

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



Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe

**Phase 2: Ökologischer und ökonomischer Vergleich,
Systemoptimierung, intelligente Regelung, Versuche**

ausgearbeitet durch

Dr.Th.Afjei

Prof.W.Betschart

R.Bircher

G.Doka

Prof.Dr.H.P.Geering

S.Ginsburg

Dr.A.Glass

A.Huber

Dr.E.Shafai

M.Wetter

D.Wittwer

G.Zweifel

INFEL (Projektleitung)

ZTL

Bircher+Keller AG

Ingenieurbüro

IMRT-ETHZ

IMRT-ETHZ

ZTL

Huber Energietechnik

IMRT-ETHZ

ZTL

INFEL

ZTL

im Auftrag des
Bundesamtes für Energiewirtschaft

Impressum

Auftraggeber:	Bundesamt für Energiewirtschaft (BEW)	
	Prof. Dr. M. Zogg	Projektbegleiter
	Leiter Forschungsprogramm UAW	
	Kirchstutz 3	Email:
	3414 Oberburg	Martin.Zogg@ISBurg.CH
Beauftragter:	Informationsstelle für Elektrizitätsanwendung	
	Dr. Th. Afjei	Projektleiter
	D. Wittwer	stv. Projektleiter
	INFEL	
	Lagerstrasse 1, Postfach	Email:
	8021 Zürich	afjei@infel.ch
Projektgruppe:	Bircher + Keller AG	Fussbodenheizung
	R. Bircher	
	Weidenbodenweg 2	
	4450 Sissach	Fax. 061 / 971 61 16
	Ingenieurbüro Doka, G. Doka	Ökobilanzen
	Stationsstrasse 32	Email:
	8003 Zürich	doka@logon.ch
	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	
	8032 Zürich	Fax. 01 / 422 79 53
Zentralschweizerisches Technikum Luzern ZTL		
	Prof. W. Betschart, G. Zweifel, M. Wetter	Simulation mit TRNSYS
	Dr. A. Glass	Zweistufige Wärmepumpe
	Abteilung HLK	Email:
	6048 Horw	wbetschart@ztl.ch

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

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 anfangs Jahr gestarteten 2. Phase werden neue Gebäudevarianten simuliert, Testanlagen gemessen und die ökologischen Aspekte vertieft untersucht.

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

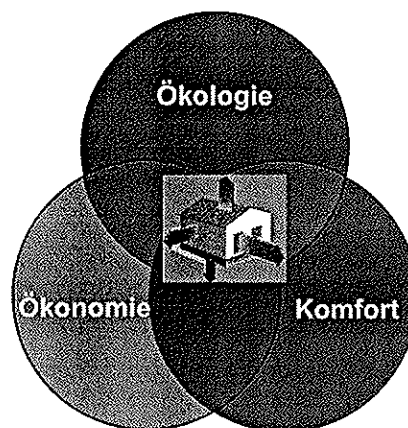


Abb. 1: Gesamtheitliche Betrachtung von Gebäude und Wärmeerzeugung

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 Simulationssrechnungen durchgeführt. Im weiteren ist ein dynamisches Erdsondenmodell in Zusammenarbeit mit A. Huber [Huber, Schuler 1997] 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 wird das gewählte Heizsystem 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 Extremfall 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“ wurden die Modelle in MATLAB/SIMULINK soweit verbessert, dass eine Angleichung an das TRNSYS-Modell erreicht wird. Das Kennfeld eines Abluft-Wärmepumpenboilers konnte anhand von Herstellerdaten als COP in Funktion von Abluftenthalpie, Luftvolumenstrom und Warmwassertemperatur beschrieben werden.

Vorläufige Ergebnisse

Beim passiv-solar optimierten NOAH-Haus wurde nur bei der Massivbauweise eine 13%ige Reduktion des Heizenergiebedarfs erreicht. Beim Leichtbau und 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. Bei den Sensitivitätsuntersuchungen der Erdsonde zeigte sich, dass eine Änderung der Wärmeleitfähigkeit um 1 W/mK die Soletemperatur um 2 K ändert, was einer Änderung der JAZ um rund 3% entspricht.

Bei den Ökobilanzen stellte sich heraus, dass die Umweltbelastung durch die Gebäudeerstellung eine vergleichbare Grössenordnung erreicht, wie die der Wärmebereitstellung (Herstellung und Betrieb). Bei der letzteren werden etwa ein Fünftel durch die Herstellung der Wärmepumpe verursacht, während vier Fünftel vom Stromverbrauch abhängen. Dabei sind noch keine radioaktiven Emissionen berücksichtigt. Die durch das verwendete Kältemittel (R407c) verursachte Umweltbelastung spielt eine untergeordnete Rolle.

Das MATLAB/SIMULINK-Modell kann trotz einer Erhöhung des Zeitschritts auf 15 Minuten das dynamische Verhalten des TRNSYS-Modells sehr gut wiedergeben. Sobald Thermostatventile im Heizkreis eingebaut sind, treten mit der Zweipunkt-Rücklauf temperaturregelung Probleme auf. 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 Raumfühler installieren zu müssen.

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 abnimmt, aber der Temperaturhub zwischen Wärmequelle und -senke wegen der tieferen Verdampfungstemperatur zunimmt, wodurch der COP kleiner wird.

Weitere Arbeiten im nationalen Projekt

Für die Brauchwarmwasserbereitung ab Heizungswärmepumpe, den Betrieb mit einer zweistufigen Wärmepumpe und den Einsatz von reinem Wasser in einer Erdsonde sind noch zusätzliche TRNSYS-Simulationen durchzuführen. Bei den Ökobilanzen sind neben einigen Varianten für die Wärmezeugung und das Gebäude in einer weiteren Ausbaustufe noch die radioaktiven Emissionen zu berücksichtigen. Beim Regelmodul sind Anpassungen am TRNSYS-Modell vorzunehmen, um einen Vergleich mit MATLAB zu ermöglichen. Ausserdem soll durch die Einführung von zusätzlichen Ein- und Ausschaltkriterien die Reaktion auf abrupte, witterungsbedingte Störgrössen verbessert werden. Um Kosten und Potential von Komfortwärme-Varianten in der Schweiz besser zu erfassen, muss die Wohnungslüftung als optionale Zusatz-Dienstleistung ausgewiesen werden. Dies ist besonders für einen Kostenvergleich mit Standardlösungen wichtig.

Einbettung im Annex XXV

In Ergänzung zum BEW-Projekt „Kostengünstige Niedrigtemperaturheizung mit Wärmepumpe, Phase 2“ erfolgen die Arbeiten im Annex XXV. Anfangs September wird voraussichtlich ein Kick-Off-Meeting stattfinden. Das ZTL, das Institut für Mess- und Regeltechnik der ETHZ und die beiden Ingenieurbüros Doka und Huber sind daran interessiert, am Annex XXV aktiv teilzunehmen. Die Koordination erfolgt über die INFEL, welche den Operating Agent (OA) stellt, und das Ingenieurbüro Huber (stv. OA). Eine genaue Beschreibung der einzelnen Arbeiten kann erst nach dem Kick-Off-Meeting (11./12.09.97) erfolgen. Sobald diese definiert sind, wird für die Finanzierung der zusätzlichen Arbeiten an das BEW ein Gesuch gestellt.

Inhaltsverzeichnis

1 ZIELSETZUNG	1
2 DURCHGEFÜHRTE ARBEITEN.....	2
2.1 TRNSYS-SIMULATION GEBÄUDE UND WÄRMEERZEUGUNG.....	2
2.1.1 Gebäude	2
2.1.2 Wärmepumpe	4
2.1.3 Wärmequelle.....	5
2.2 SIMULATION DER ERDSONDE.....	5
2.2.1 Verwendetes Modell	5
2.2.2 Berechnungsverfahren	5
2.3 ÖKOBILANZEN	7
2.3.1 Grundsätzliches	7
2.3.2 Zu beantwortende Fragen – Zieldefinition	7
2.3.3 Systemgrenzen.....	8
2.3.4 Erhebung des Ökoinventars	9
2.3.5 Vollaggregation	10
2.4 MATLAB-SIMULATION DES REGELMODULS	10
2.4.1 Anpassung des MATLAB/SIMULINK-Modells an das TRNSYS-Modell	10
2.4.2 Pulsbreitenmodulation	12
2.4.3 H_∞ -Reglerentwurf unter Einbezug von Aussentemperatur und Solarstrahlung	12
2.4.4 Vergleich des H_∞ -Reglers mit dem 2-Punkte Regler	12
2.4.5 Einsatz von Thermostatventilen	13
2.4.6 H_∞ -Reglerentwurf mit zusätzlichem Druckdifferenzsignal	14
2.5 ERMITTLUNG KENNZAHLEN WASSERERWÄRMUNG MIT ABLUFTWÄRMEPUMPE.....	14
2.5.1 Technische Daten der LWAZ 250:	14
2.5.2 Leistungsdaten LWAZ 250	14
2.5.3 Kennwerte nach EN 255 Teil 6.....	15
2.5.4 Bereitschaftsenergieverbrauch.....	16
2.5.5 Einfluss der Abluft-Enthalpie	16
2.5.6 Jahresarbeitszahl der Wassererwärmung mit Abluftwärmepumpe	17
3 GEWONNENE ERKENNTNISSE	18
3.1 GEBÄUDEOPTIMIERUNG	18
3.2 ERDSONDEN-WÄRMEPUMPE	19
3.3 ÖKOBILANZEN	20
3.4 REGELMODUL.....	21
3.4.1 Problematik der Abtastzeit von TRNSYS	21
3.4.2 Modellstruktur in MATLAB/SIMULINK.....	21
3.4.3 Probleme mit der Rücklauftemperaturregelung.....	21
3.5 EFFIZIENZ DER WASSERERWÄRMUNG.....	21
4 WEITERE UNTERSUCHUNGEN	22
4.1 TRNSYS-SIMULATION GEBÄUDE UND WÄRMEERZEUGUNG.....	22
4.1.1 Warmwasseraufbereitung.....	22
4.1.2 Wärmepumpe	22
4.1.3 Erdsonde	22
4.2 ÖKOBILANZEN	22
4.3 REGELMODUL.....	22
4.3.1 Implementierung des H_∞ -Reglers in TRNSYS.....	22
4.3.2 Erweiterung des TRNSYS-Modells mit Thermostatventilen	22
4.3.3 Identifikation des TRNSYS-Modells mit variablem Volumenstrom	22
4.3.4 Implementierung des H_∞ -Reglers mit Drucksignal in TRNSYS	22
4.3.5 Einführung von zusätzlichen Ein- und Ausschaltkriterien	23

4.3.6 <i>Implementation eines PID Reglers mit Pulsbreitenmodulation</i>	23
4.4 KOSTEN UND POTENTIAL DER KOMFORTWÄRME-VARIANTEN	23
4.4.1 <i>Gesamtkosten für Erzeugung und Verteilung</i>	23
4.4.2 <i>Potential der Wärmepumpen-Heizung im Niedrigenergiehaus</i>	23
5 IEA-ANNEX XXV	24
6 LITERATURVERZEICHNIS	25

1 ZIELSETZUNG

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 gemessenen 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 erfolgt 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.

