmequelle bedeutet dies, dass die Temperatur und Feuchte der Umluft in der Prüfkammer einem vorgegebenen zeitlichen Verlauf folgen, unabhängig davon, ob die Wärmepumpe läuft oder ausgeschaltet ist. Auf der Heizkreisseite werden die effektiven Temperaturen von Luft und Vorlauf gemessen. Sie dienen als Eingangsgrößen für die Simulation des Gebäudemodells. Die Wärmepumpeneintrittstemperatur folgt deshalb nicht einem vorgegebenes Profil sondern der berechneten Rücklauftemperatur der Simulation. In Abb. 44 sind die Schnittstellen zwischen der realen Wärmepumpe und ihrer emulierten Umwelt dargestellt.

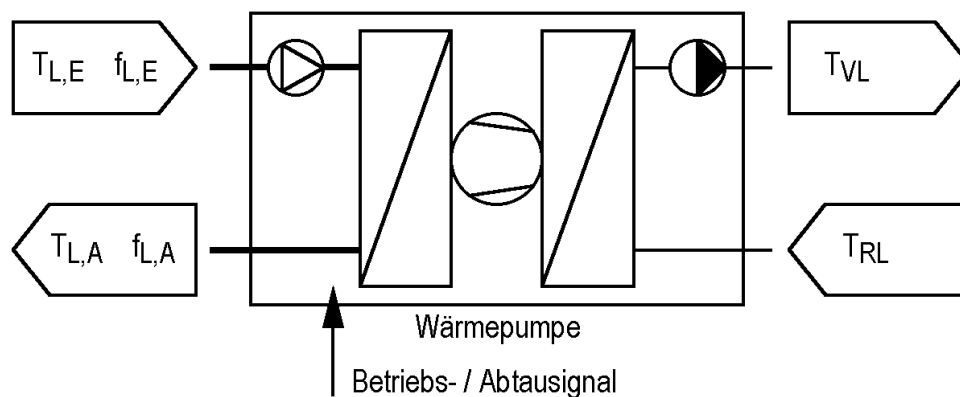


Abb. 44: Schnittstellen zwischen Realität und Emulation

Zwei Ziele stehen bei der Emulation im Vordergrund. Einerseits soll die Auswirkung des Unterschieds zwischen der realen und der modellierten Wärmepumpe auf das Regelverhalten ermittelt werden und andererseits die Lauffähigkeit des implementierten Reglers nachgewiesen werden.

2.10.2 Aufbau der Testanlage

Ursprünglich war vorgesehen, direkt die vorhandene Regelung des Prüfstandes für die Umsetzung der Sollwerte der Emulation zu verwenden. Leider hat es sich gezeigt, dass die für stationäre Messungen ausgelegte Prüfstandsregelung bei transienten Vorgängen viel zu langsam und schlecht gedämpft reagierte. Deshalb musste die gesamte Prüfstandsregelung vom Emulationsrechner durchgeführt werden.

Damit die Rücklauftemperatur sowohl während der Laufzeit als auch während der Stillstandszeit der Wärmepumpe und vor allem während der Abtauung mit Prozessumkehr auf den gewünschten Wert geregelt werden kann, muss auf der Heizkreisseite sowohl gekühlt als auch geheizt werden können. In Abb. 45 ist der Aufbau des Prüfstandes schematisch dargestellt.

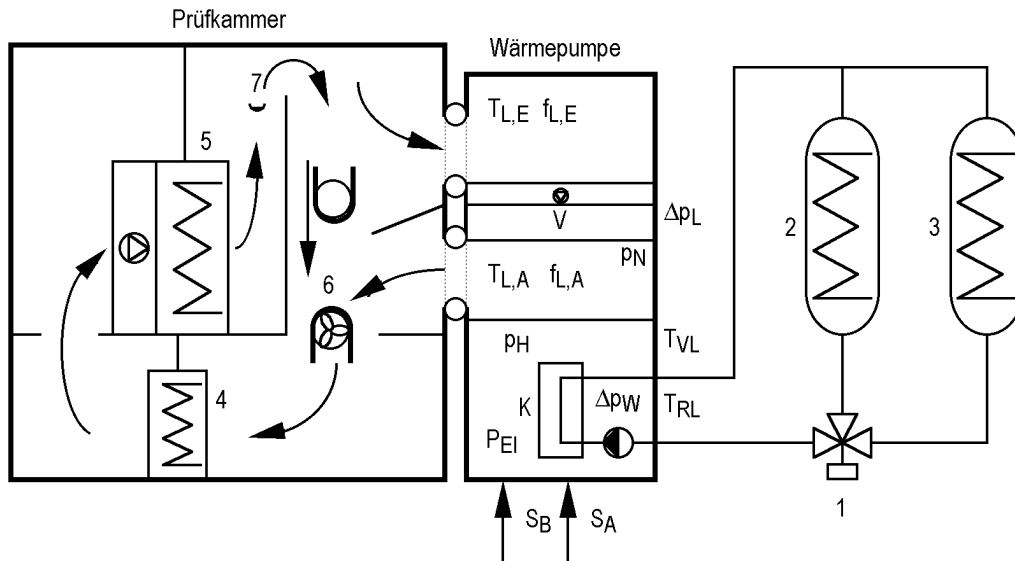


Abb. 45: Prüfstands Aufbau

Zur Regelung der Rücklauftemperatur wird Wasser aus einem beheizten Tank (2) und einem gekühlten Tank (3) gemischt. Dies ist zwar nicht die energieeffizienteste Realisierung der Heizkreisseite, kann aber mit einem Dreiwegeventil vergleichsweise einfach geregelt werden. Auf der Luftseite ist ein Ringkanal in der Prüfkammer eingerichtet, in der die Luft sowohl durch einen gekühlten (5) als auch durch einen beheizten (4) Wärmetauscher geführt wird.

Da beide Wärmetauscher einen Druckverlust nach sich ziehen, bildete sich in der Folge ein Unterdruck in der Kammer vor dem Ventilator, durch den Umgebungsluft durch undichte Stellen in die Prüfkammer nachströmte. In der Gegenkammer bildete sich gleichzeitig ein kleiner Überdruck, der über die Ausgleichsöffnung für einen Kaltluftstrom sorgte. Dieser ungewollte Luftaustausch führte zu einem immensen Kühlbedarf der Prüfkammer und konnte nur durch konsequentes Abdichten sämtlicher auch noch so kleiner Ritzen in der Kammeroberfläche auf ein erträgliches Mass reduziert werden.

Für die Kühlung des Heizkreises und zur Heizung der Quellenseite wird Sole mit ca. 15 °C verwendet, die über einen grossen Speicher mit einer Erdsonde verbunden ist. Zur Kühlung der Quellenseite wird über eine Sole-Wasser Wärmepumpe ein 500 l Tank mit 35 % Solegemisch auf -10 °C gekühlt. Damit ist eine Temperatur in der Kammer von bis zu -2 °C erreichbar. Tiefer Temperaturen hätten mit einer stärkeren Solemischung erreicht werden können, aber die schnellere Vereisung des Wärmetauschers hätte die Versuchsdauer massiv gekürzt.

Durch die langsamen Transienten des Tagesganges und den grossen Kühlleistungsbedarf der Kammer wird der Heizwärmetauscher während der Emulation nicht benötigt. Die Vereisung des Kühlwärmetauschers während der Versuche war jedoch beträchtlich, so dass zwischen den Emulationen eine Abtauung notwendig war. Mit dem Heizwärmetauscher konnte die Abtauung weitaus am schnellsten durchgeführt werden.

Zur Kompensation des Wärmeentzugs der Wärmepumpe ist ein Gebläse (6) installiert, das während der Laufzeit der Wärmepumpe durch Luftaustausch mit der Umgebung die Temperatur in der Kammer in etwa konstant hält.

Ein Dampfbefeuchter (7) führt der Kammer Feuchtigkeit zu.

Die Wärmepumpe wird direkt mit dem Betriebssignal S_B und dem Abtausignal S_A angesteuert.

2.10.3 Aufbau der Emulation

Die Emulation besteht aus sechs Hauptbestandteilen die in Blöcken gemäss Abb. 46 zusammengefasst sind.

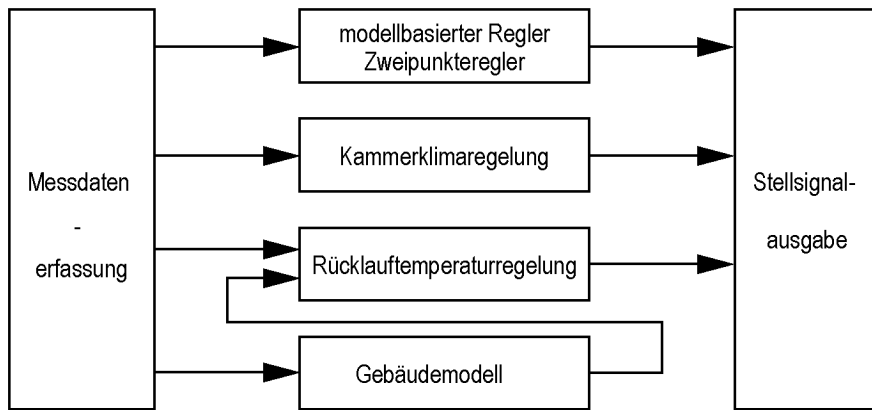


Abb. 46: Grobsignalfussbild der Emulation

In den Blöcken Messdatenerfassung und Stellsignalausgabe werden die Ein- und Ausgabesignale kalibriert und die gemessenen Signale zusätzlich noch gefiltert. Die Blöcke des „modellbasierten Reglers“ oder des „Zweipunktereglers“ und des „Gebäudemodells“ wurden unverändert aus den Systemen kopiert, mit denen bereits die Simulationen durchgeführt wurden. Im Block „Rücklauftemperaturregler“ wird die effektive Rücklauftemperatur über ein Mischventil derjenigen der Emulation nachgeregelt. Im Block „Kammerklimaregelung“ werden die Wärmetauscher und die Dampfbefeuchtung in der Prüfkammer so geregelt, dass das vorgegebene Temperatur- und Feuchteprofil eines Tagesganges nachgefahren wird.

In Abb. 47 ist der für die Emulation verwendete Verlauf des Aussenklimas aufgetragen.

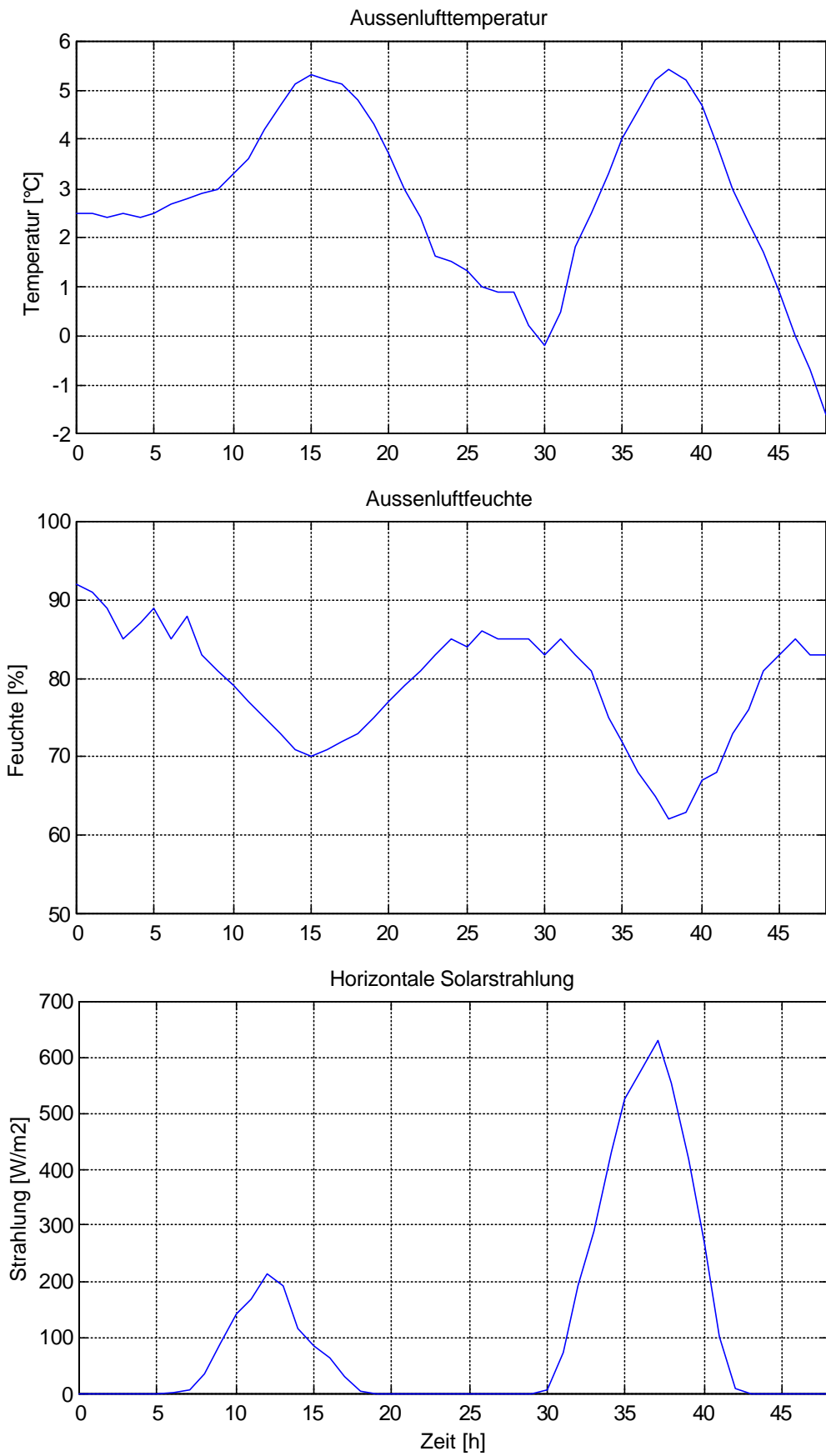
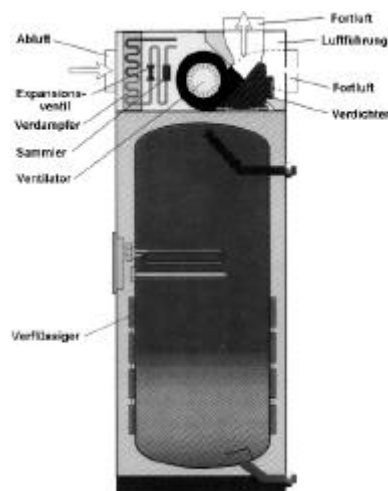


Abb. 47: Verlauf des Aussenklimas

2.11 Wassererwärmung mit einer Abluftwärmepumpe

Bereits in Phase 1 wurde gezeigt, dass die Wassererwärmung bei einer monovalenten Wärmepumpen-Heizung am effizientesten mit einer Abluftwärmepumpe zu erreichen ist [NTH1 96, Seite 52, Abb. 46 und 47]. Neben den energetischen Aspekten sprechen aber auch technische Gründe gegen die Verwendung eines Beistellboilers, der durch eine Luft/Wasser-Heizwärmepumpe geladen wird. Bei ganz tiefen Aussenluft-Temperaturen werden extrem hohe Arbeitsmitteldrücke notwendig, damit das Warmwasser auf 50°C gebracht werden kann. Dies kann durch Verwendung der Abluft als Wärmequelle elegant vermieden werden. Gleichzeitig ergibt sich eine qualitativ bessere Luftqualität durch den kontrollierten Luftwechsel. Die Frischluft wird durch Mauerventile zugeführt.

Diverse Hersteller bieten solche Abluftwärmepumpen an. Seit kurzem sind auch Geräte mit natürlichen Kältemitteln erhältlich. Als typischer Vertreter wurde die Abluftwärmepumpe LWAZ 250 von Stiebel Eltron für die Berechnungen gewählt (Abb. 48). Vom Hersteller wurden für diese Untersuchungen ausführliche Messdaten zur Verfügung gestellt.



Temperaturbereich der Abluft	°C	15 bis 35
Warmwassertemperatur	°C	(45), 55 oder 65
Abluftvolumenstrom	m³/h	125/250/350
Anschlüsse für Luftleitungen	DN	160
Speicherinhalt	l	303
Kältemittel/Füllgewicht	-/g	R290/420
Abmessungen (HxBxT ohne Stutzen)	mm	1792x660x660
Gewicht leer/gefüllt	kg	150/453
Spannung/Frequenz	V/Hz	230/50
COP*	-	3.5
Nennleistungsaufnahme**	kW	0.44
Heizleistung WP***	kW	ca. 1.2
Leistungsaufnahme Heizstab	kW	2.0
Frei verfügbare, externe Pressung	Pa	200 bei 250 m³/h

* bei Luft 20°C/rel. Feuchte 40%/ V250 m³/h nach DIN EN255
** Messpunkt bei 20°C Lufttemp., 40% rel. Feuchte und 45°C Wassertemperatur
*** Mittelwert bei 20°C Lufttemp., 40% rel. Feuchte, Aufheizen von 15 auf 55°

Abb. 48: Aufbau und technische Daten der LWAZ 250 [Stiebel Eltron 97]

2.11.1 Leistungsdaten LWAZ 250

Die Leistungsmessungen wurden vom Hersteller nach EN 255 Teil 6 [prEN 255-6 92] durchgeführt. Die Messeinrichtung ist aus Anhang 1.6 ersichtlich. Bei Abluftwärmepumpen mit Kanalanschluss wird dabei die Messung mit dem vom Hersteller angegebenen verfügbaren Druckverlust für die Anschlusskanäle, der sogenannten "externen Pressung" gemacht. Sämtliche elektrischen Verbraucher werden dabei erfasst. Die Bestimmung des COP_t erfolgt aufgrund von mindestens 2 Zyklen mit Entnahme des halben Speicherinhalts. Der COP_t stellt somit gemäss [prEN 255-6 92] eine Arbeitszahl über den betrachteten Zeitraum der Be- und Entladezyklen dar, in der jedoch nicht die Bereitschaftsverluste während der Stillstandszeit enthalten sind. Die Kaltwasser-Temperatur beträgt 15°C, die Warmwassertemperatur entsprechend der Reglereinstellung 55 oder 65°C, (45 °C ist bei der jetzigen Serieausführung nicht möglich). Die Umgebungstemperatur während der Messung beträgt 15°C. Im Anschluss an die Wasserentnahme-Zyklen werden die Bereitschaftsverluste ermittelt.

Die Bestimmung des COP_t wird wie folgt vorgenommen:

Der elektrische Stromverbrauch des Gerätes für eine halbe Speicherentladung wird rechnerisch reduziert um den anteiligen Lüftungsenergieverbrauch und die Bereitschaftsverluste. Diese beiden Anteile berechnen sich wie folgt (s. Tab. 26):

Anteiliger Lüftungsenergieverbrauch in Wattstunden :

$$W_{\text{eant}} = \dot{V} \cdot \Delta p \cdot t_h / \eta \quad \text{mit} \quad \eta = 0.3$$

Δp = Druckverlust für Anschlusskanäle in Pa
 \dot{V} = Volumenstrom in m³/s
 t_h = Aufheizzeit in Stunden

Gl. 24

Anteiliger Bereitschaftsenergieverlust W_{et} :

$$W_{\text{et}} = P_{\text{es}} \cdot t_h \quad \text{mit} \quad P_{\text{es}} = \text{Effektive Leistungsaufnahme während der Bereit- schäftsperiode}$$

Gl. 25

Die Arbeitszahl COP_t für die Wassererwärmung ergibt sich anschliessend zu:

$$\text{COP}_t = Q_t / (W_{\text{eh}} - W_{\text{eant}} - W_{\text{et}}) \quad \text{mit} \quad Q_t = \text{Wärmeinhalt der entnommenen Wassermenge}$$

W_{eh} = Gemessene Energieaufnahme während der Aufheiz- periode

Gl. 26

Ablufttemp	rel. Feuchte	Volumenstr.	Aufheizzeit t_h nach ½Speicherentnahme			COP _t nach EN 255 Teil 6 bei Wassertemperatur von		
			auf 45°C	auf 55°C	auf 65°C	45°C	55°C	65°C
°C	%	m ³ /h						
15	70	125	4.5	6.4	8.5	3.5	3.3	3.1
20	40	125	4.5	6.4	8.5	3.5	3.3	3.1
35	47	125	3.1	4.3	5.8	5.2	5	4.6
15	70	250	4.2	5.9	7.8	3.7	3.5	3.3
20	40	250	4.2	5.9	7.8	3.7	3.5	3.3
35	47	250	2.9	4.1	5.5	5.3	5	4.7
15	70	350	4.1	5.8	7.7	3.6	3.4	3.2
20	40	350	4	5.5	7.4	3.7	3.6	3.3
35	47	350	2.8	4	5.3	5.2	4.8	4.6

Tab. 26: Kennwerte nach EN 255 Teil 6 [prEN 255-6 92]

2.11.2 Bereitschaftsenergieverbrauch

Der Bereitschaftsenergieverbrauch bei 15°C Umgebungstemperatur und 55°C Wassertemperatur beträgt 1.10 kWh/24h. Für tiefere oder höhere Warmwassertemperaturen kann dieser Verbrauch proportional zur Temperaturdifferenz umgerechnet werden.

2.11.3 Einfluss der Abluft-Enthalpie

Auf der Basis der Messreihen wurde vom Hersteller die Abhängigkeit des COP_t von der Enthalpie der Abluft bestimmt. Angaben liegen nur für die Erwärmung des Warmwassers von 15°C auf 55°C nach Entnahme des halben Speichervolumens vor. Der Enthalpieeinfluss h , und damit der Einfluss der Feuchte, kann durch folgende Gleichungen beschrieben werden [Stiebel Eltron 97]:

$$\text{COP}_t (125 \text{ m}^3/\text{h}, 15 - 55^\circ\text{C}) = 0.05 \text{ h [kJ/kg]} + 1.6$$

$$\text{COP}_t (250 \text{ m}^3/\text{h}, 15 - 55^\circ\text{C}) = 0.0441 \text{ h [kJ/kg]} + 2.0$$

$$\text{COP}_t (350 \text{ m}^3/\text{h}, 15 - 55^\circ\text{C}) = 0.0382 \text{ h [kJ/kg]} + 2.2$$

Gl. 27

2.11.4 Jahresarbeitszahl der Abluftwärmepumpe

Mit den Leistungsdaten und den Kennwerten sind alle Angaben vorhanden, um die Jahresarbeitszahl der Abluftwärmepumpe bestimmen zu können. Sie hängt ab vom Luftvolumenstrom, der rel. Feuchte der Abluft, der Wassertemperatur und der bezogenen Warmwassermenge pro 24h. In der Jahresarbeitszahl nicht enthalten ist der Energieverbrauch des Ventilators zur Überwindung der Kanalverluste, wohl aber derjenige zur Überwindung des Verdampfer-Druckverlustes. Die Kanalverluste sind stark von der Netzlänge und den Umlenkungen abhängig und müssen auf das Konto der Wohnungslüftung verbucht werden.

Da im COP_t die Bereitschaftsverluste nicht enthalten sind, müssen sie für die JAZ wieder eingeführt werden. Sie sind von der Wassertemperatur abhängig und verschlechtern die Jahresarbeitszahl wesentlich, besonders bei kleinen Wasserbezügen pro 24 Stunden. Sie sind der Hauptgrund für den Abfall der JAZ mit sinkenden Wasserbezügen. Die nachfolgenden Diagramme (Abb. 49 bis Abb. 51) zeigen die Resultate der Auswertungen für verschiedene Luftmengen, Wassertemperaturen und Feuchten. Die Ablufttemperatur beträgt konstant 20°C .

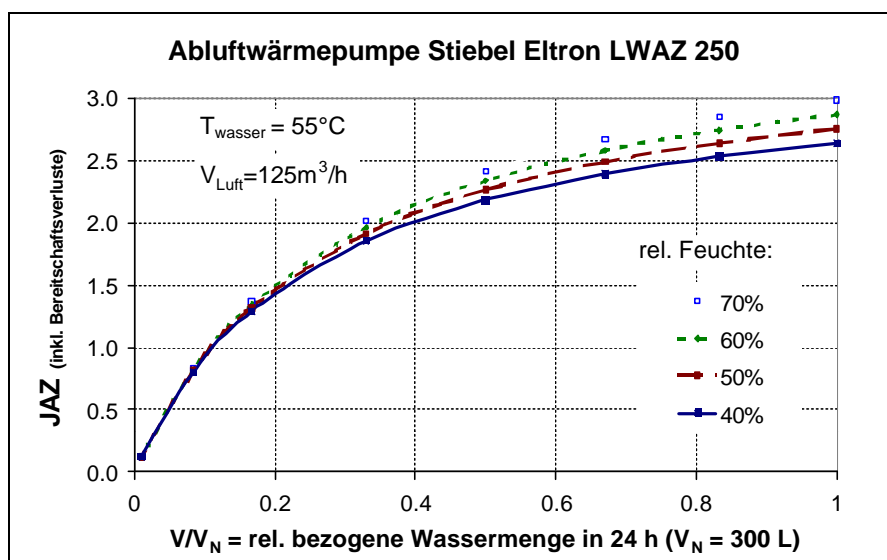


Abb. 49: Jahresarbeitszahl der Abluft-Wärmepumpe LWAZ250 für 55°C Speicherladetemperatur und $125 \text{ m}^3/\text{h}$ Luftvolumenstrom (inkl. Bereitschaftsverluste von 1.1 kWh/d für $55^\circ/15^\circ\text{C}$, ohne Druckverlust der Anschlusskanäle)

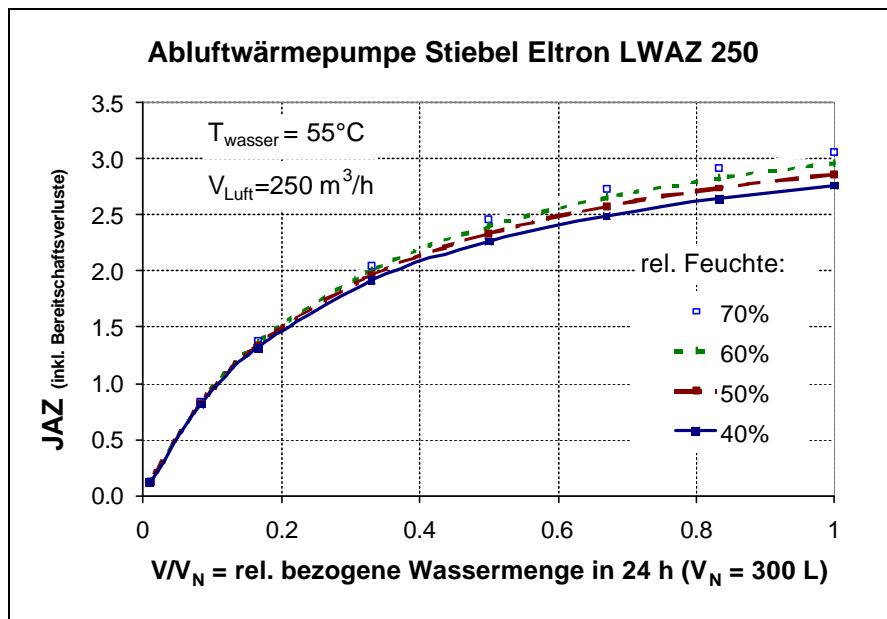


Abb. 50: Jahresarbeitszahl der Abluft-Wärmepumpe LWAZ250 für 55°C Speicherladetemperatur und $250 \text{ m}^3/\text{h}$ Luftvolumenstrom (inkl. Bereitschaftsverluste von 1.1 kWh/d für $55^\circ/15^\circ\text{C}$, ohne Druckverlust der Anschlusskanäle)

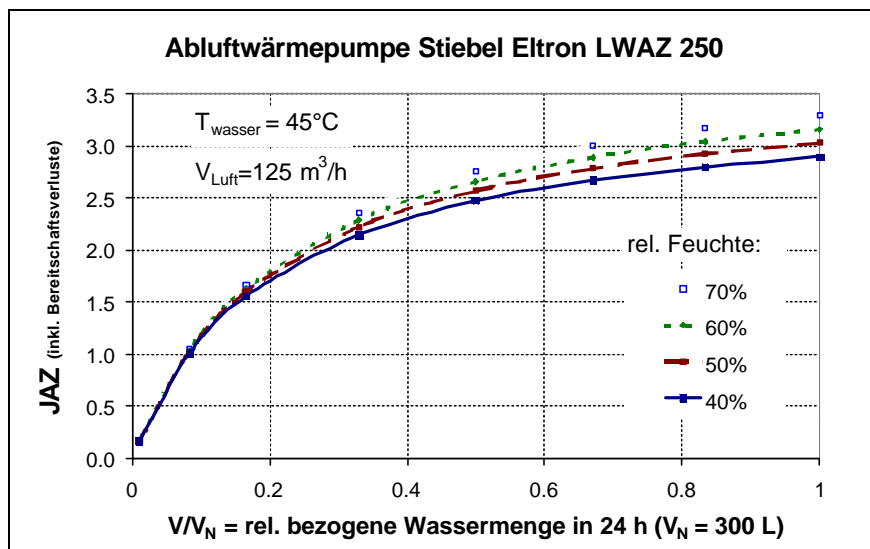


Abb. 51: Jahresarbeitszahl der Abluft-Wärmepumpe LWAZ250 für 45°C Speicherladetemperatur und $125 \text{ m}^3/\text{h}$ Luftvolumenstrom (inkl. Bereitschaftsverluste für $45^\circ/15^\circ\text{C}$, ohne Druckverlust der Anschlusskanäle)

2.12 Kostenvergleich

Die Kosten stellen für die Marktakzeptanz und das Wachstum einer neuen Haustechnologie nach wie vor eine wesentliche Entscheidungsgrösse dar. In der Regel spart der Bauherr eher bei der Haustechnik und investiert lieber in eine luxuriöse Küche oder ein schönes Bad. Als Folge der Treibhausproblematik und ihrer Thematisierung in den Medien spielen jedoch die ökologischen Aspekte eine zunehmend wichtigere Rolle. Die Kosten/Nutzen-Beurteilung wird beeinflusst durch echte Bedürfnisse

nach einem persönlichen Beitrag zur Umwelt- und Ressourcenschonung, durch den Wunsch nach einem nachhaltigen System und auch durch Prestigeüberlegungen. Hervorragende Durchsetzungschancen haben allerdings solche Angebote, deren Mehrpreis gegenüber den konventionellen Lösungen 10 -20 Prozent nicht übersteigt.

2.12.1 Untersuchte Systemvarianten

Aufgrund der Ergebnisse von Phase 1 [NTH1 96] stehen für die Komfortwärme-Erzeugung im Niedrigenergiehaus folgende Wärmepumpen-Systeme im Vordergrund:

- Luft/Wasser-Wärmepumpe in Kombination mit einer Abluftwärmepumpe zur Wassererwärmung
- Sole/Wasser-Wärmepumpe mit Beistellboiler zur Wassererwärmung u. Zuluft/Abluft-Wärmetauscher
- Luft/Luft-Wärmepumpe mit Zuluft/Abluft-Wärmetauscher und Ansaugung über Erdregister, Wassererwärmung mit zweitem Wärmepumpen-Kondensator (nachträglich für Phase 3 aufgenommen)

Als Konkurrenz-Systeme wurden folgende Varianten einbezogen:

- Ölheizung mit Beistellboiler (Winter: Öl, Sommer: Elektroheizstab) u. Zuluft/Abluft-Wärmetauscher
- Gasheizung kondensierend mit Beistellboiler und Zuluft/Abluft-Wärmetauscher
- Holzheizung zentral in Kombination mit einem Zuluft/Abluft-Wärmetauscher und Elektroboiler (oder Solarkollektor) zur Wassererwärmung

2.12.2 Detailangaben zu den Wärmepumpen-Systemen

Die Kostenangaben für die drei Wärmepumpen-Systeme entsprechen den realen Offerten für die Pilotanlagen von Phase 3. Sie stellen typische Angebote für diesen Leistungsbereich dar. Die Angaben für den Kostenvergleich sind im Anhang 1.7 enthalten.

Die Firma Piatti AG hat zusätzlich für ihre NOAH-Siedlungen aussenaufgestellte Luft/Wasser-Wärmepumpen mit Elektroboiler offerieren lassen. Die komplette Wärmezeugung und -Verteilung (System 45°/35°) inklusive Elektroboiler liegt bei rund 23'000 Franken und liegt damit im Bereich einer Ölheizung mit Kombikessel. Aus Gründen der Energieeffizienz wird die Luft/Wasser-Wärmepumpe in der Pilotanlage 2 mit einem Abluft-Wärmepumpen-System kombiniert, das rund 8'000 Franken teurer ist als ein Elektroboiler.

2.12.3 Detailangaben zu den Öl- und Gassystemen

Die Kostenangaben für die konventionellen Wärmesysteme mit Öl und Gas wurde aus diversen Angeboten und Quellen erarbeitet [Bircher 98], [Küng 98], [Koster 98], [Piatti 98]. Bei der Ölheizung wurde ein 16-Kilowatt-Heizkessel mit Beistellboiler eingesetzt, der kostengünstig in grossen Serien produziert wird. Die Wassererwärmung erfolgt im Winter durch den Heizkessel, im Sommer durch den Elektroheizstab. Die Gasheizung wird im NOAH-Haus typischerweise im Dachgeschoss eingebaut und profitiert zudem von einem kurzen Kamin mit Doppelmantelrohr inkl. Frischluftzuführung. Die Wassererwärmung erfolgt über einen Beistellboiler. Zum Vergleich wurde auch beim Gas eine Offerte an die Piatti AG beigezogen. Die komplette Wärmezeugung und -Verteilung (50°/40°-System) inkl. Wassererwärmung wurde für eine NOAH-Siedlung zu rund 16'500 Franken offeriert. Erstaunlicherweise verlangt das Gaswerk keine Anschlusskosten bis zur zentralen Verteilstation. Zudem sind in den Angeboten an Immobilienfirmen Rabatte enthalten für die Installation mehrerer Einheiten. Die Planungskosten für die Wärmeverteilung können auf mehrere Einheiten verteilt werden. Dadurch werden die Investitionskosten sehr günstig. Der Verzicht auf Anschlussgebühren bei der Gasheizung scheint die Regel zu sein bei Siedlungen mit zentraler Einspeisung, nicht aber bei alleinstehenden Einfamilienhäusern. Zwecks Vergleichbarkeit wurde deshalb eine Anschlussgebühr eingesetzt und das Preisniveau (zur Kompensation des Stückzahleinflusses) um 10% angehoben.

2.12.4 Detailangaben zum Holzheizungssystem

Die zentrale Holzheizung ohne Wärmeverteilsystem in Kombination mit einer Zuluft/Abluftanlage mit WRG ist besonders im Niedrigenergiehaus schon mehrmals eingesetzt worden. Sie bedingt eine offe-

ne Bauweise, damit alle Wohnräume angenehme Raumtemperaturen erhalten. Als typischer, neuer Vertreter für eine Zu-/Abluftanlage wurde das System Eco Confort ausgewählt. Es zeichnet sich dadurch aus, dass die Zuluft in mehreren kleinen Rohren durch den Deckenboden geführt und dadurch nacherwärmt wird. Mehr als 100 Anlagen sind bereits in Betrieb.

Die Kostenangaben für die Systemvariante Holz wurden in Absprache mit einem Anbieter des Systems Eco Confort [Jolliet 98] (siehe auch Marktführer Wohnungslüftung mit Wärmerückgewinnung [FWS 98a]) erarbeitet. Sie basieren auf einer grösseren Anzahl von bereits realisierten Projekten. Ein Sonnenkollektor anstelle des Elektroboilers würde zusätzliche Mehrkosten von etwa 8'000 Franken verursachen.

Die Kostenberechnungen aller Varianten sind im Anhang 1.7 ersichtlich. Das Resultat zeigt Abb. 52.

