

Vermessung des Passiv-Solarhauses Cölbe und Untersuchungen zur Parametersensitivität

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Naturwissenschaften
(Dr. rer. nat.)

dem
Fachbereich Physik
der
Philipps-Universität Marburg
vorgelegt von

Astrid Wille
(geb. Spieler)

aus Hattorf

Marburg 2003

Vom Fachbereich Physik der Philipps-Universität Marburg als Dissertation
angenommen am 22.04.2003.

Erstgutachter:	Prof. Dr. H. Ackermann
Zweitgutachter:	Prof. Dr. O. Melsheimer
Tag der mündlichen Prüfung:	06.05.2003

“Wir haben gefunden, dass unter der Erde Kohlenvorräte aus alten Zeiten liegen, welche sich im Laufe so langer Zeiträume, dass alle historischen Zeiten dagegen verschwindend klein sind, [...] abgelagert haben. Diese verbrauchen wir nun, und verhalten uns dabei wie lachende Erben, welche eine reiche Hinterlassenschaft verzehren. Es wird aus der Erde heraufgeschafft [...] und verbraucht, als ob es unerschöpflich wäre. [...]. Der Vorrath von potentieller Energie, welche in den Kohlelagern vorhanden ist, verdankt seine Entstehung derjenigen Energie, welche die Sonne der Erde in der Form strahlender Wärme [...] in langen, dem Bestehen des Menschengeschlechts vorausgegangenen Zeiten zugesandt hat. Wenn dieser Vorrath verbraucht sein wird, [...] werden die Menschen darauf angewiesen sein, sich mit der Energie zu behelfen, welche die Sonne ihnen im Verlauf der ferneren Zeit noch fortwährend durch ihre Strahlen liefert.”

(Rudolf Clausius 1885, zitiert nach [Stark00].)

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	5
Abkürzungen	11
Einleitung	13
1 Das Passiv-Solarhaus Cölbe	17
1.1 Das Projekt: Passiv-Verwaltungsgebäude in Cölbe.	17
1.1.1 Architektur	18
1.1.2 Baukonstruktion	20
1.1.3 Haustechnik	22
1.1.4 Betriebsführung	24
1.2 Zusammenfassung.	28
2 Messtechnische Untersuchungen und statistische Analysen	29
2.1 Motivation und Vorgehen	29
2.1.1 Erfassung der klimatischen Randbedingungen	29
2.1.2 Vermessung des aktiv solaren Heizsystems	29
2.1.3 Vermessung des Lüftungssystems	31
2.1.4 Vermessung des Innenraumklimas	31
2.1.5 Übermittlung und Sicherung der Messdaten	33
2.1.6 Zusammenfassung	33
2.2 Messergebnisse	33
2.2.1 Allgemeine Betriebserfahrungen	33
2.2.2 Analyse der klimatischen Randbedingungen	34
2.2.3 Relevante Energieströme	38
2.2.4 Bewertung des aktiv-solaren Heizsystems	43
2.2.5 Bewertung des Lüftungssystems	45
2.2.6 Analyse der Raumtemperaturen für den Sommerfall	56
2.2.7 Statistische Vorhersagbarkeit der Heizlast	59
2.2.8 Zusammenfassung	63
2.3 Zusammenfassung.	63
3 Sensitivitätsanalysen für Gebäude mit solaren Heizsystemen	65
3.1 Motivation und Vorgehen	65
3.2 Das untersuchte System	66
3.2.1 Das Gebäude	66
3.2.2 Die Haustechnik	68
3.2.3 Festlegung der Randbedingungen	70
3.2.4 Definition der freien Parameter und der Zielgrößen	72
3.2.5 Zusammenfassung	76
3.3 Algorithmen für Sensitivitätsanalysen	76
3.3.1 Differentielle Sensitivitätsanalyse	77
3.3.2 Vollständige und reduzierte Faktoranalyse	80
3.3.3 Stochastische Verfahren	88
3.3.4 Monte Carlo Verfahren	88
3.3.5 Zusammenfassung	90
3.4 Primärenergetische Bewertung der untersuchten Varianten.	92
3.4.1 Extraktion der relevanten Parameter	92
3.4.2 Zusammenfassung	98