2 DURCHGEFÜHRTE ARBEITEN

2.1 TRNSYS-Simulation Gebäude und Wärmeerzeugung

In der zweiten Projektphase steht nebst dem besseren Modellierungsgrad einzelner Komponenten, insbesondere der Erdsonde, die Systemoptimierung "Gebäude mit Haustechnik" im Vordergrund. Die Simulationen werden mit der gleichen Version des TRNSYS Simulationsprogramms [TRNSYS 96] durchgeführt, damit die Resultate direkt miteinander vergleichbar sind.

Als Randbedingung für die Systemoptimierung gilt nach wie vor die Forderung nach möglichst einfacher Technik und der Aspekt des kostengünstigen Bauens. Abb. 2 gibt eine Übersicht über die Eckpfeiler der Systemoptimierung.

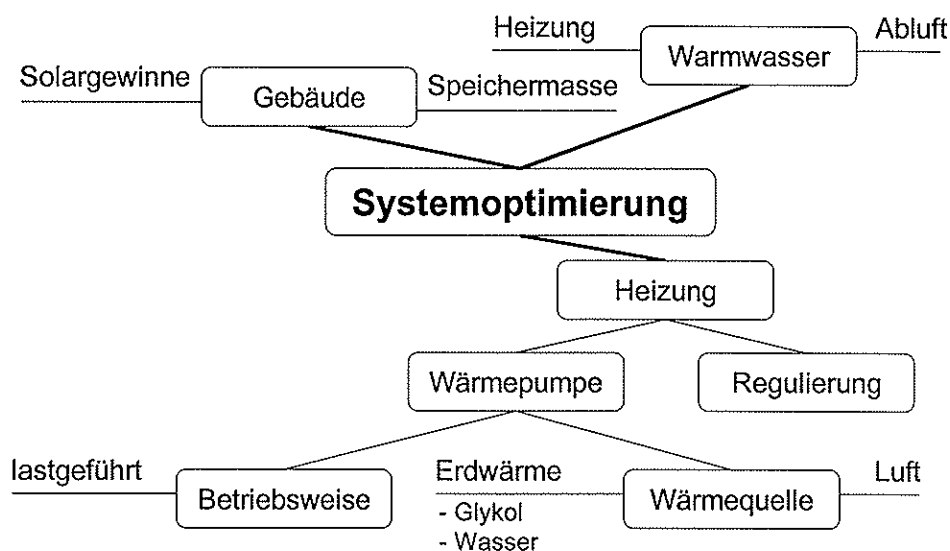


Abb. 2 : Systemoptimierung

Nachfolgend werden die einzelnen Optimierungsgebiete erläutert:

2.1.1 Gebäude

In der ersten Projektphase wurde ein bezüglich der passiven Solarenergienutzung konservatives Gebäude untersucht. Da eine Senkung des Primärenergieverbrauch nicht nur durch hohe Jahresarbeitszahlen erreicht wird, sondern in erster Linie durch eine Senkung der Bedarfsnachfrage des Gebäudes, wird in der zweiten Projektphase ein Gebäude den Untersuchungen zu Grunde gelegt, das der passiven Sonnenenergienutzung erhöht Rechnung schenkt.

Bei der Wahl des Referenzgebäudes 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 Projektphase 1 und 2 nachzukommen.

Als wesentlichste Merkmale von Niedrigenergiegebäuden gelten:

- gute Wärmedämmung
- passive Sonnenenergiegewinnung (Südausrichtung der Aufenthaltszonen mit grossen Fensterflächen)

- Anbringen von thermischer Speichermasse im Gebäude zur kurzfristigen Speicherung der freien Wärme
- Rückgewinnung 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 verbessert. Sie wurde derart erhöht, dass der Wärmeleistungsbedarf der einzelnen Zonen trotz der vorgenommenen Fenstervergrösserung etwa gleich gross blieb wie in der ersten Phase, was zu einer ähnlichen Systemauslegung führt. In der zweiten Projektphase wurden die gleichen Fenster wie in der ersten Phase verwendet, da diese schon einen recht guten Wärmedämmstandard haben. Ebenfalls wurde das Benutzerverhalten gleich beibehalten wie in der ersten Phase mit der Ausnahme, dass neu eine Beschattungseinrichtung betätigt wird. Der Aussenluftwechsel wird auch wie in der ersten Phase als Funktion der Aussenlufttemperatur festgelegt (siehe Abb. 3) und die Abluft wird entweder über einen Abluftwärmepumpen-Wassererwärmer genutzt oder bei Warmwasseraufbereitung ab Sole/Wasser-Wärmepumpe ungenutzt ins Freie geführt.

	Projektphase 1	Projektphase 2
	k-Werte [W/(m ² ·K)]	k-Werte [W/(m ² ·K)]
Aussenwand	0.29 (0.16 cm Dämmung)	0.20 (0.24 cm Dämmung)
Dach	0.22 (0.20 cm Dämmung)	0.15 (0.30 cm Dämmung)
Boden EG	0.25 (0.12 cm Dämmung)	0.20 (0.16 cm Dämmung)
Fenster	1.1	1.1

Tab. 1: Vergleich der Wärmedurchgangskoeffizienten der beiden Projektphasen

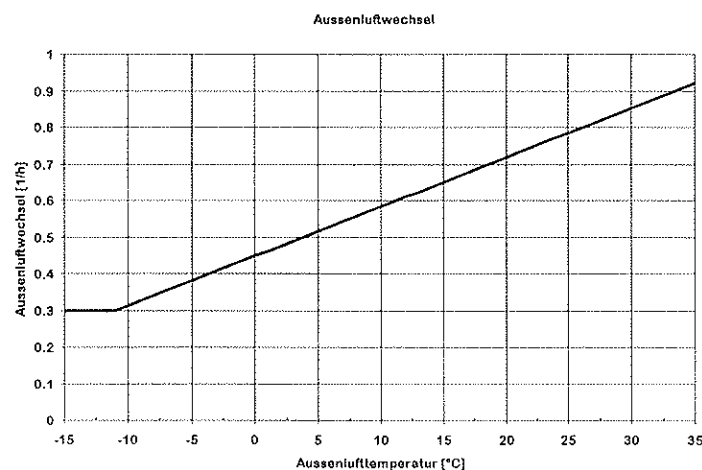


Abb. 3: Aussenluftwechsel als Funktion der Aussenlufttemperatur

Der Heizenergiebedarf konnte durch diese Massnahmen von 155 [MJ/(m²·a)] (erste Projektphase) auf 110 [MJ/(m²·a)] gesenkt werden, was einer Reduktion von 30% entspricht. Der Heizenergiebedarf ist um 60% niedriger als der im Kanton Zürich vorgegebene Grenzwert von 276 MJ/m²a.

2.1.2 Wärmepumpe

Bei der Wärmepumpe sind zwei neue Aggregate den Simulationsrechnungen zu Grunde gelegt. Neu werden die Wärmepumpen Saurer Natura AW 108.1 Hi und CTA WRHH 21 sc prop für die Simulationsrechnungen verwendet.

Die letztgenannte Sole/Wasser-WP hat nicht nur eine wesentlich bessere Leistungszahl als diejenige der ersten Phase, sondern mit Propan auch ein sog. natürliches Kältemittel ohne Treibhauspotential. Bei der Luft/Wasser-WP wird neu ein Aggregat mit dem Kältemittel R407c anstelle von R22 verwendet.

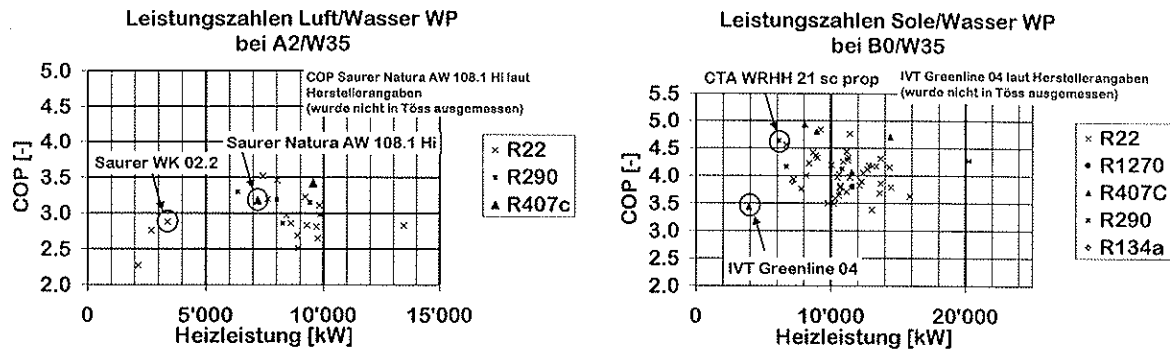


Abb. 4: Übersicht über die Leistungszahlen der in Töss getesteten L/W- und S/W-Wärmepumpen (Stand 31. 1. 97). Eingekreist die in der ersten und zweiten Projektphase verwendeten Wärmepumpen.

	Luft/Wasser Saurer Natura AW 108.1 Hi	Sole/Wasser CTA WRHH 21 sc prop
Nennleistung in [kW] (bestimmt aus Regressionspolynom)	5.8 bei A-7/W35	6.1 bei B0/W35
Skalierungsfaktor (Faktor, um den die Nennleistung für die Simulationsrechnungen reduziert wird)	0.6	0.65
effektive Nennleistung in [kW] (für Simulation verwendet)	3.5 bei A-7/W35 (inkl. Leistungsminderung durch Vereisung)	4.0 bei B0/W35
Kältemittel	R407c	R290 (Propan)

Tab. 2: Übersicht über die verwendeten Wärmepumpen

Bei der Luft/Wasser-WP ist der Unterschied zwischen Wärmepumpenleistung und Wärmeleistungsbedarf naturgemäss sehr gross. Bei dieser Variante wird daher untersucht, um wieviel die Jahresarbeitszahl durch den Einsatz einer 2-stufigen Wärmepumpe gegenüber einem 1-stufigen Betrieb erhöht werden kann. Zur Zeit wird hierzu noch das notwendige Modell ausgearbeitet.