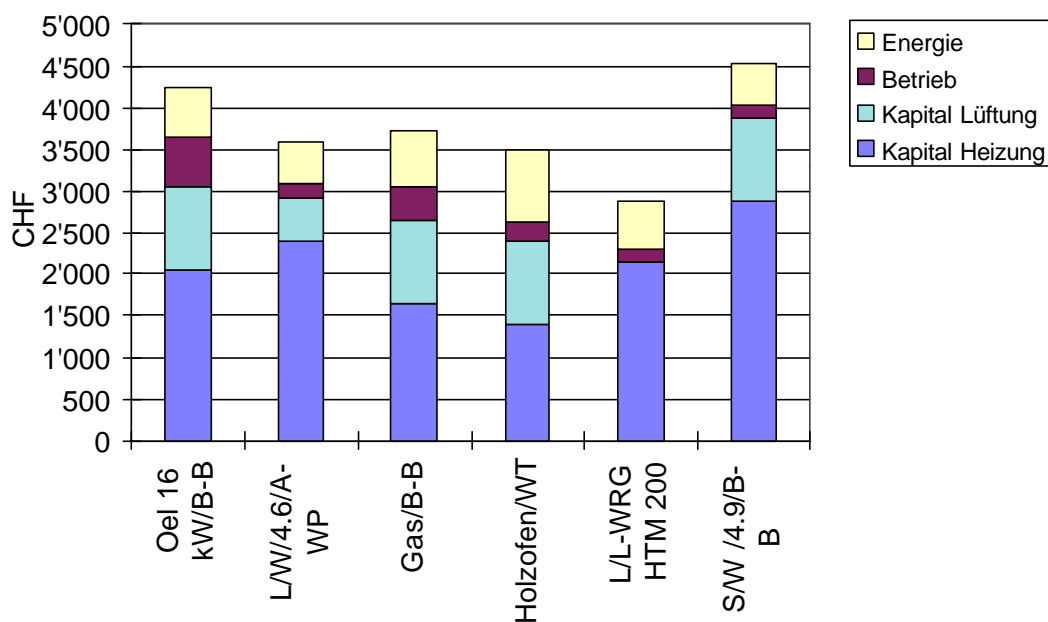


Abb. 52: Vergleich der gesamten Jahreskosten verschiedener Heizsysteme in einem Niedrigenergiehaus mit 147 m² Energiebezugsfläche und einem Komfortwärmeverbrauch von 236 MJ/m²a

Legende:

- Öl 16 kW: Ölkessel mit Beistellboiler, Wassererwärmung Winter: Öl, Sommer: elektrisch, Wohnungslüftung mit Zuluft/Abluft-Wärmetauscher
- L/W/4.6/A-WP: Innenaufgestellte Luft/Wasser-WP mit einer Heizleistung von 4.6 kW (A-7W35) und Abluft-Wärmepumpe zur Wassererwärmung
- Gas/B-B: Gastherme im Obergeschoss montiert, Wassererwärmung durch Beistellboiler, Wohnungslüftung mit Zuluft/Abluft-Wärmetauscher
- Holzofen/WT: Schwedenofen im Wohnzimmer, Lüftungsanlage mit WRG Eco Confort.
- L/L-WRG HTM200: Luft/Luft-Wärmepumpe mit Erdregisteransaugung und WRG für Heizung und Wassererwärmung
- S/W/4.8/B-B: Sole/Wasser-WP mit einer Heizleistung von 4.8 kW (B0/W35) und Beistellboiler für die Wassererwärmung, Wohnungslüftung mit Zuluft/Abluft-Wärmetauscher

2.12.5 Fazit des Kostenvergleichs

Die Kombination einer Kesselheizung mit einem Zuluft/Abluft-Wärmetauscher für die Wohnungslüftung hat im Niedrigenergie-Neubau keine Kostenvorteile mehr. Die Trennung von Lüftung und Heizung ergibt hohe Investitionskosten und demzufolge beträchtliche Jahreskosten. Am kostengünstigsten schneidet das Luft/Luft-Wärmepumpensystem HTM200 ab, das die Wärme direkt mit der Zuluft und nicht über eine hydraulische Verteilung in die Zimmer bringt. Dadurch werden die Kosten der hydraulischen Wärmeverteilung gespart. Ob der Komfort mit einer Bodenheizung vergleichbar ist, werden die Messungen an der Pilotanlage 3 zeigen. Kostenmässig ebenfalls gut schneidet die Kombination eines Holzofens mit einem Zuluft/Abluft-Wärmetauscher ab. Auch dabei wird auf die hydraulische Wärmeverteilung verzichtet. Im Vergleich zur Pilotanlage 3 liefert ein Holzofen allerdings höhere Leistungen, verbunden mit dem Nachteil des manuellen Anfeuerns. Eine interessante Lösung stellt die Luft/Wasser-Wärmepumpe in Kombination mit einer Abluftwärmepumpe für die Wassererwärmung dar. Dank der Niedrigtemperatur-Bodenheizung ergeben sich tiefe Heizkosten bei guten Jahresarbeitszahlen. Das in der Praxis erreichbare Niveau werden die Messungen an der Pilotanlage 2 zeigen. Ebenso wird sich zeigen, ob die Zuluftführung über Mauerventile komfortmässig alle Ansprüche erfüllen kann. Die Sole/Wasser-Wärmepumpe mit Beistellboiler und Zuluft/Abluft-Wärmetauscher ist die energetisch beste Lösung (Pilotanlage 1). Dieser Vorteil wird allerdings mit beträchtlichen Jahreskosten erkauft.

Insgesamt stehen im Niedrigenergiehaus-Neubau mit den vorgestellten Varianten kostenmässig und energetisch unterschiedliche Lösungen zur Verfügung. Ob das erreichbare Komfortniveau bei der Wärmeverteilung über die Zuluft genügt, werden die Messungen an der Pilotanlage 3 zeigen. Eine kostenmässig interessante Lösung dürfte die Kombination der Wärmequelle Erdreich mit einer Wärmeverteilung über die Zuluft und Wärmerückgewinnung (wie HTM 200) ergeben. Entsprechender Forschungs- und Entwicklungsbedarf ist hier vorhanden.

2.13 Marktpotential

2.13.1 Einfamilienhaus-Neubau mit Niedrigenergie-Standard

Der Hauptmarkt in der Schweiz liegt eindeutig im Neubau. Pro Jahr werden heute zwischen 10'000 - 12'000 Einfamilienhauseinheiten gebaut. Aufgrund der Kostensituation bei der Gebäudestruktur kann man davon ausgehen, dass relativ kurzfristig (innerhalb 3-5 Jahren) alle Häuser in Niedrigenergiebauweise erstellt werden. Das Marktpotential liegt deshalb bei etwa 10'000 -12'000 Einheiten pro Jahr. Bereits heute erreicht die Wärmepumpen-Heizung ein Marktvolumen von über 30% (Abb. 53), die Gasheizung von 15%, die Holzheizung von 5%. Die restlichen 50% gehören der Ölheizung. Dieser Anteil dürfte in Zukunft hart umstritten sein. Da die Gasheizung ohne Wohnungslüftung bei vorhandenem Netzzugang günstige Kosten aufweist und auch ökologisch gut abschneidet, dürfte sie in diesen Gebieten einen Marktanteil behalten. Die anderen Energieträger dürften vor allem in Gebieten ohne Gasversorgung zum Zuge kommen.

2.13.2 Einfamilienhaus-Sanierung

Schwierige Verhältnisse liegen bei der EFH-Sanierung vor. Pro Jahr werden in der Schweiz etwa 40'000 Heizungssanierungen durchgeführt. Öl- und Gasheizungen teilen rund 90% dieses Marktes unter sich auf. Bei rund 1000 Sanierungen kommt eine Wärmepumpen-Heizung zum Einsatz, ein Teil davon ersetzt ältere WP-Heizungen. Dieser Marktanteil von nur 2.5% zeigt deutlich die Schwierigkeiten bei der Substitution eines Heizsystems, welches günstigere Sanierungskosten aufweist (Typischerweise kostet die Sanierung einer alten Ölheizung mit Low-Nox-Kessel und neuem Kamin 8'000-10'000 Franken). Da bei vielen Gebäuden auch die Fenster saniert werden müssen, ist die Bereitschaft der Hausbesitzer für zusätzliche Investitionen gering. Zur Vermeidung von Feuchteproblemen wären Lüftungssysteme mit Wärmerückgewinnung erwünscht, die kostengünstig nachgerüstet werden könnten. Der Einbau einer Niedrigtemperatur-Heizung würde zu einer weiteren Steigerung der Kosten führen. Das Marktpotential in diesem Bereich ist deshalb gering.

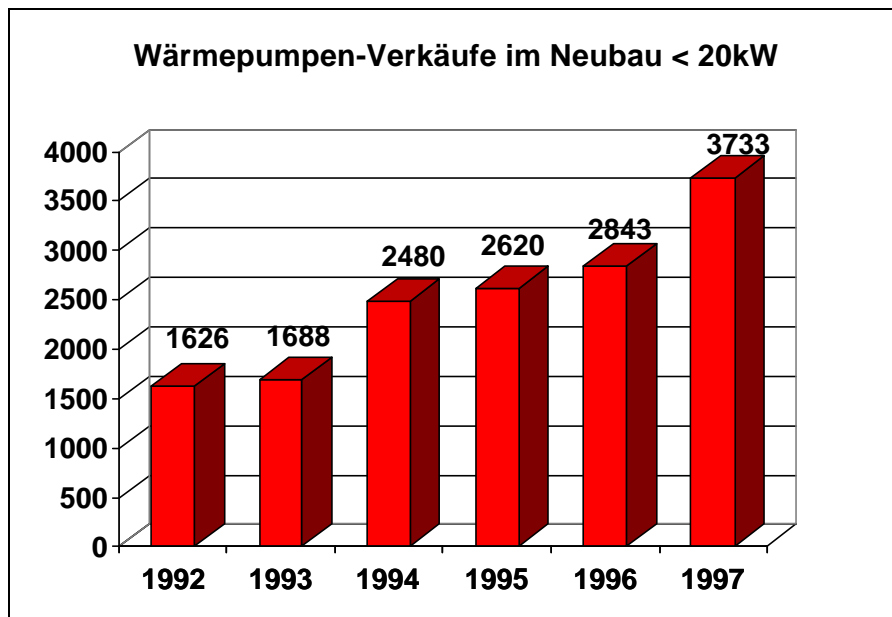


Abb. 53: Wärmepumpen-Verkäufe Schweiz im Einfamilienhausbereich (Quelle: FWS)

2.13.3 Mehrfamilienhaus-Neubau

Wesentlich langsamer als bei den Einfamilienhäusern dürfte sich der Niedrigenergie-Standard im Mehrfamilienhaus-Neubau durchsetzen. In diesem Marktsegment spielen die Investitionskosten eine entscheidende Rolle, da sie an die Mieter überwältigt werden. Zudem steigen die Investitionskosten bei der Wärmepumpen-Heizung mit grösserer Heizleistung rasch an, während sie bei der Ölheizung nur schwach wachsen. Konkurrenzfähige Jahreskosten sind damit nicht mehr gegeben [Huser 97]. In der Regel wird in diesem Segment bivalent gefahren, das heisst in Kombination mit einer Ölheizung. Die bessere Wärmedämmung und dichtere Bauweise wird auch bei den MFH-Häusern den Bedarf für Wohnungslüftung mit Wärmerückgewinnung steigern. Zu diesem Zweck ist eine zentrale Abluftfassung und Nutzung in einer Wärmepumpe zur Wassererwärmung und Heizung geeignet. Diverse Referenzanlagen sind in diesem Segment vorhanden (z. Bsp. [Löpfe 97]).

2.13.4 Mehrfamilienhaus-Sanierung

Auch dieses Segment dürfte für die Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe äusserst schwierig zu erschliessen sein. Gesamtsanierungen von MFH schliessen in der Regel sowohl eine bessere Wärmedämmung wie auch Fenster mit Wärmeschutzverglasung ein. Dadurch werden die Heizenergieverbräuche wesentlich reduziert. Die bestehende Öl- oder Gasheizung kann danach kostengünstig und mit kleinerer Leistung saniert werden. Die Bereitschaft zum Ersatz des alten Heizsystems durch eine WP-Heizung ist aus Kostengründen gering. Ebenfalls erwünscht wäre eine zusätzlich Wohnungslüftung mit Wärmerückgewinnung. Der nachträgliche Einbau der Abluftkanäle stellt auch hier ein Problem dar, das viele Hausbesitzer an einer Realisierung hindert.

2.13.5 Fazit

Insgesamt ist es in der Schweiz und auch in den anderen europäischen Staaten der Einfamilienhaus-Neubau, der das grösste Potential für die Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe bietet. Die Gasheizung ohne Wohnungslüftung ist in Gebieten mit Gasanschluss eine komfortmässig schlechtere aber kostengünstige Alternative.

3 GEWONNENE ERKENNTNISSE

3.1 Gebäudeoptimierung

3.1.1 Energetische Optimierung

In einem ersten Schritt ist die Leichtbauvariante des NOAH-Hauses einerseits mit einer idealen Heizung²⁴ anstelle einer Fussbodenheizung und andererseits mit einer bedarfsabhängigen, aussenliegenden Beschattungseinrichtung ausgestattet worden. An diesem Gebäude wurden dann die Fenster auf den Stand 1 von Abb. 54 modifiziert, was eine Reduktion des Heizenergiebedarfs um 7% auf 156 MJ/(m²·a) zur Folge hatte. Von diesem Stand aus brachte die Erhöhung der Wärmedämmstärke auf den Wert des SIA2010-Hauses eine weitere Einsparung von 19%, so dass der Heizenergiebedarf total um einen Viertel auf 127 MJ/(m²·a) gesenkt werden konnte.

Bei der Fensteränderung, die beim Wechsel vom NOAH- zum SIA2010-Haus vorgenommen wurde, sind nicht nur die Südfensterflächen vergrößert worden, sondern es wurden auch neue Fenster an der Westfassade hinzugefügt. Diese Fensterflächen wurden nicht aus energetischen Gründen angebracht, sondern um die Problematik der Überhitzung für die Simulationsrechnung zu verschärfen. In der Regel tragen Fenster an der West- und der Ostfassade wegen der geringeren Sonneneinstrahlung auf diese Fassaden nicht oder nur unwesentlich zu einer Verringerung des Heizenergiebedarfs bei. In der Übergangszeit und speziell in den Sommermonaten verschärft sich jedoch das Überhitzungsproblem, da dann die direkte Solarstrahlung in einem steilen Winkel auf die Fenster auftrifft (gegenüber einem flachen Winkel auf die Südfassade im Sommer). Das führt zu einem hohen Eintrag an Solarenergie während denjenigen Jahreszeiten, an dem der zusätzliche Fremdwärmeeintrag nicht erwünscht ist. Die Fenster an der Westfassade wurden also nicht aus Gründen der Gebäudeoptimierung hinzugefügt, sondern lediglich, um die Anfälligkeit auf eine unerwünschte Raumtemperaturerhöhung bei starkem Solarenergieeintrag zu erhöhen.

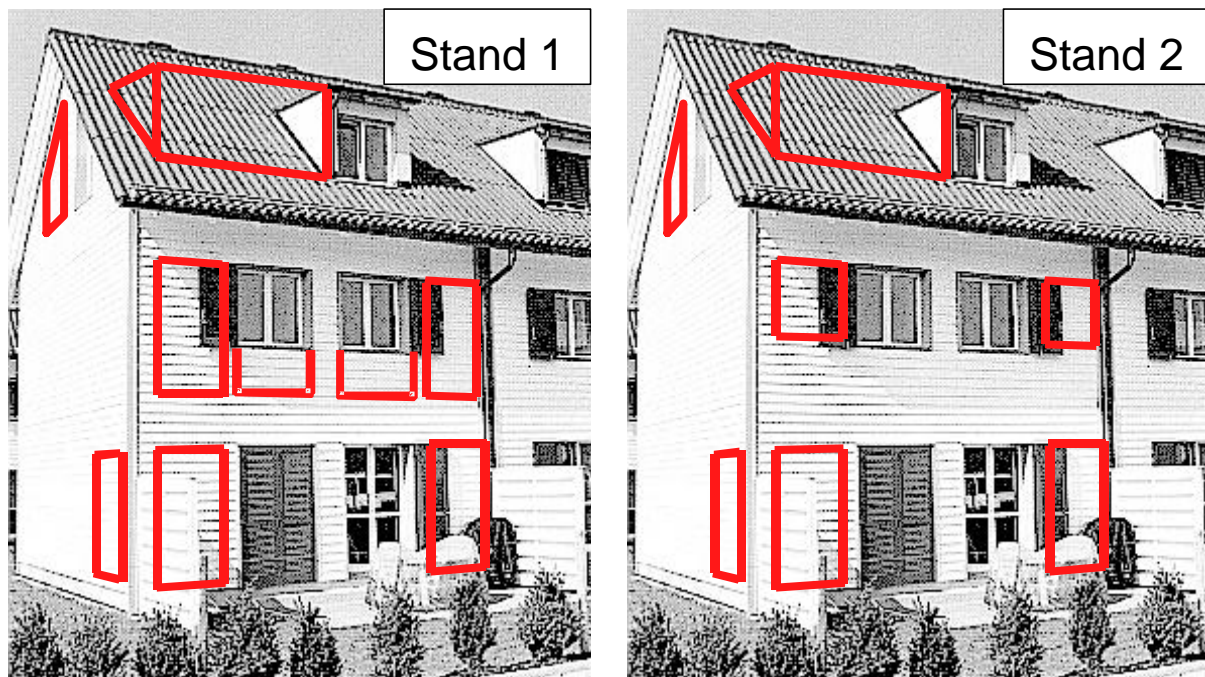


Abb. 54: Modifiziertes NOAH Gebäude. Stand 1 und 2 der Fensteroptimierung

²⁴ Eine „ideale Heizung“ zeichnet sich dadurch aus, dass sie keine Trägheit besitzt und der Sollwert, falls genügend Leistung zur Verfügung steht, immer exakt eingehalten wird.

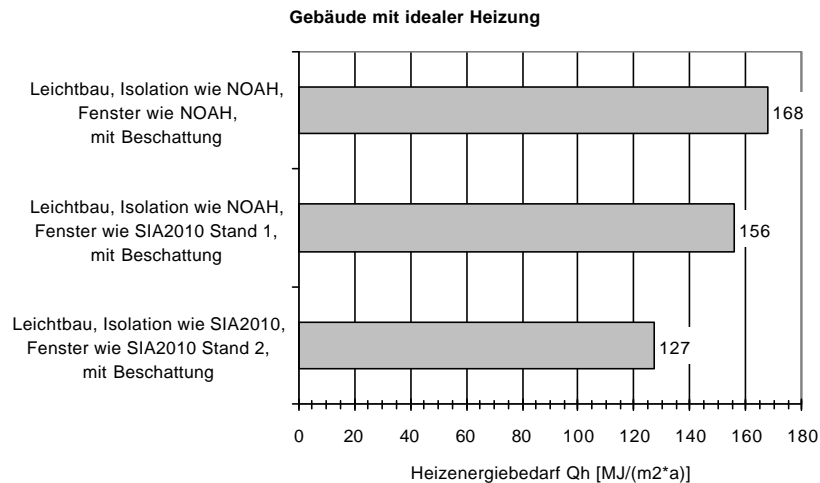


Abb. 55: Heizenergiebedarf Q_h der Gebäudevariation vom NOAH-Haus Leichtbau zum SIA2010-Haus Leichtbau

Zweckmässige

Südverglasung [m²]

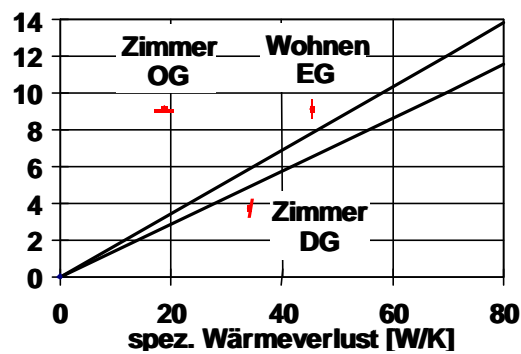


Abb. 56: Zweckmässiger Verglasungsanteil der Südfassade in Abhängigkeit der spezifischen Wärmeverluste der Südräume (aus SIA D010) und Vergleich mit SIA2010-Haus Stand 1

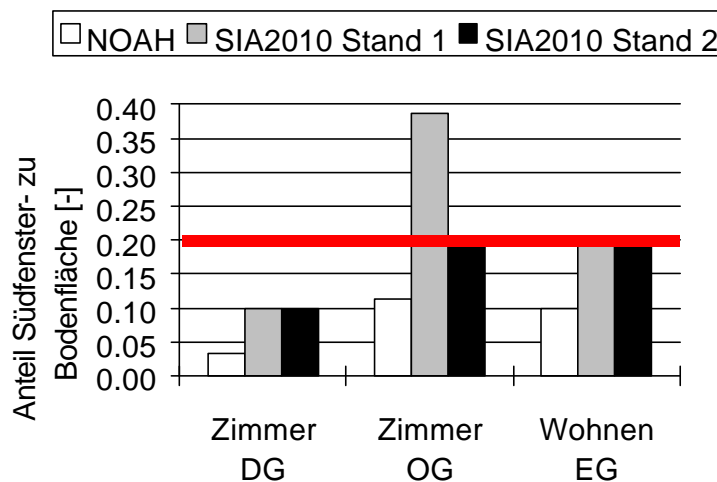


Abb. 57: Anteil Fensterfläche zu Bodenfläche (ausgezogene Linie bei 0.20 entspricht Vorschlag D010 [SIA 86])

Für die Bestimmung der zweckmässigen Grösse der Südverglasung gibt die SIA Dokumentation D010 [SIA 86] Richtwerte in Abhängigkeit des spezifischen Wärmeverlustes des Raumes in W/K an (siehe Abb. 56). Im weiteren schlägt SIA D010 für mittelschwere Bauten²⁵ einen Anteil der Südfensterfläche an der Bodenfläche des Raumes von 20% vor.

Für den Stand 1 der Modifikation vom NOAH- zum SIA2010-Haus wurde die Fenstergrösse im Zimmer OG absichtlich rund doppelt so gross als SIA D010 vorschlägt gewählt. Die Folge war, dass selbst im Massivbau die Beschattungseinrichtung zu oft betätigt werden musste. Daraufhin wurde die Fensterfläche im Zimmer OG halbiert, was Stand 2 in Abb. 54 entspricht. Diese Massnahme hat zu keiner Änderung des Heizenergiebedarfs geführt, also weder zu einer Erhöhung noch zu einer Verminderung. Die Beschattungseinrichtung wird nach der Halbierung der Fenstergrösse im Zimmer OG jedoch wesentlich seltener betätigt, wie aus Abb. 58 hervorgeht, und der PPD-Wert konnte im Zimmer OG von 7.8% auf 6.8% gesenkt werden. Stand 2 von Abb. 54 wird für die folgenden Untersuchungen weiter verwendet und nachfolgend nur noch als SIA2010-Haus (ohne explizite Angabe von Stand 2) bezeichnet.

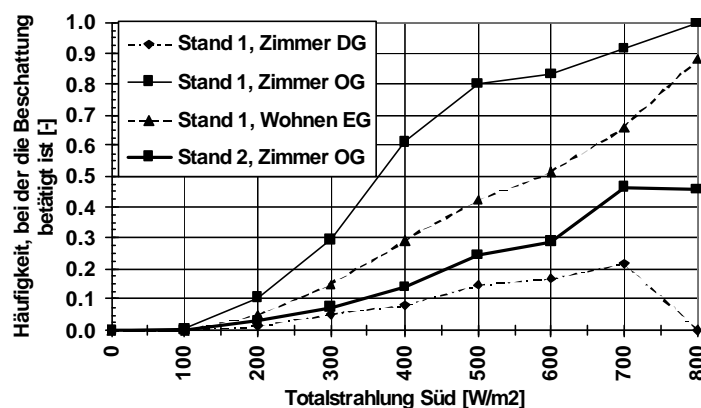


Abb. 58: Relative Häufigkeit, bei der die Beschattung im SIA2010 Massivbau betätigt ist in Abhängigkeit der Totalstrahlung Süd (keine Summenhäufigkeit)

Das SIA2010-Haus wie auch die beiden anderen Gebäude sind als Leicht- und Massivbau untersucht worden. Beim Grenzwert- und NOAH-Haus hat die Gebäudemasse keinen Einfluss auf den Heizenergiebedarf. Infolge der erhöhten passiven Solarenergienutzung des SIA2010-Hauses hat die Speichermasse des Gebäudes nun einen Einfluss auf den Heizenergiebedarf. Durch die Änderung von Leicht- auf Massivbauweise kann der Heizenergiebedarf um weitere 13% auf 110 MJ/(m²a) reduziert werden. Diese optimierte Hausvariante MMB30 wird für die weiteren Untersuchungen am SIA2010-Haus verwendet.

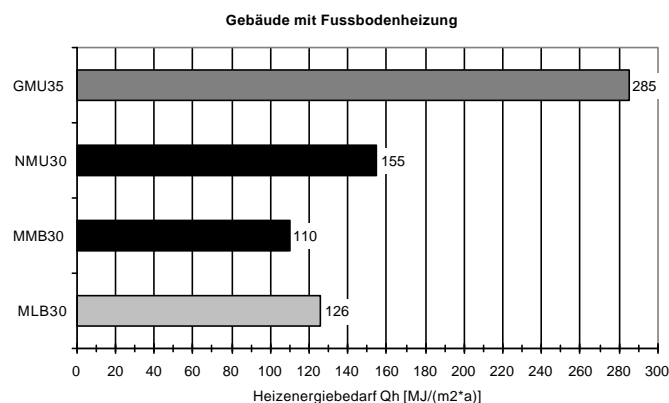


Abb. 59: Heizenergiebedarf der untersuchten Gebäudetypen

²⁵ Mittelschwere Bauten nach SIA D010: massive Innenwände, Betondecke

3.1.2 Behaglichkeitsvergleich

Durch die Erhöhung der Speichermasse konnte nicht nur der Heizenergiebedarf des SIA2010-Hauses, sondern auch in allen Gebäuden der PPD-Wert gesenkt werden. Aus Abb. 60 geht klar hervor, dass in allen Massivbauten die Behaglichkeit höher ist als in den entsprechenden Leichtbauten. Alle in Abb. 60 aufgeführten Gebäude sind mit einer Fussbodenheizung ausgerüstet. Das SIA2010-Haus weist trotz Beschattung etwas höhere PPD-Werte als das Grenzwert-Haus und das NOAH-Haus auf. Die PPD-Werte sind jedoch nur unwesentlich höher als diejenigen der anderen Gebäude und durchaus noch in einem akzeptablen Bereich, so dass keine weiteren Vorkehrungen zur Verbesserung der Behaglichkeit getroffen werden müssen.

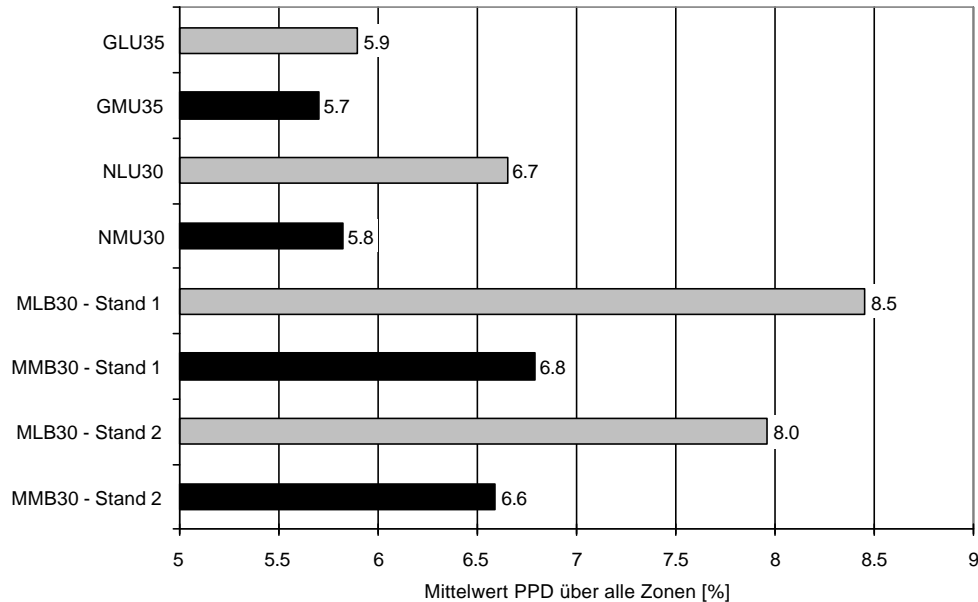


Abb. 60: Vergleich der mittleren PPD-Werte der verschiedenen Gebäude. Auswertung über ganze Heizperiode jeweils von 7.00-23.00 Uhr (Legende s. Tab. 11)

3.2 Erdsonde

3.2.1 Optimaler Massenstrom

Die optimale Wahl der Temperaturdifferenz über den Verdampfer ist nicht von vornherein klar. Eine grosse Temperaturdifferenz (und somit ein kleiner Massenstrom) senkt die Stromaufnahme der Umwälzpumpe, führt aber auch zu laminarer Strömung in der Erdsonde, was eine Verschlechterung des Wärmeübergangskoeffizienten in der Erdsonde zur Folge hat. Die Abnahme des Massenstroms führt zu einer Senkung der mittleren Sondenfluidtemperatur, damit trotz des schlechteren Wärmeübergangs die von der Wärmepumpe der Sole entzogene Energiemenge dem Fluid in der Sonde zugefügt werden kann. Eine kleine Temperaturdifferenz und der damit verbundene hohe Massenstrom führt zu einer besseren Wärmeübertragung, aber auch zu einem höheren Elektrizitätsverbrauch der Umwälzpumpe und somit zu einer schlechteren Jahresarbeitszahl des Heizsystems.

Mit Simulationen am SIA2010-Haus ohne Warmwasseraufbereitung und Sole als Kälteträger wurde die optimale Temperaturdifferenz über den Verdampfer bestimmt. Wie aus Abb. 61 hervorgeht, liegt die optimale Temperaturdifferenz um 4.0 K. Die Jahresarbeitszahl ist jedoch nicht sehr sensitiv auf die Temperaturdifferenz. Da die Umwälzpumpe des Primärkreislaufes nur dann in Betrieb ist, wenn die Wärmepumpe läuft, ändert sich die Jahresarbeitszahl nicht stark bei verändertem Massenstrom. Der Stromverbrauch der Solepumpe fällt erst bei Temperaturdifferenzen unter 2.5 K ins Gewicht (siehe Abb. 62).

Wird Wasser als Kälteträger verwendet, so liegt die energetisch optimale Temperaturdifferenz des Verdampfers im gleichen Bereich wie bei Sole als Kälteträger. Da die Austrittstemperatur aus dem Verdampfer jedoch nicht unter $+2^{\circ}\text{C}$ sein darf, da sonst örtlich Frost an schlecht umströmten Stellen des Verdampferwärmetauscher entstehen kann, sind hier andere Kriterien massgebend für die Bestimmung der Temperaturdifferenz über den Verdampfer. Will man die Temperaturdifferenz beim energetisch optimalen Wert von etwa $3\div 4\text{ K}$ halten, so muss die Austrittstemperatur aus der Sonde bei $+5\div 6^{\circ}\text{C}$ liegen. Um derart hohe Sondausttrittstemperaturen zu erreichen, muss die Sondenlänge stark vergrössert werden, so dass man sich auf wirtschaftlichen Gründen oft für eine etwas kürzere Sonde entscheidet, diese dann aber mit einem höheren Massenstrom betreibt.

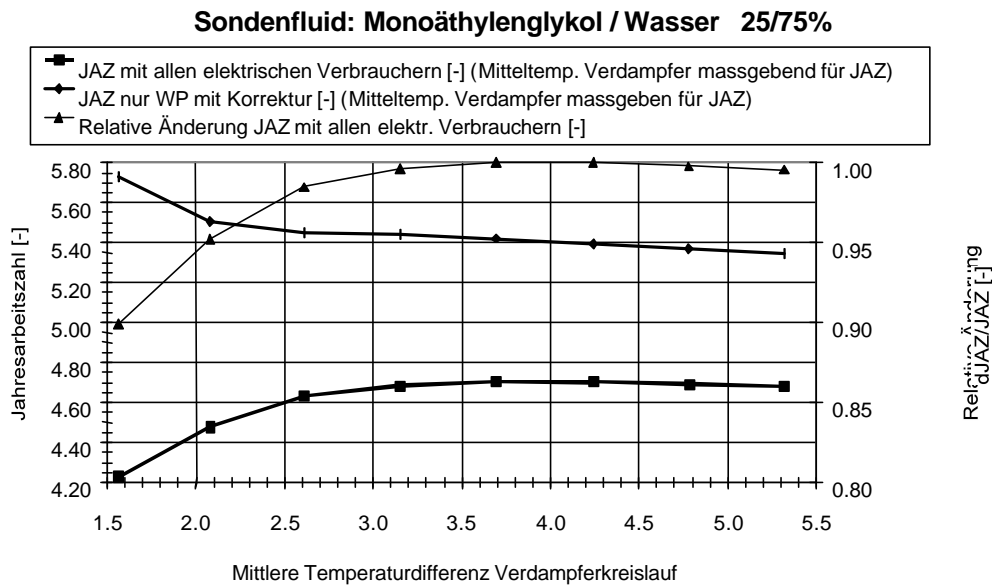


Abb. 61: Einfluss der Temperaturdifferenz des Verdampferkreislauf auf die Jahresarbeitszahl des Heizsystems im SIA2010-Haus. Sondenlänge: 63 m, spez. Sondenbelastung 47 W/m, spez. Kälteenergie der Sonde: 208 MJ/m (=58 kWh/m)

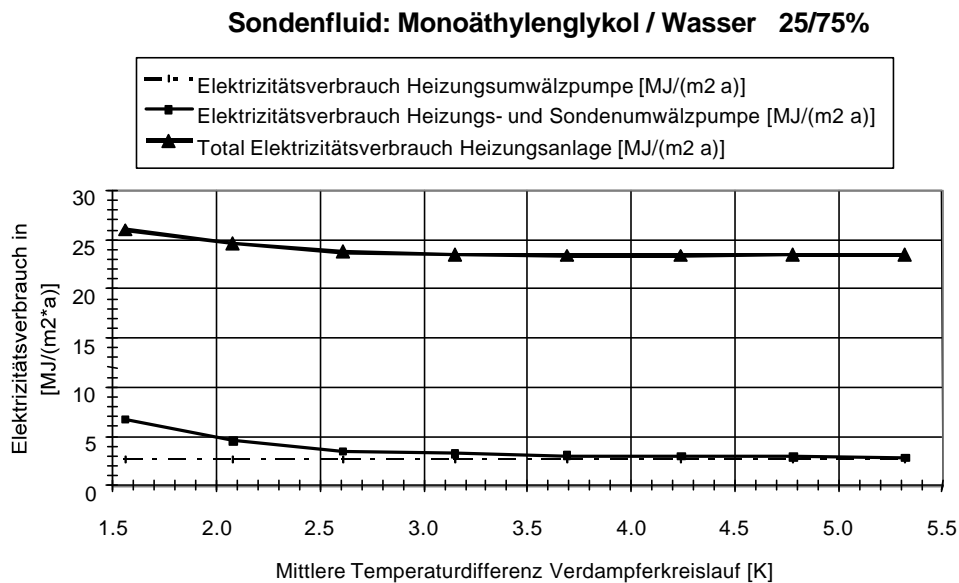


Abb. 62 Aufteilung des Stromverbrauchs für die Raumheizung im SIA2010-Haus mit Sole als Sondenfluid. Konfiguration wie bei Abb. 61

3.3 Wärmepumpe

3.3.1 Erdsonden-Wärmepumpe

3.3.1.1 JAZ und Sensitivität bezüglich Wärmeleitfähigkeit Erdreich

Die Simulationen am SIA2010-Haus ergaben Jahresarbeitszahlen des Heizsystems (ohne Warmwasser) von rund 4.7 bei Solebetrieb.

Abb. 63 zeigt die Sensitivität einer mit 50 W/m belasteten Erdsonde. Die Daten stammen aus den Simulationsrechnungen am SIA2010-Haus, wobei die Warmwasseraufbereitung *nicht* mit der Heizungswärmepumpe durchgeführt wird. Sondenmedium ist eine Mischung aus 25-Vol.-% Monoethylglykol (Handelsname: *Antifrogen N*) und Wasser. Die Sensitivität der Soletemperatur bezüglich der Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs $\partial\vartheta/\partial\lambda$ ist in diesem Bereich 2.0 (mK²)/W, das heisst eine Änderung der Wärmeleitzahl um 1 W/(mK) ändert die Soletemperatur um 2 K. Die relative Sensitivität der Jahresarbeitszahl $\frac{\partial JAZ}{JAZ} / \partial I_{Erde}$ beträgt 0.055 bis 0.025 mK/W, was bedeutet, dass eine Änderung der

Wärmeleitfähigkeit des Erdreiches um 1 W/(mK) die Jahresarbeitszahl des Heizsystems um 2.5% bis 5.5% ändert. Der Variationsbereich der Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs von etwa ± 1 W/(mK) ändert in diesem Bereich die Jahresarbeitszahl des Heizsystem relativ um etwa $\pm 3.5\%$ oder bei einer Jahresarbeitszahl von etwa 4.7 absolut um etwa ± 0.15 .