2.1.3 Wärmequelle

Als Wärmequelle wird weiterhin Aussenluft oder untiefe Geothermie¹ verwendet. Die Aussenluft wird direkt angesaugt (nicht über 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 Primärkreislaufs bei ändernden Randbedingungen von Interesse. Die Variation wird bezüglich folgender Parameter untersucht:

- Wärmeleitfähigkeit Erdreich
- Sondenlänge
- Sondenmedium (25 Vol.-% Antifrogen N oder Wasser)
- Auslegungstemperaturdifferenz Sondenkreislauf

2.2 Simulation der Erdsonde

2.2.1 Verwendetes Modell

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

In der Projektphase 2 wird das Erdsondenmodul verwendet, das im parallel laufenden BEW-Forschungsprogramm "Berechnungsmodul für Erdwärmesonden" [Huber, Schuler 1997] 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 Programm-Modifikationen, deren Notwendigkeit sich in den TRNSYS-Simulationen ergeben hat, sind in beiden Programmversionen durchgeführt worden, um beide Algorithmen gleichwertig zu halten.

2.2.2 Berechnungsverfahren

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 1996] 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, wird das Sondenfluid, das sondennahe Erdreich und die Randbedingungen (entfernte Erdreich), die alle sehr unterschiedliche Zeitkonstanten haben, mit verschiedenen Zeitschritten berechnet. Abb. 5 und Abb. 6 zeigen die axiale und radiale Diskretisierung des Sondenbereichs.

¹ Die Grenzen der untiefen Geothermie liegen zwischen 10-20 [m] unter der Erdoberfläche für die obere Grenze und 400 [m] für die untere Grenze

2.3 Ökobilanzen

2.3.1 Grundsätzliches

Eine Ökobilanz soll Auskunft geben über die ökologischen Belastungen, die mit einem bestimmten Prozess – hier verschiedene Wärmepumpensysteme – verknüpft sind. Insbesondere interessieren dabei nicht nur die direkt durch diesen Prozess verursachten Beeinträchtigungen, sondern auch die indirekt, aber kausal verknüpften Beeinträchtigungen, die durch diesen Prozess entstehen, wie z.B. durch den Energieverbrauch oder Materialproduktion, Entsorgungsprozesse etc. Diese indirekten Beeinträchtigungen werden als "graue" Beeinträchtigungen bezeichnet. Die Summe der direkten und indirekten ("grauen") Belastungen werden als *kumulierte Belastungen* bezeichnet.

Sollen verschiedene Prozesse miteinander verglichen werden, ist darauf zu achten, dass sie einen vergleichbaren Nutzen erbringen. Dieser erbrachte Nutzen wird im Ökobilanzier-Jargon als "funktionale Einheit" bezeichnet. Für die vorliegende Studie sollen verschiedene Wärmepumpensysteme miteinander verglichen werden. Die funktionale Einheit der Heizsysteme – der erbrachte Nutzen – ist die abgegebene Nutzwärme in MJ_{th} oder kWh_{th} für Heiz- und Warmwasser. Die Bilanz muss den Betrieb während eines durchschnittlichen Jahres abbilden.

2.3.2 Zu beantwortende Fragen – Zieldefinition

2.3.2.1 Optimierungsanalyse

Durch Analyse der Ökobilanzresultate können diejenigen Systemteile identifiziert werden, welche massgeblich an der ökologischen Belastung durch den betrachteten Gesamtprozess beitragen. Ökologische Optimierungen sollten für maximale Effektivität an diesen "Löwenanteilen" ansetzen. Eine *Optimierungsanalyse* der Wärmepumpensysteme verhindert, dass falsche Prioritäten zur Optimierung eines unbedeutenden, wenig einflussreichen Systemteils gesetzt werden.

2.3.2.2 Marktvergleich

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

2.3.2.3 Belastungen aus dem Gebäude und der Wärmeerzeugung

Zusätzlich wird folgende Problematik beleuchtet: Bei Solarhäusern werden die Fensterflächen und die Speichermassen (Wände, Böden) vergrössert, um Solarenergie als passive Heizenergie zu nutzen. Allgemein herrscht die Meinung, dass dieser Aufwand gerechtfertigt ist, da eine Bereitstellung von konventioneller Heizwärme ökologisch belastender sei. Wärmepumpen sind aber vergleichsweise ökologisch sehr gering belastende Technologien.

Folgende Fragen sollen beantwortet werden:

- "Ist bei der betrachteten Wärmepumpenheizung der Mehraufwand zum Bau eines Passivhauses gegenüber einem konventionellen Haus noch ökologisch sinnvoll?" oder
- "Ist der Optimierungspunkt bereits überschritten?"

Um diese Fragen beantworten zu können muss die oben erwähnte „funktionale Einheit“ erweitert werden. Sie soll nicht nur die Belastungen und Aufwendungen für die Bereitstellung von Wärmeenergie (Heizung und Brauchwarmwasser) umfassen, sondern auch die Belastungen und Aufwendungen durch das Gebäude.

Für die „funktionelle Einheit“ wird folgende Definition verwendet:

- *Belastungen aus Gebäude und Wärmebedarf (Heiz- und Brauchwarmwasser) bei 150m² Nutzfläche und 3 Personen während einer Gebäudelebensdauer von 80 Jahren.*

2.3.2.4 Variante Strombereitstellung durch BHKW

Ein wichtiger Beitrag zu den Umweltbelastungen durch Wärmepumpensysteme stammt aus der Strombereitstellung. Für eine Bilanzierung von in der Schweiz betriebenen Wärmepumpen ist der Bezug von Strom aus dem gegenwärtigen schweizerischen Strommix zu bilanzieren.

Bei der Bilanzierung wurde vom CH-Strommix ausgegangen. Die Frage, woher - falls nötig - *zusätzlicher* Strom zum Betrieb von Wärmepumpen genommen werden soll, stellt sich auf der Ebene *Energieplanung* der Schweiz, deren Antizipierung aber ausserhalb des Rahmens der vorliegenden Studie liegt. Ist in der Energieplanung hingegen der zusätzliche Bau von neuen BHKW 100%ig motiviert durch neue Wärmepumpen, so kann von einer Kausalität zwischen Wärmepumpen und BHKW gesprochen werden. Diese Kausalität ist real kaum zu 100% gegeben: wenn Wärmepumpen rückgebaut würden und z.B. durch fossile Systeme ersetzt würden, würde das kaum zu einem zwingenden Rückbau der BHKW-Kapazität führen. Bei Betrachtung der Betriebsituation wird nochmals klar, dass die Kausalität sehr künstlich ist, denn das BHKW kann auch Strom einspeisen, wenn die Wärmepumpe nicht läuft und umgekehrt.

Eine Variante "Wärmepumpe mit 100% BHKW Strom" wird für die vorliegende Studie – angesichts der obigen Vorbehalte – als Extremfall gerechnet. Die Realität ist dann zwischen den Varianten "Wärmepumpe mit CH Strommix" und "Wärmepumpe mit 100% BHKW Strom" zu suchen, je nachdem wie stark die Kausalität zwischen BHKW und Wärmepumpe gewichtet werden soll.

2.3.2.5 Überblick Varianten Teilsysteme

Folgende Varianten von Teilsystemen werden betrachtet:

Varianten Heizsysteme

- Sole/Wasser-Erdsondenwärmepumpe mit Beistellboiler
- Luft/Wasser-Wärmepumpe (ohne Elektrozusatzheizung) und WP-Boiler mit Abflutnutzung
- Ölheizung (Referenzsystem)
- Gasheizung (Referenzsystem)
- Elektrowiderstandsheizung (Referenzsystem)

Varianten Gebäude

- NOAH-Leichtbauhaus (Holz)
- Variante Massivbauhaus
- Variante Leichtbauhaus Passiv-Solar
- Variante Massivbauhaus Passiv-Solar

Varianten Strombereitstellung

- Schweizerischer Inlandstrommix (inkl. Importanteile)
- 100% Strom ab Blockheizkraftwerk (Zubau)

2.3.3 Systemgrenzen

Die Systemgrenzen ergeben sich aus der zu beantwortenden Frage und damit der Wahl der „funktionalen Einheit“. Es werden alle direkten und indirekten Umweltbelastungen erhoben (s.o.). Die Methodik entspricht dem Vorgehen im Standardwerk [ESU 1996], d.h. es werden die Material- und Energieflüsse von und in die *natürliche Umwelt* betrachtet (Ressourcenentnahme und Emissionen). Insbesondere Belastungen am Arbeitsplatz werden nicht berücksichtigt bzw. es wird angenommen, dass gesetzliche Grenzwerte eingehalten werden. Ebenfalls nicht enthalten sind die Umweltbelastungen aus seltenen Unfällen (probabilistische Risiken). Häufige Unfälle (z.B. Blow-outs der Ölförderung, diffuse Emissionen) sind aber enthalten.

Die indirekten Belastungen aus Standardprozessen wie Materialherstellung, Transporten, Energiebereitstellung und Entsorgungsprozessen werden ebenfalls aus [ESU 1996] übernommen. Die Bilanzierung von Baumaterialien stützt sich auf [ESU 1995]. In Abb. 7 werden die bilanzierten Prozessstufen in einer sogenannten Prozesskette dargestellt. Auf jeder Stufe der Prozesskette werden Energien und Materialien zugeordnet und eventuell Emissionen erzeugt.

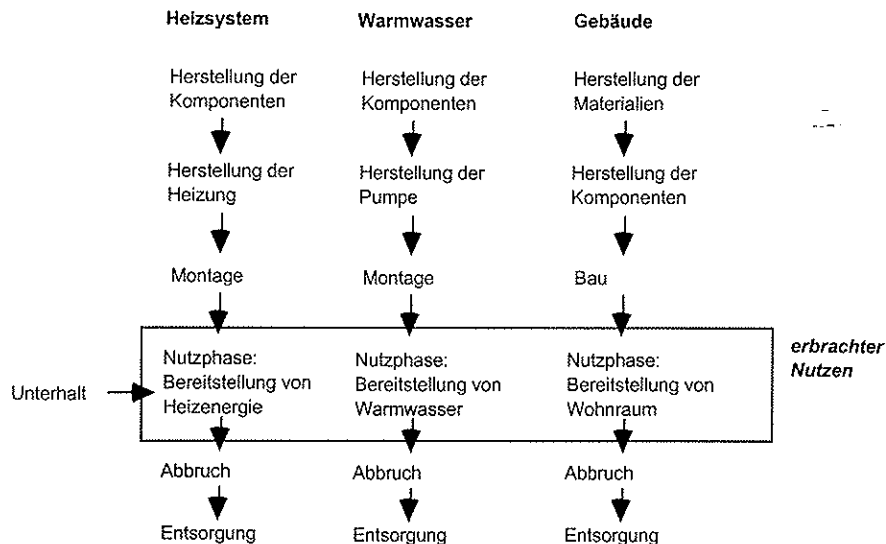


Abb. 7: Prozesskette der betrachteten Prozesse

2.3.4 Erhebung des Ökoinventars

Für die zu betrachtenden Teilprozesse müssen die direkt auftretenden Energie- und Materialflüsse bekannt sein. Für die betrachteten Heiz- und Warmwassersysteme sowie Gebäude wurden Hersteller um Auskunft gebeten. Folgende Inventare werden erhoben:

Heizsysteme:

- *Luft/Wasser-WP*: Dr. Bruderer, Hr. Hohl, Saurer Thermotechnik AG, für Saurer WK02.2
- *Erdsonden-WP*: Hr. Meyer, Durena AG, für IVT-Sole/Wasserpumpe

Warmwassersystem:

- *Abluft-WP-Boiler*: Hr. Reiner, Novelan AG, für Siemens MV 2003 WP-Boiler
- *Beistellboiler*: Hr. Meyer, Durena AG, für Beistellboiler

Gebäude:

- *NOAH-Leichtbauhaus*: Hr. Wuhrmann, Alfredo Piatti AG

(Die Hausvarianten "Massivbau" sowie "Massivbau Passiv-Solar" und "Leichtbau Passiv-Solar" werden aus der erhobenen Variante "Leichtbau" extrapoliert.)

Die unterschiedliche Lebensdauer der betrachteten Komponenten wird natürlich berücksichtigt. Die erhobenen Inventardaten werden mit den spezifischen Umweltbelastungen aus [ESU 1996] verrechnet, um die kumulierten Umweltbelastungen zu erhalten.

2.3.5 Vollaggregation

Als Umweltbelastungen werden so verschiedene Effekte wie Luftemissionen, Wasseremissionen, Radioaktivität, Abwärme, Flächenbeanspruchung und Ressourcenentnahmen errechnet. In [ESU 1996] werden ca. 150 Luft- und 100 Wasseremissionen ausgewiesen. Die Emissionen können quantitativ verschiedenen Umwelteffekten wie z.B. Treibhausproblematik, Ozonloch, Sommersmog etc. zugeordnet werden. Beim Vergleich von verschiedenen Systemen ist auf dieser Stufe aber oft noch nicht eindeutig entscheidbar, welches System ökologisch besser abschneidet. In [Goedkoop 1995] wurde die Methode "Eco-indicator 95" vorgestellt, welche verschiedene Umwelteffekte gegeneinander gewichtet und damit eine sogenannte *Vollaggregation* der Umweltauswirkungen ermöglicht. Als empfindliche Lücke besteht in der gegenwärtigen Methodik das Fehlen einer Bewertung von *radioaktiven Emissionen*. Diese Lücke soll aber geschlossen werden und in einem "Eco-indicator 97 oder 98" behoben sein [Hofstetter 1997]. Eine nachträgliche Ergänzung der vorliegenden Bilanzierung wird vorgesehen.

2.4 MATLAB-Simulation des Regelmoduls

2.4.1 Anpassung des MATLAB/SIMULINK-Modells an das TRNSYS-Modell

Ausgehend vom Modell L_06_01 wurde ein MATLAB/SIMULINK-Modell parametrisiert, um ein vergleichbares dynamisches Verhalten zu erreichen. Die Parameter wurden vorerst manuell eingestellt. Damit konnte bereits eine gute Übereinstimmung mit dem TRNSYS-Modell erzielt werden. Ziel war die Angleichung der Temperaturverläufe von Vor- und Rücklaufftemperatur sowie einer gemittelten Raumlufttemperatur 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. 8 gezeigt. In Abb. 9 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 Wärmepumpen in der Vergleichssimulation verwendet.

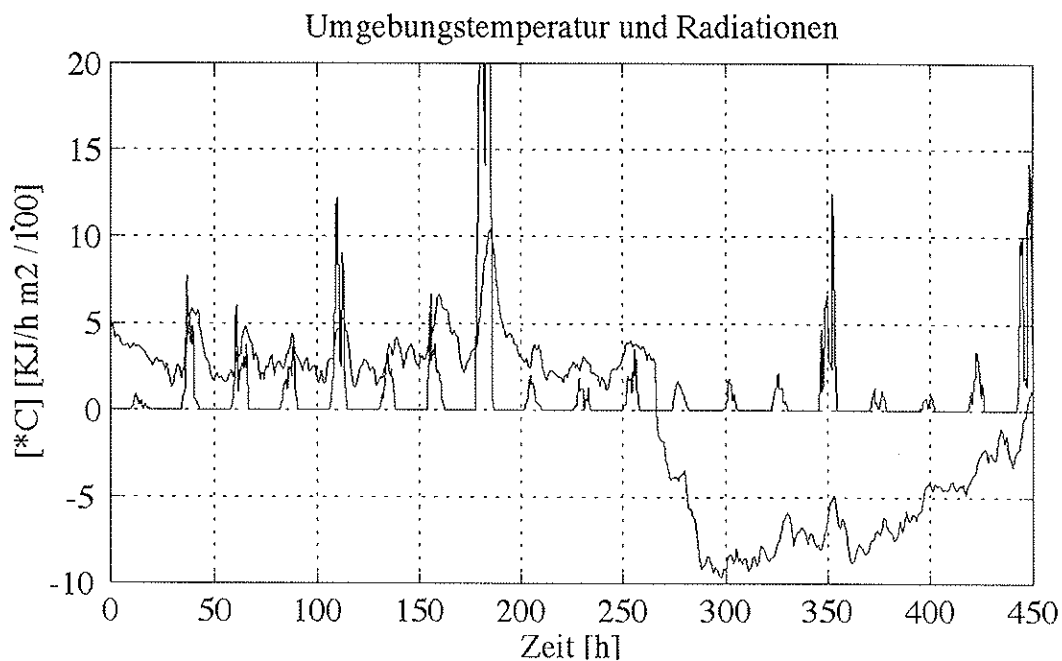


Abb. 8: Wetterverlauf für die Simulationszeit

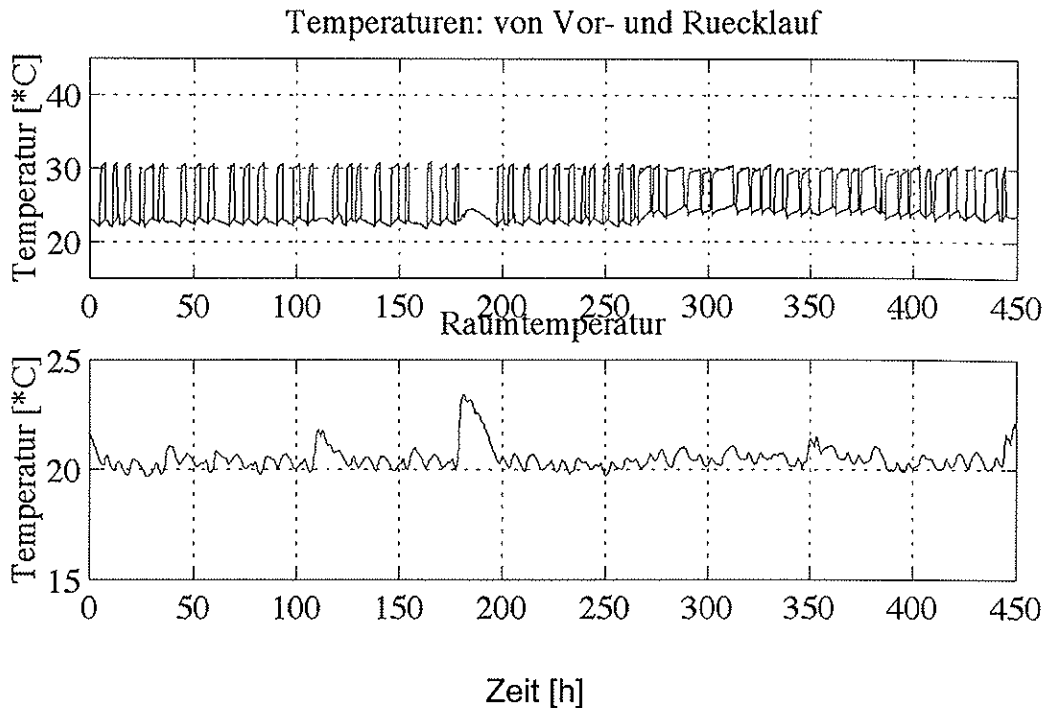


Abb. 9: Temperaturverlauf der TRNSYS-Referenzsimulation

Ausgehend von den manuell gefundenen Parametern wurde mittels einer Optimierungsroutine der Fehler zwischen den Referenzdaten und denjenigen der Vergleichssimulation in MATLAB/SIMULINK minimiert. Abb. 10 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, wo von einem Mehrzonengebäudemodell ausgegangen wird. Da sich selbst kleinste Parameterfehler stark auswirken können, ist diese Art der Optimierung von Hand nicht mehr machbar.

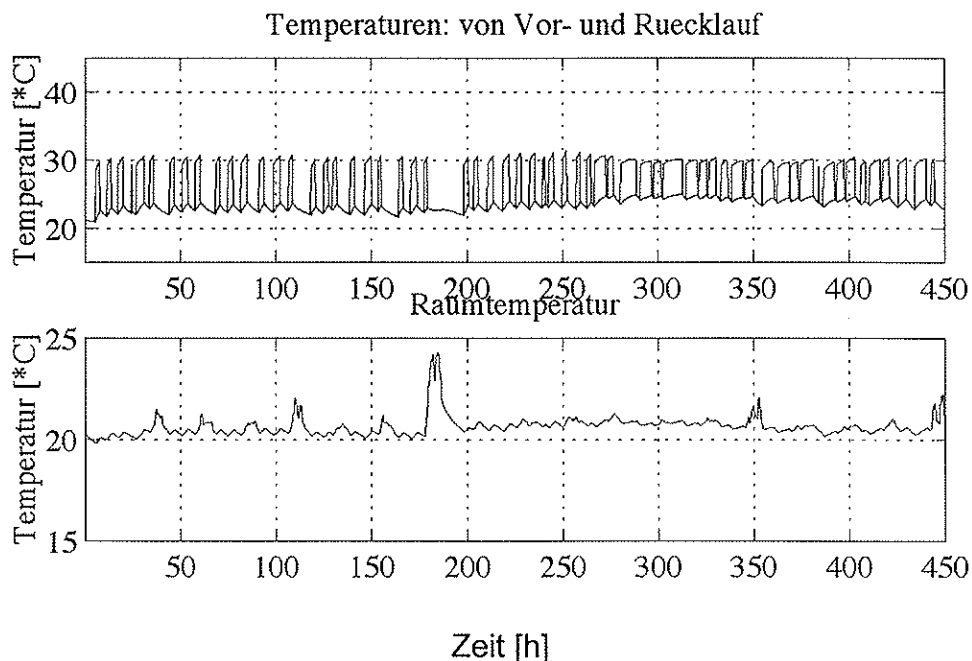


Abb. 10: MATLAB/SIMULINK-Simulation mit optimalen Parametern

2.4.2 Pulsbreitenmodulation

Eine der Voraussetzungen, damit ein linearer Regler funktionieren kann, besteht darin, dass der Regler ein wertkontinuierliches Stellsignal dem zu regelnden Prozess zur Verfügung stellt. Die Wärmepumpe jedoch verlangt ein binäres Stellsignal. Die Pulsbreitenmodulation bietet eine Lösung, um aus dem wertkontinuierlichen Signal des zeitdiskret arbeitenden Reglers ein binäres Signal umzuformen, so dass im Mittel über der Zykluszeit das Verhältnis zwischen Ein- und Ausschaltzeit dem zeitdiskreten Stellsignal des Reglers entspricht.