Um diese erstaunlich geringe Abhängigkeit der Arbeitszahl von der Wärmeleitfähigkeit der Erde zu verstehen, sollten wir uns die analytische Erdsondengleichung (Gl. 28) vor Augen führen [Hässig et al. 98]:

$$T_{Quelle} = T_m - \left[\frac{g(t, H)}{2p I_{Erde}} + \frac{1}{8p a r_o} + R_c - \frac{H}{2 \dot{m} c_p} \right] \dot{q}$$

Gl. 28

Wir ersehen daraus, dass der relative Einfluss der Wärmeleitfähigkeit λ_{Erde} dann gering wird, wenn die dimensionslose Temperatursprungantwort g (g -Funktion von Eskilson) klein ist, oder wenn der thermische "Flaschenhals" bei R_c oder α liegt. Die g -Funktion ist bei geringer Sondentiefe H etwas kleiner als bei langen Sonden. Bei kurzen Sonden haben wir ausserdem in der Regel eine laminare Sondenströmung (cf. Kap. 3.2.1).

Dies alles zeigt, dass wir die oben beschriebenen Resultate nicht auf längere Sonden mit turbulenter Strömung oder Sonden mit langer Laufzeit übertragen dürfen.

Da für eine Wärmepumpe nicht die Quelltemperatur, sondern eher die Quellen-Mitteltemperatur (=durchschnittliche Temperatur der Sondenflüssigkeit im Verdampfer) massgebend ist, fällt in der Erdsondengleichung für die Bestimmung der Quelltemperatur der Solemassenstrom heraus (Gl. 29):

$$T_{Quellen-Mitteltemperatur} = T_m - \left[\frac{g(t, H)}{2p I_{Erde}} + \frac{1}{8p a r_o} + R_c \right] \dot{q}$$

Gl. 29

Für die Sonden-Rücklauftemperatur (massgebend für die Frostsicherheit) muss der Solemassenstrom allerdings wieder mit einbezogen werden (Gl. 30):

$$T_{Rücklauftemperatur} = T_m - \left[\frac{g(t, H)}{2p I_{Erde}} + \frac{1}{8p a r_o} + R_c + \frac{H}{2 \dot{m} c_p} \right] \dot{q}$$

Gl. 30

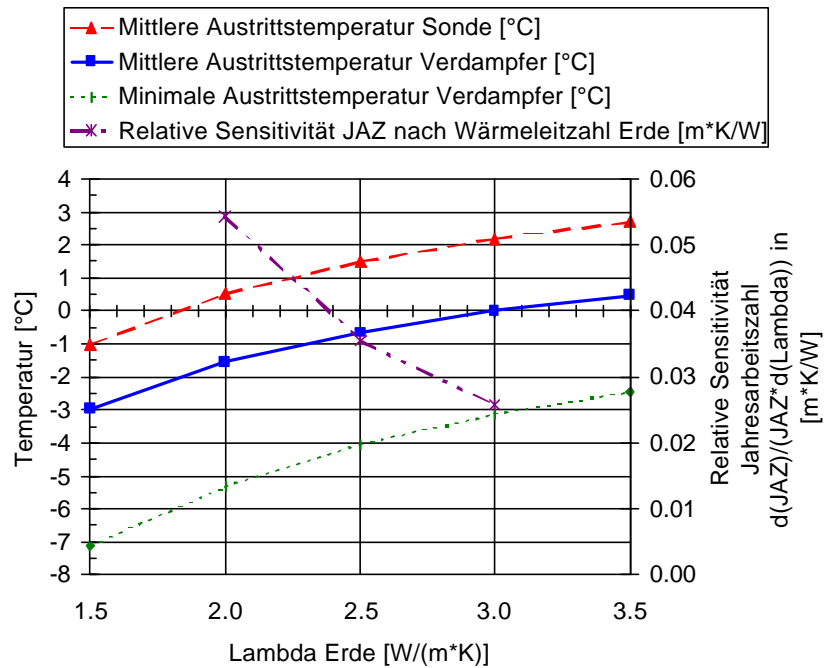


Abb. 63: Sensitivität Soletemperatur bezüglich Wärmeleitfähigkeit Erde

3.3.1.2 Kälteträger

Das SIA2010-Haus ohne Warmwasseraufbereitung wurde mit einer Erdsonde simuliert, die entweder mit 25prozentigen Monoethylenglykol-Wasser-Mischung oder mit reinem Wasser betrieben wird. Abb. 64 zeigt, dass bei *turbulenter* Strömung die Rohrreibungszahl R der wasserbetriebenen Sonde bei gleichem Massenstrom kleiner ist als diejenige der solebetriebenen.

Im folgenden wird die Änderung des Druckgefälles R bei Wasser und Monoethylenglykol 25 Vol.-% bei gleichem Wärmekapazitätsstrom hergeleitet.

Für ein hydraulisch glattes Rohr und turbulenter Strömung gilt nach Blasius für die Rohrreibungszahl im Bereich nach Gl. 2 und Gl. 3 auf Seite 21

$$I = 0.3164 \text{ Re}^{-0.25}$$

Gl. 31

Wird dabei als Randbedingung

$$\dot{m}_W c_W = \dot{m}_S c_S$$

Gl. 32

angenommen, das heisst der Wärmekapazitätsstrom soll für Wasser und Sole gleich gross sein, so erhält man für die Änderung der Rohrreibungszahl

$$\frac{R_S}{R_W} = \left(\frac{n_S}{n_W} \right)^{1/4} \left(\frac{r_W}{r_S} \right)^{3/4} \left(\frac{c_W}{c_S} \right)^{7/4}$$

Gl. 33

und mit den Stoffwerten nach Tab. 9 auf S. 23

$$\frac{R_S}{R_W} = 1.42$$

Gl. 34

Der Druckverlust ist im turbulenten Bereich bei Monoethylenglykol 25 Vol.-% also um 42% grösser als bei Wasser, wenn der gleiche Wärmekapazitätenstrom gefördert wird.

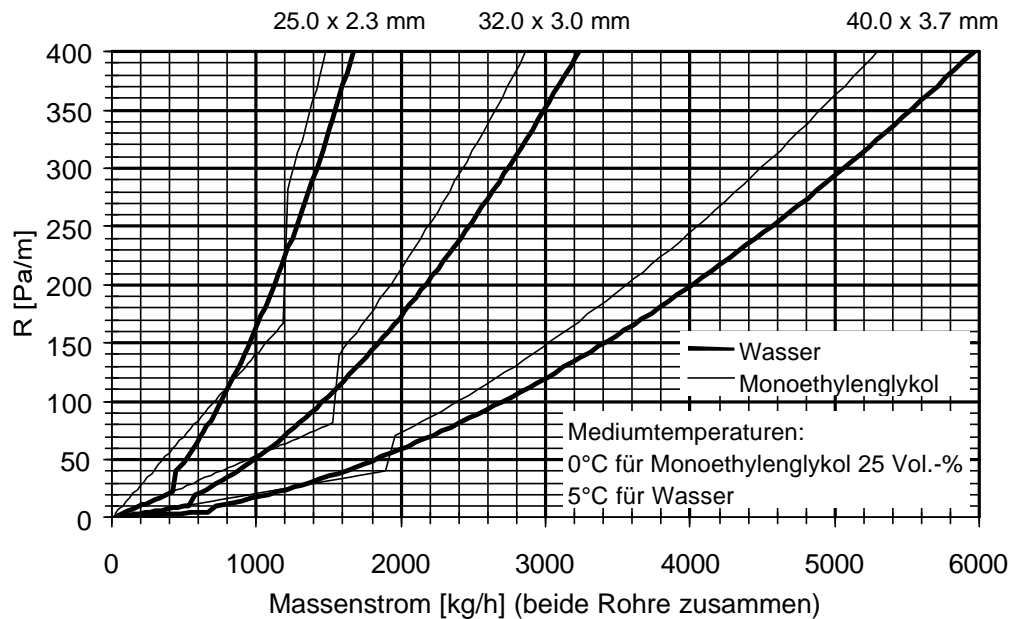


Abb. 64: Vergleich R-Wert bei Wasser und Monoethylenglykol (Antifrogen N) 25 Vol.-%

3.3.2 Erdsondenbetrieb mit Wasser

An der Massivbauvariante des SIA2010-Hauses wurden Simulationen durchgeführt, bei denen die Erdsonde mit Wasser anstelle von 25 Vol.-% Monoethylenglykol betrieben wird. Dabei wurde nebst der Jahresarbeitszahl des Heizsystems der Verlauf zwischen

1. minimaler Verdampferaustrittstemperatur
2. Temperaturdifferenz zwischen Verdampfer Ein- und Austritt
3. spezifischer Sondenbelastung
4. Wärmeleitfähigkeit des Erdreiches

untersucht. Bei Wasser als Kälte­träger darf die minimale Verdampferaustrittstemperatur nicht unter etwa +2°C liegen, da sich sonst an schlecht umströmten Stellen im Verdampfer Eis bilden kann. Die Unterschreitung der minimalen Verdampfer-Austrittstemperatur bei gegebener Wärmeleitfähigkeit des Erdreiches kann entweder durch eine Verlängerung der Erdsonde und/oder durch eine Erhöhung des Sondenmassenstroms vermieden werden. Abb. 65 zeigt, welche spezifische Sondenbelastung bei gegebener Wärmeleitfähigkeit des Erdreiches und Temperaturdifferenz über den Verdampfer zulässig ist. Dabei müssen die Werte aus Frostgründen unter der +2°C Kurve vermieden werden. Die parallelen Kurvenscharen zeigen auch die Sensitivität der minimalen Austrittstemperatur auf.

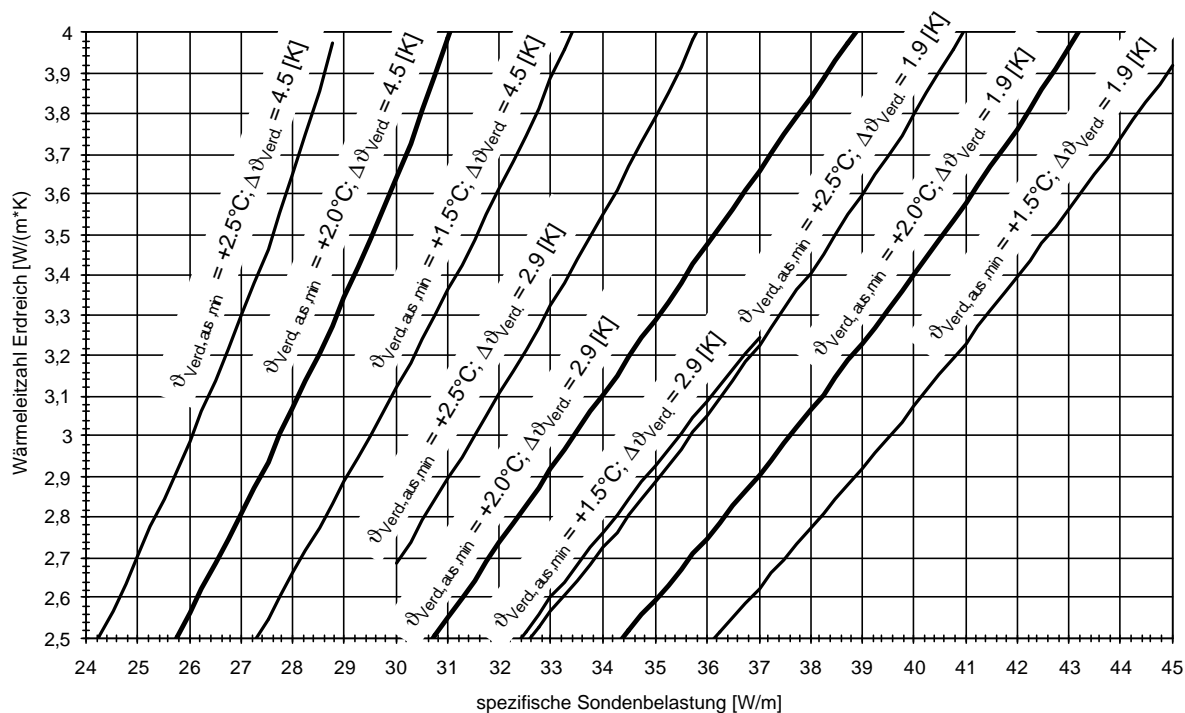


Abb. 65: Grenzkurven für minimale Austrittstemperatur aus dem Verdampfer bei Betrieb mit Wasser

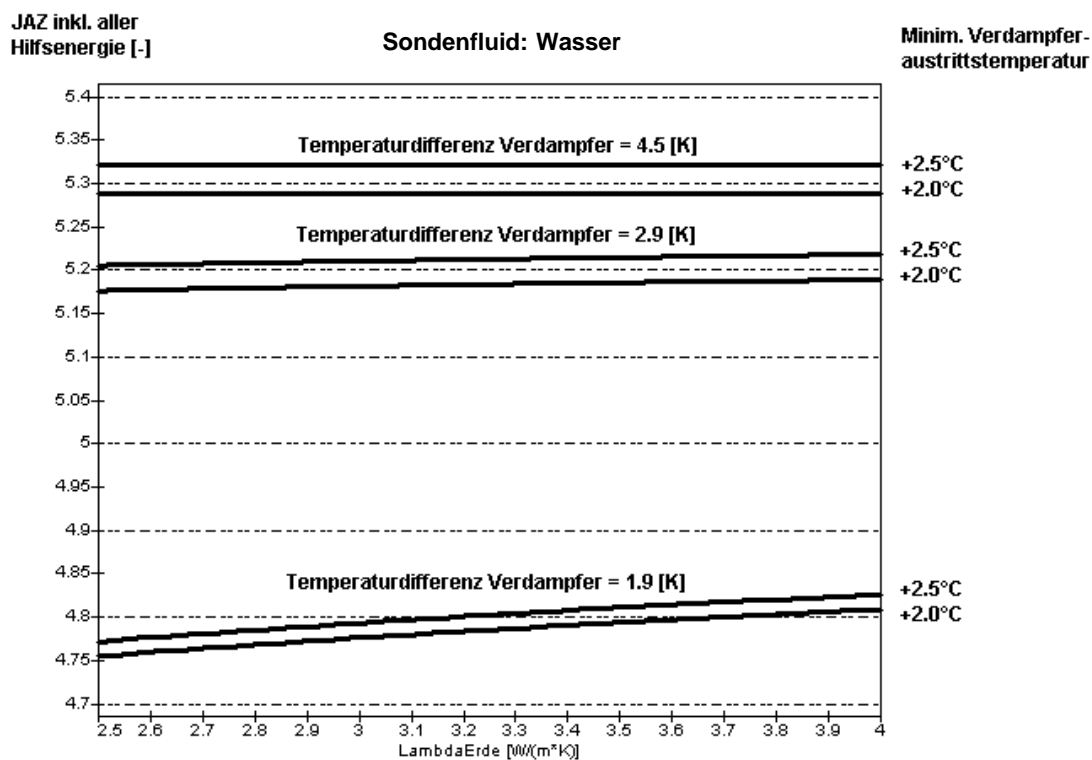


Abb. 66: Jahresarbeitszahl des Heizsystems bei verschiedener Wärmeleitzahl und Temperaturdifferenz über dem Verdampfer

Bei einer Sondenlänge von 100 m (spez. Sondenbelastung: 36.5 W/m), einer Wärmeleitfähigkeit des Erdreiches von 3.0 W/(m·K) und einer mittleren Temperaturdifferenz über den Verdampfer von 1.9 K teilt sich der Elektrizitätsverbrauch für die Raumheizung wie folgt auf:

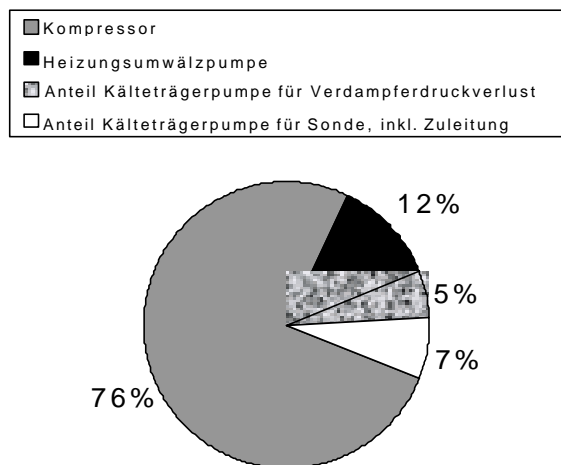


Abb. 67: Aufteilung des Stromverbrauchs bei einer Wasser/Wasser-Wärmepumpe im SIA2010-Haus

3.3.3 Zweistufig leistungsgeregelte Luft/Wasser-Wärmepumpe

An der zweistufigen Luft/Wasser-Wärmepumpe soll der Einfluss der Leistungsabstufung auf die Jahresarbeitszahl und die Schalthäufigkeit aufgezeigt werden.

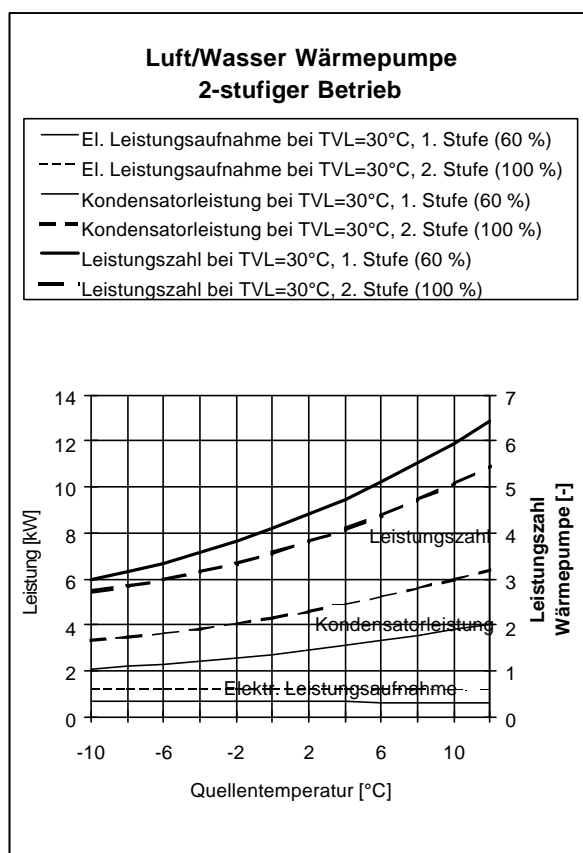


Abb. 68: Kennfeld der 2-stufigen L/W-Wärmepumpe nach der Leistungsskalierung

Die erforderlichen Drehzahlen wurden so gewählt, dass die erste Stufe mit 29 Hz und die zweite Stufe mit 50 Hz betrieben wird. Die erste Betriebsstufe deckt also rund 60% der Spitzenleistung ab. Da im kleinen Leistungsbereich keine zweistufigen Aggregate auf dem Markt erhältlich sind, wurden die Kennfelder einer grösseren Wärmepumpe auf das kleinere Aggregat angepasst. In Abb. 68 ist das Leistungskennfeld der zweistufigen L/W-Wärmepumpe abgebildet.

In Abb. 69 ist der Verlauf der Aussen-, Vorlauf- und Rücklauf-temperatur sowie der Stellgrösse der Wärmepumpe für den ein- und zweistufigen Betrieb aufgezeichnet. Es wird eine Viertagesperiode betrachtet, während der die Aussentemperatur zwischen 3°C und 6°C schwankt. Die Rücklauf-temperatur, welche bei dem gewählten System die Regelgrösse ist, liegt bei diesem für unsere Klimaregion typischen Temperaturbereich zwischen 22°C und 23°C. Die eingekreisten Stellen markieren diejenigen Zeitpunkte, bei denen die Wärmepumpe durch die EW-Rundsteuerung abgestellt respektive verzögert eingestellt wird.

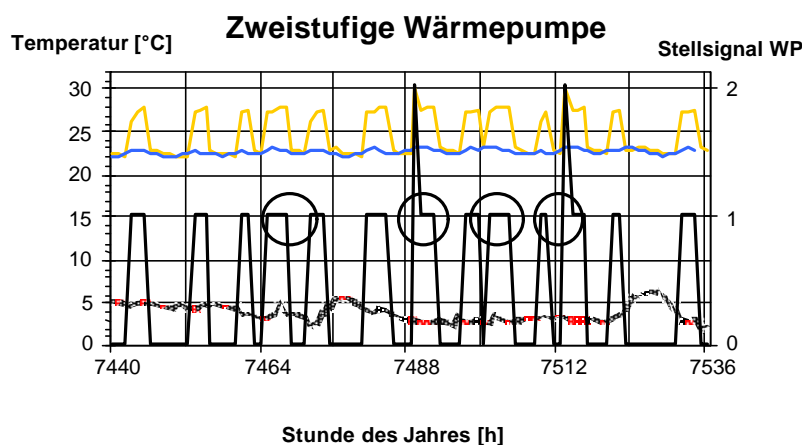
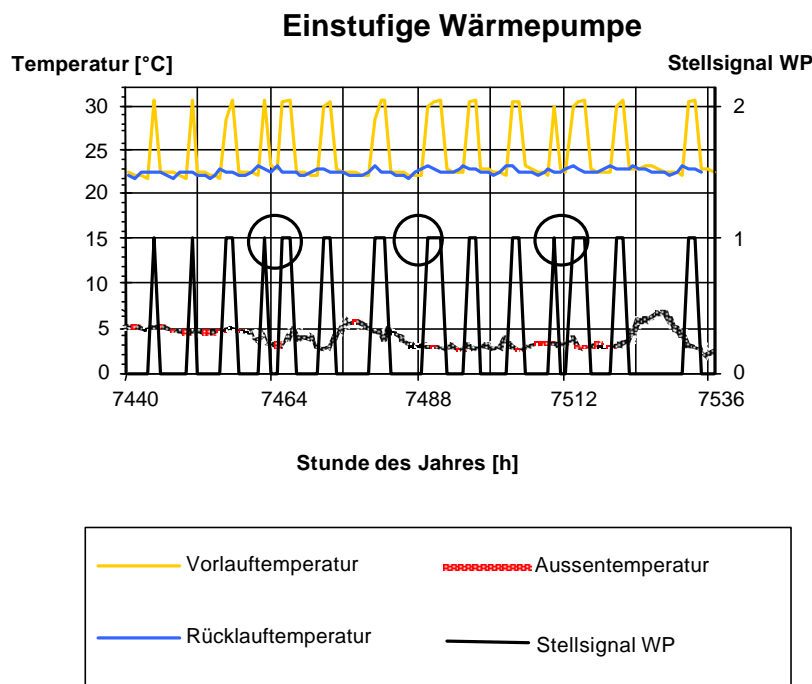


Abb. 69: Verlauf der Aussen-, Vorlauf- und Rücklauf-temperatur sowie des Stellsignals der Wärmepumpe während einer Viertagesperiode in der Übergangszeit

Vergleicht man den Verlauf des Stellsignals der beiden Varianten miteinander, stellt man fest, dass die Stufe 2 nur während einer sehr kurzen Zeit in Betrieb ist. Dies ist einerseits die Folge des Teillastbetriebes (mittlere Aussentemperatur während des Zeitfensters liegt bei 4°C), andererseits auch des gewählten Leistungsverhältnisses von 1:1.66. Bei einem Leistungsverhältnis von beispielsweise 1:2 würde die zweite Betriebsstufe häufiger zugeschaltet. Deutlich zeigt sich ausserdem der Einfluss der EW-Rundsteuerung: Bevor die Wärmepumpe auf die zweite Betriebsstufe schaltet, ist die Wärmeerzeugung jeweils gesperrt. Sobald die Sperrung aufgehoben ist, schaltet die Regulierung kurzfristig auf die zweite Stufe, um das entstandene Wärmemanko im Gebäude zu decken. Diese Phase ist nur von kurzer Dauer, und die Regulierung schaltet die Wärmepumpe auf die erste Stufe zurück.

Während den vier betrachteten Tagen wird die einstufige Wärmepumpe 14 mal, die zweistufige 13 mal eingeschaltet. Im Teillastfall findet also keine massive Reduktion der Schaltheufigkeit statt, und auch bei der Betrachtung der gesamten Heizperiode lassen sich die Einschaltungen nur um knapp 10% reduzieren (Abb. 70, oben). Dies ist eine direkte Folge der EW-Sperrzeiten. Durch die längere jährliche Betriebszeit der zweistufigen Wärmepumpe (Abb. 70, unten) wird das Heizsystem häufiger durch die Sperrzeiten des EW tangiert. Die durch die Leistungsabstufung erreichte Reduktion der Schaltheufigkeit wird durch das häufigere Schalten, hervorgerufen durch die Rundsteuerung, beinahe wieder aufgehoben. Allerdings muss festgehalten werden, dass mit vier bis fünf Einschaltungen pro Tag bei einer mittleren Aussentemperatur von rund 4°C die Anforderung an einen taktarmen Betrieb bei beiden Varianten erfüllt ist.

Wie oben erwähnt, steigt die jährliche Betriebszeit der Wärmepumpe von 1070 auf 1540 Betriebsstunden, wobei knapp ein Fünftel davon auf die zweite Leistungsstufe entfällt. Der Umschaltzeitpunkt von ein- auf zweistufigen Betrieb ist abhängig von den anfallenden internen und externen Lasten und kann somit nicht einer bestimmten Rücklauftemperatur zugeordnet werden.

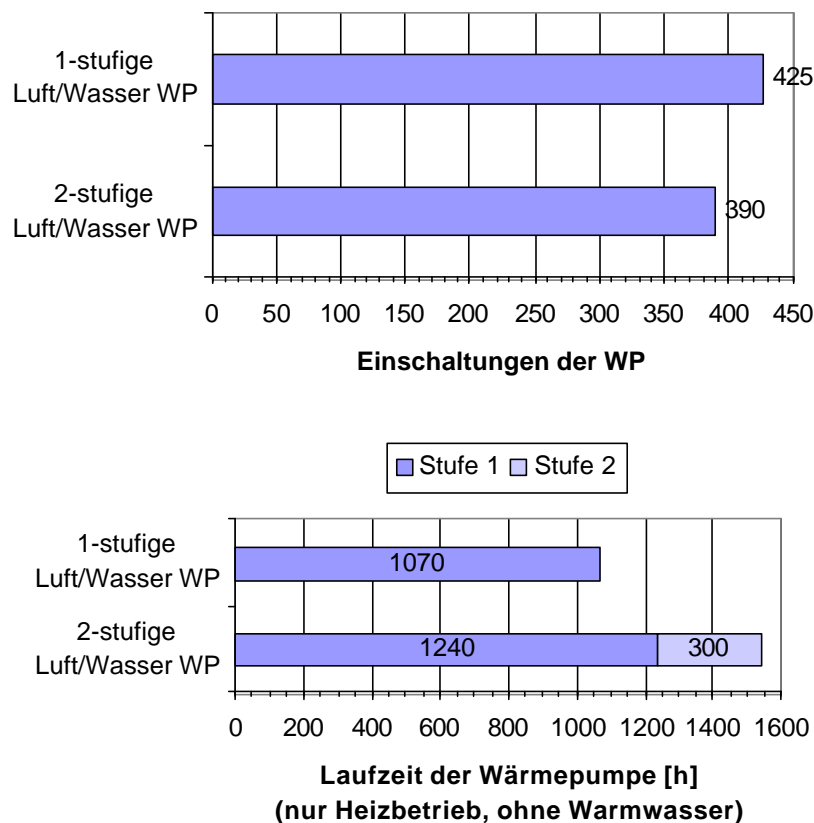


Abb. 70: Einschaltungen der Wärmepumpe während der Heizperiode und Laufzeit der Wärmepumpe (ohne Warmwasseraufbereitung)

Sowohl die abgegebene Heizleistung als auch die aufgenommene elektrische Leistung nehmen durch die Reduktion der Drehzahl ab, jedoch nicht linear zu der Drehzahlverminderung. Dies hat zur Folge, dass die Leistungszahl über den gesamten Temperaturbereich auf der ersten Stufe über jenem der zweiten Stufe liegt. Durch die geringere Schalttätigkeit verringern sich zudem die Anfahr- und Abkühlverluste der L/W-Wärmepumpe, aufgrund dessen sich der Jahresnutzungsgrad der Wärmepumpe ohne Berücksichtigung der Warmwasseraufbereitung von 3.4 auf 4.0 erhöht (Abb. 71).

Abb. 72 zeigt, dass die absolute Einsparung an Energie trotz der 20% höheren Jahresarbeitszahl gering ist.

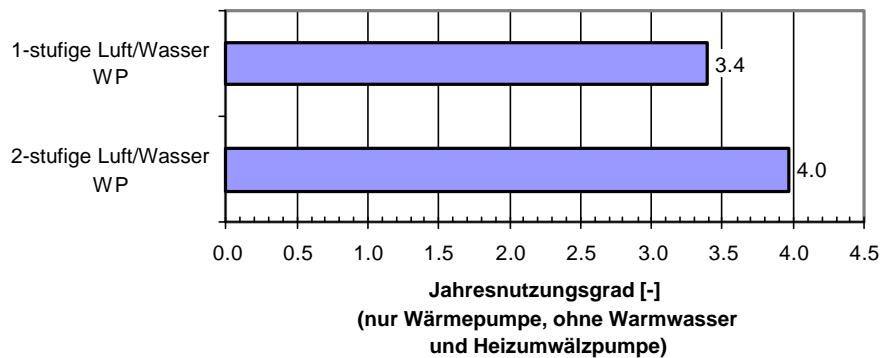


Abb. 71: Jahresnutzungsgrad der Wärmepumpen (ohne Warmwasser und Heizungsumwälzpumpe, inkl. aller Hilfsenergie)

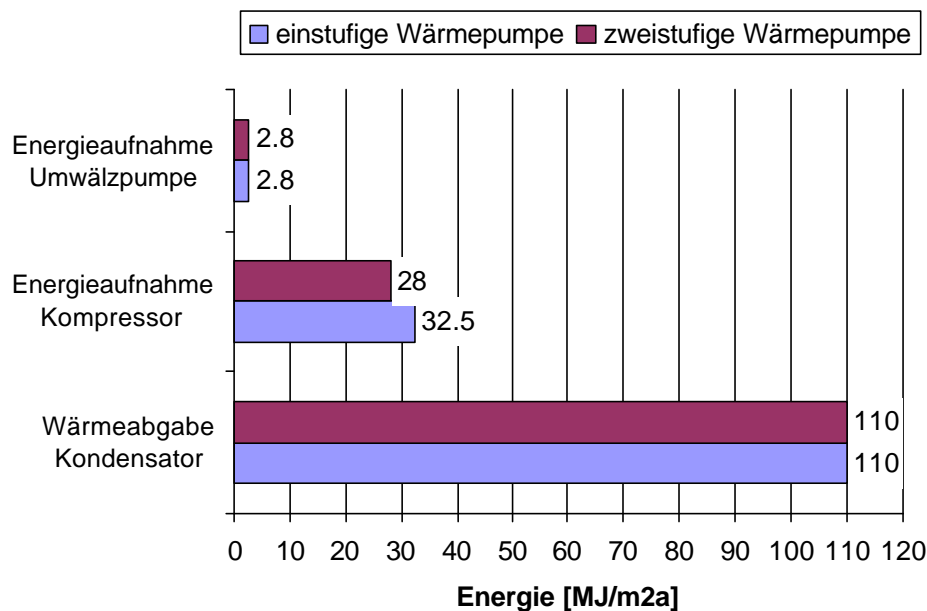


Abb. 72: Energetischer Vergleich zwischen einstufiger und zweistufiger Wärmepumpe

Fazit

Durch die zweistufige Leistungsregelung der Wärmepumpe können auf der energetischen und der mechanischen Seite des Aggregates Verbesserungen erzielt werden. Nachfolgend werden die Vor- und Nachteile der einstufig und zweistufig betriebenen Wärmepumpen diskutiert:

- Durch den besseren Jahresnutzungsgrad der zweistufigen Wärmepumpe kann die aufgenommene elektrische Klemmenleistung des Kompressors um 15% gesenkt werden. Das finanzielle Sparpotential ist durch den hohen wärmetechnischen Standard des Hauses gering und beträgt pro Heizperiode lediglich Fr. 30.--. Dem stehen die höheren Anschaffungskosten für einen zweistufig betriebenen Kompressor mit dem nötigen Frequenzumformer gegenüber.
- Die untersuchten Varianten zeigen im Teillastbetrieb ein gutes Taktverhalten. Gegenüber der einstufigen Wärmepumpe werden die Einschaltungen bei zweistufigem Betrieb um 10% reduziert. Die Lebensdauer des Kompressors wird jedoch nicht massgeblich verlängert.
- Bei den Behaglichkeitswerten (PPD) besteht zwischen den beiden verglichenen Varianten kein Unterschied, welcher für den zwingenden Einsatz einer zweistufigen Wärmepumpe sprechen würde. Die Behaglichkeit ist mit einem mittleren PPD-Wert von 6.5 gewährleistet.
- Die oben genannten Punkte sprechen gegen den Einsatz einer zweistufigen Wärmepumpe in dem betrachteten SIA2010-Haus. Ein zweistufiger Betrieb mit einem Leistungsverhältnis von beispielsweise 1:2 müsste separat betrachtet werden. Das geringe Sparpotential, hervorgerufen durch die gute Bauhülle des Gebäudes, spricht aber in jedem Fall gegen einen zweistufigen Betrieb.

3.4 Ökobilanzen

Die Resultate werden jeweils für die einzelnen Umwelteffekte (Treibhauseffekt, Ozonloch, Sommersmog, Versauerung, etc.) präsentiert. Der Wert der schlechtesten Variante wird jeweils zu 100% definiert. Die Resultate der anderen Varianten werden relativ zur schlechtesten Variante gezeigt. In der Tab. 27 werden die den 100%-Grössen entsprechenden Äquivalentwerte der Wirkungskategorien gezeigt.

Die folgenden Ergebnisse gelten nur für die in diesem Projekt untersuchten Niedrigenergiehäuser und Heizsysteme.

Aufgrund der Unsicherheiten in Ökobilanzen dürfen Schlussfolgerungen nicht auf kleinsten Unterschieden in den Resultaten basieren. Relative Unterschiede im Bereich unter 20% sind als nicht signifikant anzusehen. Die Aussagen beziehen sich auf die untersuchten Fallbeispiele und sind nicht ohne weiteres verallgemeinerbar.

Umwelteffekt	Einheit Leitsubstanz	100%-Maximalwert entspricht
Treibhauseffekt	kg CO ₂ -eq.	4120
Ozonzerstörung	kg R11-eq.	0.00716
Sommersmog	kg C ₂ H ₄ -eq.	8.64
Versauerung	kg SO _x -eq.	15.4
Überdüngung	kg PO ₄ -eq.	0.861
Schwermetalle	kg Pb-eq.	0.0426
Karzinogene	kg PAH-eq.	0.00124
Wintersmog	kg SO ₂ -eq.	15.8
Radioaktivität	kBq 129I-eq.	108

Tab. 27: 100%-Maximalwerte, auf welche die Angaben in den Resultategraphiken bezogen sind.

Die beiden wichtigsten Vorbedingungen für ein korrektes Verständnis der Resultate seien hier nochmals wiederholt.

Nicht alle betrachteten Umwelteffekte dürfen als gleich gravierend verstanden werden²⁶. Eine abschliessende Beurteilung zu erhalten, müssen die Umwelteffekte gegeneinander gewichtet werden. Diese Vollaggregation wird hier auf Wunsch der Auftraggeber nicht durchgeführt, da diese Gewichtung der einzelnen Umwelteffekte nicht ohne subjektive Wertung erfolgen kann.

3.4.1 Resultate Gesamtbetrachtungen

Im folgenden werden die Gesamtergebnisse der Ökobilanzierung präsentiert. Die einzelnen Varianten enthalten jeweils die jährlichen Belastungen für die gesamte Wärmebereitstellung (Raumwärme und Brauchwarmwasser) sowie für die ganze Gebäudeinfrastruktur. Pro Graphik werden jeweils ein Umwelteffekt für eine der vier verschiedenen Gebäudevarianten gezeigt (vergl. Tab. 28). Zur Verdeutli-

²⁶ Dies bedeutet, dass zum Beispiel folgende Schlussfolgerung **nicht** zulässig ist: "Variante A weist bei sieben von neun Umwelteffekten geringere Belastungen auf als die Variante B. Variante A ist daher gesamtökologisch vorteilhafter als Variante B". Zulässig ist aber folgende Aussage: "Variante A ist in **allen** Umwelteffekten vorteilhafter als Variante B. Variante A ist daher im Rahmen der Untersuchung gesamtökologisch vorteilhafter als Variante B".

chung sind die Beiträge der Teilsysteme "Heizung", "Brauchwarmwasser" und "Gebäude" unterschieden. Bei den Basisvarianten wurde für den Betriebsstrom der schweizerische Strommix inkl. Importanteil mit 0% Transitgeschäften bilanziert.

Variante ²⁷	LW-WP	SW-WP	Öl	Gas	Elektro
Heizungssystem	Luft/Wasser-Wärmepumpe	Sole/Wasser-Wärmepumpe	Ölkessel	Gaskessel	Elektrodirektheizung
JAZ _{netto}	2.9	3.7			
JNG; JAZ _{brutto}	3.1	4.0	94%	97%	99%
Brauchwarmwassersystem	Separate L/W-WP mit Abluft	Heizungsgespiesener Beistellboiler	Elektroboiler und heizungsgespiesener Boiler	Gas-Durchlauferhitzer	Elektroboiler
JAZ _{netto}	2.1*	2.5**			
JNG; JAZ _{brutto}	3.1	4.0	94%	88%	100%
Verluste	31%	31%	31%	10%	31%
Strommix	CH Import, 0% Transit	CH Import, 0% Transit			CH Import, 0% Transit

Tab. 28: Überblick über die bilanzierten Wärmebereitstellungssysteme, JNG = Jahresnutzungsgrad, JAZ_{brutto} = Jahresarbeitszahl WP alleine, JAZ_{netto} = Jahresarbeitszahl inkl. Hilfsenergien (und Bereitschaftsverluste)
 *: Differenz zu JAZ_{brutto} durch (Bereitschafts)verluste
 **: Differenz zu JAZ_{brutto} (4.0) durch Heizungspumpe (® 3.7) und (Bereitschafts)verluste (® 2.5)

Übersicht der Annahmen

- CH-Strommix mit Import und 0% Transitanteil (schlechtester Landesstrommix, besser als UCPTE-Mix)
- 100% Kältemittelleckage (worst case)
- 94-97% Kessel-Jahresnutzungsgrad (moderne Geräte mit Brennwerttechnik)

Var.	Name	Beschreibung	Heizenergiebedarf [MJ/a]	Warmwasserbedarf [MJ/a]	Totale Fens-terglasfläche [m ²]
1.	NOAH Holz-Leichtbauhaus	Leichtbauhaus mit Wänden aus Holz/Gipsfaserplatten mit Isocell-Isolation	22'785	9166	9.9
2.	NOAH Massivbauhaus	heiztechnisch gleichwertiges Haus wie Variante 1 aber mit Backsteinwänden/Steinwolle	22'785	9166	9.9
3.	SIA2010 Holz-Leichtbauhaus	gegenüber Variante 1 zusätzlich isoliertes Holzleichtbauhaus mit vergrösserten Fensterflächen	18'522	9166	17.1
4.	SIA2010 Massivbauhaus	gegenüber Variante 2 zusätzlich isoliertes Backsteinhaus mit vergrösserten Fensterflächen	16'170	9166	17.1

Tab. 29: Überblick über die vier bilanzierten Gebäudevarianten

²⁷ JAZ_{brutto}: Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe ohne Hilfsaggregate (analog JNG der Heizkessel)
 JAZ_{netto}: Jahresarbeitszahl der gesamten Wärmepumpenheizanlage inkl. aller Hilfsaggregate (Umwälzpumpen) oder Bereitschaftsverluste des WW-Speichers (Wärmeverluste über Oberfläche)
 JNG: Jahresnutzungsgrad eines Heizkessels ohne Hilfsaggregate (Umwälzpumpen, Gebläse, etc.)

Legende

- LW-WP** Luft/Wasser-WP mit separater BWW-WP
- SW-WP** Sole/Wasser-WP mit BWW-Beistellboiler
- Öl** Ölheizung mit BWW ab Kessel/elektrisch
- Gas** Gasheizung mit BWW ab Durchlauferhitzer
- Elektro** Elektroheizung mit BWW ab Elektroboiler

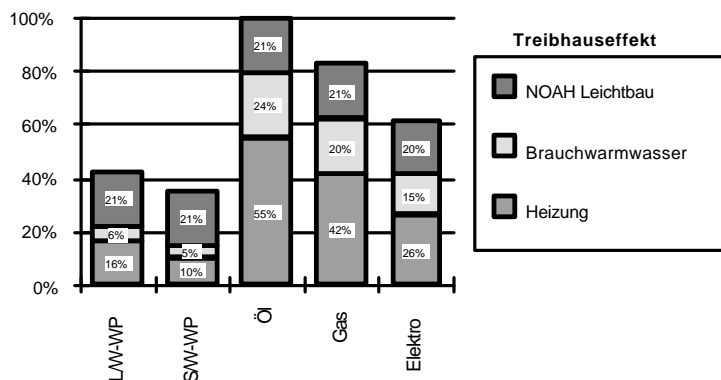


Abb. 73: NOAH Leichtbau: Treibhauseffekt durch Heizung, Brauchwarmwasser und Gebäude für den NOAH Leichtbau mit verschiedenen Wärmeerzeugungs-Varianten, Annahme: CH-Importstrommix mit 0% Transitanteil, Aussagegenauigkeit ca. +/- 35%.

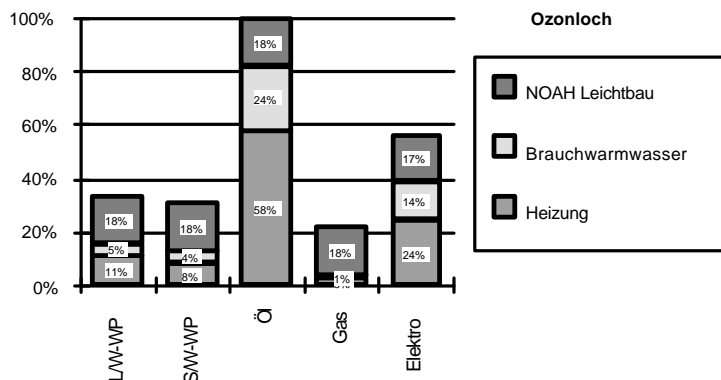


Abb. 74: NOAH Leichtbau: Ozonzerstörung durch Heizung, Brauchwarmwasser und Gebäude für den NOAH Leichtbau mit verschiedenen Wärmeerzeugungs-Varianten, Annahme: CH-Importstrommix mit 0% Transitanteil, Aussagegenauigkeit ca. +/- 35%.

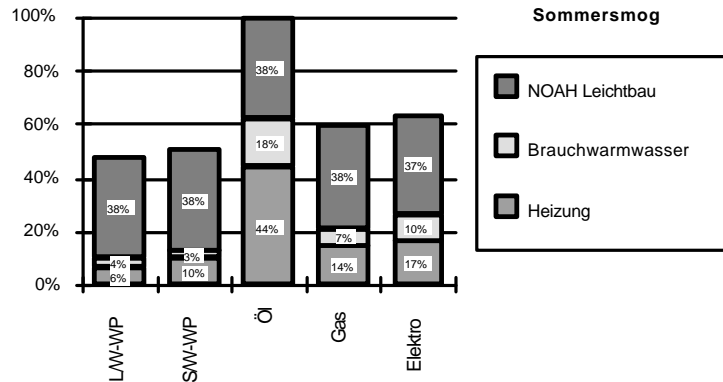


Abb. 75: NOAH Leichtbau: Sommersmog durch Heizung, Brauchwarmwasser und Gebäude für den NOAH Leichtbau mit verschiedenen Wärmeezeugungs-Varianten, Annahme: CH-Importstrommix mit 0% Transitanteil, Aussagegenauigkeit ca. +/- 35%.

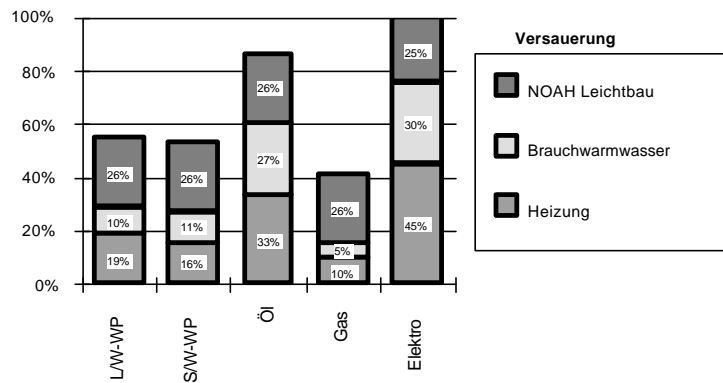


Abb. 76: NOAH Leichtbau: Versauerung durch Heizung, Brauchwarmwasser und Gebäude für den NOAH Leichtbau mit verschiedenen Wärmeezeugungs-Varianten, Annahme: CH-Importstrommix mit 0% Transitanteil, Aussagegenauigkeit ca. +/- 35%.

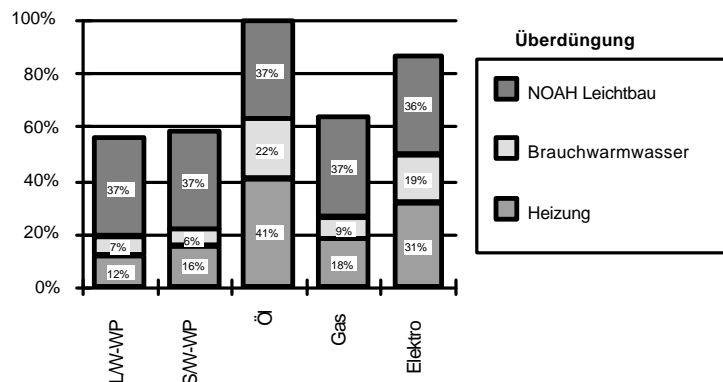


Abb. 77: NOAH Leichtbau: Überdüngung durch Heizung, Brauchwarmwasser und Gebäude für den NOAH Leichtbau mit verschiedenen Wärmeezeugungs-Varianten, Annahme: CH-Importstrommix mit 0% Transitanteil, Aussagegenauigkeit ca. +/- 35%.

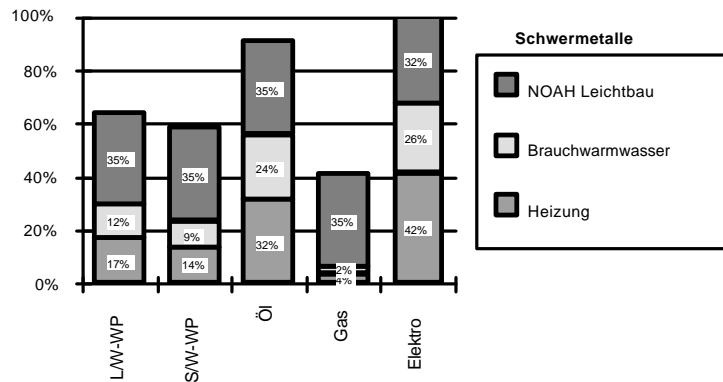


Abb. 78: NOAH Leichtbau: Schwermetalle durch Heizung, Brauchwarmwasser und Gebäude für den NOAH Leichtbau mit verschiedenen Wärmeerzeugungs-Varianten, Annahme: CH-Importstrommix mit 0% Transitanteil, Aussagegenauigkeit ca. +/- 35%.

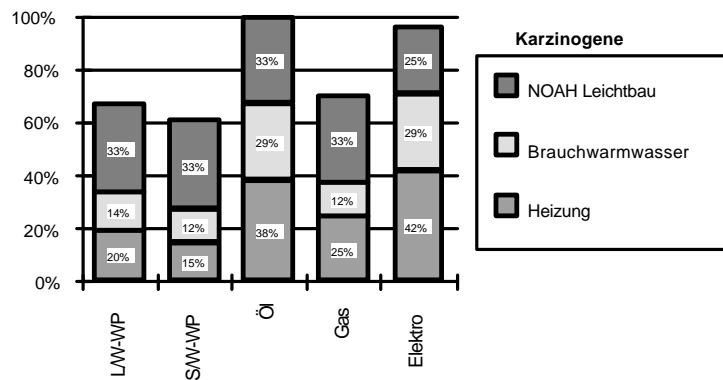


Abb. 79: NOAH Leichtbau: Karzinogene durch Heizung, Brauchwarmwasser und Gebäude für den NOAH Leichtbau mit verschiedenen Wärmeerzeugungs-Varianten, Annahme: CH-Importstrommix mit 0% Transitanteil, Aussagegenauigkeit ca. +/- 35%.

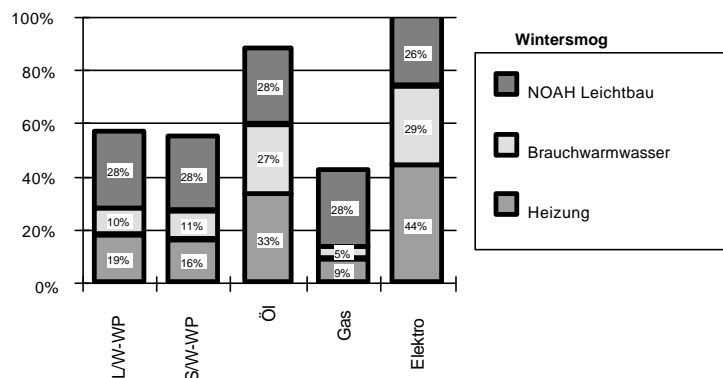


Abb. 80: NOAH Leichtbau: Wintersmog durch Heizung, Brauchwarmwasser und Gebäude für den NOAH Leichtbau mit verschiedenen Wärmeerzeugungs-Varianten, Annahme: CH-Importstrommix mit 0% Transitanteil, Aussagegenauigkeit ca. +/- 35%.

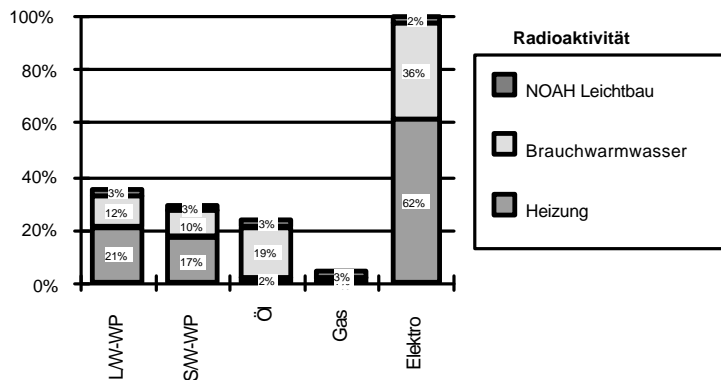


Abb. 81: NOAH Leichtbau: Radioaktivität durch Heizung, Brauchwarmwasser und Gebäude für den NOAH Leichtbau mit verschiedenen Wärmeerzeugungs-Varianten, Annahme: CH-Importstrommix mit 0% Transitanteil, Aussagegenauigkeit ca. +/- 35%.

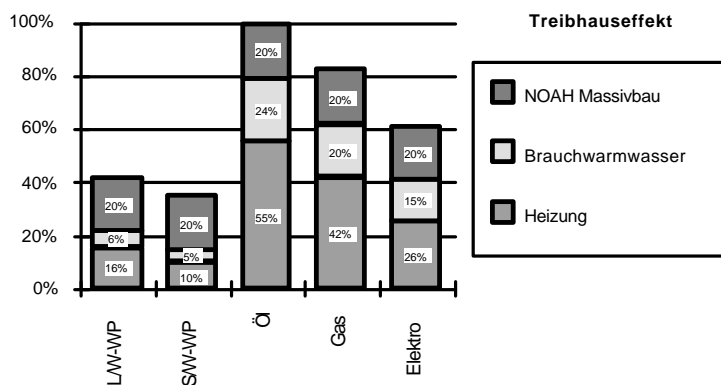


Abb. 82: NOAH Massivbau: Treibhauseffekt durch Heizung, Brauchwarmwasser und Gebäude für den NOAH Massivbau mit verschiedenen Wärmeerzeugungs-Varianten, Annahme: CH-Importstrommix mit 0% Transitanteil, Aussagegenauigkeit ca. +/- 35%.

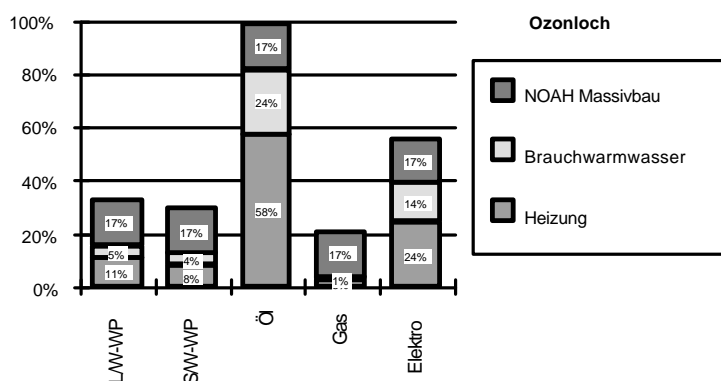


Abb. 83: NOAH Massivbau: Ozonzerstörung durch Heizung, Brauchwarmwasser und Gebäude für den NOAH Massivbau mit verschiedenen Wärmeerzeugungs-Varianten, Annahme: CH-Importstrommix mit 0% Transitanteil, Aussagegenauigkeit ca. +/- 35%.

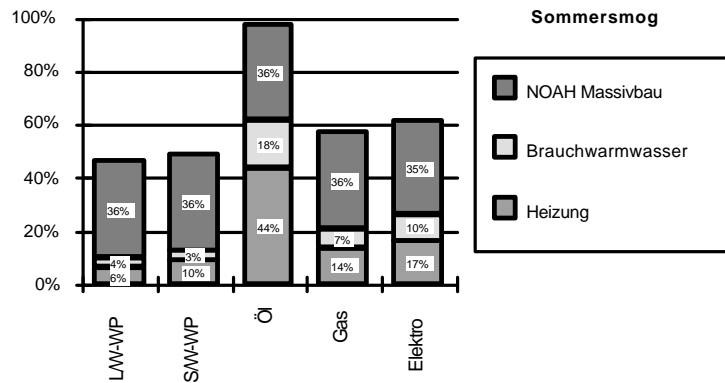


Abb. 84: NOAH Massivbau: Sommersmog durch Heizung, Brauchwarmwasser und Gebäude für den NOAH Massivbau mit verschiedenen Wärmeerzeugungs-Varianten, Annahme: CH-Importstrommix mit 0% Transitanteil, Aussagegenauigkeit ca. +/- 35%.

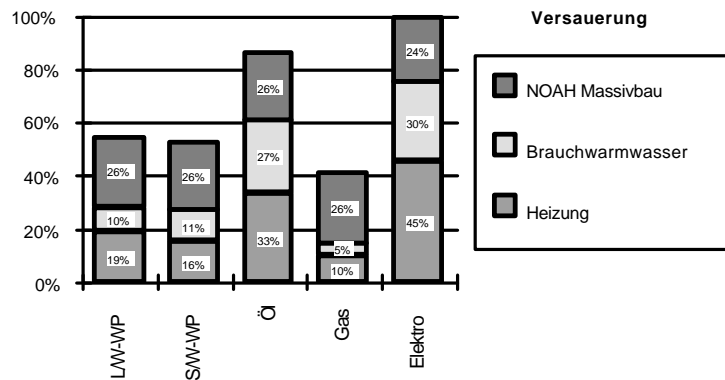


Abb. 85: NOAH Massivbau: Versauerung durch Heizung, Brauchwarmwasser und Gebäude für den NOAH Massivbau mit verschiedenen Wärmeerzeugungs-Varianten, Annahme: CH-Importstrommix mit 0% Transitanteil, Aussagegenauigkeit ca. +/- 35%.

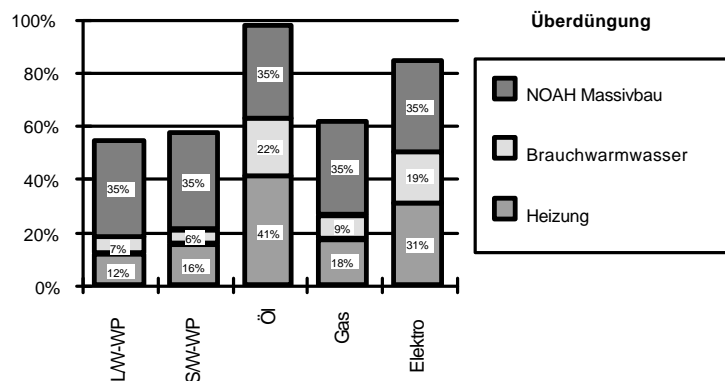


Abb. 86: NOAH Massivbau: Überdüngung durch Heizung, Brauchwarmwasser und Gebäude für den NOAH Massivbau mit verschiedenen Wärmeerzeugungs-Varianten, Annahme: CH-Importstrommix mit 0% Transitanteil, Aussagegenauigkeit ca. +/- 35%.

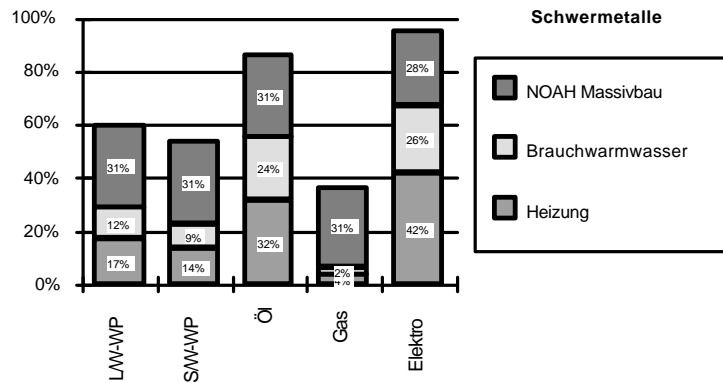


Abb. 87: NOAH Massivbau: Schwermetalle durch Heizung, Brauchwarmwasser und Gebäude für den NOAH Massivbau mit verschiedenen Wärmeerzeugungs-Varianten, Annahme: CH-Importstrommix mit 0% Transitanteil, Aussagegenauigkeit ca. +/- 35%.

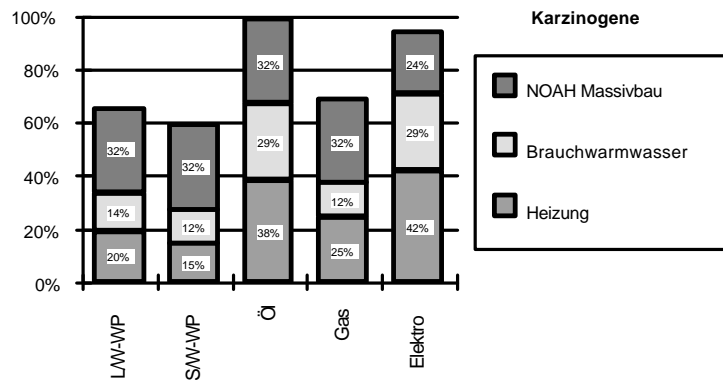


Abb. 88: NOAH Massivbau: Karzinogene durch Heizung, Brauchwarmwasser und Gebäude für den NOAH Massivbau mit verschiedenen Wärmeerzeugungs-Varianten, Annahme: CH-Importstrommix mit 0% Transitanteil, Aussagegenauigkeit ca. +/- 35%.

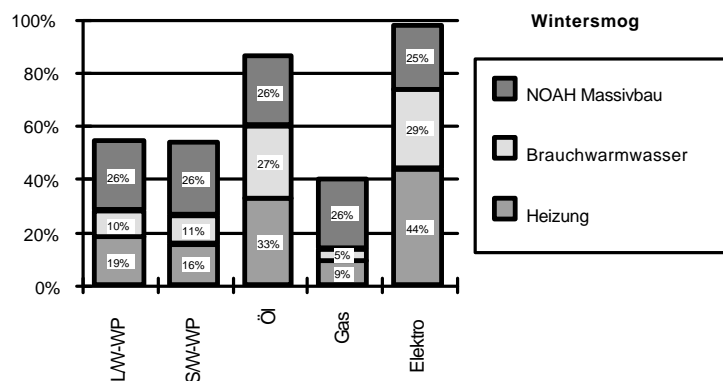


Abb. 89: NOAH Massivbau: Wintersmog durch Heizung, Brauchwarmwasser und Gebäude für den NOAH Massivbau mit verschiedenen Wärmeerzeugungs-Varianten, Annahme: CH-Importstrommix mit 0% Transitanteil, Aussagegenauigkeit ca. +/- 35%.

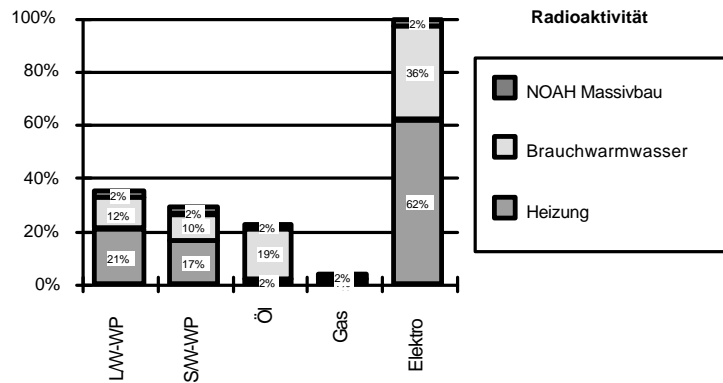


Abb. 90: NOAH Massivbau: Radioaktivität durch Heizung, Brauchwarmwasser und Gebäude für den NOAH Massivbau mit verschiedenen Wärmeerzeugungs-Varianten, Annahme: CH-Importstrommix mit 0% Transitanteil, Aussagegenauigkeit ca. +/- 35%.

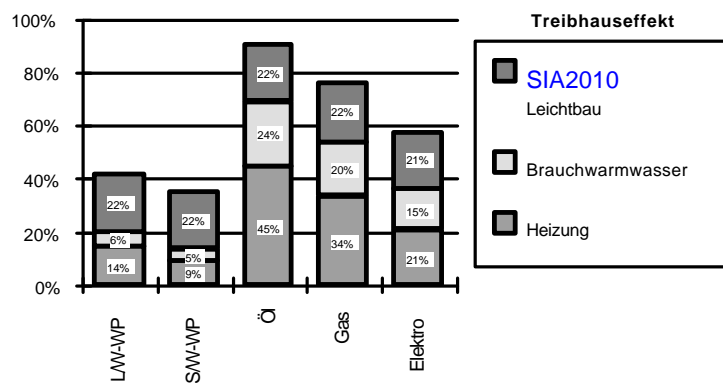


Abb. 91: SIA2010 Leichtbau: Treibhauseffekt durch Heizung, Brauchwarmwasser und Gebäude für den SIA2010 Leichtbau mit verschiedenen Wärmeerzeugungs-Varianten, Annahme: CH-Importstrommix mit 0% Transitanteil, Aussagegenauigkeit ca. +/- 35%.

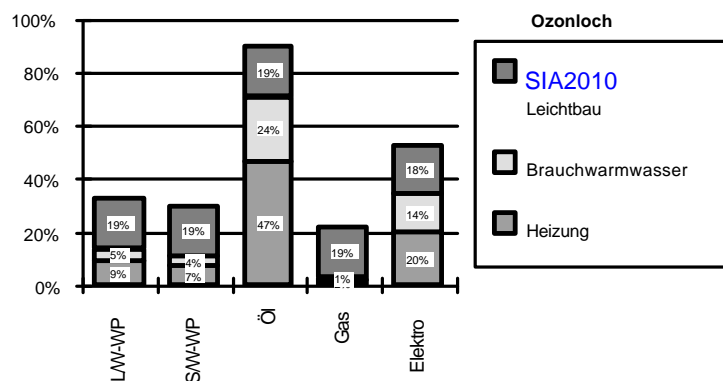


Abb. 92: SIA2010 Leichtbau: Ozonzerstörung durch Heizung, Brauchwarmwasser und Gebäude für den SIA2010 Leichtbau mit verschiedenen Wärmeerzeugungs-Varianten, Annahme: CH-Importstrommix mit 0% Transitanteil, Aussagegenauigkeit ca. +/- 35%.

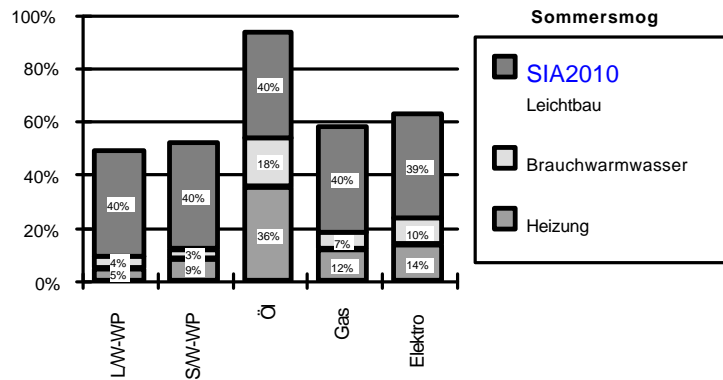


Abb. 93: SIA2010 Leichtbau: Sommersmog durch Heizung, Brauchwarmwasser und Gebäude für den SIA2010 Leichtbau mit verschiedenen Wärmeerzeugungs-Varianten, Annahme: CH-Importstrommix mit 0% Transitanteil, Aussagegenauigkeit ca. +/- 35%.

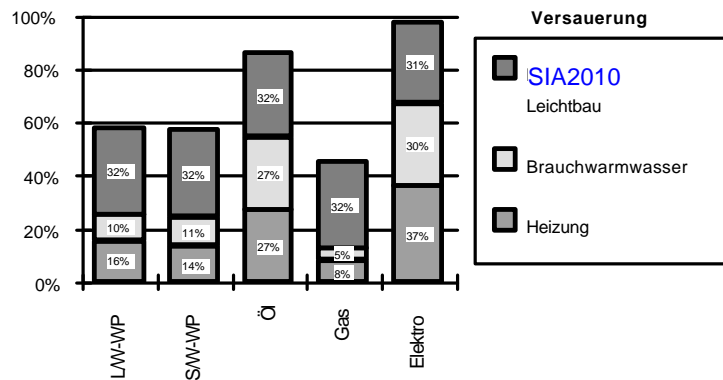


Abb. 94: SIA2010 Leichtbau: Versauerung durch Heizung, Brauchwarmwasser und Gebäude für den SIA2010 Leichtbau mit verschiedenen Wärmeerzeugungs-Varianten, Annahme: CH-Importstrommix mit 0% Transitanteil, Aussagegenauigkeit ca. +/- 35%.

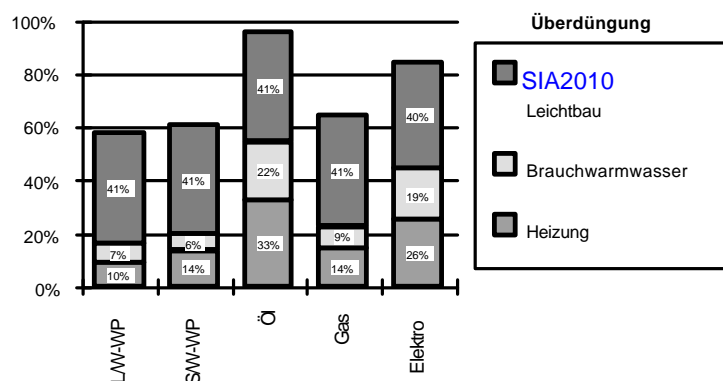


Abb. 95: SIA2010 Leichtbau: Überdüngung durch Heizung, Brauchwarmwasser und Gebäude für den SIA2010 Leichtbau mit verschiedenen Wärmeerzeugungs-Varianten, Annahme: CH-Importstrommix mit 0% Transitanteil, Aussagegenauigkeit ca. +/- 35%.

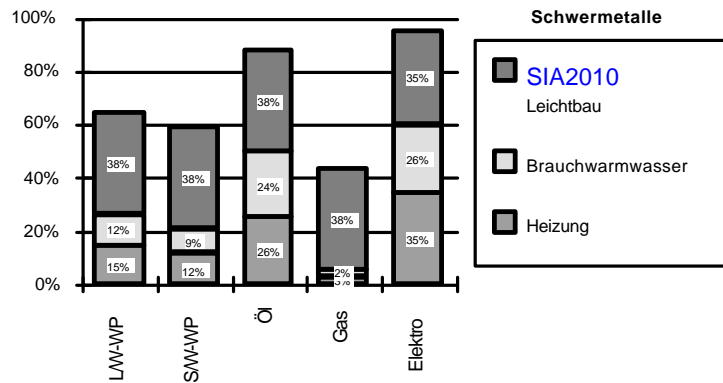


Abb. 96: SIA2010 Leichtbau: Schwermetalle durch Heizung, Brauchwarmwasser und Gebäude für den SIA2010 Leichtbau mit verschiedenen Wärmeerzeugungs-Varianten, Annahme: CH-Importstrommix mit 0% Transitanteil, Aussagegenauigkeit ca. +/- 35%.

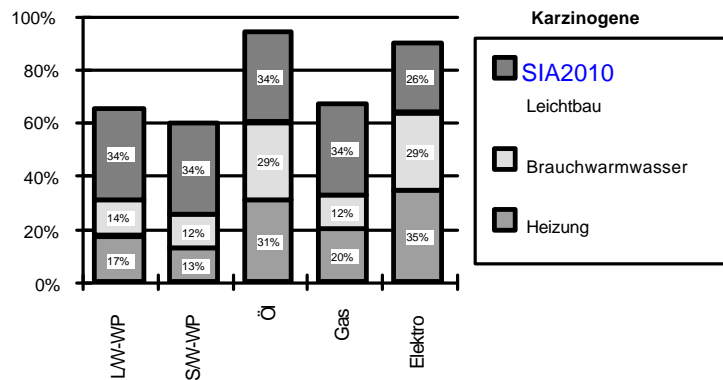


Abb. 97: SIA2010 Leichtbau: Karzinogene durch Heizung, Brauchwarmwasser und Gebäude für den SIA2010 Leichtbau mit verschiedenen Wärmeerzeugungs-Varianten, Annahme: CH-Importstrommix mit 0% Transitanteil, Aussagegenauigkeit ca. +/- 35%.

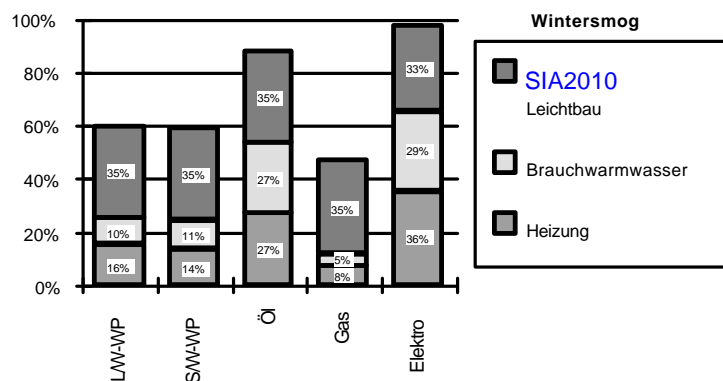


Abb. 98: SIA2010 Leichtbau: Wintersmog durch Heizung, Brauchwarmwasser und Gebäude für den SIA2010 Leichtbau mit verschiedenen Wärmeerzeugungs-Varianten, Annahme: CH-Importstrommix mit 0% Transitanteil, Aussagegenauigkeit ca. +/- 35%.

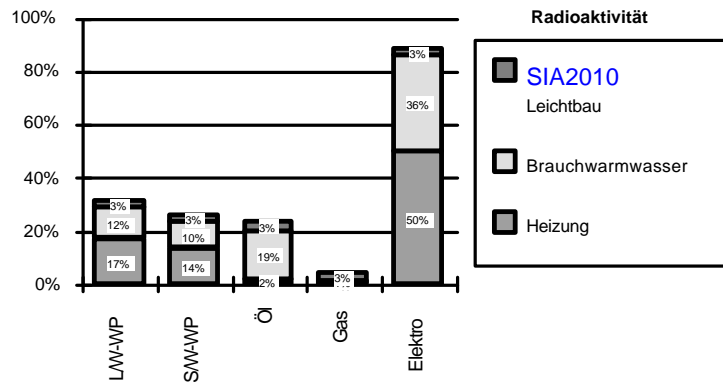


Abb. 99: SIA2010 Leichtbau: Radioaktivität durch Heizung, Brauchwarmwasser und Gebäude für den SIA2010 Leichtbau mit verschiedenen Wärmeerzeugungs-Varianten, Annahme: CH-Importstrommix mit 0% Transitanteil, Aussagegenauigkeit ca. +/- 35%.