Die Hauptschwierigkeit bei der Implementierung 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 schwingt die Raumtemperatur stärker. Wird die Zykluszeit zu klein gewählt, wird die Wärmepumpe zu häufig eingeschaltet, so dass sie schneller abgenützt wird. Allerdings kann nur schon durch die Wahl der Pulsbreitenmodulation am Reglerausgang ausgeschlossen werden, dass die Wärmepumpe taktet.

2.4.3 H_∞ -Reglerentwurf unter Einbezug von Aussentemperatur und Solarstrahlung

Der Regler besteht aus drei Teilen, einer Vorsteuerung, einer Störgrössenkompensation und einem Rückführregler. Eingangsgrössen in den Rückführregler sind die Vor- und Rücklauftemperatur und in den Kompensator die Aussentemperatur und Solarstrahlung. Damit Nichtlinearitäten besser berücksichtigt werden können, wird das Referenzsignal der Vorsteuerung über eine Kennlinie in Abhängigkeit der Aussentemperatur geführt. Der zeitdiskrete Regler liefert zu jedem Taktzeitpunkt einen 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 Pulsbreitenmodulation berechnet die Laufzeit anschliessend als Produkt von korrigiertem Wert des Reglers mit der Zykluszeit. Diese entspricht der Zeit zwischen zwei Abtastzeitpunkten des Reglers.

2.4.4 Vergleich des H_∞ -Reglers mit dem 2-Punkte Regler

Der H_∞ -Regler erzielt bei der vorliegenden Simulation (Abb. 11) eine leicht höhere durchschnittliche Arbeitszahl als der 2-Punkte Regler (Abb. 12). Die Anzahl Einschaltungen konnte jedoch von 40 auf 29 gesenkt werden, ohne die Raumtemperatur stark vom gewünschten Wert abweichen zu lassen!

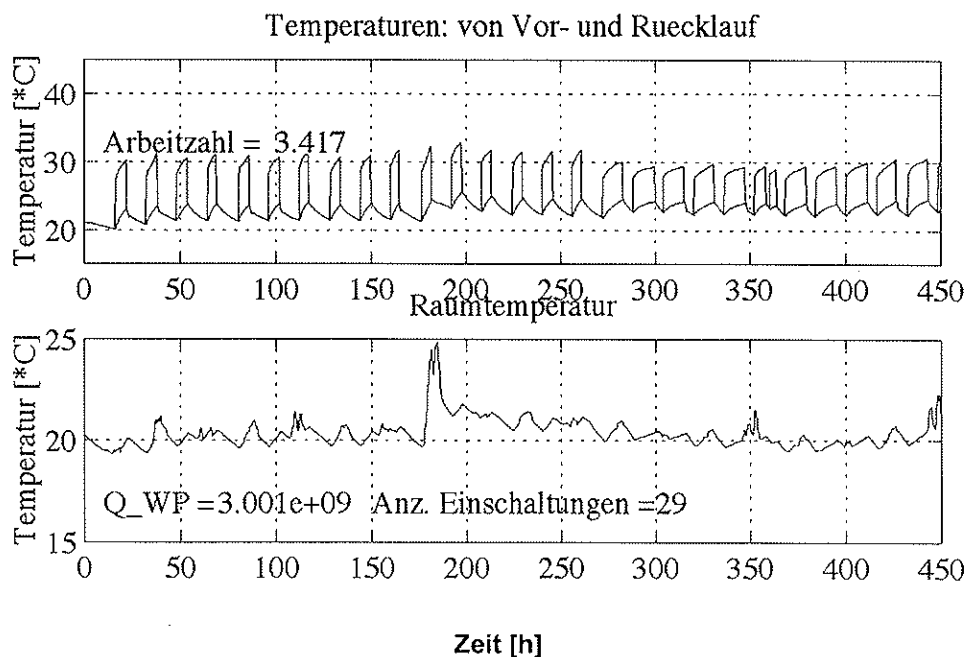


Abb. 11: Simulation mit H_∞ -Regler

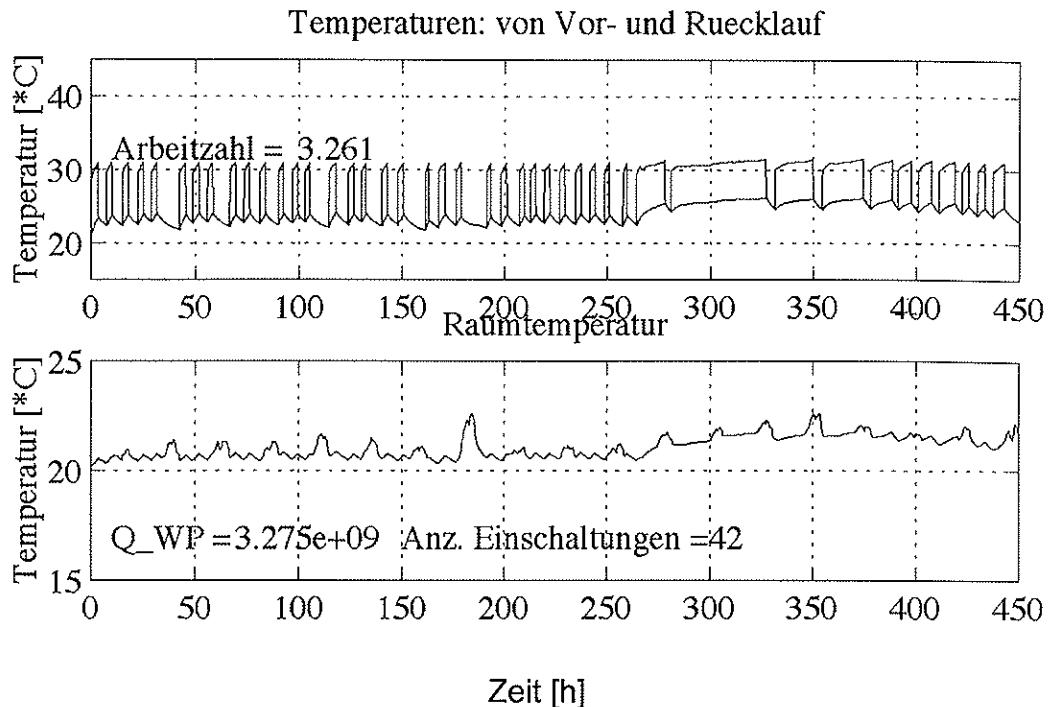


Abb. 12: Simulation mit 2-Punkte Regler

Beim gewählten Beispiel ist die thermische Trägheit der Bodenplatte erstaunlich gross und lässt sehr grosse Zykluszeiten von bis zu 8 Stunden zu. Auch wenn der Regler nur alle 16 Stunden die Wärmepumpe einschaltet, sind keine grossen Raumtemperaturschwankungen feststellbar. Es ist noch zu untersuchen, ob ein reales Gebäude gleich träge reagiert.

2.4.5 Einsatz von Thermostatventilen

Das vom ZTL übernommene Gebäudemodell lässt einen vordefinierten konstanten Volumenstrom durch die Bodenheizung fließen, sobald die Umwälzpumpe läuft. Es soll untersucht werden, ob sich Komfort- und/oder Effizienzverbesserungen durch den Einsatz von Thermostatventilen erzielen lässt. Dabei wird von einem einfachen hydraulischen Schema gemäss Abb. 13 ausgegangen.

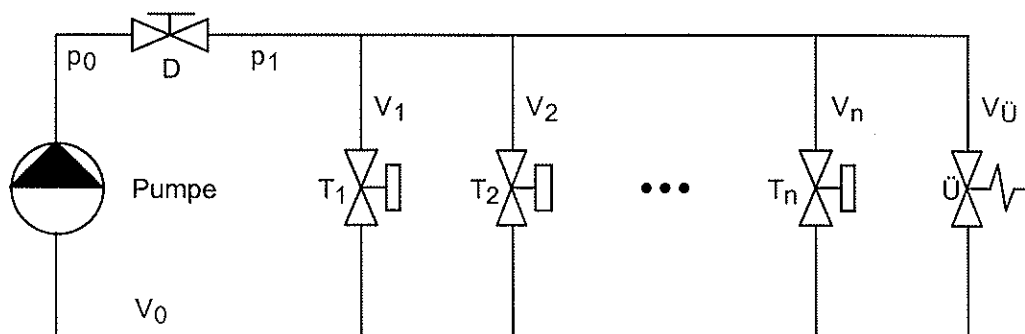


Abb. 13: Hydraulikschema für Heizwasserkreislauf

D repräsentiert den Druckabfall im Kondensator und im Hauptstrang. T_1 bis T_n sind die Thermostatventile in den einzelnen Heizsträngen, wobei der Druckabfall in der Verrohrung den Thermostatventilen zugerechnet wird. Das Überstromventil \ddot{U} (Bypass) begrenzt den Druck p_1 auf einen maximal zulässigen Wert. Die Pumpenkennlinie wird im Betriebsbereich linearisiert.