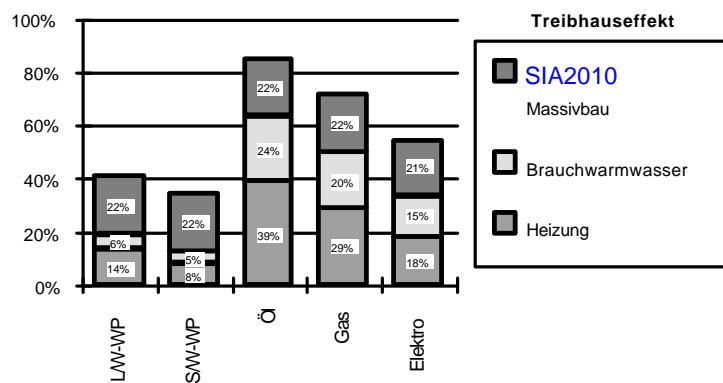


Abb. 100: SIA2010 Massivbau: Treibhauseffekt durch Heizung, Brauchwarmwasser und Gebäude für den SIA2010 Leichtbau mit verschiedenen Wärmeerzeugungs-Varianten, Annahme: CH-Importstrommix mit 0% Transitanteil, Aussagegenauigkeit ca. +/- 35%.

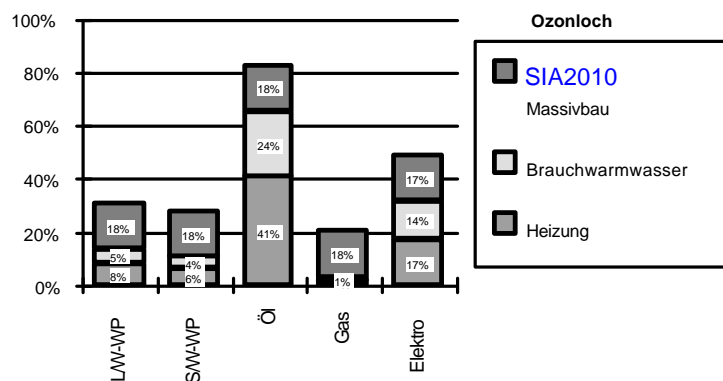


Abb. 101: SIA2010 Massivbau: Ozonzerstörung durch Heizung, Brauchwarmwasser und Gebäude für den SIA2010 Massivbau mit verschiedenen Wärmeerzeugungs-Varianten, Annahme: CH-Importstrommix mit 0% Transitanteil, Aussagegenauigkeit ca. +/- 35%.

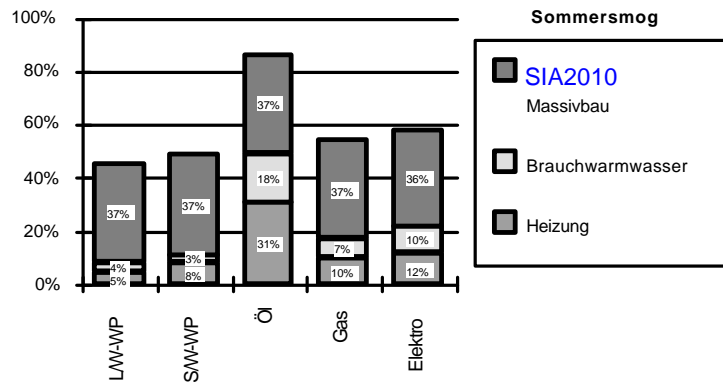


Abb. 102: SIA2010 Massivbau: Sommersmog durch Heizung, Brauchwarmwasser und Gebäude für den SIA2010 Massivbau mit verschiedenen Wärmeerzeugungs-Varianten, Annahme: CH-Importstrommix mit 0% Transitanteil, Aussagegenauigkeit ca. +/- 35%.

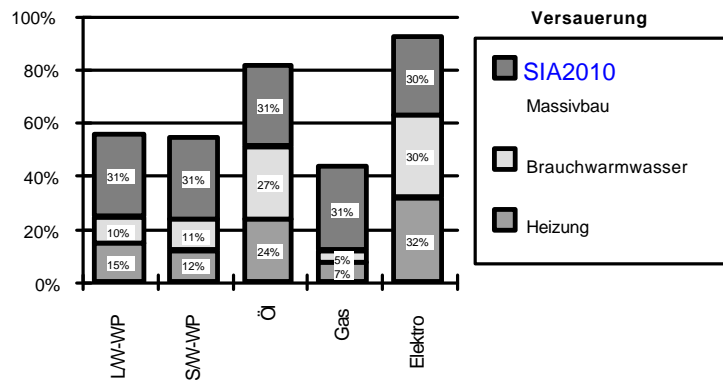


Abb. 103: SIA2010 Massivbau: Versauerung durch Heizung, Brauchwarmwasser und Gebäude für den SIA2010 Massivbau mit verschiedenen Wärmeerzeugungs-Varianten, Annahme: CH-Importstrommix mit 0% Transitanteil, Aussagegenauigkeit ca. +/- 35%.

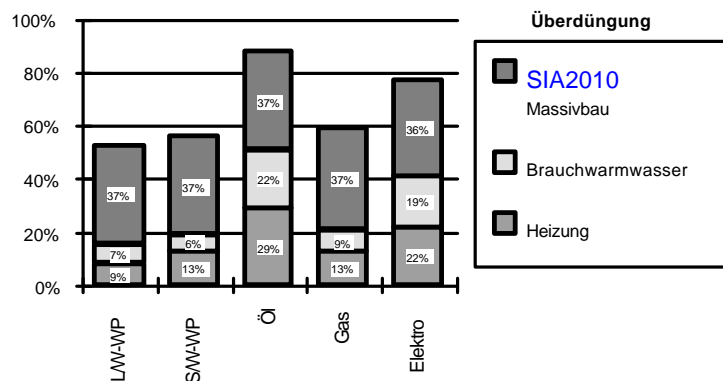


Abb. 104: SIA2010 Massivbau: Überdüngung durch Heizung, Brauchwarmwasser und Gebäude für den SIA2010 Massivbau mit verschiedenen Wärmeerzeugungs-Varianten, Annahme: CH-Importstrommix mit 0% Transitanteil, Aussagegenauigkeit ca. +/- 35%.

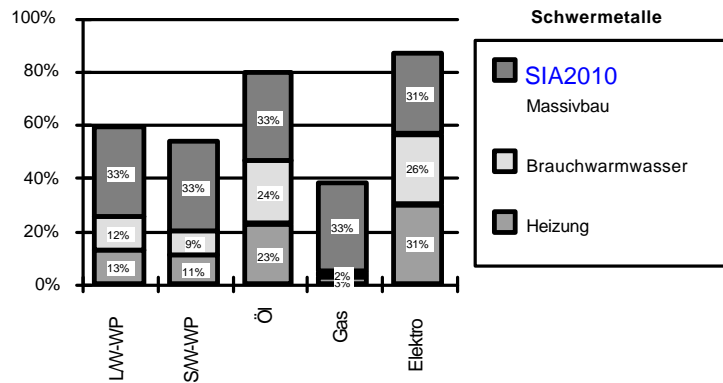


Abb. 105: SIA2010 Massivbau: Schwermetalle durch Heizung, Brauchwarmwasser und Gebäude für den SIA2010 Massivbau mit verschiedenen Wärmeerzeugungs-Varianten, Annahme: CH-Importstrommix mit 0% Transitanteil, Aussagegenauigkeit ca. +/- 35%.

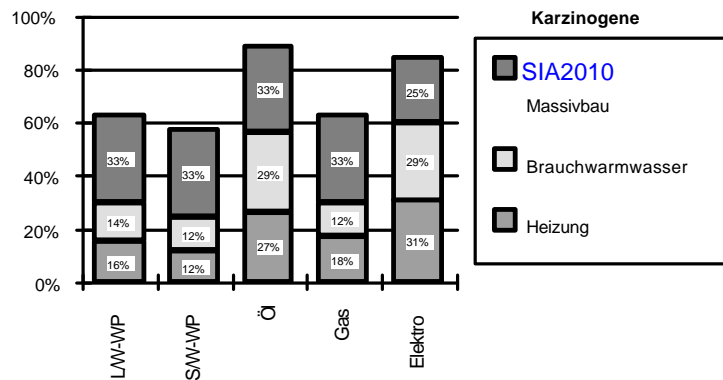


Abb. 106: SIA2010 Massivbau: Karzinogene durch Heizung, Brauchwarmwasser und Gebäude für den SIA2010 Massivbau mit verschiedenen Wärmeerzeugungs-Varianten, Annahme: CH-Importstrommix mit 0% Transitanteil, Aussagegenauigkeit ca. +/- 35%.

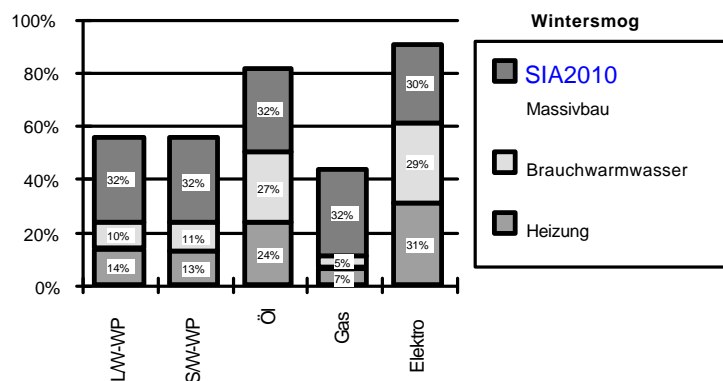


Abb. 107: SIA2010 Massivbau: Wintersmog durch Heizung, Brauchwarmwasser und Gebäude für den SIA2010 Massivbau mit verschiedenen Wärmeerzeugungs-Varianten, Annahme: CH-Importstrommix mit 0% Transitanteil, Aussagegenauigkeit ca. +/- 35%.

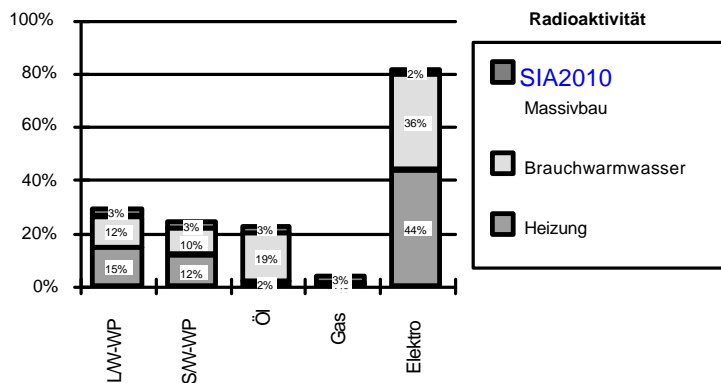


Abb. 108: SIA2010 Massivbau: Radioaktivität durch Heizung, Brauchwarmwasser und Gebäude für den SIA2010 Massivbau mit verschiedenen Wärmeerzeugungs-Varianten, Annahme: CH-Importstrommix mit 0% Transiteil, Aussagegenauigkeit ca. +/- 35%.

3.4.1.1 Resultatdiskussion Gesamtbetrachtungen

Wie gesagt ist auf dieser Aggregierungsstufe keine abschliessende Beurteilung der verschiedenen Varianten möglich. Trotzdem sollen hier einige Kommentare zu den Resultaten gemacht werden.

Die beiden verschiedenen Wärmepumpenvarianten L/W und S/W weisen nur geringe Unterschiede in ihrem Ökoprofil auf.

Allgemein kann beobachtet werden, dass bei fast allen betrachteten Umwelteffekten die Varianten mit Öl- resp. Elektrodirektheizung signifikant schlechter als beide Wärmepumpenvarianten abschneiden²⁸, was kaum überraschen mag.

Überraschend mag sein, dass die Gasheizungsvariante nicht eindeutig schlechter als die Wärmepumpenvarianten abschneidet. Tatsächlich ist die Gasheizungsvariante bei allen Umwelteffekten *ausser beim Treibhauseffekt und knapp beim Sommersmog* vorteilhafter als die Wärmepumpenvarianten. Bei den Effekten "Karzinogene" und "Überdüngung" ist sie nicht signifikant verschieden. Bei den restlichen Effekten (Ozonloch, Versauerung, Schwermetalle, Wintersmog, Radioaktivität) ist die Gasheizungsvariante besser. Daraus kann jedoch nicht abgeleitet werden, ob die Gasheizungsvariante gesamthaft besser als die Wärmepumpenvarianten ist. Sie kann aber auf dieser Analysenstufe nicht als eindeutig schlechter bezeichnet werden. Die Vorteile der Gasheizung sind in der relativen Reinheit der Rohresource Erdgas begründet, die nur geringe Aufwendungen zur Aufbereitung benötigt und relativ geringe Verbrennungsemissionen erzeugt.

Die hohen Belastungen der Ölheizungsvariante in der Kategorie "Ozonzerstörung" stammen von Brandschutzmitteln bei der Erdölprecombustion. Bei der Gasvariante ist das Resultat in der Kategorie "Ozonzerstörung" als untere Schätzung anzusehen, da die Typen und Mengen von Brandschutzmittel für die *Erdgasprecombustion* in [ESU 96] nicht erfasst sind.

Der Anteil der Gebäudeinfrastruktur ist bei allen Effekten ausser Radioaktivität bedeutend und nicht zu vernachlässigen. Bei geringbelastenden Wärmevarianten können die Belastungen aus dem Gebäude leicht über die Hälfte der Gesamtbelastungen aus Gebäude und Wärme ausmachen. Das heisst, dass dort die Belastungen aus der Gebäudeinfrastruktur bereits höher sind als die Belastung aus der Energieversorgung des Gebäudes (s. Diskussion unten). Dies bei einer angenommen Lebensdauer des Gebäudes von 80 Jahren.

Es können keine signifikante Unterschied zwischen Leicht- und Massivbauweise gefunden werden. Aus ökologischer Sicht unterscheiden sich die hier betrachteten Bauweisen nicht. Die SIA2010-

²⁸Ausnahmen: die Sommersmogbelastung der Elektrodirektheizungsvariante ist kaum grösser als diejenige der Wärmepumpenvarianten; die Belastung durch Radioaktivität bei der Ölvariante ist geringer als bei den Wärmepumpenvarianten. Die Ölheizungsvariante ist jedoch auch bezüglich Sommersmog schlechter als die Wärmepumpenvarianten.

Gebäude sind aufwendiger als die NOAH-Gebäude, was sich in den Effekten Versauerung, Wintersmog und in geringerem Masse bei Sommersmog und Überdüngung zeigt.

Die Analyse bestätigt den Ruf der Wärmepumpen als ein vergleichsweise umweltschonendes Wärmesystem in der Schweiz eindeutig vor Öl- und Elektrodirektssystemen. Erdgasbetriebene Kesselheizungen müssen jedoch in ökologischer Hinsicht tendenziell als ernstzunehmende Konkurrenz wahrgenommen werden.

Kältemittlemissionen

Bei der Diskussion über die ökologischen Auswirkungen von Wärmepumpen sind Kältemittel immer wieder ein Thema. In der vorliegenden Studie wurden einerseits nur Kältemittel ohne Ozonzerstörungspotential betrachtet (R407c und Propan). Zum anderen wurden aber die Leckageraten auf 100% gesetzt. Das bedeutet, dass eine gesamte Kältemittelfüllung während der gesamten Lebensdauer der Wärmepumpe emittiert wird. Die Kältemittlemissionen werden als Teil der Infrastruktur und nicht des Betriebs verstanden, da angenommen wurde, dass sie vor allem beim unsachgemässen Abbruch der Anlage entstehen (worst case). Die Zahlen, welche einer Leckagerate von 25% entsprechen sind in Klammern angegeben.

Bei der L/W-WP wird R407c als Kältemittel bilanziert. R407c hat lediglich ein Treibhauspotential. Die anderen Umwelteffekte werden von der R407c-Emission nicht betroffen. Die Kältemittlemissionen machen rund 87% (63%) des Treibhauseffektes der Infrastruktur der Wärmepumpe aus (ohne Betrieb). Dieser Anteil sinkt auf 40% (14%), wenn als Bezug die Heizwärmeproduktion ab WP (inkl. Infrastruktur) für den NOAH LB genommen wird. Bezüglich der ganzen Bilanzinheit (Heizung & BWW & NOAH LB) betragen die Kältemittlemissionen noch 15% (4%).

Bei der S/W-WP wird ebenfalls R407c als Kältemittel bilanziert. Die Kältemittlemissionen machen rund 50% (20%) des Treibhauseffektes der Infrastruktur der Wärmepumpe aus (ohne Betrieb). Dieser Anteil sinkt auf 17% (5%), wenn als Bezug die Heizwärmeproduktion ab WP (inkl. Infrastruktur) für den NOAH LB genommen wird. Bezüglich der ganzen Bilanzinheit (Heizung & BWW & NOAH LB) betragen die Kältemittlemissionen noch 5% (1%).

Bei der separaten BWW-WP wird Propan als Kältemittel bilanziert. Propan hat lediglich Einfluss auf den Sommersmog. Die anderen Umwelteffekte werden von der Propan-Emission nicht betroffen. Die Kältemittlemissionen machen hier rund 17% (5%) des Sommersmog-Potentials der Infrastruktur der Wärmepumpe aus (ohne Betrieb). Dieser Anteil sinkt auf 4% (1%), wenn als Bezug die BWW-Produktion ab WP (inkl. Infrastruktur) genommen wird. Bezüglich der ganzen Bilanzinheit (Heizung & BWW & NOAH LB) betragen die Kältemittlemissionen noch 0.3% (0.1%).

Bei allen anderen Umwelteffekten haben die Kältemittlemissionen keinen Einfluss.

R407c hat einen wesentlichen Einfluss auf die Treibhausgasemissionen der Heiz-WP. Die Annahme der vollständigen Emission ist hier bedeutend. Üblicherweise werden Kältemittel zu 17% bis 24% emittiert [Hohl 97, Weibel 96]. Die Propanemissionen der BWW-WP machen einen kleineren Teil des Sommersmogpotentials aus, als R407c für die Treibhausgase.

Eine abschliessende Beurteilung über die Relevanz ist hier nicht möglich, es kann aber gesagt werden, dass die verwendeten Kältemittel ohne Ozonzerstörungspotential die gesamte Ökobilanz der Wärmepumpen sicher nicht dominieren. Wichtigere Belastungen stammen aus dem Betriebsstrom.

Würde R407c durch das alte R22 ersetzt, würden die Treibhauseffekte zwar sinken (R22 besitzt etwa ein 30mal kleineres Treibhausgaspotential als R407c), aber dafür würde das Ozonzerstörungspotenti-

al wesentlich zunehmen. R22 würde den Effekt Ozonzerstörung auf Stufe Gesamtergebnis zu 81% (52%) (L/W-WP) resp. 57% (25%) (S/W-WP) bestimmen.

Die obigen Aussagen wurden für das NOAH Leichtbaugeschäft gemacht. Für die anderen Gebäudevarianten werden die Kältemittellemissionen relativ wichtiger, da die Gesamtbelastungen kleiner werden, bleiben aber in dieser Grössenordnung.

Beitrag durch Infrastruktur bei Wärmepumpen

Für die Wärmepumpensysteme für das SIA2010-Massivbauhaus wurde berechnet, wie gross der Anteil der Infrastruktur des jeweiligen Systems an den verschiedenen Umwelteffekten ist. Das SIA2010-Massivbauhaus weist den geringsten Wärmeenergiebedarf auf und weist daher tendenziell eine grössere Wichtigkeit der Infrastruktur auf. Der Bezug ist jeweils die Umweltbelastung auf Stufe (WP-Infrastruktur & Betrieb) d.h. ohne Gebäude²⁹. Die oben diskutierten Kältemittellemissionen werden dabei als Teil der WP-Infrastruktur betrachtet.

L/W-Heiz-WP		S/W-Heiz-WP		BWW-WP (L/W)	
Radioaktivität	1%	Radioaktivität	1%	Radioaktivität	1%
Überdüngung	15%	Ozonloch	29%	Ozonloch	7%
Sommersmog	18%	Schwermetalle	31%	Versauerung	13%
Versauerung	26%	Versauerung	31%	Wintersmog	14%
Wintersmog	26%	Wintersmog	33%	Überdüngung	17%
Schwermetalle	30%	Karzinogene	38%	Treibhauseffekt	18%
Ozonloch	32%	Treibhauseffekt	41%	Sommersmog	22%
Karzinogene	41%	Überdüngung	56%	Schwermetalle	39%
Treibhauseffekt	55%	Sommersmog	64%	Karzinogene	48%

Tab. 30: *Infrastrukturanteile für die verschiedenen Wärmepumpen bei Betrieb für das SIA2010-Massivbauhaus (100% Kältemittelleckage; Prozentzahlen geben den Anteil der WP-Infrastruktur an der Belastung durch "WP-Infrastruktur & -Betrieb" an)*

Für die L/W-WP schwanken die Werte zwischen 1% (Radioaktivität) und 55% (Treibhauseffekt). Bei der S/W-WP ist ebenfalls die Radioaktivität mit 1% am wenigsten durch die Infrastruktur geprägt; die Infrastruktur macht jedoch maximal 64% der Umweltbelastung aus (Sommersmog). Tendenziell sind die Werte für die S/W-WP höher, was mit einer aufwendigeren Infrastruktur und einer besseren Betriebs-Performance erklärt werden kann. Die Infrastrukturanteile sind für die Heiz-WP am häufigsten im Bereich zwischen 15% und 40% anzutreffen und sind daher für die Bilanz nicht vernachlässigbar.

Bei der separaten Brauchwarmwasser-WP sind wiederum die kleinsten Werte mit 1% bei der Radioaktivität zu finden; am wichtigsten wird die Infrastruktur mit 48% bei den Karzinogenen. Die Infrastrukturanteile sind bei der Brauchwarmwasser-WP am häufigsten im Bereich zwischen 10% und 20% anzutreffen und sind somit tendenziell geringer als bei den Heiz-WP, aber auch hier kann die Infrastruktur für die Bilanz nicht mit gutem Gewissen vernachlässigt werden.

Die Analyse bestätigt die Wichtigkeit der Berücksichtigung der Infrastruktur, umgekehrt aber auch die weiterhin dominanten Belastungen aus dem Betriebsstromverbrauch. Doch je effizienter die Betriebsdaten werden, desto wichtiger werden ökologisch gesehen die Infrastrukturaufwendungen.

²⁹Das Gebäude selbst weist überall 100% Infrastrukturanteil auf und ist daher für diese Teilanalyse uninteressant.

3.4.2 Sensitivitätsanalyse: Erhöhung der Jahresarbeitszahl

Als Sensitivitätsanalyse soll untersucht werden, wie die Wärmepumpenvarianten bei einer pauschalen Erhöhung der JAZ_{netto} auf 4.5 abschneiden. Es wird nur die Luft/Wasser-WP-Variante untersucht. Es wird dabei wiederum die ganze funktionale Einheit (Heizung, Warmwasser und Gebäude) betrachtet, um so einen Vergleich mit den oben aufgeführten Resultaten zu ermöglichen. Es werden nur die Wärmebereitstellungsvarianten für das NOAH-Leichtbaugebäude betrachtet.

Legende

- LW-WP** Luft/Wasser-WP (JAZ_{netto} 2.9)
mit separater BWW-WP (JAZ_{brutto} 3.1)
- LW-WP*** Luft/Wasser-WP mit separater BWW-WP mit jeweils auf 4.5 erhöhter JAZ

Die JAZ der untersuchten WP-Systeme besitzen verschiedene Werte (vergl. Tab. 31). Es wird angenommen, dass die Erhöhung der JAZ ohne wesentliche Erhöhung der Infrastrukturaufwendungen möglich ist. D.h. die Erhöhung der JAZ hat hier nur Einfluss auf den Betriebsstromverbrauch, die Infrastruktur wird konstant belassen.

Die Erhöhung der Gesamt-JAZ von 3 auf 4.5 entspricht einer Verbesserung der gesamten Systemleistung von 33%. Bei einer JAZ von 3 verbrauchen die Hilfsaggregate (Umwälzpumpen etc.) bereits etwa 24% der gesamten Betriebsenergie. Bei einer Verbesserung der Gesamt-JAZ sind daher auch die Hilfsaggregate zu verbessern. Künftige Verbesserungen bei den Hilfsaggregaten sind jedoch realistisch und insbesondere bei Umwälzpumpen markant.

In Tab. 31 wird angegeben, wie hoch die Verbesserung sein müsste, um von den realen JAZ zu den in der Sensitivitätsanalyse verwendeten JAZ zu gelangen.

Wärmepumpen-system	Bilanzierte JAZ	JAZ der Sensitivitäts-analyse	Verbesserung
JAZ_{netto} LW-Heizwärmepumpe	2.9	4.5	55%
JAZ_{brutto} Separate LW-Warmwasserpumpe	3.1	4.5	45%

Tab. 31: Erhöhung der Gesamt-JAZ bei der Sensitivitätsanalyse

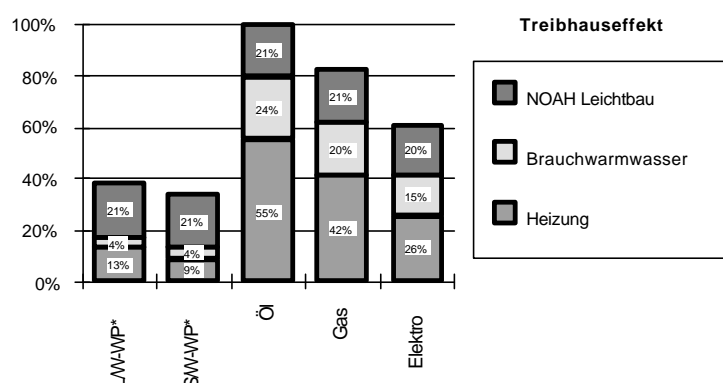


Abb. 109: JAZ Sensitivität: Treibhauseffekt durch Heizung, Brauchwarmwasser und Gebäude für den NOAH Leichtbau mit verschiedenen Wärmeenerzeugungs-Varianten; WP* = Erhöhung der JAZ auf 4.5, Betriebsstromverbrauch aus CH-Strommix mit Importanteilen und 0% Transit-Importen, relativer Fehler ca. +/- 20%.

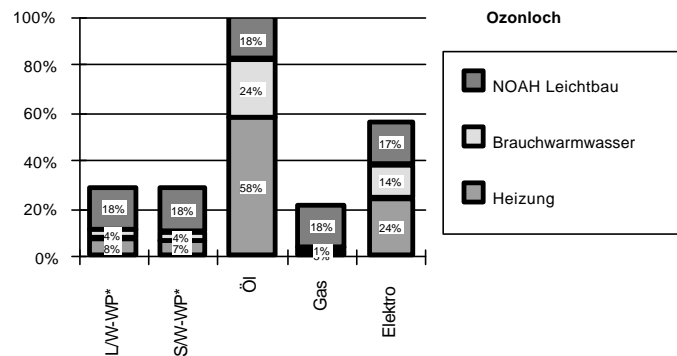


Abb. 110: JAZ Sensitivität: Ozonzerstörung durch Heizung, Brauchwarmwasser und Gebäude für den NOAH Leichtbau mit verschiedenen Wärmeerzeugungs-Varianten; WP* = Erhöhung der JAZ auf 4.5, Betriebsstromverbrauch aus CH-Strommix mit Importanteilen und 0% Transit-Importen, relativer Fehler ca. +/- 20%.

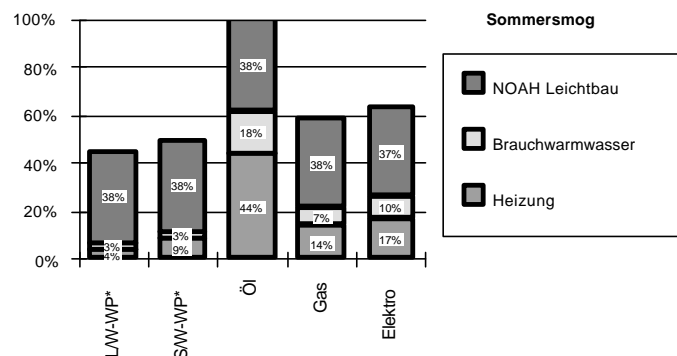


Abb. 111: JAZ Sensitivität: Sommersmog durch Heizung, Brauchwarmwasser und Gebäude für den NOAH Leichtbau mit verschiedenen Wärmeerzeugungs-Varianten; WP* = Erhöhung der JAZ auf 4.5, Betriebsstromverbrauch aus CH-Strommix mit Importanteilen und 0% Transit-Importen, relativer Fehler ca. +/- 20%.

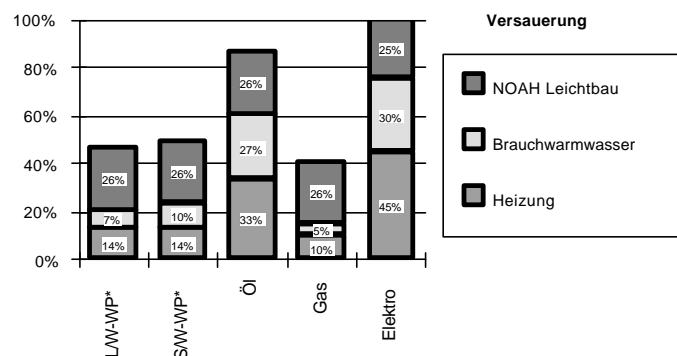


Abb. 112: JAZ Sensitivität: Versauerung durch Heizung, Brauchwarmwasser und Gebäude für den NOAH Leichtbau mit verschiedenen Wärmeerzeugungs-Varianten; WP* = Erhöhung der JAZ auf 4.5, Betriebsstromverbrauch aus CH-Strommix mit Importanteilen und 0% Transit-Importen, relativer Fehler ca. +/- 20%.

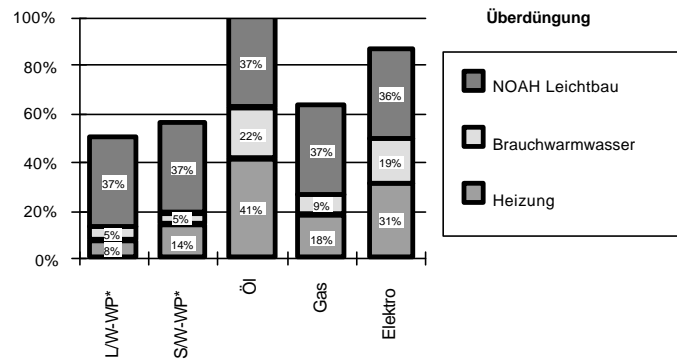


Abb. 113: JAZ Sensitivität: Überdüngung durch Heizung, Brauchwarmwasser und Gebäude für den NOAH Leichtbau mit verschiedenen Wärmeerzeugungs-Varianten; WP* = Erhöhung der JAZ auf 4.5, Betriebsstromverbrauch aus CH-Strommix mit Importanteilen und 0% Transit-Importen, relativer Fehler ca. +/- 20%.

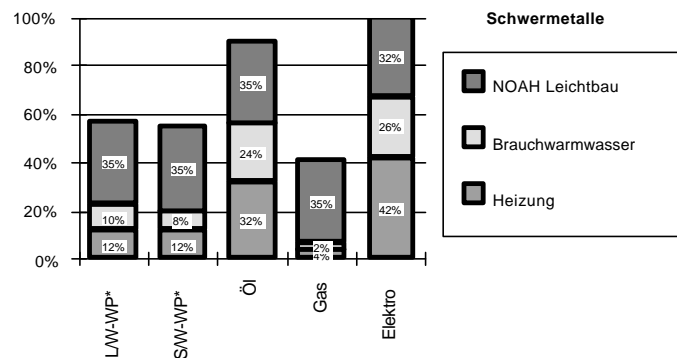


Abb. 114: JAZ Sensitivität: Schwermetalle durch Heizung, Brauchwarmwasser und Gebäude für den NOAH Leichtbau mit verschiedenen Wärmeerzeugungs-Varianten; WP* = Erhöhung der JAZ auf 4.5, Betriebsstromverbrauch aus CH-Strommix mit Importanteilen und 0% Transit-Importen, relativer Fehler ca. +/- 20%.

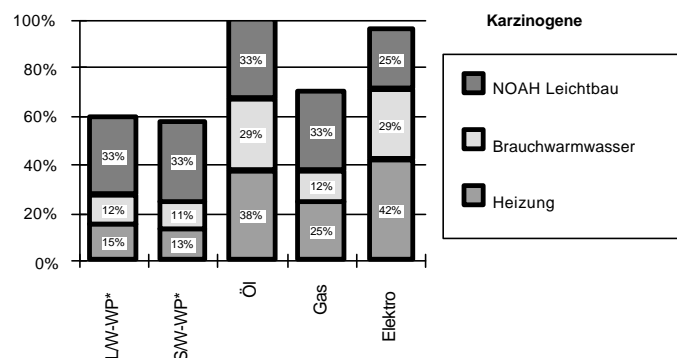


Abb. 115: JAZ Sensitivität: Karzinogene durch Heizung, Brauchwarmwasser und Gebäude für den NOAH Leichtbau mit verschiedenen Wärmeerzeugungs-Varianten; WP* = Erhöhung der JAZ auf 4.5, Betriebsstromverbrauch aus CH-Strommix mit Importanteilen und 0% Transit-Importen, relativer Fehler ca. +/- 20%.

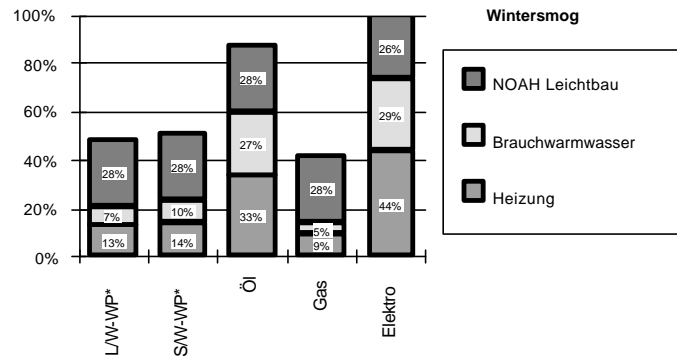


Abb. 116: JAZ Sensitivität: Wintersmog durch Heizung, Brauchwarmwasser und Gebäude für den NOAH Leichtbau mit verschiedenen Wärmeerzeugungs-Varianten; WP* = Erhöhung der JAZ auf 4.5, Betriebsstromverbrauch aus CH-Strommix mit Importanteilen und 0% Transit-Importen, relativer Fehler ca. +/- 20%.

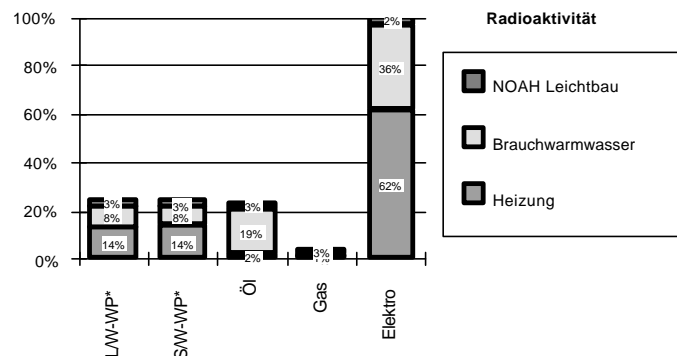


Abb. 117: JAZ Sensitivität: Radioaktivität durch Heizung, Brauchwarmwasser und Gebäude für den NOAH Leichtbau mit verschiedenen Wärmeerzeugungs-Varianten; WP* = Erhöhung der JAZ auf 4.5, Betriebsstromverbrauch aus CH-Strommix mit Importanteilen und 0% Transit-Importen, relativer Fehler ca. +/- 20%.

3.4.2.1 Resultatdiskussion JAZ-Erhöhung

Durch die Erhöhung der JAZ kann einerseits der Einfluss der JAZ auf das Gesamtergebnis demonstriert werden, zum anderen werden auch Tendenzen klar, die bei einer zukünftigen Erhöhung der JAZ durch technische Verbesserungen erzielt werden können. Bei letzterem gilt aber zu bedenken, dass die mitpräsentierten Referenzsysteme (Öl-, Gas-, Elektrowärme) gemäss heutigen Technologien bilanziert wurden, und dort keine entsprechenden Verbesserungen berücksichtigt sind³⁰.

Durch die JAZ-Erhöhung verringern sich die Belastungen bei allen Umwelteffekten³¹. Am stärksten sichtbar ist der Rückgang bei der Radioaktivität; am geringsten beim Treibhauseffekt.