2.4.6 H_o-Reglerentwurf mit zusätzlichem Druckdifferenzsignal

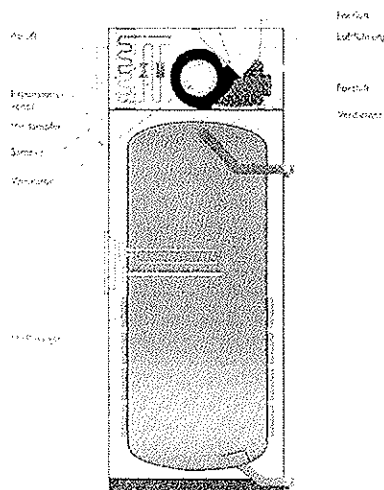
Falls in einem Heizungssystem Thermostatventile vorhanden sind, bewirkt eine ansteigende Vorlauf-temperatur nicht automatisch ein Ansteigen der Rücklauftemperatur. Dadurch wird die obere Tempe-raturschranke für den Rücklauf während einer relativ langen Zeitperiode nicht erreicht, obwohl die Wärmepumpe weiter die Vorlauf-temperatur erhöht, was sicherlich exergetisch nicht sinnvoll ist. Es ist bekannt, dass Thermostatventile bei Niedrigtemperaturheizungen (Vorlauf < 30°C) wegen der grossen Zeitkonstanten kaum etwas zur Regelung beitragen. Aus der durch den Schliessvorgang verursachten Druckänderung im Heizsystem können jedoch Rückschlüsse auf die Raumtemperatur geschlossen werden. Absperrventile haben den Vorteil, dass einzelne Räume bei Bedarf reduziert beheizt werden können.

Die Verwendung der Druckdifferenz als Eingangssignal der Regelung ermöglicht es, direkt auf eine Raumerwärmung reagieren zu können. Das Schliessen des Ventils wird sofort in einer Erhöhung der Druckdifferenz registriert. Bei Systemen mit geregelten Umwälzpumpen würde dies einer Drehzahlre-duktion entsprechen. Die Regelung auf ein bestimmtes Druckniveau kann damit als Regelung einer gemittelten Raumtemperatur gedeutet werden. Damit die Raumtemperatur besser eingehalten werden kann, sollten neben der Druckdifferenz auch die unter 2.4.3 verwendeten Temperatursignale weiterhin verwendet werden. Dies ist insbesondere dann wichtig, wenn einzelne Thermostatventile zeitweise ganz zuge dreht werden.

2.5 Ermittlung Kennzahlen Wassererwärmung mit Abluftwär-mepumpe

In Phase 1 wurde gezeigt, dass die Wassererwärmung bei einer monovalenten Wärmepumpen-Hei-zung am effizientesten mit einer Abluftwärmepumpe zu erreichen ist [Schlussbericht Phase 1, Seite 52, Abb. 46 und 47]. 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, über die ausführliche Messdaten vom Hersteller zur Verfügung gestellt wurden.

2.5.1 Technische Daten der LWAZ 250:



Temperaturbereich der Abluft	°C	15 bis 35
Warmwassertemperatur	°C	(45), 55 oder 65
Abluftvolumenstrom	m ³ /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 m ³ /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°

2.5.2 Leistungsdaten LWAZ 250

Die Leistungsmessungen wurden vom Hersteller nach EN 255 Teil 6 [DIN EN 255 Teil 6] durchgeführt. 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_i erfolgt aufgrund von mindestens 2 Zyklen mit Entnahme des halben Speicherinhalts. Der COP_i stellt somit gemäss [DIN EN 255 Teil 6] 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 Warmwasser-Temperatur entsprechend der Reglereinstellung 55 oder 65°C, (45 °C ist bei der jetzigen Serieausführung nicht vorgesehen). Die Umgebungstemperatur während der Messung beträgt 15°C. Im Anschluss an die Wasserentnahme-Zyklen werden die Bereitschaftsverluste ermittelt.

Die Bestimmung des COP_i 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 :

Anteiliger Lüftungsenergieverbrauch:

$$W_{eant} = \dot{V} \cdot \Delta p \cdot t_h / \eta \text{ in Wh} \quad \text{mit} \quad \begin{aligned} \eta &= 0.3 \\ \Delta p &= \text{Druckverlust für Anschlusskanäle in Pa} \\ \dot{V} &= \text{Volumenstrom in m}^3/\text{s} \\ t_h &= \text{Aufheizzeit in Stunden} \end{aligned}$$

Anteiliger Bereitschaftsenergieverlust W_{et} :

$$W_{et} = P_{es} \cdot t_h \quad \text{mit} \quad P_{es} = \text{Effektive Leistungsaufnahme während der Bereitschaftsperiode in Wh}$$

Die Arbeitszahl COP_i für die Wassererwärmung ergibt sich anschliessend zu:

$$COP_i = Q_t / (W_{eh} - W_{eant} - W_{et}) \quad \text{mit} \quad \begin{aligned} Q_t &= \text{Wärmeinhalt der entnommenen Wassermenge in Wh} \\ W_{eh} &= \text{Gemessene Energieaufnahme während der Aufheizperiode in Wh} \end{aligned}$$

2.5.3 Kennwerte nach EN 255 Teil 6

Ablufttemp	rel. Feuchte	Volumenstr.	Aufheizzeit t_h nach 1/2 Speicherentnahme			COP _i nach EN 255 Teil 6 bei Wassertemperatur von		
			auf 45°C	auf 55°C	auf 65°C	45°C	55°C	65°C
°C	%	m3/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

2.5.4 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.

2.5.5 Einfluss der Abluft-Enthalpie

Auf der Basis der obigen Messwerte wurde vom Hersteller die Abhängigkeit von der Enthalpie der Abluft bestimmt. Sie kann durch folgende Gleichungen beschrieben werden:

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

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

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

Damit sind alle Daten vorhanden, um die Jahresarbeitszahl für die Wassererwärmung in Abhängigkeit des Luftvolumenstroms, des Druckabfalls über den Verdampfer (ohne externe Pressung), der rel. Feuchte der Abluft und der bezogenen Warmwassermenge pro 24h zu berechnen. Dazu müssen noch die von der Speichertemperatur abhängigen Bereitschaftsverluste abgezogen werden. Die Auswertung wurde in einem Excel-Sheet vorgenommen und ergibt folgende Resultate.

2.5.6 Jahresarbeitszahl der Wassererwärmung mit Abluftwärmepumpe

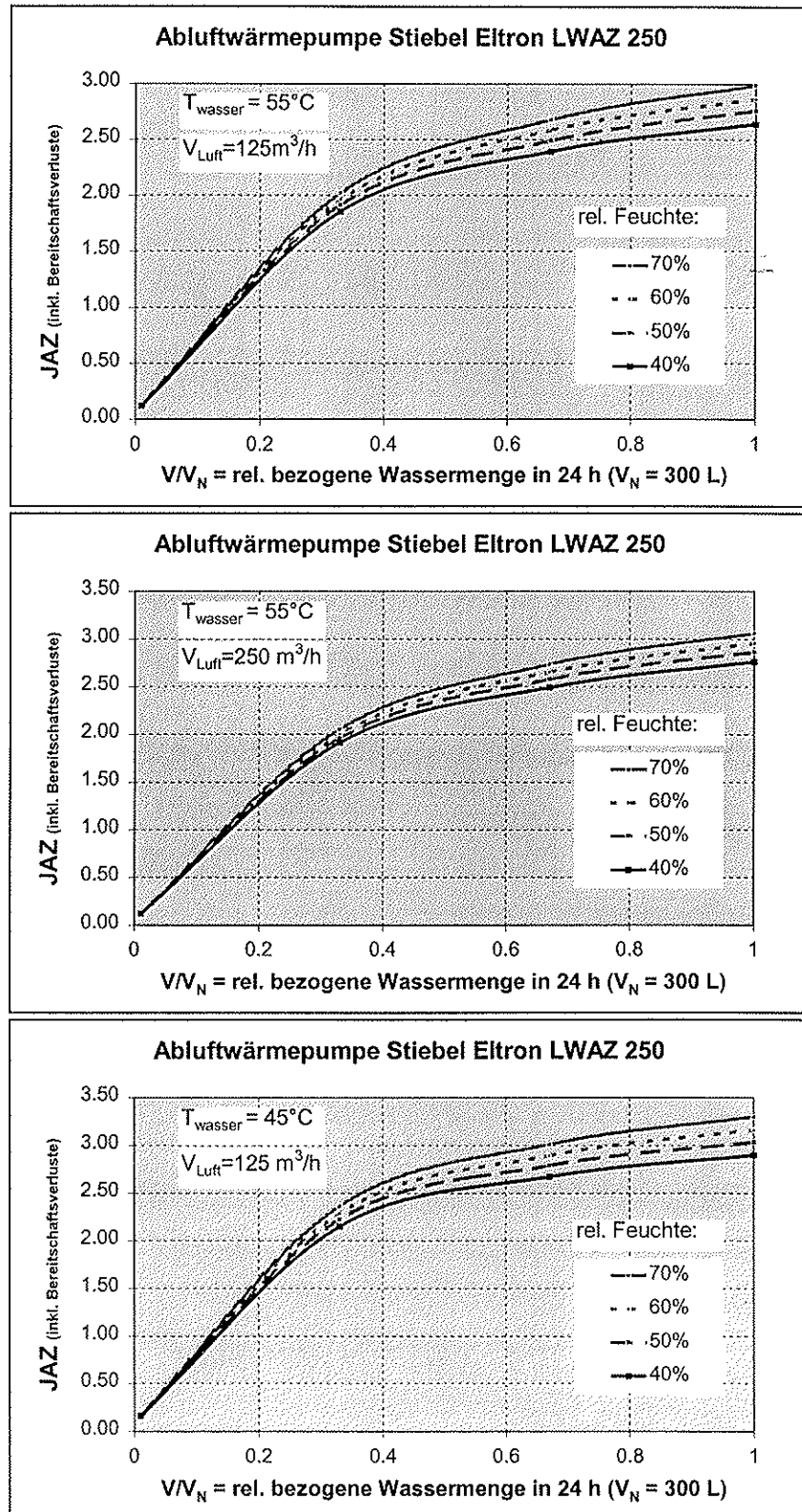


Abb. 14: Jahresarbeitszahl Abluft-Wärmepumpe in Funktion der Warmwassertemperatur und des Volumenstroms (inkl. Bereitschaftsverluste von 1.1 kWh/d für 55°/15°C, ohne Druckverlust der Anschlusskanäle)

3 GEWONNENE ERKENNTNISSE

3.1 Gebäudeoptimierung

Beim Gebäude der ersten Projektphase hatte die Speichermassenerhöhung des Gebäudes keinen Einfluss auf den Heizenergiebedarf. Beim optimierten NOAH-Gebäude, das der passiven Solarenergienutzung erhöht Rechnung trägt, führt die Massivbauweise gegenüber der Leichtbauweise zu einer Reduktion des Heizenergiebedarfs von 13%. Wesentlichster Grund für die Energieeinsparung ist, dass beim Massivbau die Beschattungseinrichtung weniger oft betätigt werden muss.