³⁰ Auf der Ebene der Feuerungsanlage selbst sind nur noch geringe Wirkungsgradverbesserungen zu erwarten. Bei anderen Grössen des Lebenszyklus, insbesondere auch in der Precombustion sind bei Erdgas und Heizöl durchaus Verbesserungen denkbar. In der Schweiz existiert z.B. ein spezielles Heizöl extra leicht, bei welchem der Schwefel- und Stickstoffgehalt wesentlich reduziert wurde und welches gemäss Hersteller weniger Energie bei der Raffinierung benötigt [Shell 96]. Dieses Einzelprodukt kann aber (noch?) nicht als repräsentativ betrachtet werden.

³¹ Der Rückgang im Gesamtergebnis ist selbstverständlich nicht direkt proportional zur Verbesserung der JAZ, da im Gesamtergebnis auch Infrastruktur-Teile berücksichtigt sind, welche nicht mit der JAZ variieren.

Gegenüber der Gasheizungsvariante wird durch die JAZ-Erhöhung insbesondere bei den Effekten Überdüngung und Karzinogene aufgeholt. Die WP-Variante liegt hier mit diesen Effekten sowie bezüglich Treibhauseffekt und Sommersmog vor der Gasheizung. Eine abschliessende Beurteilung ist jedoch nicht möglich.

3.4.3 Sensitivitätsanalyse: Stromvarianten

Um den Einfluss der Strombereitstellung auf die ökologischen Belastungen der S/W-Wärmepumpe zu verdeutlichen, wurde die Variante "S/W-WP für NOAH Leichtbau" mit verschiedenen Strombereitstellungen bilanziert.

Zwei Stromvarianten entsprechen der Bilanzierung mit den **gegenwärtigen, durchschnittlichen Strommixe** für die Schweiz. Der Unterschied besteht in der Berücksichtigung der Stromimporte aus dem Ausland.

Ø CH: Durchschnittlicher Strommix für die Schweiz ohne Importe. Reine Inlandproduktion unter der Annahme, dass alle Importe aus dem Ausland Transitgeschäfte sind, die nicht in der Schweiz benötigt werden. Dies ist für einen *Landesstrommix der Schweiz* die beste denkbare Variante.

Ø CH Import: Durchschnittlicher Strommix für die Schweiz inkl. Importe. Inlandproduktion plus Gesamtheit der Importe aus dem Ausland. Der Anteil der Transitgeschäfte an den Importen beträgt also 0%. Die Bilanzen in dieser Studie wurden mit diesem Strommix berechnet. Dies ist für einen *Landesstrommix der Schweiz* die schlechteste denkbare Variante.

Da der genaue Anteil Transitgeschäfte an den Importen nicht genau bekannt ist, kann lediglich ausgesagt werden, dass für eine Betrachtung des gegenwärtigen Strommixes für die Schweiz die Realität zwischen den Varianten "Ø CH" und "Ø CH Import" liegt.

Die anderen zwei Stromvarianten entsprechen einer Marginalbetrachtung. Als Stromlieferanten werden einige der **Wachstumstechnologien** bilanziert, die bei einem Ausbau der Kraftwerksleistung heute eingesetzt werden.

GuD: Der Strom für die Wärmepumpe stammt aus einem Kraftwerk mit gasbetriebener Gas- und Dampfturbine.

BHKW: Der Strom für die Wärmepumpe stammt aus einem gasbetriebenen Blockheizkraftwerk. Die Wärme aus dem BHKW wird anstelle eines Teils der Wärmepumpenwärme bilanziert. Die Variante entspricht daher nicht einer reinen Stromsensitivität, sondern einem unterschiedlichen Heizsystem, welches Wärme aus dem BHKW und der Wärmepumpe nutzt (BHKW-WP-Kombination)

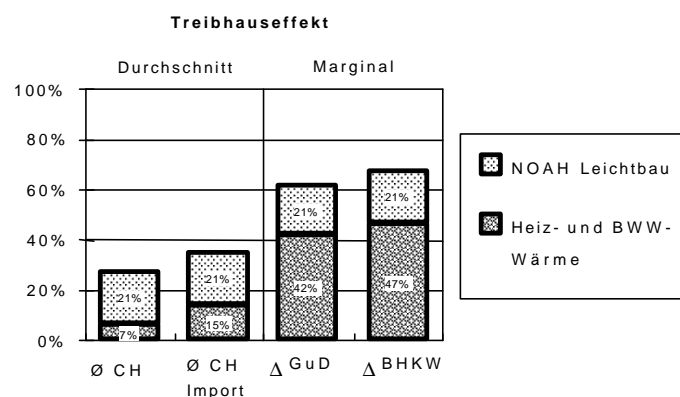


Abb. 118: Stromsensitivität: Treibhauseffekt durch S/W-WP, Beistellboiler und NOAH Leichtbau mit verschiedenen Strombereitstellungs-Varianten, relativer Fehler ca. +/- 20%.

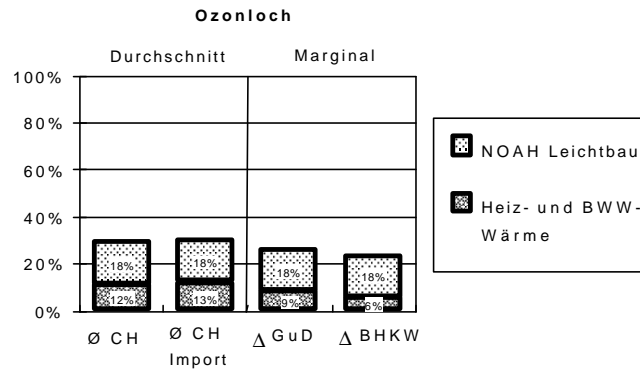


Abb. 119: Stromsensitivität: Ozonloch durch S/W-WP, Beistellboiler und NOAH Leichtbau mit verschiedenen Strombereitstellungs-Varianten, relativer Fehler ca. +/- 20%.

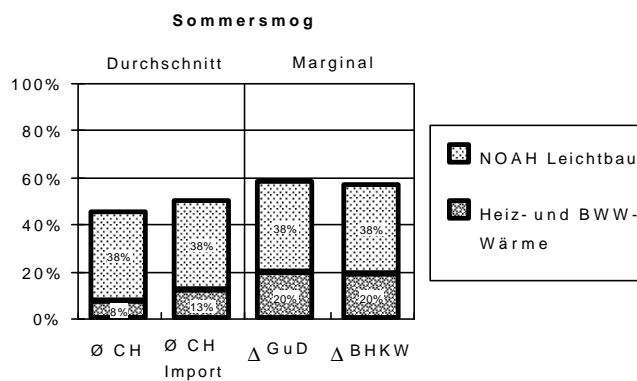


Abb. 120: Stromsensitivität: Sommersmog durch S/W-WP, Beistellboiler und NOAH Leichtbau mit verschiedenen Strombereitstellungs-Varianten, relativer Fehler ca. +/- 20%.

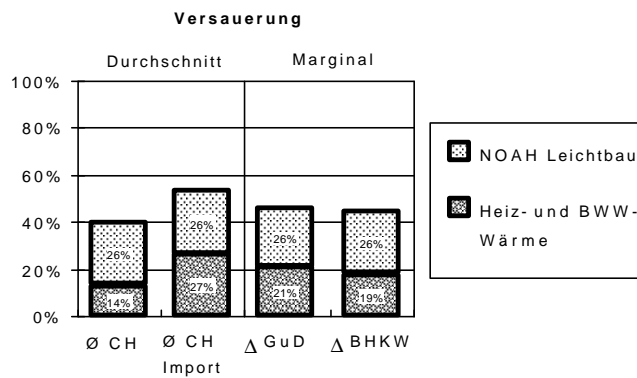


Abb. 121: Stromsensitivität: Versauerung durch S/W-WP, Beistellboiler und NOAH Leichtbau mit verschiedenen Strombereitstellungs-Varianten, relativer Fehler ca. +/- 20%.

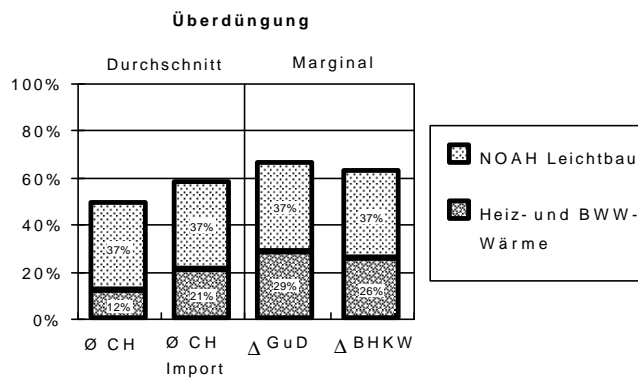


Abb. 122: Stromsensitivität: Überdüngung durch S/W-WP, Beistellboiler und NOAH Leichtbau mit verschiedenen Strombereitstellungs-Varianten, relativer Fehler ca. +/- 20%.

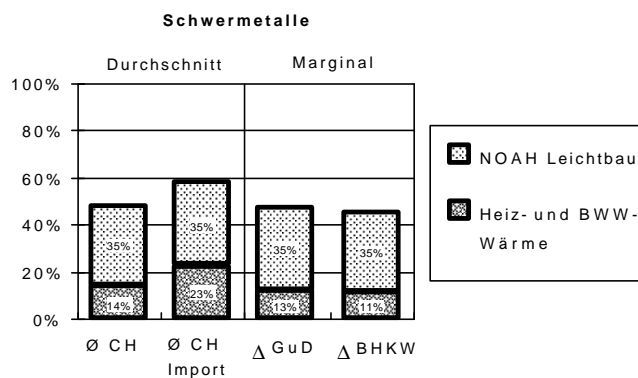


Abb. 123: Stromsensitivität: Schwermetalle durch S/W-WP, Beistellboiler und NOAH Leichtbau mit verschiedenen Strombereitstellungs-Varianten, relativer Fehler ca. +/- 20%.

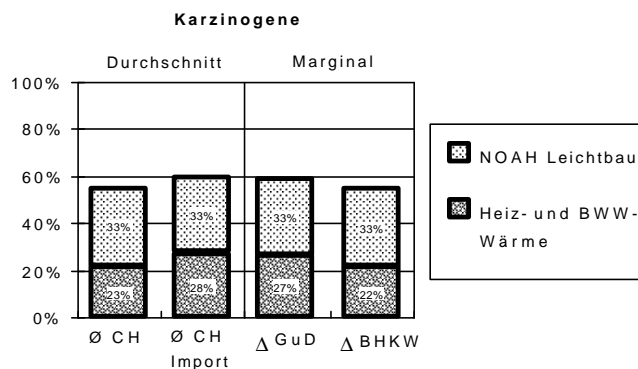


Abb. 124: Stromsensitivität: Karzinogene durch S/W-WP, Beistellboiler und NOAH Leichtbau mit verschiedenen Strombereitstellungs-Varianten, relativer Fehler ca. +/- 20%.

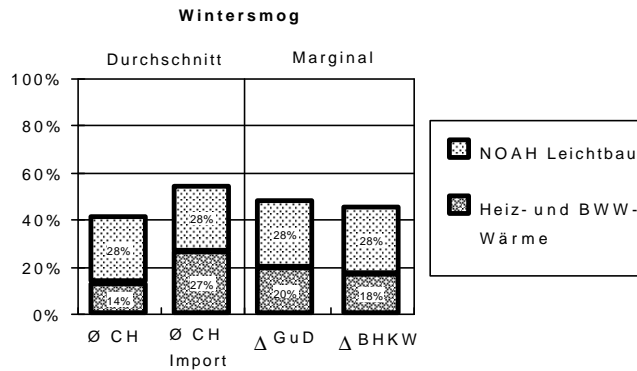


Abb. 125: Stromsensitivität: Wintersmog durch S/W-WP, Beistellboiler und NOAH Leichtbau mit verschiedenen Strombereitstellungs-Varianten, relativer Fehler ca. +/- 20%.

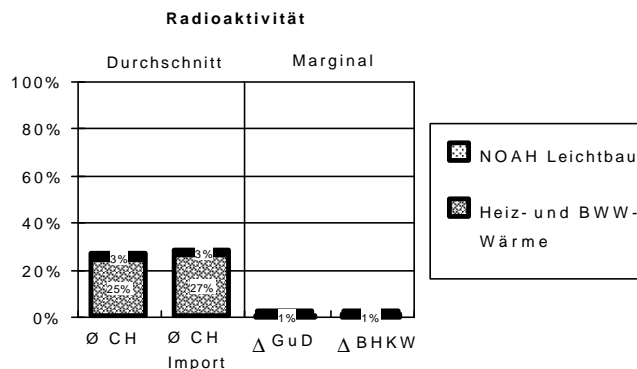


Abb. 126: Stromsensitivität: Radioaktivität durch S/W-WP, Beistellboiler und NOAH Leichtbau mit verschiedenen Strombereitstellungs-Varianten, relativer Fehler ca. +/- 20%.

3.4.3.1 Resultatdiskussion Stromvarianten

Gegenwärtiger CH-Strommix: Bei den Bilanzen mit gegenwärtigen durchschnittlichen Stromvarianten "Ø CH" und "Ø CH Import" fällt die erste Variante ohne Importstrom bzw. 100% Transitanteil eindeutig besser aus als die zweite "Standard"-Variante inkl. 100% Importstrom bzw. 0% Transitanteil. Der in die Schweiz importierte Strom besteht vor allem aus Nuklearstrom aus Frankreich und Kohlestrom aus Deutschland. Die grössten Unterschiede finden sich bei den Umwelteffekten Versauerung und Wintersmog. Die Realität für den gegenwärtigen Strommix mit einem realen Transitanteil grösser als 0% und kleiner als 100% liegt zwischen diesen beiden Varianten. Die Wärmepumpen werden also bei Bilanzierung des effektiven gegenwärtigen durchschnittlichen Strommixes noch etwas besser ausfallen als in den obigen Gesamtergebnissen.

Marginaler Strommix: Die Bilanzen mit den beiden marginalen Stromvarianten weisen ein ähnliches Ökopprofil auf, da bei beiden Erdgas die Hauptenergiequelle ist. Die Unterschiede sind kaum signifikant. Die GuD-Variante schneidet nur beim Treibhauseffekt leicht besser ab als die BHKW-Variante. Beide "Gas-Varianten" sind in den Effekten Radioaktivität und Karzinogene besser als die durchschnittliche "Standard"-Variante "Ø CH Import". Bei den Kategorien Treibhauseffekt, Überdüngung und Sommersmog sind sie schlechter. Ob die Gas-Varianten besser oder schlechter als die Varianten mit dem gegenwärtigen durchschnittlichen Strommix sind, kann hier nicht abschliessend beantwortet werden. Die Marginaltechnologien sind jedenfalls nicht generell schlechter als der gegenwärtige heu-

tige durchschnittliche Strommix der Schweiz einzustufen. Vielmehr finden Verschiebungen von Belastungen statt.

Die Sensitivitätsanalyse zur Strombereitstellung zeigt, dass der Einfluss der Strombereitstellung auf die Bilanzresultate wesentlich ist. Die Festlegung des Strommixes ist jedoch zur Zeit nicht objektiv durchführbar, sondern hängt von diskutablen Szenarien ab. Für die gegenwärtigen durchschnittlichen Strommixe ist nicht bekannt, wie hoch der Transitanteil an den Importen aus dem Ausland tatsächlich ist. Für die marginalen Strommixe hängt die Wahl besonders von dem Verlauf des Stromkonsums ab: Sinkt der gesamte Stromkonsum eines Landes so müssen andere Marginaltechnologien berücksichtigt werden, wie wenn der Stromkonsum steigt. Die Marginalanalyse hier wurde unter der Voraussetzung eines steigenden Strombedarfes gemacht, wodurch weniger belastende Strommixe resultieren. Die Wahl der zu berücksichtigenden Marginaltechnologie (oder einer Mischung von Technologien) kann zudem mehr oder weniger beliebig ausfallen.

3.4.4 Payoff SIA2010-Gebäude vs. NOAH-Gebäude

In der vorliegenden Analyse sollte die Frage *"Kann der ökologische Mehraufwand eines Niedrigenergiehauses die ökologischen Entlastungen durch die Einsparung von Wärmeenergie möglicherweise kompensieren?"* beleuchtet werden. Es können nun Unterschiede zwischen den betrachteten NOAH und den SIA2010-Gebäuden in Bezug auf diese Frage ausgewertet werden. Dabei werden die Heizenergieeinsparungen betrachtet. Die Brauchwarmwasserbereitstellung wird aus dieser Frage automatisch ausgeklammert, da der Warmwasserbedarf bei allen Gebäudevarianten derselbe ist.

Um festzustellen, ob sich der Zusatzaufwand für den Bau des hier betrachteten SIA2010-Gebäudes (relativ zum NOAH-Gebäude) überhaupt ökologisch lohnt, können die Umweltbelastungen aus diesem Zusatzaufwand verglichen werden mit den *vermiedenen* Umweltbelastungen durch die erzielte Heizenergieeinsparung (ebenfalls relativ zum NOAH-Gebäude). Dazu wird ein sogenannter Payoff-Index definiert. Der Payoff-Index wird für jeden einzelnen der neun Umwelteffekte berechnet als: Zusatzbelastung dividiert durch die vermiedene Belastung. Es resultiert eine dimensionslose Zahl.

$$\text{Payoff} - \text{Index} = \frac{\text{Umweltbelastung durch Zusatzbauaufwand für Energieeinsparung}}{\text{Vermiedene Umweltbelastung durch Energieeinsparung}}$$

Gl. 35

Payoff-Index < 1: Zusatzaufwand lohnt sich bezüglich des entsprechenden Umwelteffektes

Payoff-Index > 1: Zusatzaufwand lohnt sich bezüglich des entsprechenden Umwelteffektes nicht

3.4.4.1 Resultatdiskussion Payoff für Energieeinsparung

Die beiden unterschiedlichen Bauweisen "Leichtbau" und "Massivbau" werden separat dargestellt. Bei relativ hochbelastenden Wärmebereitstellungsvarianten ist die vermiedene Umweltbelastung durch Energieeinsparung relativ hoch, was den Payoff-Index kleiner, also vorteilhafter, werden lässt. Bei den hochbelastenden Varianten "Öl" und "Elektro" liegen bei beiden Bauweisen alle Indexe unter 1. Dies bedeutet, dass sich der Zusatzaufwand vor allem bei diesen Varianten bezahlt machen würde, da sie hochbelastende Energiequellen einsparen.

Nicht so deutlich fällt die Beurteilung der anderen Varianten aus. Bei den Wärmepumpen liegen die Payoff-Indices für Wintersmog, Versauerung, Überdüngung, Sommersmog und Schwermetalle über 1. Das heisst, dass sich bezüglich dieser Umwelteffekte der Zusatzaufwand nicht lohnt. Die Indexe sind für die L/W-WP-Variante generell tiefer, was als Zeichen der grösseren Umweltbelastung durch die L/W-WP gesehen werden kann.

Bei der Gasheizung fällt die Bilanz unterschiedlich aus, je nachdem welche Architektur betrachtet wird. Bei der Leichtbauweise liegen die Payoff-Indices für die Gasvariante bei den Effekten Schwermetalle, Wintersmog, Versauerung, Radioaktivität, Ozonzerstörung und Überdüngung über 1. Bei der Massivbauweise sind es nur noch die Effekte Schwermetalle, Wintersmog und Versauerung für die sich der Zusatzaufwand nicht lohnt.

Es kann festgehalten werden, dass es also durchaus Wärmesysteme gibt, für die sich der Zusatzaufwand für eine Energieeinsparung ökologisch gesehen teilweise *nicht* lohnt. Zwar kann durch die Energieeinsparung der direkte Energieverbrauch und die einhergehende Umweltbelastung reduziert werden. Die Umweltbelastungen aus dem Zusatzaufwand in der Gebäudeinfrastruktur vermögen jedoch diese Einsparungen bei gewissen Umwelteffekten zu kompensieren. Dem ist entgegenzuhalten, dass das als Standard betrachtete NOAH-Gebäude bereits einen unterdurchschnittlichen Energieverbrauch aufweist, die Energieeinsparung daher relativ gering ist, was die Payoff-Indices in die Höhe treibt. Zudem gilt die Untersuchung nur strikt für die untersuchten Fallbeispiele und kann nicht verallgemeinert werden. Der Zusatzaufwand stammt beispielsweise zu einem beträchtlichen Teil aus dem Kupfer für das Lukarnendach, welches bei der Vergrößerung der südgerichteten Lukarnenfenster entsprechend vergrößert wurde. Dies zeigt, dass der ökologische Zusatzaufwand für eine Energieeinsparung nicht zwingend aus den offensichtlichen Materialien (hier Isolation und Fensterglas) stammen muss, sondern sich an überraschenden Gebäudeteilen manifestieren kann. Dies ist ein Hinweis darauf, dass pauschalisierte Betrachtungsweisen nicht immer richtig sein müssen. Eine differenzierte und fallspezifische Betrachtungsweise ist daher bei der Beurteilung von Energieeinsparungen angebracht.

Leichtbau	Treibhaus-effekt	Ozon-zerstö-rung	Sommer-smog	Ver-sauer-ung	Über-dün-gung	Schwe-rmetalle	Karzi-nogene	Winter-smog	Radio-aktivi-tät
Kupfer (Lukarnendach)	58.9%	56.1%	25.7%	77.0%	19.4%	29.6%	46.1%	73.0%	49.8%
Massivholzbretter	-65.1%	21.4%	46.6%	9.3%	33.6%	15.9%	20.6%	13.9%	24.3%
Dachisolation Steinwolle	24.2%	16.9%	15.1%	5.2%	9.6%	16.0%	16.0%	4.8%	13.3%
Fensterglas	25.4%	5.2%	7.8%	3.1%	9.5%	7.2%	8.4%	2.8%	5.0%
Holzentsorgung (KVA)	36.6%	0.3%	4.4%	0.9%	4.5%	4.3%	2.7%	0.7%	0.1%
Wandisolation Papierflocken	1.1%	1.8%	1.6%	0.7%	1.3%	1.0%	4.1%	0.7%	1.4%
Gipsfaserplatte für Wände	-7.5%	-10.0%	-5.7%	-1.7%	-3.3%	-2.4%	-5.5%	-1.6%	-3.3%
weitere Materialien	26.4%	8.4%	4.5%	5.7%	25.5%	28.5%	7.7%	5.8%	9.5%
Summe	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Tab. 32: Anteile am Zusatzaufwand bei Leichtbauweise
(100% = jeweils gesamte Zusatzbelastung durch den entsprechenden Umwelteffekt)

Massivbau	Treibhaus-effekt	Ozon-zerstö-rung	Sommer-smog	Ver-sauer-ung	Über-dün-gung	Schwe-rmetalle	Karzi-nogene	Winter-smog	Radio-aktivi-tät
Kupfer (Lukarnendach)	43.8%	69.7%	59.8%	85.8%	37.6%	31.3%	53.8%	85.4%	58.7%
Isolation Steinwolle	38.3%	44.7%	75.0%	12.3%	39.8%	36.2%	39.8%	11.9%	33.4%
Fensterglas	18.9%	6.4%	18.2%	3.4%	18.4%	7.6%	9.8%	3.3%	5.9%
Backstein für Wände	-9.5%	-7.7%	-18.7%	-2.8%	-11.9%	-1.1%	-6.0%	-2.7%	-3.5%
Weitere Materialien	8.5%	-13.1%	-34.3%	1.3%	16.0%	25.9%	2.7%	2.1%	5.5%
Summe	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Tab. 33: Anteile am Zusatzaufwand bei Massivbauweise
(100% = jeweils gesamte Zusatzbelastung durch den entsprechenden Umwelteffekt)

Die Tabellen zeigen den Anteil bestimmter Materialien am Zusatzaufwand. Der Zusatzaufwand ist dabei als 100% definiert worden. Wichtige Zusatzbelastungen stammen aus den Isolationsmaterialien und Fensterglas. Da die Wanddicke zunimmt, vergrößert sich auch der Bedarf an Massivholz bei der Leichtbauvariante. Meistens wichtiger ist aber die Zusatzbelastung aus dem Kupfer, welches wie bereits erwähnt aus der Dachlukarne stammt.

Der Zusatzaufwand ist eine Summe der Differenzen zwischen den beiden betrachteten Gebäuden. Bei einer Vergrößerung der Fensterfläche kann sich der Bedarf an gewissen Materialien auch vermindern. So zum Beispiel bei den Aufwendungen in den Aussenwänden: für Gipsfaserplatten bei der Leichtbauvariante und bei Backsteinen bei der Massivbauvariante. Dieser kleine Beitrag der Entlastung wird aber von den zusätzlichen Belastungen der zusätzlich benötigten Materialien bei weitem kompensiert, sodass gesamthaft eine Zusatzbelastung resultiert.

Zur Reduktion der Umweltbelastung durch Heizenergieversorgung können die Förderung umweltschonender Wärmebereitstellungssysteme resp. die technische Reduktion des Heizenergiebedarfes des Gebäudes als zwei unterschiedliche Strategien mit demselben Ziel angesehen werden. Es wurde nun sichtbar, dass es Bereiche gibt, wo die *Kombination beider Strategien* aus ökologischer Sicht weniger effizient werden kann, d.h. das ökologische Optima für gewisse Umwelteffekte überschritten werden kann. Theoretisch sind aber auch hier noch weitere Verbesserungen möglich (und langfristig wohl auch nötig) z.B. auch durch nicht-technische Methoden der Heizenergieumwandlung. Hier nicht betrachtet wurde eine Reduktion des Brauchwarmwasserbedarfes. Je grösser der Anteil des Warmwasserberarfs am Energieverbrauch eines Gebäudes wird, desto wichtiger werden auch Massnahmen in diesem Bereich³².

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

Tab. 34: Payoff betrachtetes SIA2010- vs. NOAH-Gebäude bei Leichtbauweise.
Bei Werten unter 1 (fett) lohnt sich der Zusatzaufwand.

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. 35: Payoff betrachtetes SIA2010- vs. NOAH-Gebäude bei Massivbauweise.
Bei Werten unter 1 (fett) lohnt sich der Zusatzaufwand.

³²Als weiterer – nicht unerheblicher – Beitrag zum Energieverbrauch eines Gebäudes kann bei einer weiter gefassten Sichtweise auch der Personenverkehr der Bewohner betrachtet werden. Dann werden auch weitere Aspekte wie Gebäude-Standort, Bewohneraktivitäten, Siedlungsstruktur, verdichtetes Bauen, Verkehrserschliessung wesentlich. Diese standortabhängigen Aspekte können im Rahmen der vorliegenden Studie nicht beleuchtet werden, dürfen aber bei der Prioritätensetzung unter einer ganzheitlicheren Betrachtung nicht fehlen.

3.5 Regelung

3.5.1 Vergleich Regler mit/ohne Sonnenfühler

Die Frage, ob die Installation eines Sonnenfühlers sinnvoll ist, kann nicht alleine damit beantwortet werden, indem Simulationen über mehrere Tage miteinander verglichen werden. Da den Simulationen Messdaten mit einer Auflösung von einer Stunde zugrunde liegen, kann das Ereignis einer plötzlich auftretenden starken Solarstrahlung bei kürzeren Zeitschritten nicht vorkommen. Vielmehr wird die simulierte Sonnenstrahlung interpoliert und baut sich langsam innerhalb einer Stunde auf.

Mit Vorteil verwendet man dafür eine Simulation, in der der Wert der auf das Haus einwirkenden Solarstrahlung die Form einer Rechteckfunktion hat. Die Aussentemperatur kann dann mit einer Totzeit und einem Tiefpassverhalten der Solarstrahlung folgen. Im folgenden sollen vier Simulationsserien behandelt werden.

- Die Intensität der Solarstrahlung ist klein (500 W/m^2)
- Die Intensität der Solarstrahlung ist gross (1500 W/m^2)
- Die Temperatur reagiert schnell (Totzeit $T_0=0 \text{ h}$ und Zeitkonstante $T_1=2 \text{ h}$)
- Die Temperatur reagiert träge (Totzeit $T_0=1 \text{ h}$ und Zeitkonstante $T_1=8 \text{ h}$)

Da das Verhalten der Wärmepumpe einen grossen Einfluss auf die Reaktion bei Sonneneinstrahlung hat, werden nicht die reinen Verläufe der einzelnen Simulationen miteinander verglichen. Vielmehr wurden für jede Situation eine Serie von 30 Simulationen durchgeführt, wobei die Störung jeweils zeitlich verschoben wurde, so dass sie bei unterschiedlichsten Laufzeiten auftritt. Anschliessend wird die umhüllende Kurve aller Simulationen als Minimal- resp. Maximalumhüllende aufgezeichnet. Verglichen werden der Zweipunkteregler (Zpkt) und der modellbasierte Regler (Hinf) jeweils mit (mSolf) und ohne (oSolf) Solarstrahlungsfühler.

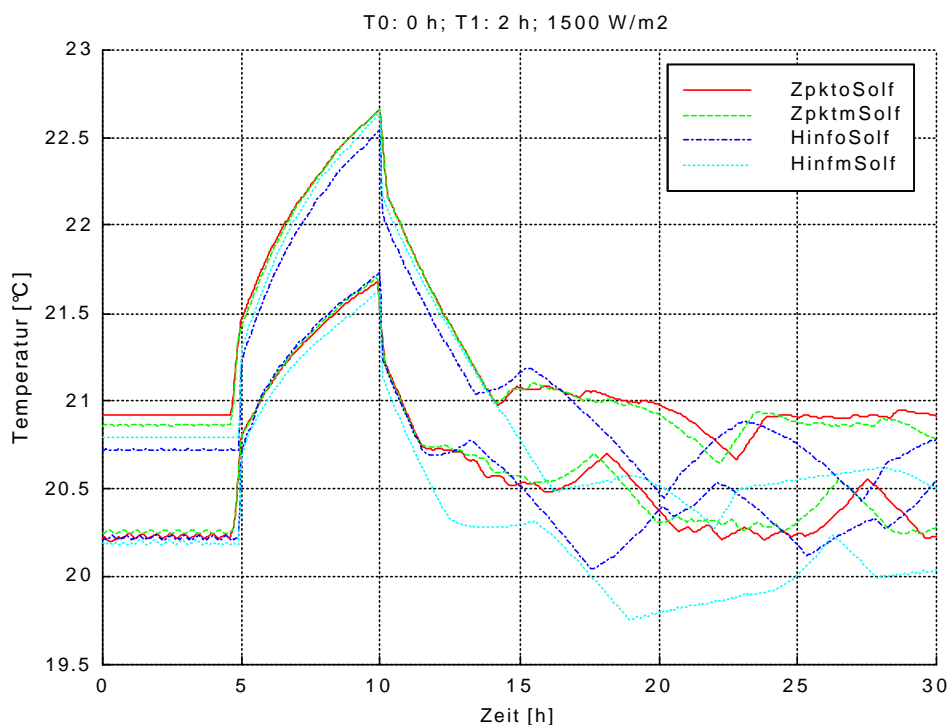


Abb. 127: Umhüllende bei 1500 W/m^2 und flinker Reaktion der Aussentemperatur

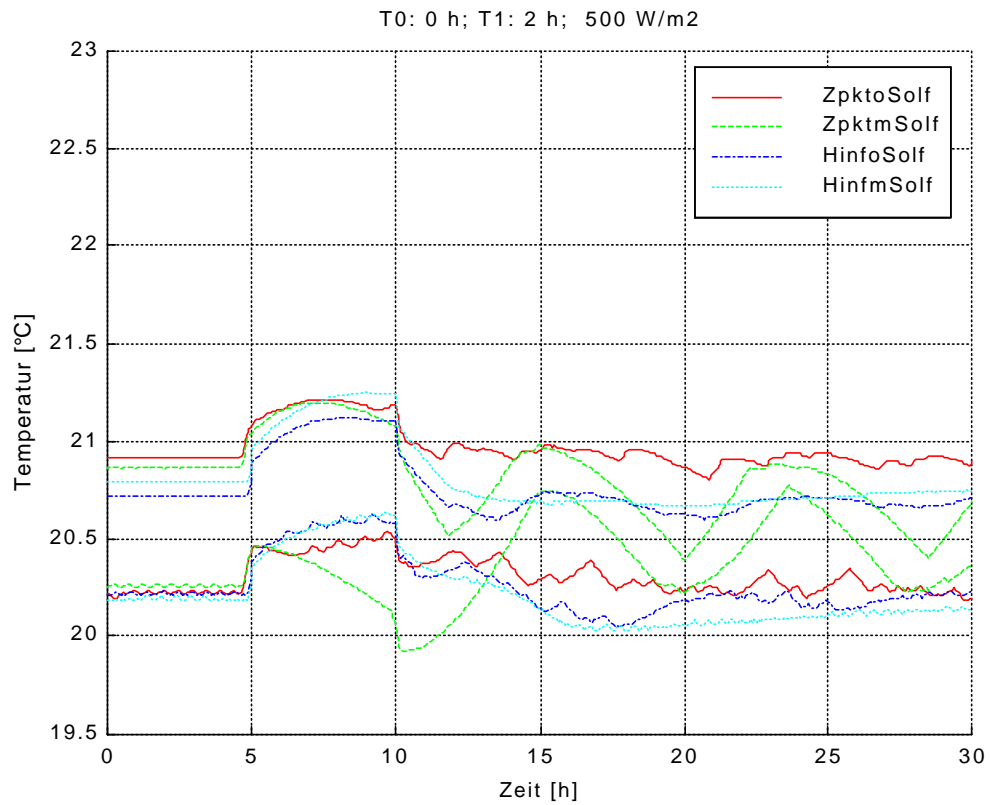


Abb. 128: Umhüllende bei 500W/m² und flinker Reaktion der Aussentemperatur

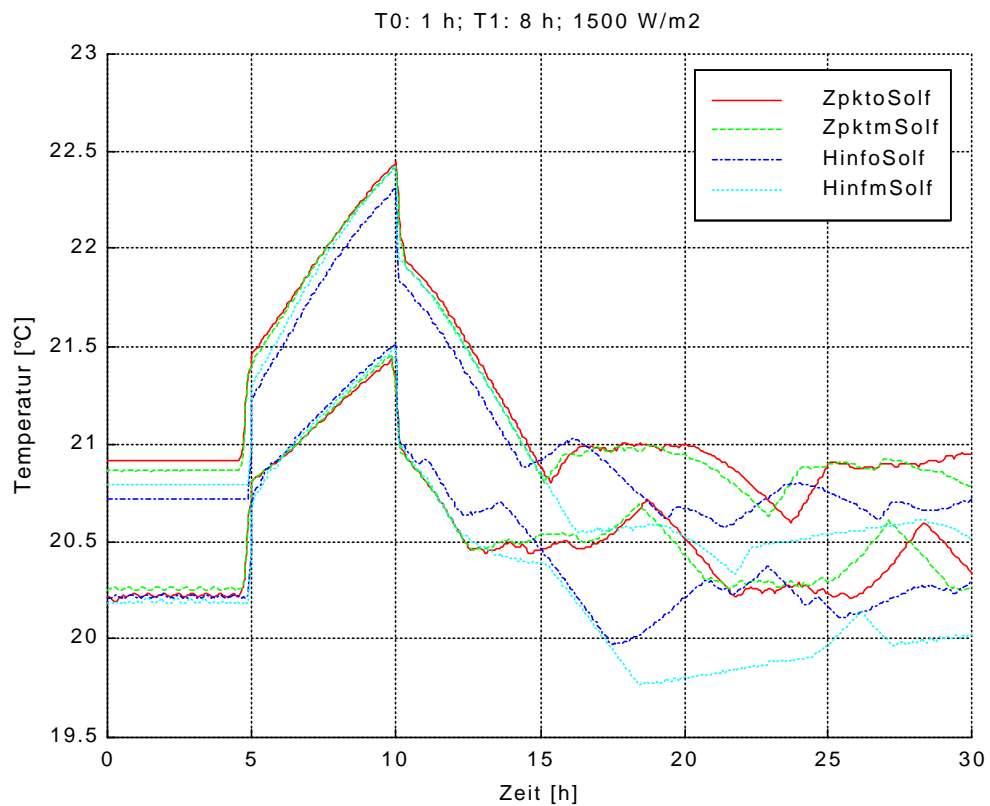


Abb. 129: Umhüllende bei 1500W/m² und träger Reaktion der Aussentemperatur

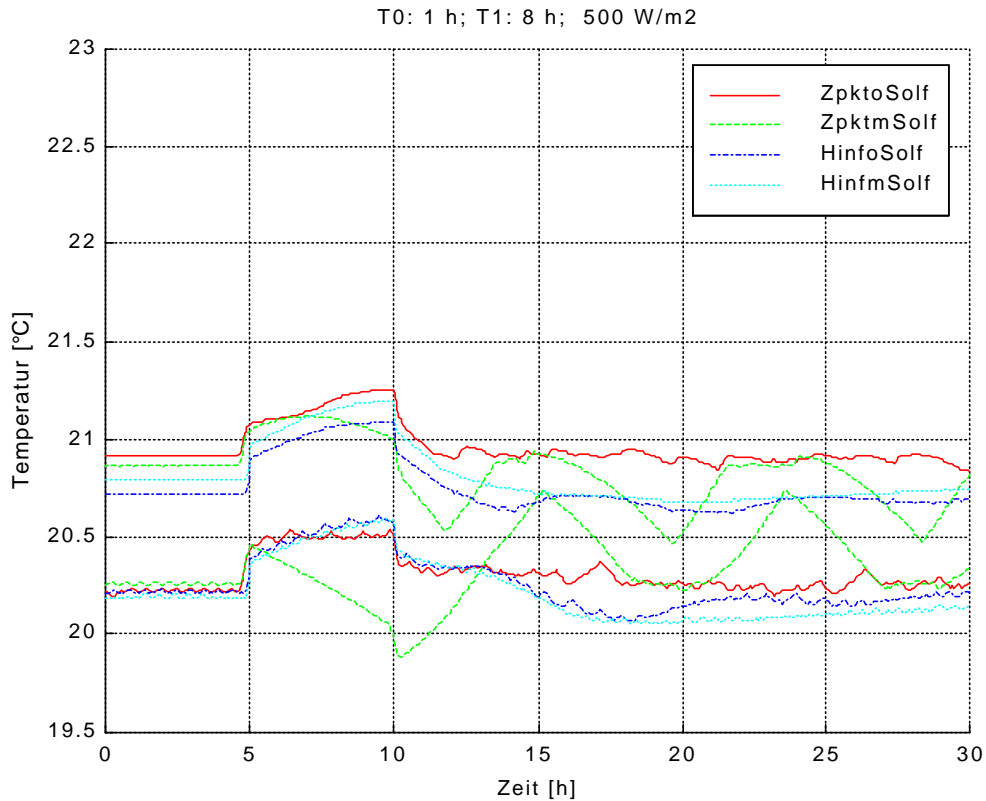


Abb. 130: Umhüllende bei 500W/m² und träger Reaktion der Aussentemperatur

Unabhängig davon, ob die Aussentemperatur sich träge oder flink verhält, lassen sich einige Rückschlüsse über das Regelverhalten ziehen. Der Zweipunkteregler mit durch den Solarfühler vertikal korrigierter Heizkennlinie reagiert bei kleinen Störungen fast zu stark. Dafür zeigt der modellbasierte Regler mit Solarfühler bei grossen Störungen ein überschwingendes Verhalten. Die Regler ohne Solarfühler überschwingen während der Bestrahlung leicht stärker.