In einer ersten Variante der Fensteroptimierung wurden die Fensterflächen im Zimmer OG bewusst grösser als in SIA Dokumentation D010 [SIA1986] empfohlen gewählt (siehe linkes Bild von Abb. 15). Die Simulationsrechnungen ergaben jedoch, dass die Beschattungseinrichtung im Zimmer OG zu oft betätigt werden musste. In der Folge wurde die Fensterfläche im Zimmer OG halbiert (rechtes Bild von Abb. 15), was zu keiner Änderung des Heizenergiebedarfs geführt hat, das Problem der zu häufigen Beschattung jedoch löste. Die Empfehlung nach SIA D010 [SIA 1986] hat sich insofern als sinnvoll erwiesen.



Abb. 15: Modifiziertes NOAH Gebäude, erste und zweite Optimierungsvariante

Beim optimierten Gebäude ist der Selbstregeleffekt trotz den grösseren Störgrössen, die auf die Raumtemperatur wirken, noch ausreichend, um ein behagliches Raumklima zu gewährleisten. Die grösseren Fensterflächen erfordern jedoch bei Aussentemperaturen über $+8^{\circ}\text{C}$ und intensiver Sonnenstrahlung die Betätigung einer Beschattungseinrichtung, damit die Raumtemperatur unter 24°C gehalten werden kann. Mit Hilfe der Beschattungseinrichtung kann der PPD-Wert (Predicted Percentage of Dissatisfied [Fanger 1970]) auf einem Mittelwert von 6.6% gehalten werden, was als behaglich gilt.

3.2 Erdsonden-Wärmepumpe

Erste Untersuchungen des Erdreiches zeigten erwartungsgemäss einen hohen Einfluss der Wärmeleitfähigkeit der Erde auf die Sondentemperatur.

Die Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs 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 Wärmeleitfähigkeit variieren. Abb. 16 und Abb. 17 zeigen eine Übersicht über den Bereich der Wärmeleitfähigkeit von Erdreich. Auf die Betrachtung von Grundwasserströmen wird in dieser Arbeit nicht eingegangen.

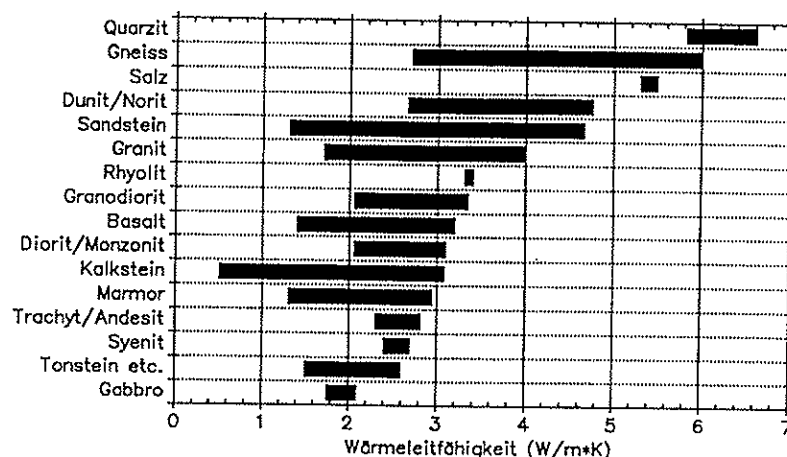


Abb. 16: Wärmeleitfähigkeit der wichtigsten Festgesteine [Sanner 1992]

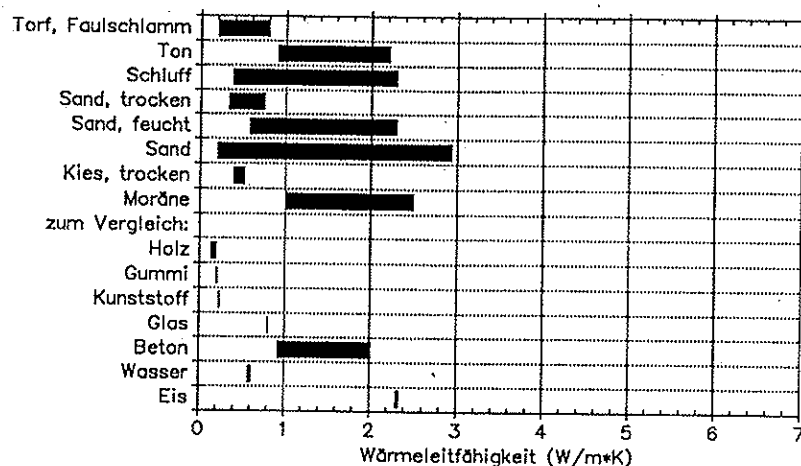


Abb. 17: Wärmeleitfähigkeit der wichtigsten Lockergesteine [Sanner 1992]

Abb. 18 zeigt die Sensitivität einer mit 50 [W/m] belasteten Erdsonde ohne Warmwasseraufbereitung. Sondenmedium ist 25-Vol.-% Monoethylenglykol (Antifrogen N). Die Sensitivität $\partial\theta/\partial\lambda$ ist in diesem Bereich 2.0 [(m·K²)/W], das heisst eine Änderung der Wärmeleitfähigkeit um 1 [W/(m·K)] ändert die

Soletemperatur um 2 [K]. Die relative Sensitivität der Jahresarbeitszahl $\frac{\partial JAZ}{JAZ} / \partial \lambda_{Erde}$ beträgt 0.055 bis 0.025 [m·K/W], was bedeutet, dass eine Änderung der Wärmeleitfähigkeit des Erdreiches um 1 [W/(m·K)] die Jahresarbeitszahl des Heizsystems um 5.5 bis 2.5 % ändert. Der Variationsbereich der Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs von etwa ± 1 [W/(m·K)] ändert in diesem Bereich die Jahresarbeitszahl des Heizsystems relativ um etwa $\pm 3.5\%$ oder bei einer Jahresarbeitszahl von etwa 4.7 absolut um etwa ± 0.15 .

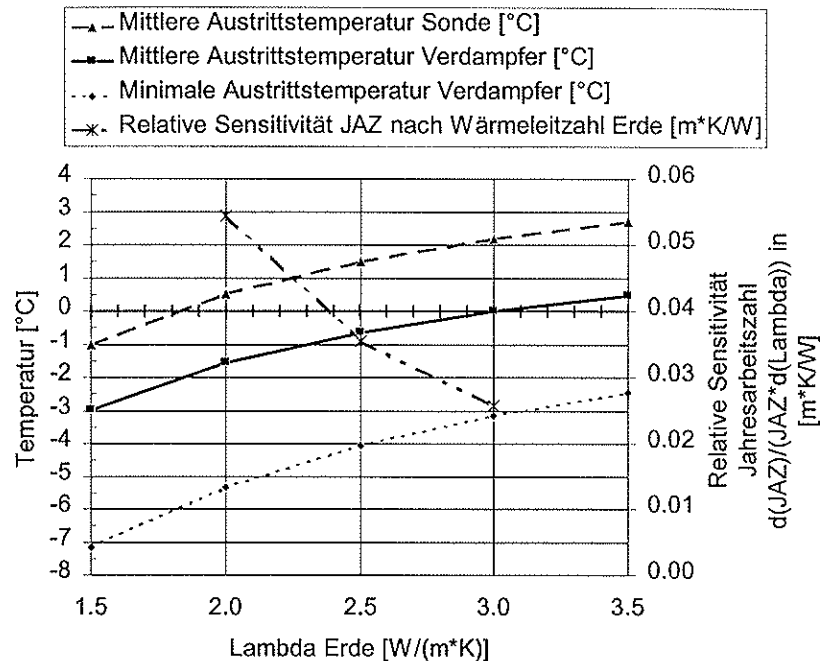


Abb. 18: Sensitivität Soletemperatur bezüglich Wärmeleitfähigkeit Erde

3.3 Ökobilanzen

Erste vorläufige, vollaggregierte Resultate für das Luft/Wasser-System zeigen, dass der Stromverbrauch wie erwartet einen dominierenden Einfluss auf die Umweltbelastung hat. Eine Optimierung in diesem Bereich ist also weiterhin prioritär.

Dagegen scheinen beispielsweise die Kältemittlemissionen (FKW) und der damit verbundenen Ozonlochproblematik beim vorliegenden Kühlmittel (R407c) eine verschwindende Rolle zu spielen. Die ganze Herstellung und der Unterhalt der Wärmepumpe macht nur etwa einen Fünftel der Gesamtbelastungen durch die Wärmepumpe aus. Optimierungen in diesem Bereich werden sich (innerhalb der gewählten Methodik) in der Ökobilanz nicht spürbar niederschlagen und sind daher nicht prioritär (was natürlich nicht heissen soll, dass die erzielten Fortschritte in diesem Bereich aufgegeben werden sollten).

Die vorläufigen Resultate für das Gesamtsystem "Wärme+Gebäude" lassen erkennen, dass die Umweltbelastung durch das Gebäude eine vergleichbare Grössenordnung erreicht, wie diejenige der Wärmebereitstellung. Die gestellte Frage "Kann der ökologische Mehraufwand eines Solarhauses die ökologischen Entlastungen durch die Einsparung von Wärmepumpenenergie möglicherweise kompensieren?" ist also valid und kann nach momentanem Kenntnisstand unter Umständen bejaht, jedenfalls noch nicht eindeutig verneint werden.

Es gilt aber zu bedenken, dass für diese Aussagen noch keine Bewertung der radioaktiven Emissionen aus der Strombereitstellung erfolgte. Die Berücksichtigung der radioaktiven Emissionen wird die ökologische Bedeutung der Gebäudehülle gegenüber der Wärmebereitstellung vermindern. Dadurch könnte eine Passiv-Solar-Strategie auch bei wärmepumpenversorgten Häusern wieder ökologisch vorteilhafter erscheinen.

3.4 Regelmodul

3.4.1 Problematik der Abtastzeit von TRNSYS

Bei der Anpassung des MATLAB-Modells sind Schwachstellen des TRNSYS-Modells aufgetaucht, die eine direkte Vergleichbarkeit der beiden Modelle erschweren. Da das TRNSYS-Modell nur im Viertelstundentakt Daten generiert, schaltet der 2-Punkte Regler auch nur zu diesen Zeitpunkten ein oder aus. In der Zwischenzeit hat die Rücklauftemperatur die Schalttemperatur bereits bis zu einem Kelvin über- resp. unterschritten. Damit sind direkte Vergleiche nur machbar, wenn die MATLAB Simulation künstlich verschlechtert wird. d.h. der Zweipunkteregler nur alle 15 Minuten ein- oder ausschalten darf.

3.4.2 Modellstruktur in MATLAB/SIMULINK

Obwohl die Modellstruktur viel einfacher gewählt worden ist als in TRNSYS, kann das Modell das dynamische Verhalten des TRNSYS-Modell sehr gut wiedergeben. Die Simulation stimmt nicht nur in einem speziellen Betriebspunkt, sondern über ein breites Band der Aussentemperatur mit der TRNSYS-Vergleichssimulation überein.

3.4.3 Probleme mit der Rücklauftemperaturregelung

Wenn ein Rücklauftemperatur geregeltes Wärmeabgabesystem mit Thermostatventilen ausgerüstet ist, treten zwangsläufig Probleme auf, die sich in der Reduktion der Arbeitszahl der Wärmepumpe niederschlägt. Als Lösung bietet sich der Einbezug von zusätzlichen Messsignalen, z.B. des Druckabfalls über der Umwälzpumpe.

3.5 Effizienz der Wassererwärmung

Zwecks Vergleichbarkeit verschiedener Wassererwärmungs-Systeme definiert die EN 255 die Kennzahlen von Wärmepumpen-Wassererwärmern so, dass sich Abluftsysteme mit Wärmepumpen-Boilern vergleichen lassen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass bei den Abluftsystemen der Energieaufwand für die Lüftung zusätzlich berechnet werden muss. Dieser hängt natürlich vom Druckverlust im Kanalsystem, von der Betriebszeit der Lüftung und von der Effizienz des Ventilators ab.

Für die reine Wassererwärmung sind die Kennzahlen gemäss Kapitel 2.5.6 vorhanden und können zur Bestimmung des Energieaufwandes verwendet werden. Einen wesentlichen Einfluss hat die Warmwassertemperatur und infolge der Bereitschaftsverluste auch die bezogene Warmwassermenge. Eine Reduktion der Abluftmenge von 250 auf 125 m³/s wirkt sich dabei nicht wesentlich aus, da bei der geringeren Luftmenge der Ventilatorenergiebedarf deutlich kleiner ist. Von Vorteil ist jedoch, dass die Lüftungswärmeverluste durch die Senkung des Abluftstromes wesentlich verkleinert werden können.

Eine klare Verbesserung der JAZ ergibt sich bei der tieferen Warmwassertemperatur von 45°C anstelle von 55°C. Die Absenkung der Temperatur ist besonders dann sinnvoll, wenn die Kapazität des Speichers nicht ausgenützt wird. Zwecks Reduktion der Legionellen-Gefahr wäre es sinnvoll, einmal pro Woche auf 65°C zu erhitzen. Eine entsprechende Steuerung wäre zu entwickeln. Das gleiche gilt für die zusätzliche Wählbarkeit von 45°C bei der LWAZ 250.

4 WEITERE UNTERSUCHUNGEN

4.1 TRNSYS-Simulation Gebäude und Wärmeherzeugung

4.1.1 Warmwasseraufbereitung

Bei der Erdsonden-Wärmepumpenanlage wird das Brauchwarmwasser optional über einen Abluftwärmepumpen-Wassererwärmer oder über die Heizungs-Wärmepumpe aufbereitet. Die Simulationen der Brauchwarmwasseraufbereitung ab Heizungs-Wärmepumpe stehen noch aus.

4.1.2 Wärmepumpe

Das Berechnungsmodul der Wärmepumpe wird erweitert, damit ein 2-stufiger Betrieb simuliert werden kann. Zur Zeit wird das Modul fertigprogrammiert.

4.1.3 Erdsonde

Bei der Erdsondenanlage müssen noch die energetischen Vorteile von Wasser als Wärmeträger des Sondenkreislaufes untersucht werden.

4.2 Ökobilanzen

Folgende Arbeiten sind noch ausstehend: Bilanzierungen des Sole/Wasser-Systems, der Warmwasserbereitstellung, der Referenzsysteme und der BHKW Stromversorgung, Extrapolation der Gebäudevarianten aus den Inventardaten für das NOAH-Leichtbauhaus und Erweitern der Vollaggregationsmethodik zur Integration von radioaktiven Emissionen.

4.3 Regelmodul

4.3.1 Implementierung des H_∞ -Reglers in TRNSYS

Der kompilierte Regleralgorithmus ist noch in einem TRNSYS-Type (Type204) einzubinden. Anschließend sind Vergleichsimulationen durchzuführen.

4.3.2 Erweiterung des TRNSYS-Modells mit Thermostatventilen

Damit der Reglerentwurf in MATLAB durchgeführt werden kann, muss zuerst das TRNSYS-Modell mit integrierten Thermostatventilen versehen werden. Dabei sind noch einige TRNSYS-spezifische Tücken zu überwinden.

4.3.3 Identifikation des TRNSYS-Modells mit variablem Volumenstrom

Sobald das entsprechende TRNSYS-Modell lauffähig ist, kann mit demselben Optimierungsprogramm, das schon für den Fall des konstanten Volumenstroms verwendet wurde, die optimalen Parameter für das MATLAB-Vergleichsmodell berechnet werden.

4.3.4 Implementierung des H_∞ -Reglers mit Drucksignal in TRNSYS

Aufgrund des linearisierten Modells kann der Regler berechnet werden. Dabei kann im Wesentlichen auf existierende Entwurfsprogramme zurückgegriffen werden, die nur leicht zu modifizieren sind. Da der Algorithmus nur unwesentlich von dem für den Fall mit konstantem Volumenstrom abweicht, kann

Type204 erweitert werden. Der Regler entscheidet dann aufgrund des eingelesenen Parameterfiles, welche Eingangsgrößen zu verarbeiten sind.

4.3.5 Einführung von zusätzlichen Ein- und Ausschaltkriterien

Wenn die Sonne plötzlich stark in das Gebäude scheint oder eine Kaltfront einen Temperatursturz verursacht, kann der pulsbreitenmodulierte Regler nur nach Ablauf der Zykluszeit reagieren. Ein der Pulsbreitenmodulation übergeordnetes Kriterium soll in genannten Fällen sofort reagieren und, das Stellsignal der Pulsbreitenmodulation umgehend, bis zur nächsten Zykluszeit die Wärmepumpe ein- oder ausschalten können.

4.3.6 Implementation eines PID Reglers mit Pulsbreitenmodulation

Simulationen haben gezeigt, dass eine Regelung der Druckdifferenz auf einen Sollwert das Raumklima in einem angenehmen Bereich hält. Ein PID-Regler soll dies in TRNSYS-Simulationen zeigen.

4.4 Kosten und Potential der Komfortwärme-Varianten

4.4.1 Gesamtkosten für Erzeugung und Verteilung

Die beiden Wärmepumpen-Systeme (Sole/Wasser und Luft/Wasser) werden aufgrund von offerierten Preisen mit den Standardlösungen Gas- und Ölheizung inkl. Wassererwärmung verglichen. Besonderes Augenmerk erfordert die Zusatz-Dienstleistung „Wohnungslüftung“, deren Kosten separat und inklusive ausgewiesen werden.

4.4.2 Potential der Wärmepumpen-Heizung im Niedrigenergiehaus

Aufgrund der Kostenvergleiche und der voraussichtlichen Entwicklung des Baustandards wird für die Schweiz eine Potentialabschätzung durchgeführt. Diese soll aufzeigen, welchen Marktanteil die Wärmepumpen im Niedrigenergiehaus erreichen können.

5 IEA-ANNEX XXV

Auch im Heat Pump Program (HPP) der internationalen Energieagentur (IEA) fand das vom Schweizer National Team vorgeschlagene Konzept einer einfachen kostengünstigen Heizung mit Wärmepumpe Interesse. Am letzten Exekutiv-Komitee-Treffen wurde das „Low Temperature Low Cost Heat Pump Heating System“ als Annex XXV des Implementing Agreements on Heat Pumping Technologies gestartet.

Hauptmotivation sind die sich in Europa abzeichnende Verschärfung der Energiekennzahlen, wie die Wärmeschutzverordnung '98 in Deutschland oder der von den Kantonen Bern und Zürich vorgeschlagene MINERGIE-Standard. Daraus entsteht die Notwendigkeit, speziell für Niedrigenergiehäuser kreierte integrale Wärmekonzepte anzubieten, welche die Energie für Heizung und Warmwasser effizient, kostengünstig und ökologisch sinnvoll bereitstellen. Dabei sind auch geeignete Konzepte für Wohnungslüftung zu berücksichtigen. Bisher haben die Niederlande und, vorbehaltlich einer Finanzierungszusage, Österreich und Deutschland ihre Teilnahme zugesagt. Das Kick-Off-Meeting findet voraussichtlich anfangs September in Zürich statt.

Während sich der Annex XXV primär auf die Gebäudeheizung und Warmwassererzeugung konzentriert, strebt auch die Electricité de France (EdF) ein verstärktes Engagement im Wärmepumpensektor an. Von der Direction des Etudes et Recherches wurde ein Annex mit dem Titel „Year round space conditioning system using heat pumps“ vorgeschlagen, in dem es um Anlagenkonzepte zum Heizen und Kühlen geht. Nach einem Start durch das Exekutiv-Komitee werden die Arbeiten in den beiden Annexen durch regelmässige Treffen der Operating Agents sichergestellt und somit Doppelspurigkeiten vermieden.

6 LITERATURVERZEICHNIS

- [DIANE 96] Holzbau oder Massivbau; DIANE Öko-Bau c/o Basler & Hofmann; Zürich 1996
- [ESU 1995] T. Weibel, A. Stritz, "Ökoinventare und Wirkungsbilanzen von Baumaterialien", Gruppe Energie-Stoffe-Umwelt (ESU), ETH Zürich, September 1995
- [ESU 1996] 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
- [Fanger 1970] P.O. Fanger; Thermal Comfort, Analysis and Applications in Environmental Engineering; Technical University of Denmark, Copenhagen; 1970; Lyngby
- [Goedkoop 1995] M. Goedkoop, "The Eco-indicator 95 - Final Report", University of Leiden (CML), PRé Consultants, Amersfoort, Netherlands agency for energy and the environment (NOVEM), Utrecht, et al., 1995
- [Hofstetter 1997] Persönliche Mitteilung von Patrick Hofstetter vom 15.07.97
- [Huber, Schuler 1997] Huber Arthur, Schuler Othmar; Berechnungsmodul für Erdwärmesonden; Forschungsprogramm Umgebungs- und Abwärme, Wärme-Kraft-Kopplung (UAW); Bundesamt für Energiewirtschaft; Bern (erscheint 1997).
- [SIA 1986] SIA D010; Handbuch der passiven Sonnenenergienutzung; Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein; Zürich 1986.
- [TRNSYS 96] TRNSYS 14.2; University of Wisconsin, Madison WI, USA; Solar Energy Laboratory; 1996
- [Werner 1996] 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