Mit dem verwendeten Modellansatz ergeben die Simulationen keinen signifikanten Vorteil bei Verwendung eines Sonnenfühlers.

3.5.2 Vergleich des H_{xy}-Reglers mit dem 2-Punkte Regler

Die schon bei der Anpassung des MATLAB-Modells an TRNSYS verwendete Zeitspanne der Wetterdaten von 450 Stunden (18. November 22 Uhr bis 7. Dezember 16 Uhr) wurde in der Folge auch für den Vergleich der Regler verwendet. Die Zweipunkteregler wurden ausgehend von der Einstellung der HTA (Fachhochschule Zentralschweiz) an das veränderte Modell angepasst.

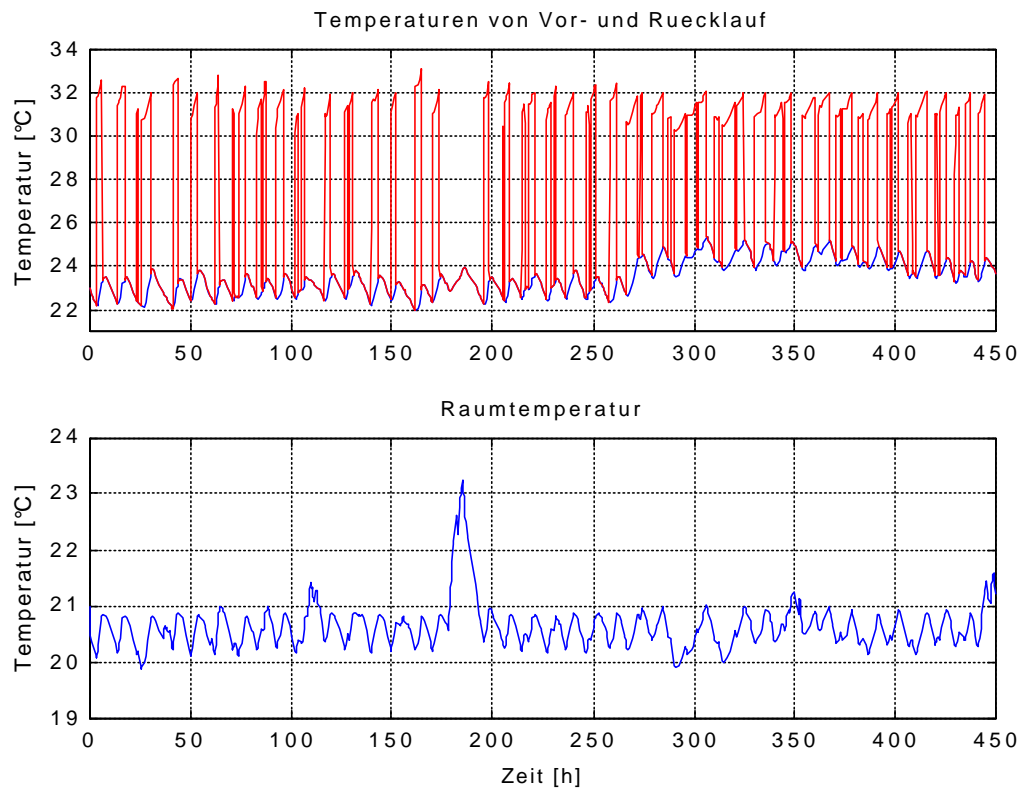


Abb. 131: Simulation des Zweipunktereplers ohne Solarfühler

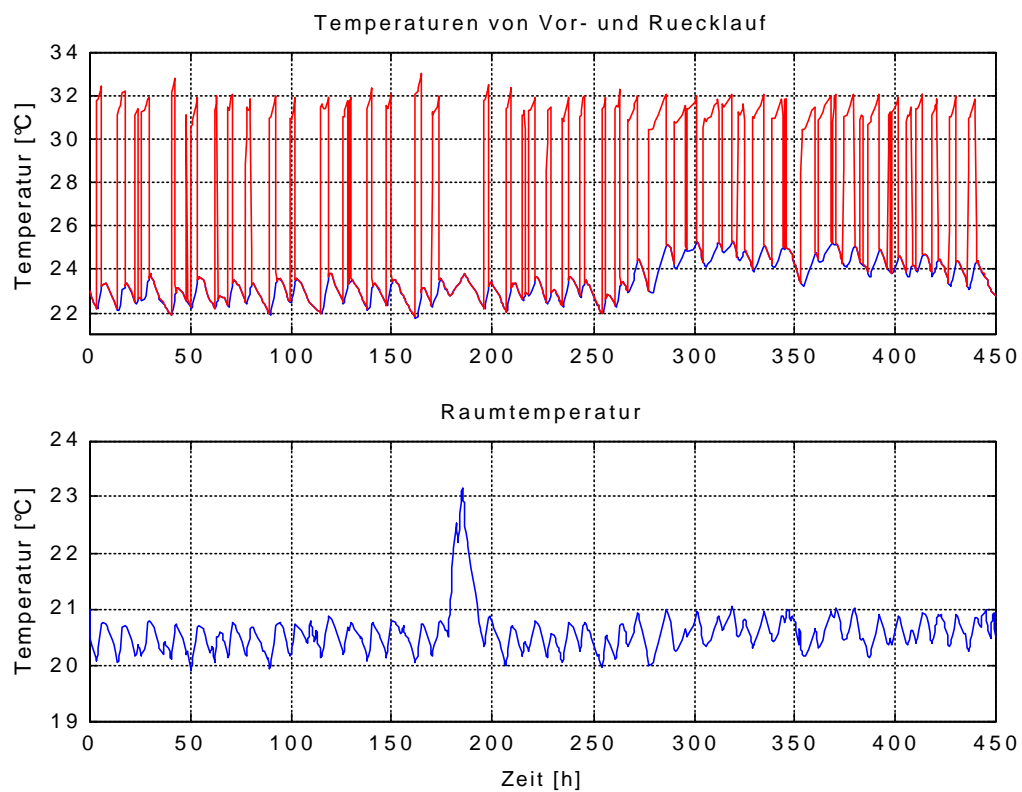


Abb. 132: Simulation des Zweipunktereplers mit Solarfühler

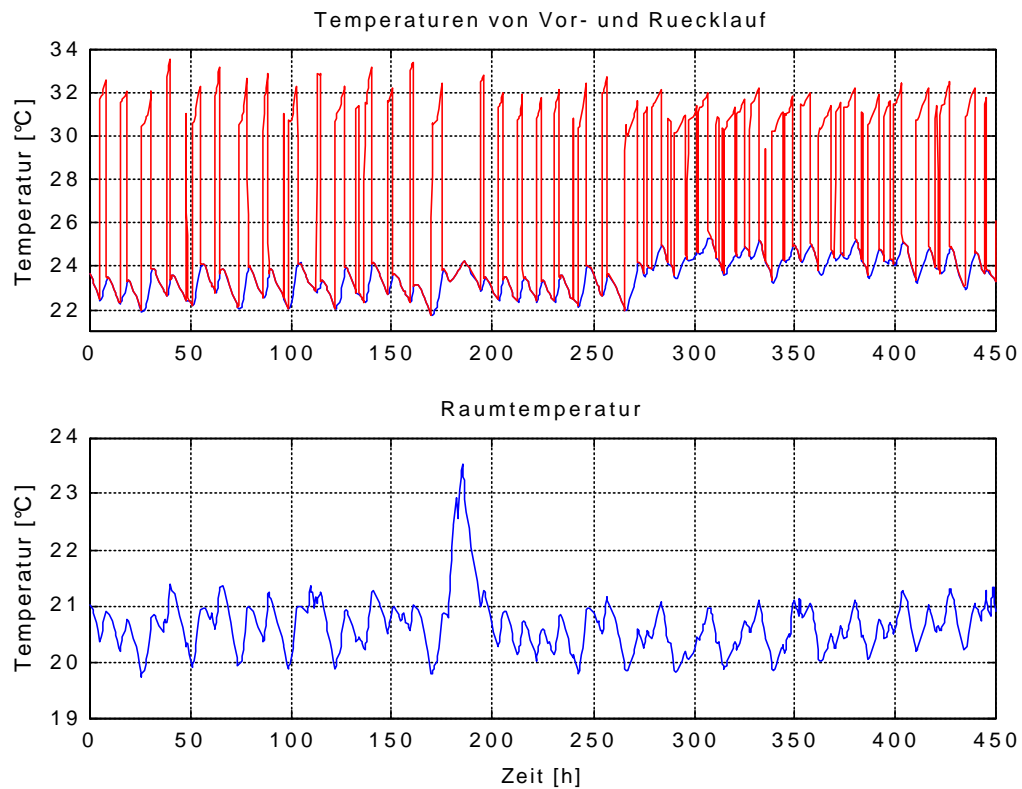


Abb. 133: Simulation des H -Reglers ohne Solarfühler

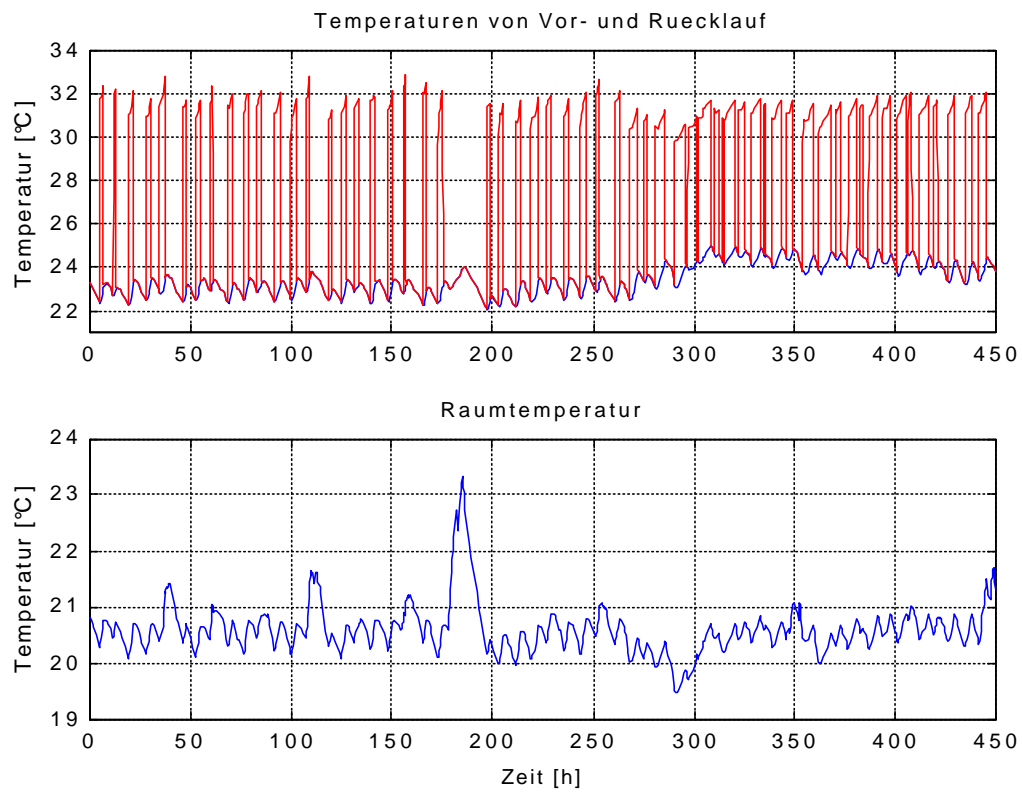


Abb. 134: Simulation des H -Reglers mit Solarfühler

In Tab. 36 sind die wichtigsten Resultate der einzelnen Simulationen zusammengefasst. In Temperatur [°C]

Abb. 135 ist zudem die Häufigkeitsdichtefunktion der Raumtemperatur der vier Simulationen aufgetragen. Für die Berechnung der Nettoarbeitszahl wurde von einer elektrischen Leistungsaufnahme der Umwälzpumpe von 80 W ausgegangen.

Reglertyp	P _{WP}	Q _{WP}	AZ _{netto}	AZ _{brutto}	Anzahl Einsch.	Mittlere Laufzeit	Mittelwert, Raumtemp.	Standardab. Raumtemp.
	KWh	KWh	–	–	–	h	°C	°C
ZpktoSolf	301	895	2.65	2.97	60	2.965	20.63	0.3609
ZpktmSolf	297	885	2.66	2.98	52	3.374	20.58	0.3609
HinfoSolf	302	897	2.65	2.97	68	2.840	20.6	0.5025
HinfmSolf	301	890	2.64	2.96	60	2.892	20.6	0.4394

Tab. 36: Zusammenfassung der Simulationsergebnisse

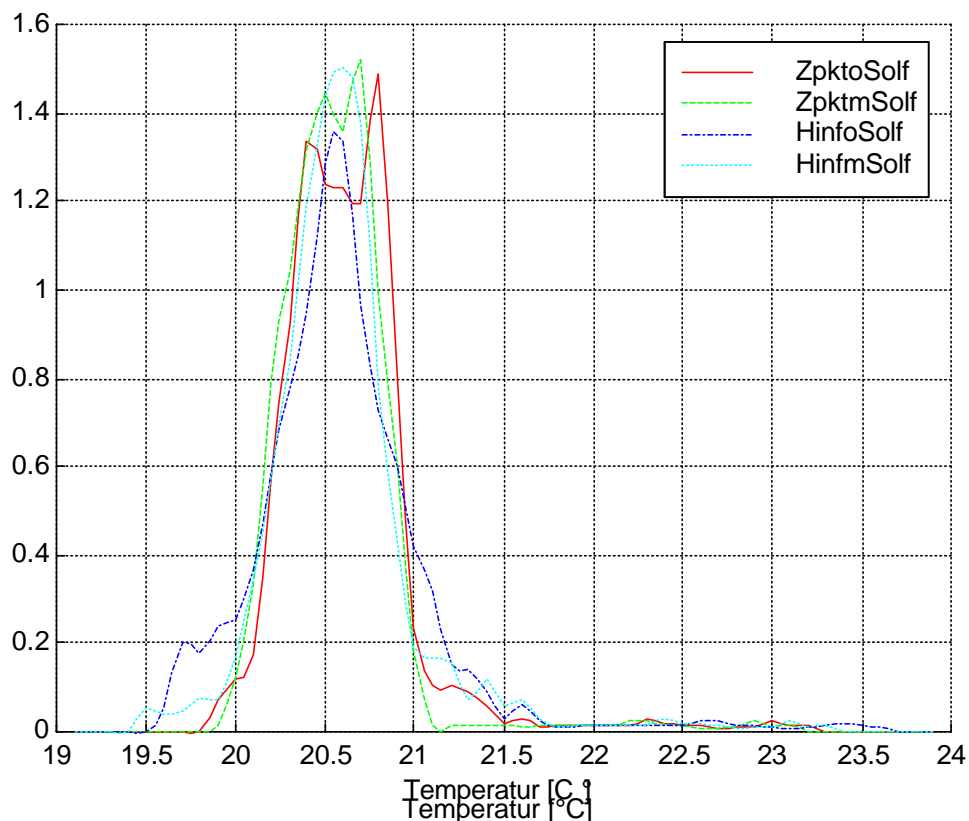


Abb. 135: Häufigkeitsdichtefunktion der Raumtemperatur

Es lassen sich aus diesen Resultaten keine eindeutige Rückschlüsse über Vor- und Nachteile der Regler ziehen. Der Zweipunktregler mit Solarfühler erreicht in diesen Simulationen mit geringfügig kleineren Menge an elektrischer Energie und der kleinsten Anzahl Einschaltungen ein behagliches Raumklima. Ansonsten zeigen die Regler ein sehr ausgeglichenes Verhalten.

Während die Zweipunktregler dahingehend optimiert wurden, dass sie bei dieser Simulation den Sollwert der Raumlufttemperatur halten können, verwendet der modellbasierte Reglerentwurf neben den Daten über die Dynamik des Gebäudes nur die vom Wärmepumpenhersteller gelieferten Kenndaten der Wärmepumpe.

3.5.3 Gebäudeemulation mit modellbasiertem Regler

Bei einer Emulation wird das dynamische Verhalten des die Wärmepumpe umgebenden Systems (Gebäude & Wärmeverteilung) simuliert oder *emuliert*. In Abb. 136 sind der Verlauf der Temperaturen von Vor- und Rücklauf, des Luftein- und austritts sowie des Raumes aufgetragen.

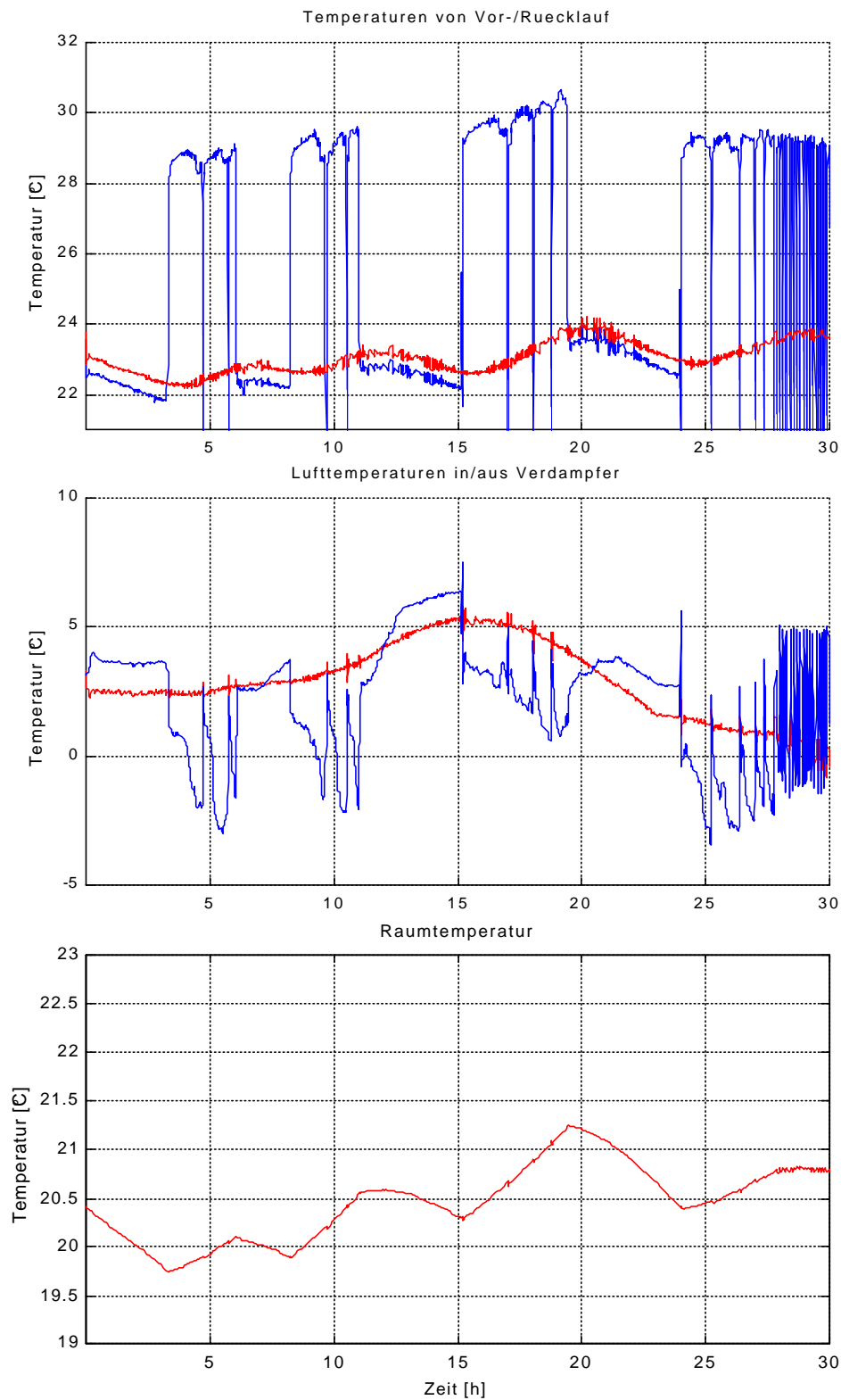


Abb. 136: Temperaturverläufe der Emulation mit modellbasiertem Regler

Da der Kältekreis ein Leck besass, wurde die Wärmeleistung der Wärmepumpe immer schlechter. Der modellbasierte Regler hat dies erkannt und kompensiert, um die Raumtemperatur zu halten. Die Abtauungen sind als Temperaturspitzen in der Ablufttemperatur („Lufttemperatur Aus“, Abb. 136, Mitte) gut erkennbar. Während anfangs die Leistung noch genügend war, um die Abtauung innerhalb von fünf Minuten abzuschliessen, reichte in der Folge die Zeit nicht mehr, und ein Zeitrelais unterbrach die Abtauung. Nach ca. 28 Stunden war die Wärmepumpe dann derart vereist, dass sie in einen Grenzzyklus zwischen Abtauung und fünfminütiger Abtausperre fiel. In Abb. 137 sind die gemessene elektrische Leistung und die aus der Temperaturdifferenz des Wassers und dessen Volumenstroms berechnete Wärmeleistung der Wärmepumpe im Vergleich mit den in Töss gemessenen Werten aufgetragen.

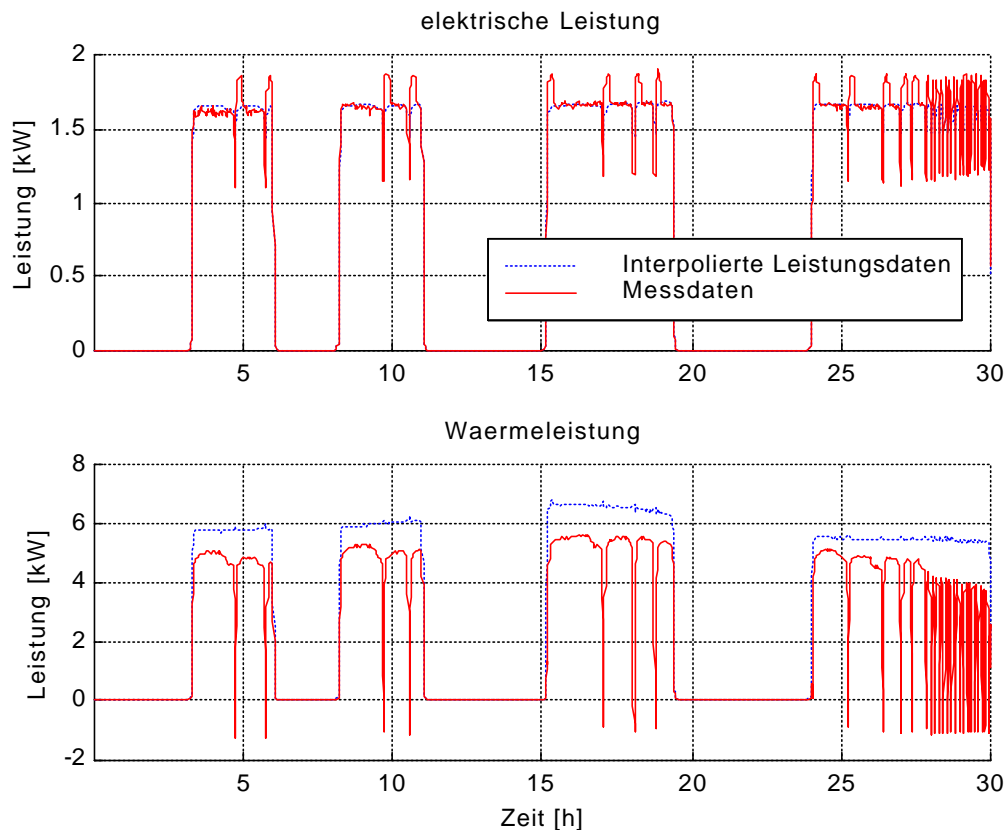


Abb. 137: Leistungsverläufe der Emulation mit modellbasiertem Regler

Die elektrische Leistung stimmt sehr gut überein, während bei der Wärmeleistung die effektive Leistung (ausgezogene Linie) nicht an die aus den stationären Leistungsdaten interpolierten Daten (gestrichelte Linie) herankommt. Insbesondere bei der Abtauung ist die Leistung hier viel kleiner, was sich im schlechten Abtauverhalten auch bestätigt hat.

Die Dauer der Laufzeiten und Ausschaltphasen unterscheidet sich nicht stark von der Simulation. Auch die Raumtemperatur konnte trotz veränderten Randbedingungen in etwa gehalten werden.

3.5.4 Emulation mit Zweipunkteregler

Abb. 138 zeigt die Temperaturverläufe der Emulation.

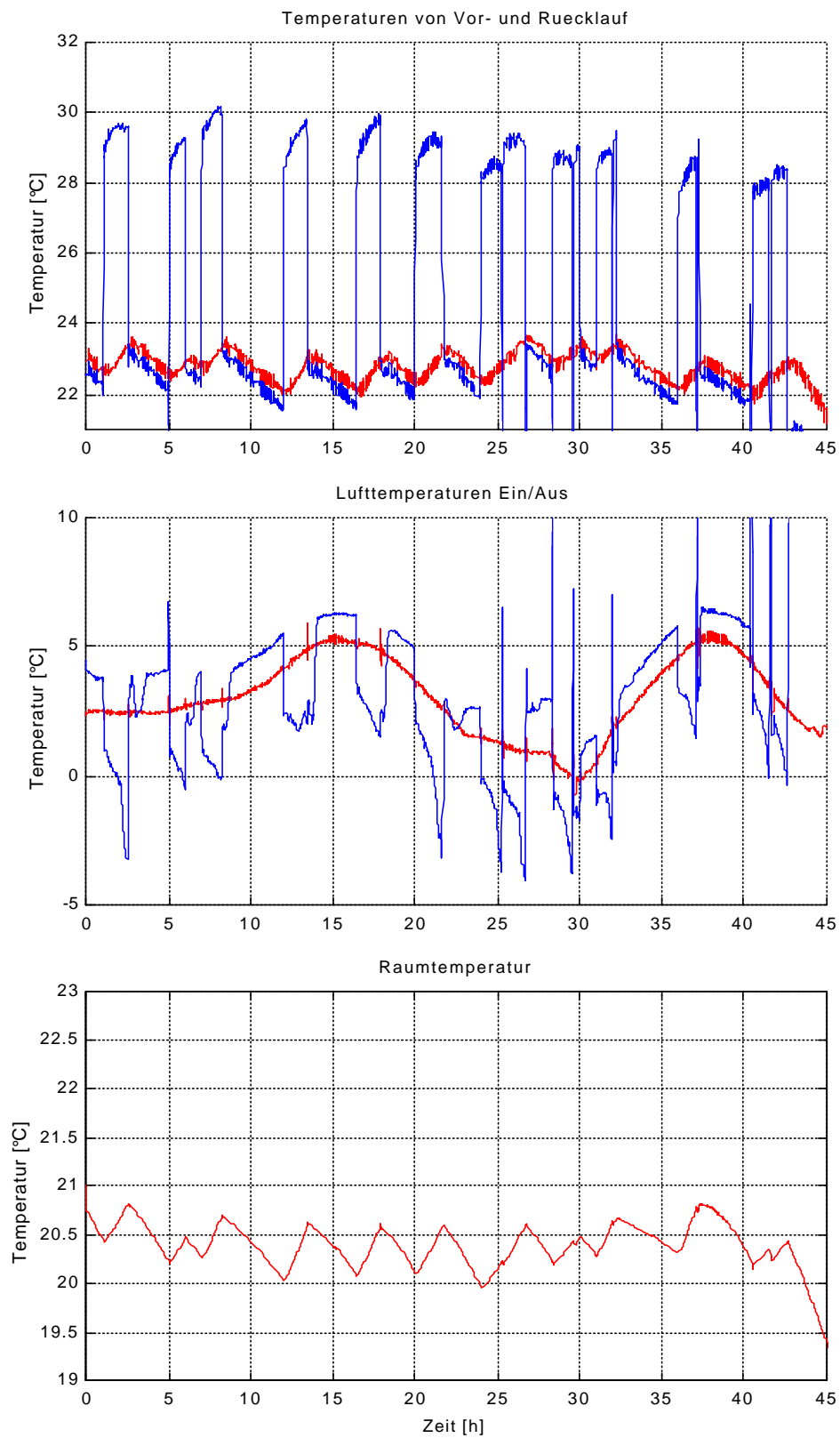


Abb. 138: Temperaturverläufe der Emulation mit Zweipunkteregler

Obwohl nach der ersten Emulation Kältemittel nachgefüllt und das vermeintliche Leck gestopft wurde, konnte die Leckage nicht gestoppt werden. Das Zeitrelais der Abtauung wurde ebenfalls demontiert. Die Abtauung wurde in der Folge nicht mehr unterbrochen. Nach ca. 42 Stunden machte sich der Leistungsabfall bemerkbar und der zur Beendigung der Abtauung nötige Druck im Verdampfer wurde erst nach über zwei Stunden Abtauung erreicht. In Abb. 139 sind die gemessenen Leistungen (ausgezogene Linien) mit den aus den Tössmessungen interpolierten Daten (gestrichelte Linien) miteinander verglichen.

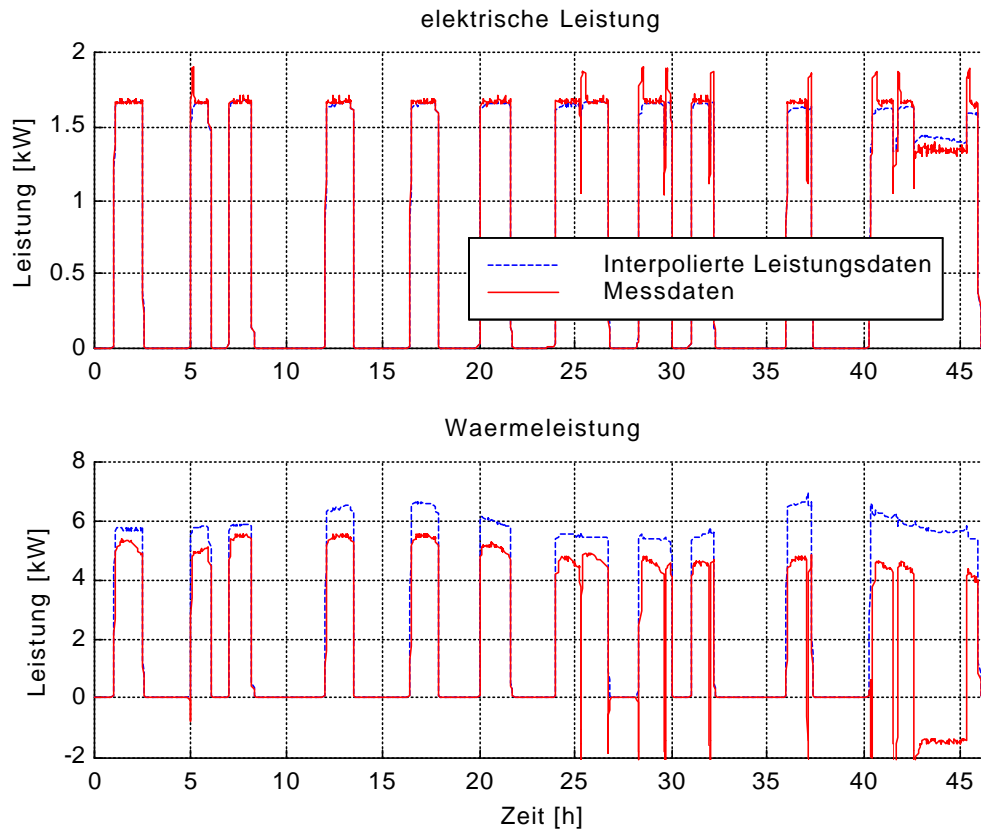


Abb. 139: Leistungsverläufe der Emulation mit Zweipunktregler

Die Wärmeleistung nahm nach ca. 30 Stunden wieder stark ab. Die überproportionale Leistungsreduktion während der Abtauung ist während der über zweistündigen Abtauung (Abb. 139, Stunde 42 - 45) besonders stark sichtbar.

Der Zweipunktregler kann die Raumtemperatur gut halten. Allerdings wird die Wärmepumpe etwa doppelt so häufig eingeschaltet, wie in der entsprechenden Simulation.

In Abb. 140 ist der Vergleich der Sollwerte mit den Istwerten der Prüfstandssteuerung aufgezeigt.

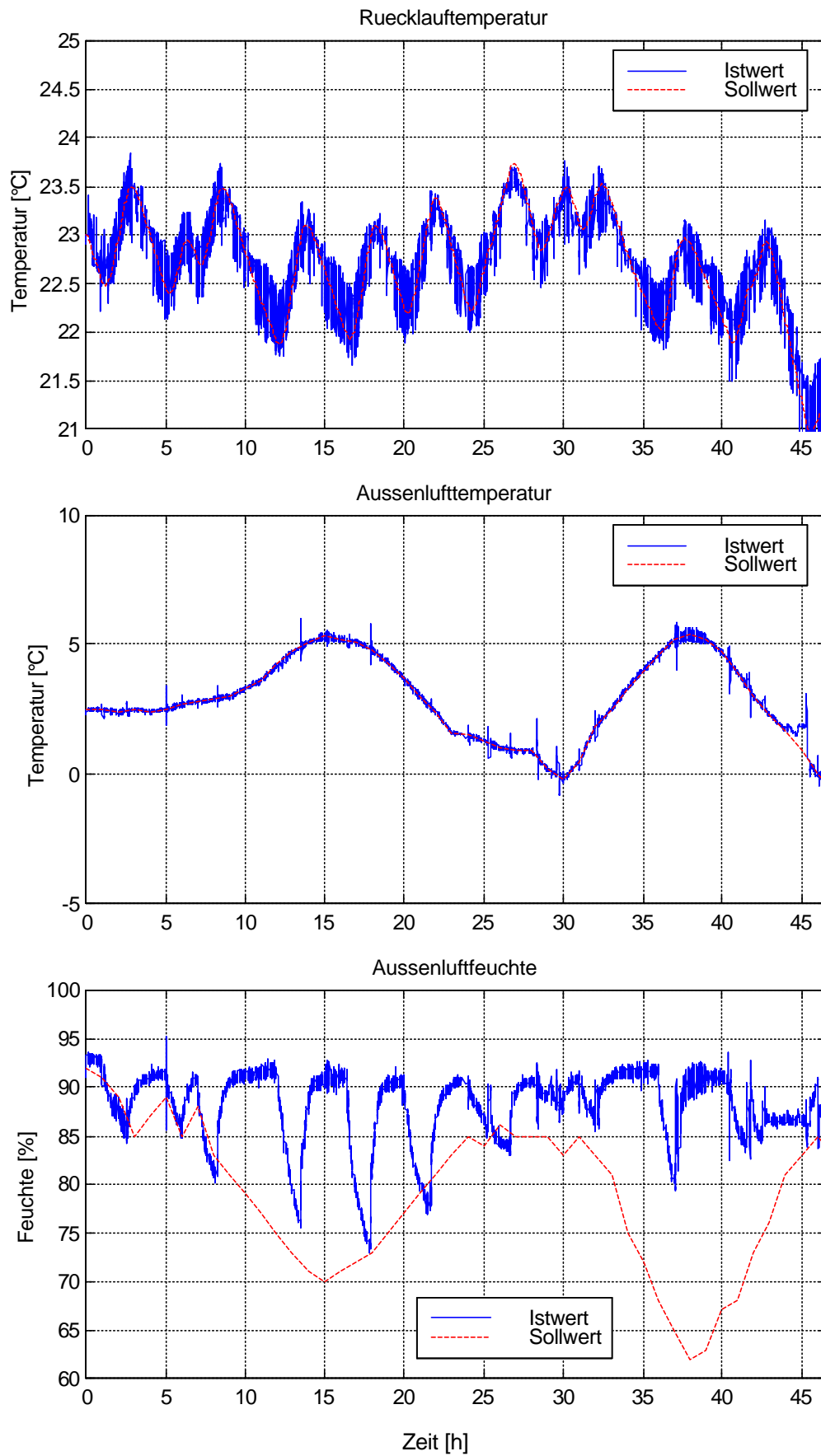


Abb. 140: Vergleich Soll- Istwerte für Prüfstandssteuerung

Es zeigt sich, dass die Feuchte in der Prüfkammer weniger vom Sollwert abhängt als vielmehr ein Gleichgewicht zwischen Eintrag aus der Aussenluft und Aufbau einer Vereisungsschicht im Wärmetauscher und Verdampfer der Wärmepumpe ist.

3.5.5 Vergleich der Emulationen mit den Simulationen

Während der Entwurfsphase der Regler wurde darauf geachtet, dass die Wärmepumpe möglichst wenig Schaltzyklen macht. Ausgehend von den Simulationsverläufen der TRNSYS-Simulation wurde die Pulsbreitenmodulation so ausgelegt, dass im Mittel drei Einschaltungen pro Tag erreicht wurden. Die Emulation mit dem modellbasierten Regler hat dies auch bestätigt. Der Zweipunkteregler hat bei der Emulation auf Störungen der Rücklauftemperatur mit einer Verdoppelung der Einschaltungsdichte reagiert und damit die Raumtemperatur besser halten können.

Die Versuche lassen jedoch keine Prognosen zu, wie sich die Regelung im Gebäude der Pilotanlage verhalten wird, da bei der Testanlage die Gebäudeemulation und die Regelung vom identischen Modell ausgegangen sind.

3.5.6 MATLAB-Listing für Regelmodul

Kann beim Institut für Mess- und Regeltechnik der ETH-Zürich (s. Impressum) bestellt werden.

4 EMPFEHLUNG FÜR WEITERE UNTERSUCHUNGEN

4.1 Ökologie

In der vorliegenden Studie wurden *spezifische Fallbeispiele* untersucht. Ziel der Untersuchung war ein Vergleich der betrachteten Wärmepumpen mit herkömmlichen Systemen, Hinweise auf die Optimierung sowie eine Analyse der Zusatzaufwendungen für ein SIA2010-Gebäude gegenüber den damit erzielbaren Einsparungen. Als Zielpublikum resp. Akteure wurden Hauseigentümer resp. Wärmepumpenkonstrukteure betrachtet. Die Systemgrenzen und Analyseobjekte wurden so gewählt, dass für diese Zielsetzungen und Zielgruppen Aussagen möglich werden. Es ist wichtig zu erkennen, dass die Resultate aus diesen Fallbeispielen – insbesondere bei den Gebäuden – nicht ohne weiteres verallgemeinert werden können.

Im Laufe der Untersuchung wurde klar, dass auch Interesse an allgemeineren Untersuchungen besteht, die eine nationale Perspektive einnehmen und Entscheidungshilfen für die Energiepolitik der Schweiz sein könnten. Zum Teil wurden auf diese Wünsche Rücksicht genommen, die Bilanzobjekte sind aber immer noch ausdrücklich Fallbeispiele von Wärmepumpen und Gebäuden. Bei einer nationalen Perspektiven müssten diese durch durchschnittliche Aggregate und Gebäude ersetzt werden. Interesse bestand auch an der Frage, wie die zusätzliche Elektrizität für Wärmepumpen möglichst ökologisch bereitgestellt werden soll. Hier wurden nur die Varianten GuD- und BHKW-Strom betrachtet. Es sind natürlich noch weitere Varianten denkbar, die für eine eingehende Studie ebenfalls untersucht werden könnten.

Es muss auch darauf hingewiesen werden, dass die der Ökobilanzierung zu Verfügung stehenden Daten und Methoden sowie auch die Bilanzobjekte sich noch laufend erweitern und verändern. Die vorliegenden Resultate sind als Momentaufnahme gemäss dem aktuellen Stand des Wissens zu verstehen. Die hier präsentierten Daten können daher nicht als abschliessende Beurteilung verstanden werden, sondern stellen eine Grundlage für das Verständnis von Ökobilanzen im allgemeinen und einen ersten Einblick und Einstieg für weitere Fragestellungen dar.

Mit der Optimierung des Stromverbrauchs bei Wärmepumpen werden die Belastungen durch die Infrastruktur der Pumpen relativ wichtiger. Für eine weitere Verbesserung der Wärmepumpen wird in Zukunft zusätzlich auch die nicht-energetische Optimierung der Anlagekomponenten eine wichtige Aufgabe darstellen. Bei einer weiter gefassten Betrachtungsweise stellt sich auch die Frage, welcher Aufwand bei der Gebäudeinfrastruktur zur Heizenergieeinsparung noch gerechtfertigt ist, wenn die Heizsysteme ökologisch immer weniger belastend werden. Die in der Vergangenheit und auch heute noch mehrheitlich korrekte Auffassung, dass für ein ökologisches Gebäude in erster Linie der Heizenergiebedarf reduziert werden muss wird in der Zukunft ergänzt werden müssen mit Betrachtungen der Belastungen durch die Gebäudeinfrastruktur, den Brauchwarmwasserbedarf sowie von Standortfragen und des Benutzerverhaltens (Erschliessung).

Durch erhöhte Dämmstärken können sich die Luftaustauschraten verringern, was zu einem Anstieg der Radon-Innenraumkonzentrationen führen kann. Durch Berücksichtigung der radioaktiven Emissionen in der Ökobilanz könnte die Innenraumbelastung mit Radon ebenfalls bewertet werden.

Es gibt auch gasbetriebene Wärmepumpen, die eine interessante Alternativoption (Referenzsystem) zu Wärmepumpen darstellen. Zur Zeit sind aber keine gasbetriebenen Wärmepumpen mit der hier geforderten Leistungsklasse auf dem Markt. Eine Abklärung erscheint aufgrund der konkurrenzfähigen ökologischen Belastung durch Erdgas angebracht.

Eine weitere mögliche alternative Energiequelle als Referenzanlage wäre Holzenergie. Die in [ESU 96] bilanzierten Holzheizungen (Stand 1993) lassen aber ein eher ungünstiges Resultat erwarten. Holzheizungen werden aber ebenfalls laufend optimiert.

Die hier gewonnenen Resultate gelten ausdrücklich nur für schweizerische Verhältnisse. Eine Anpassung an andere Länder kann insbesondere beim konsumierten Strommix der Wärmepumpen grossen Einfluss haben. Eine Anpassung der Resultate auf verschiedene Länder und Klimazonen wäre möglich. Dazu müssten die Heizenergiebedarfe neu berechnet werden. Eine Untersuchung von fünf ver-

schiedenen, gebauten Solar-Niedrigenergiebauten für drei verschiedene Klimazonen in der Schweiz wird momentan (Frühling 1998) durchgeführt [Metron 97]³³.

Die hier bilanzierten Gebäudevarianten wurden als Fallbeispiele bilanziert und sind daher nicht verallgemeinerbar. Es zeigte sich, dass insbesondere die Differenzaussagen über die Zusatzaufwendungen für das betrachtete SIA2010-Gebäude gegenüber dem NOAH-Gebäude stark von nicht verallgemeinerbaren Eigenschaften der Gebäude abhängen (Kupfereinsatz im Lukarnendach). Für verallgemeinerbare Resultate müssten die Daten der Fallbeispiele durch typische und durchschnittliche Daten ersetzt werden.

4.2 Regelung

Aus Zeitgründen musste auf eine Weiterentwicklung des Systems unter Einbezug des Raumthermostatventils verzichtet werden. Insbesondere die damit verbundene Nichtlinearität der Leistungsbestimmung wegen dem variablen Volumenstrom erschwert die notwendige Ergänzung des für den Reglerentwurf notwendigen linearen Gebäudemodells. Dieses System ist aber sicher für die Regelung interessant, falls es gelingt den Öffnungsgrad der Ventile für eine bessere Beobachtung der mittleren Raumtemperatur zu nutzen.

Da bei der Pulsweitenmodulation beim Ausschalten der Wärmepumpe bereits eine Prognose der Aushaltperiode vorhanden ist, könnte diese Periode verwendet werden, um Warmwasser zu produzieren, anstatt die Wärmepumpe ausgeschaltet zu lassen.

4.3 Markt

Die grösseren Jahreskosten der energieeffizienten Wärmepumpen-Systeme gegenüber den fossilen Heizungen werden durch die höheren Investitionskosten verursacht. Diese sind einerseits durch die noch kleineren Wärmepumpen-Stückzahlen, andererseits durch Mehraufwand bei der Installation (Wärmequelle, Lüftungsanlage, Niedertemperatur-Wärmeverteilung) bedingt. Zusätzlich wird von den Installateuren infolge noch mangelnder Erfahrung generell mehr Zeit gebraucht, da noch nicht jeder Handgriff sitzt und noch wenig Planungserfahrung vorhanden ist. Diese Zuschläge sind in den Wärmepumpen-Kosten enthalten. Sie dürften mit steigender Verbreitung solcher Systeme kleiner werden. Aufgrund der grösseren Jahreskosten brauchen die Wärmepumpen-Systeme ein professionelles Marketing. Die Vorteile müssen den Kunden plausibel gemacht werden. Es sind dies die Umweltfreundlichkeit, die Nachhaltigkeit sowie die Schadstofffreiheit vor Ort. Die Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz FWS hat sich bereit erklärt, ein entsprechendes Marketing-Handbuch zu finanzieren und zu realisieren (siehe Anhang 1.8 Projektbeschreibung „MINERGIE-Wärmepumpe“: Erarbeitung von Marketing-Grundlagen für Wärmepumpen von Niedrigenergiehäusern). Diese Aktivität wird einen Teil der Projektphase 4 darstellen.

Ebenfalls wichtig ist die Transparenz der Offerten. Auch in diesem Projekt waren die Angebote der Installateure unvollständig und schwer vergleichbar. Wir empfehlen deshalb gerade auch für Heizsysteme von Niedrigenergie-Häusern die Verwendung einer einheitlichen Offertstruktur gemäss Vorschlag der FWS [FWS 98b].

4.4 Energiepolitik

Nach wie vor sind die umweltfreundlicheren, erneuerbaren Energien nutzenden Komfortwärmevarianten insgesamt teurer als die konventionellen Systeme. Dies ist für die Verbreitung der neueren Systeme ein Handicap, da die Mehrinvestitionen nicht amortisiert werden können. Da die externen Kosten bei Verwendung von Öl und Gas immer noch nicht oder nur teilweise über Preiszuschläge ge-

³³„Energie- und Stoffflüsse von Solar-Niedrigenergiebauten im Vergleich mit Standardbauweisen nach SIA“ wird als BFE-Bericht ca. Ende 1998 erscheinen.

deckt sind, scheinen uns Unterstützungsbeiträge von Bund, Kantonen oder der interessierten Wirtschaft nicht unwichtig. Allerdings nur so lange, bis im Rahmen einer ökologischen Steuerreform das Verursacherprinzip bei allen Energieträgern angewendet wird.

Zur Finanzierung der Unterstützungsbeiträge stellt die vom Nationalrat vorgeschlagene Lenkungsabgabe eine mögliche Lösung dar. Die Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz FWS wird sich im Rahmen der Agentur für erneuerbare Energien dafür einsetzen (AEE), dass den Wärmepumpen-Heizsystemen entsprechende Beiträge zukommen.

Auch die neu gegründete MINERGIE-Agentur trägt zur Förderung erneuerbarer Energien bei. Bauherren, deren Gebäude die MINERGIE-Bedingungen erfüllen, profitieren von zinsgünstigen Oekodarlehen, welche von einigen Kantonalbanken angeboten werden.

5 SYMBOLVERZEICHNIS

Abkürzungen

	Symbol für "Inkrement" (inkrementale Stromproduktion in der Marginalbetrachtung)
EBF	Energiebezugsfläche, zu beheizende Wohnfläche eines Gebäudes
GWP	Global Warming Potential, Treibhausgaspotential. In Kohlendioxidäquivalenten ausgedrücktes Mass für die globale Treibhauswirkung eines Gases. Einheit: kg CO ₂ -Eq./kg Stoff.
KVA	Kehrichtverbrennungsanlage
Ø	Symbol für "Durchschnitt" (durchschnittliche Stromproduktion)
ODP	Ozone Depletion Potential, Ozonzerstörungspotential. In R11-Äquivalenten ausgedrücktes Mass für die Wirkung eines Gases bei der stratosphärischen Ozonzerstörung. Einheit: kg R11-Eq./kg Stoff.
Payoff	Balance zwischen Vor- und Nachteilen
PE	Polyethylen
PP	Polypropylen
PS	Polystyrol
PSI	Paul-Scherrer-Institut, Villigen
REA	Rauchgas-Entschwefelungs-Anlage (Sekundärrohstoffquelle für Gipsfaserplatten)
SAVA	Sonderabfallverbrennungsanlage
TJ	Terajoule (= 10 ⁶ Megajoule), Energieeinheit
tkm	Tonnenkilometer, Einheit für Transportleistung, entspricht dem Transport von einer Tonne Material über einen Kilometer.
UCPTE	Europäischer Elektrizitäts-Netzverbund (Union pour la coordination, de la production et du transport de l'électricité)
VOC	<i>Volatile Organic Compounds</i> , flüchtige organische Verbindungen

Variablen

\tilde{y}	[-]	Signal des erweiterten Streckenausgangs
\tilde{B}_c	[h ⁻¹]	erweiterte Eingangsmatrix des Reglers
\tilde{A}_c	[h ⁻¹]	erweiterte Systemmatrix des Reglers
\dot{x}	[h ⁻¹]	zeitliche Ableitung des Signals x
ε		Rohrrauigkeit
v	[-]	Hilfssignal
ω	[-]	Kreisfrequenz
δ	[-]	Quotient der minimalen Laufzeit
λ	[-]	Rohrreibungszahl
ρ	[kg/m ³]	Dichte

ν	[m ² /s]	kinematische Viskosität
λ	[W/m.K]	Wärmeleitfähigkeit
Δp_L	[bar]	Druckdifferenz über Verdampfer (Luftseite)
Δp_W	[bar]	Druckdifferenz über Kondensator (Heizkreisseite)
2pkt	[-]	Zweipunkteregler
A	[m ²]	Fläche
A_c	[h ⁻¹]	Systemmatrix des Reglers
A_p	[h ⁻¹]	Systemmatrix der Strecke
AZ_{Brutto}	[-]	Arbeitszahl brutto (ohne Einbezug der Hilfsenergie)
AZ_{Netto}	[-]	Arbeitszahl netto (mit Einbezug der Hilfsenergie)
B_c	[h ⁻¹]	Eingangsmatrix des Reglers
B_p	[h ⁻¹]	Eingangsmatrix der Strecke
c	[kJ/kg.K]	spezifische Wärmekapazität
C_c	[-]	Ausgangsmatrix des Reglers
COP	[-]	Coefficient of Performance (Leistungszahl)
C_p	[-]	Ausgangsmatrix der Strecke
d	[-]	Signal der messbaren Störung
d	[m]	Durchmesser
dm	[-]	Eingangssignal des messbaren Störeinflusses
dq	[-]	Hilfssignal des Messgrösse
ds	[-]	Eingangssignal der Strahlung
ds	[-]	Eingangssignal des nichtmessbaren Störeinflusses
dt	[-]	Eingangssignal der Temperatur
e	[-]	Signal des Regelfehlers
$f_{L,A}$	[%]	Luftaustrittsfeuchte
$f_{L,E}$	[%]	Luft Eintrittsfeuchte
f_u	[-]	Korrekturfaktor
G	[-]	Strecke (System)
G_{ab}	[-]	Teilsystem der Strecke von Eingang b nach Ausgang a
H_∞	[-]	Modellbasierter Regler (H_∞ -Regler)
HinfmSolf[-]		Modellbasierter Regler (H_∞ -Regler) mit Solarfühler
HinfoSolf[-]		Modellbasierter Regler (H_∞ -Regler) ohne Solarfühler
Imp	[-]	Impuls der EW- Sperre
JAZ	[-]	Jahresarbeitszahl
K	[-]	Kondensator
K	[-]	Regler (System)
k	[W/m ² .K]	Wärmedurchgangskoeffizient
K_a	[-]	Begrenzungsregler (System)
K_b	[-]	Rückführregler (System)

K_d	[-]	Störgrößenkompensation (System)
K_f	[-]	Vorsteuerung (System)
m	[-]	Signal des messbaren Streckenausgangs
P_{El}	[kW]	elektrische Leistung
p_H	[bar]	Kältekreislauf Hochdruck
PMV		Predicted Mean Vote
p_N	[bar]	Kältekreislauf Niederdruck
PPD	[%]	Predicted Percentage of Dissatisfied
P_{WP}	[kW]	elektrische Leistung der Wärmepumpe
q	[W/m ²]	spezifische Wärmeleistung (Wärmeleistung pro Flächeneinheit)
Q	[W]	Wärmeleistung
Q_h	[MJ]	Heizenergiebedarf
Q_S	[kW]	Solarer Wärmegewinn
Q_{WP}	[kW]	Wärmeleistung der Wärmepumpe
r	[-]	Signal des Temperatursollwerts
R	[Pa/m]	Druckgefälle
Re	[-]	Reynoldszahl
S	[-]	Sensitivität
s	[-]	Signal der nicht messbaren Störung
s	[-]	Signal der Strahlung
S_A	[-]	Abtaubefehlssignal
S_B	[-]	Betriebsbefehlssignal
t	[-]	Signal der Temperatur
T	[°C]	Temperatur
T_0	[h]	Totzeit
T_1	[h]	Zeitkonstante
T_A	[°C]	Aussenlufttemperatur
T_{ab}	[-]	Übertragungsfunktion von Eingang b nach Ausgang a
$T_{L,A}$	[°C]	Luftaustrittstemperatur
$T_{L,E}$	[°C]	Lufteintrittstemperatur
T_R	[°C]	Raumlufttemperatur
T_{RL}	[°C]	Rücklauftemperatur
T_{VL}	[°C]	Vorlauftemperatur
T_{zw}	[-]	Übertragungsfunktion der erweiterten Strecke von w nach z
u	[-]	Stellsignal
U	[m]	Umfang
u_{beg}	[-]	Begrenzungssignal für den linearen Regler
u_{eff}	[-]	Momentane Leistung der Wärmepumpe
u_{lin}	[-]	Stellsignal des linearen Reglers

$u_{lin,des}$	[-]	Auslegungsleistung des linearen Reglers
u_{per}	[-]	Laufzeitanteil
u_{WP}	[-]	Einschaltbefehl der Wärmepumpe
V	[-]	Verdampfer
w	[-]	Führungsgrösse
w	[m/s]	Geschwindigkeit
W_x	[-]	Gewichtungsfunktion von x
x	[-]	Regelgrösse
y	[-]	Signal der nicht messbaren Zielgrösse
y	[-]	Stellgrösse
z	[-]	Zustandssignale des Reglers
$Z_{pktmSolf}$	[-]	Zweipunkteregeter mit Solarfühler
$Z_{pktoSolf}$	[-]	Zweipunkteregeter ohne Solarfühler
γ	[-]	Schwellwert
τ_A	[h]	Ausschaltzeit
τ_D	[h]	Dauer der nächsten Sperrzeit
τ_L	[h]	Laufzeit
τ_S	[h]	Zeitdauer bis zur nächsten Sperrzeit
τ_T	[h]	Laufzeit des Timers
τ_Z	[h]	Zykluszeit

Indices

A	aussen
EW	Elektrizitätswerk
h	Raumheizung
h	hydraulisch
HG	Heizgrenze
S	Sohle
W	Wasser
WP	Wärmepumpe
ww	Warmwasser

6 LITERATURVERZEICHNIS

- [ATAL 97] Amt für technische Anlagen und Lufthygiene des Kantons Zürich; Vollzugsordner Energie; Zürich 1997
- [Behrendt et al. 98] S. Behrendt, R. Kreibich, S. Lundie, R. Pfister, M. Scharp, "Ökobilanzierung komplexer Elektronikprodukte", Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT), Berlin, Springer Verlag, 1998
- [Bircher 97] Persönliche Mitteilungen von R. Bircher, Bircher + Keller AG, Sissach, im April 1997
- [Bircher 98] Werksvertrag/Heizungsdevis für Niedrigtemperatur-Fussbodenheizung, Bircher + Keller AG, Weidenbodenweg 2, 4450 Sissach, Tel. 061 971 60 80
- [BUWAL 98] G. Brand, A. Scheidegger, O. Schwank, A. Braunschweig, "Methode der ökologischen Knappheit – Ökofaktoren 1997", Vorabdruck der gleichnamigen BUWAL Schriftenreihe Umwelt, ÖBU, Februar 1998
- [Christen 96a] U. Christen, H. P. Geering; Anti-Windup for MIMO Controllers; Preprints of the 13th IFAC World Congress, San Francisco, CA, June/July, 1996, vol. D, pp. 91 – 96.
- [Christen 96b] U. Christen; Engineering Aspects of H_∞ Control; Diss. ETH No. 11433
- [Doyle 89] J. C. Doyle, K. Glover, P. P. Khargonekar, B. A. Francis; State space solutions to standard H_2 and H_∞ control problems; IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 34, pp. 831 – 847, 1989.
- [Durena 97] Persönliche Mitteilungen von H.P. Meyer, Durena AG, Lenzburg, September 1997
- [ESU 95] T. Weibel, A. Stritz, "Ökoinventare und Wirkungsbilanzen von Baumaterialien", Gruppe Energie-Stoffe-Umwelt (ESU), ETH Zürich, September 1995
- [ESU 96] R. Frischknecht, P. Suter, R. Dones et al., "Ökoinventare von Energiesystemen", Gruppe Energie-Stoffe-Umwelt (ESU), ETH Zürich und PSI, Villigen, 3. Auflage, Juli 1996
- [ExternE 95] European Commission DGXII, Science, Research and Development JOULE, "ExternE, Externalities of Energy, Vol.5. Nuclear", Luxembourg, 1995
- [Fanger 70] P.O. Fanger; Thermal Comfort, Analysis and Applications in Environmental Engineering; Technical University of Denmark, Copenhagen; 1970; Lyngby
- [Fort 93] Fort Karel, Optimaler Betrieb von Fussbodenheizungen, im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft, Oktober 1993
- [Frischknecht 98] R. Frischknecht, "Life Cycle Inventory Analysis for Decision-Making" Dissertation an der ETH Zürich, Nr. 12599, Mai 1998
- [FWS 98a] Marktführer Schweiz - Wohnungslüftung mit Wärmerückgewinnung, INFEL, Lagerstr. 1, 8021 Zürich, Tel. 01 299 4141
- [FWS 98b] Kundenfreundliches Offertformular der Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz FWS, Lagerstr. 1, 8021 Zürich, Tel. 01 299 41 41
- [Giger, Hermann 97] Hermann Roman, Giger Thomas; Selbstregeleffekt von Niedrigtemperatur-Flächenheizungen; Diplomarbeit 97_08_dv; Zentralschweizerisches Technikum Luzern, Abt. HLK; Horw 1997
- [Glück 82] Bernt Glück, Strahlungsheizung in Theorie und Praxis, Verlag C.F. Müller, Karlsruhe 1982

- [Goedkoop 95] M.Goedkoop, "The Eco-indicator 95 - Final Report", University of Leiden (CML), PRé Consultants, Ammersfoort, Netherlands agency for energy and the environment (NOVEM), Utrecht, et al., 1995
- [Goedkoop 95] M.Goedkoop, "The Eco-indicator 95 - Final Report", University of Leiden (CML), PRé Consultants, Ammersfoort, Netherlands agency for energy and the environment (NOVEM), Utrecht, et al., 1995
[Im Internet unter www.pre.com/eco-ind.html]
- [Hässig et al. 98] W. Hässig, D. Sutter, R. Bigler, A. Huber, "Regeneration von Erdwärmesonden. Phase I: Potentialabschätzung. Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung (UAW); Bundesamt für Energie; Bern, 1998
- [Heijungs et al. 92] R. Heijungs, J.B. Guinée, G.Huppes, R.M. Lankreier, H.A. Udo de Haes, A. Wegener Sleeswijk, A.M.M. Anems, P.HG. Eggels, R. van Duin, H.P. de Goede, "Environmental Life Cycle Assessment of Products, Backgrounds", report Nr. 9267, CML, Leiden
- [Hencky] K. Hencky, Wärmeverlust durch ebene Wände, Verlag R. Oldenbourg, München
- [Hofstetter 97] Persönliche Mitteilung von Patrick Hofstetter vom 15.07.97
- [Hofstetter et al. 97] Persönliche Mitteilungen von Patrick Hofstetter und Niels Jungbluth, ETH Zürich, im Oktober 97
- [Hohl 97] Persönliche Mitteilungen von Hrn. Hohl, Leiter Entwicklung Wärmepumpen, Saurer Thermotechnik AG, Arbon, April 1997
- [Höllinger et al. 97] Persönliche Mitteilungen von Hrn. Höllinger und Hrn. Fetz, beide Eternit AG, Oktober 1997
- [Huber, Schuler 97] Huber Arthur, Schuler Othmar; Berechnungsmodul für Erdwärmesonden; Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung (UAW); Bundesamt für Energiewirtschaft; Bern (erscheint 1997).
ENET-Nr. 9658807
- [Huser 92] Huser Alois, Spalinger Ruedi; Stromverbrauchserhebung in Haushalten; RAVEL/Bundesamt für Konjunkturfragen; Bern 1992
- [Huser 97] Kostenvergleich verschiedener Heiz- und Warmwassersysteme, Sensitivitätsanalyse der Stromtarife, Encontrol, Römerweg 14, 5443 Niederrohrdorf, Tel. 056 496 61 06
- [Jolliet 98] Offerte für das System EcoConfort in NOAH-Haus, Eco Confort SA, ch. Trési 6, 1028 Préverenges, Tel. 021 802 45 91
- [KKW 97] Persönliche Mitteilungen von U. Zelt, KKW Kulmbacher Klimageräte-Werk GmbH, Kulmbach, Deutschland, April 1997
- [Kohler et al. 90] N. Kohler, Th. Lützkendorf, "Energie- und Schadstoffbilanzen bei Niedrigenergiehäusern", EPF Lausanne und HAB Weimar, Zwischenbericht, Juni 1990
- [Koster 98] Offerte für Niedrigenergie-Einfamilienhaus, Pilotanlage 1, Koster AG, Länggenstr. 26, 8184 Bachenbülach, Tel. 01 860 36 66
- [Küng 98] Kostenaufstellung für Ölheizung in Neubau-Einfamilienhaus Pilotanlage 2, Küng Haustechnik AG, 6130 Willisau, Tel. 041 970 20 58
- [Löpfe 97] Ausgeführte Anlagen mit Wärmerückgewinnung, Löpfe AG Ingenieurbüro für Energieplanung und Umwelttechnik, Asylstrasse 1, 5000 Aarau, Tel. 062 824 31 80
- [Mack et al. 96] Mack M., Vanoli K., Luboschik U., Schalajda P., Schnauss M., Valentin G., Gassel A., Rindelhard U.; Measured Hot Water Consumption in Apartment Buildings as Key Design Parameter for Solar Collector Installations; Euro-

Sun 96

- [MATLAB] MATLAB: Scientific Computers SC AG, Schürmattstrasse 6 + 8, 3073 Gumligen, Tel. (031) 954 20 20, Fax (031) 954 20 22, E-mail: info@scientific.ch, Web: www.scientific.de
- [May 96] M. May, "Graue Energie und Umweltbelastungen von Heizungssystemen", Jenni Energietechnik AG, Oberburg, ISBN 3-906558-02-9, April 1996
- [Mc Adams] W.H. Mc Adams, Heat Transmission, Mc Graw-Hill Book Company, New York und Düsseldorf
- [Metron 97] Persönliche Mitteilung von D. Gerber, Metron AG, Brugg, im September 1997
- [MINERGIE 98] Broschüre, AWEL, Weinbergstrasse 15/17, 8090 Zürich, 1998, CH.
- [NTH1 96]
ENET-Nr. 9655701 Th. Afjei, W. Betschart, R. Bircher, H.P. Geering, S. Ginsburg, W. Hässig, M. Wetter, D. Wittwer, G. Zweifel: Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe, Phase 1, Schlussbericht, BFE, 1996, CH.
- [Piatti 97] Persönliche Mitteilungen von Piatti, Blumer und Partner AG, Dietlikon, vom April bis September 1997
- [Piatti 98] Kostenaufstellung für Gastherme mit Beistellboiler in NOAH-Haus, Alfredo Piatti AG, Riedmühlestr. 8, 8305 Dietlikon, Tel. 01 835 88 11
- [Potyka et al. 85] H. Potyka, R. Zabara, "Pflegefall Althaus", Picus Verlag, Wien, 1985 zitiert in [Kohler et al. 1990]
- [prEN 255-6 92] DIN EN 255, Teil 6: Anschlussfertige Wärmepumpen zum Erwärmen von Trink- und Betriebswasser, Prüfung, Definitionen und Anforderungen an die Kennzeichnung, Deutsche Fassung, Beuth Verlag, Berlin, 10/1992, D.
- [PSI 96] R. Dones, U. Gantner, S. Hirschberg, G. Doka, I. Knoepfel, "Environmental Inventories for Future Electricity Supply Systems for Switzerland", PSI Villigen, Ber. Nr. 96-07, Februar 1996
- [PSI 98] M. Ménard, R. Dones, U. Gantner, „Strommix in Ökobilanzen“, Projekt GaBE, PSI Villigen, Oktober 1998
- [Raisch 92] J. Raisch, E. D. Gilles; Reglerentwurf mittels H₂-Minimierung - Eine Einführung; Automatisierungstechnik, vol. 40, pp. 84 – 92, 123 – 131, 1992
- [Rognon 96] F. Rognon, "Ökobilanzen von Wärmepumpen", Bundesamt für Energie BFE, Dezember 1996, im Internet auf <http://www.waermepumpe.ch/hpc/oek.html>
- [Sanner 92] Sanner Burkhard; Erdgekoppelte Wärmepumpen; Geschichte, Systeme, Auslegung, Installation; Informationszentrum Wärmepumpen + Kältetechnik; IZW-Bericht 2/92; ISSN 0940-3442; Karlsruhe 1992
- [Schubiger 97] Persönliche Mitteilung von Hrn. Schubiger, Felswerke, 27.10.97 sowie Broschüre "Produkteprüfung Fermacell Gipsfaserplatte" des Österreichischen Instituts für Baubiologie und -ökologie, Wien, 1996
- [Shell 96] Mitteilungen von Shell Schweiz im Mai 1996, im Internet unter <http://www.shell.ch/deutsch/ecotherm.html>
- [SIA 88] SIA 380/1; Energie im Hochbau; Ausgabe 1988; Nachdruck 7/1993; Zürich
- [SIA 82] SIA 384/2; Wärmeleistungsbedarf von Gebäuden; Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein; Ausgabe 1982; Nachdruck 7/1995; Zürich
- [SIA 86] SIA D010; Handbuch der passiven Sonnenenergienutzung; Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein; Zürich 1986.

[Stiebel Eltron 97]	Hersteller-Messresultate und -Auswertungen LWAZ 250 nach EN255 Teil 6, Stiebel Eltron GmbH & Co KG, D-37603 Holzminden, Tel. +49 5531 7020
[Suter 96]	P.Suter, "Stellungnahme zu M.May: Graue Energie und Umweltbelastungen von Heizsystemen", Thal/ETH Zürich, 1996
[TRNSYS 96]	TRNSYS 14.2; University of Wisconsin, Madison WI, USA; Solar Energy Laboratory; 1996
[VSSH 93]	VSSH-Handbuch 5; Wasserbedarf Blatt 2.2.7-2.2.9; Verband Schweizerischer Sanitär- und Heizungsfachleute; Bern 1993
[Weibel 96]	T. Weibel, "Vergleichende Umweltrelevanz des Einsatzes alternativer Kältemittel in Kompressions-Wärmepumpen und -Kälteanlagen", Gruppe Energie-Stoffe-Umwelt (ESU), ETH Zürich, März 1996
[Werner 96]	Werner Alfred, Bigler Roland, Niederhauser Arthur et. al.: Grundlagen für die Nutzung von Wärme aus Boden und Grundwasser im Kanton Bern. Thermoprogramm Erdwärmesonden, Burgdorf. Schlussbericht. Wasser- und Energiewirtschaftsamt des Kt. Bern (WEA) 1996
[WPZ 97]	WPZ-Bulletin Nr. 11; Wärmepumpentest- und Ausbildungszentrum Töss; Nordostschweizerische Kraftwerke NOK; Elektrizitätswerk des Kantons Zürich EKZ; Töss 1997
[Xmath]	XMath: COMSOL AG, Morgenstrasse 129, 3018 Bern BE, Tel. (031) 998 44 11, Fax (031) 998 44 18, E-Mail: info@comsol.ch, Homepage: http://www.comsol.ch/
[Zimmermann et al. 96]	P. Zimmermann, G. Doka, F. Huber, A. Labhardt, M. Ménard, "Ökoinventare von Entsorgungsprozessen", Gruppe Energie-Stoffe-Umwelt (ESU), ETH Zürich, August 1996
[Zogg 97]	Mitteilungen von M. Zogg, Leiter Forschungsprogram Umgebungs- und Abwärmenutzung, Wärme-Kraft-Kopplung (UAW), Bundesamt für Energie (BFE), 1997
[Zweifel, Wetter 97]	Zweifel Gerhard, Wetter Michael; Handrechenmethode zur Bestimmung der Jahresarbeitszahl von Wärmepumpenanlagen mit Warmwasseraufbereitung; Herleitung des Rechenverfahrens; Zentralschweizerisches Technikum Luzern; Horw 1997
[ZZ 95]	Zürcher Ziegeleien, Produktedokumentation für Tonprodukte und Mörtel, 2.Auflage, 1995

Nützliche Adressen

- **Vertrieb für TRNSYS-Module**
TRANSSOLAR, Nobelstrasse 15, D - 70569 Stuttgart, fax 0711/ 679 76 - 11,
<http://www.transsolar.com>
- **Projektberichte** (Schlussbericht und Anhang zum Schlussbericht)
ENET, Postfach 13, CH 3000 Bern 6, Tel. +41-31-350 00 00, Fax +41-31-352 55 56,
Email: n+1@email.ch
- **Internet Websites**
Forschung BFE/UAW: <http://www.waermepumpe.ch/fe>
NTH-Projekt: http://www.infel.ch/htm/innova/in_nth1.htm
MINERGIE-Standard: <http://www.minergie.ch>
Nat. Team IEA HPC: <http://www.waermepumpe.ch/hpc>