3.5 Zusammenfassung.....	99
4 Zusammenfassung	101
<hr/>	
Anhang	105
<hr/>	
Literaturverzeichnis	117
<hr/>	

Nomenklatur

Lateinische Symbole

Symbol	Einheit	Bedeutung
$a_1 \dots a_4$	1	Koeffizienten der multivariaten Regression zur Vorhersage der Heizlast des Passiv-Solarhauses; Gl. 2.3, S. 60
A	m ²	Grundfläche des Passiv-Solarhauses; Kapitel 1.1.1 auf S. 18
A_{EB}	m ²	Energiebezugsfläche; Gl. 2.2, S. 59
$A_{Fenster}$	m ²	Fensterfläche; Tab. 2.5, S. 51
$A_{F, Ost}$	m ²	Fensterfläche Ostwand; Tab. 2.5, S. 51
$A_{F, Sued}$	m ²	Fensterfläche Südwand; Tab. 2.5, S. 51
$A_{F, West}$	m ²	Fensterfläche Westwand; Tab. 2.5, S. 51
A_{Koll}	m ²	Kollektorfläche; Abb. 3.7, S. 75
A_{Wand}	m ²	Wandfläche; Tab. 2.5, S. 51
d_{AW}	m	Dämmstärke der Außenwände; Abb. 3.7, S. 75
di	[i]	Differentielle Änderung der Eingangsgröße des Simulationsmodells bei der DSA; Kapitel 3.3.1 auf S. 77
d_{SD}	m	Stärke der Speicherdämmung
dp_i	[p_i]	Differentielle Änderung der Ausgangsgröße des Simulationsmodells bei der DSA infolge der Änderung der i -ten Eingangsgröße bezogen auf den Referenzwert p_{Ref} ; Kapitel 3.3.1 auf S. 77
e_p	1	Anlagenaufwandszahl nach [DIN4701], definiert als Quotient aus Nutzenergie und dem primärenergetischen Energieaufwand; Gl. 3.1, S. 73
$f_{p, el}$	1	Primärenergetische Aufwandszahl zur Bereitstellung einer kWh elektrischer Energie; Kapitel 3.2.4 auf S. 72
$f_{p, Gas}$	1	Primärenergetische Aufwandszahl zur Bereitstellung einer kWh Gas; Kapitel 3.2.4 auf S. 72
f_{sol}	1	Solare Deckungsrate; Gl. 2.1, S. 45
g	1	Gesamtenergiedurchlass; Kapitel 1.1.2 auf S. 20
H	W/K	Spezifische Wärmeverlustleistung des Gebäudes; Gl. 2.2, S. 59
I_{Glob}	kWh/m ² d	Tagessumme der gemessenen Globalstrahlung in Kollektorebene des Passiv-Solarhauses in Cölbe; Gl. 2.3, S. 60

i	[i] oder 1	Eingangsgröße des Simulationsmodells bei der DSA (Kapitel 3.3.1 auf S. 77) oder Parameter bei der vollständigen bzw. reduzierten Faktoranalyse (Kapitel 3.3.2 auf S. 80)
I	1	Generator bei der reduzierten Faktoranalyse; Kapitel 3.3.2 auf S. 80
i_{min}, i_{max}	[i]	minimaler bzw. maximaler Wert des Parameters i bei der Monte Carlo Analyse; Kapitel 3.3.4 auf S. 88
$i \times j$	1	Korrelation zwischen den Parametern i und j bei der vollständigen bzw. reduzierten Faktoranalyse; Kapitel 3.3.2 auf S. 80
Inf	h^{-1}	Infiltration (Fugenlüftung); Abb. 3.7, S. 75
j	1	Parameter bei der vollständigen bzw. reduzierten Faktoranalyse; Kapitel 3.3.2 auf S. 80
k	W/m ² K oder 1	Wärmedurchgangskoeffizient Werte für das Passiv-Solarhaus in Abbildung 1.4, S. 21 oder Ordnung des Designs bei der reduzierten Faktoranalyse; Kapitel 3.3.2 auf S. 80
kA_{Solar}	kJ/Kh	Wärmeübertragungskoeffizient des Solarwärmeübertragers; Abb. 3.7, S. 75
kA_{TWW}	kJ/Kh	Wärmeübertragungskoeffizient des Trinkwarmwasserwärmeübertragers; Abb. 3.7, S. 75
$KEA_{B,Ref}, KEA_{Betrieb,Ref}$ $KEA_{B,Sol}, KEA_{Betrieb,Sol}$	kWh	kumulierter Energieaufwand für den Betrieb des fossilen bzw. des solaren Systems; Abb. 3.6, S. 74
$KEA_{H+T,Solarsystem},$ $KEA_{H+T,Sol}$	kWh	kumulierter Energieaufwand für Herstellung und Transport der Komponenten des Solarsystems; Abb. 3.6, S. 74
$KEA_{H+T,Verteilsystem}$	kWh	kumulierter Energieaufwand für Herstellung und Transport der Komponenten des Verteilsystem für das solar unterstützte und fossile Heizsystem; Abb. 3.6, S. 74
$KEA_{Mineralwolle}$	kWh/kg	kumulierter Energieaufwand zur Herstellung von Mineralwolle
l_i	1	Schätzer bei der reduzierten Faktoranalyse für den Effekt des Parameters i , also Summe aus dem gesuchten Effekt des Parameters i sowie etwaigen Korrelationen zwischen anderen Parametern; Kapitel 3.3.2 auf S. 80
l'_i	1	Schätzer bei der reduzierten Faktoranalyse zum inversen Generator; Kapitel 3.3.2 auf S. 80
n, n_{LW}	h^{-1}	Anlagenluftwechsel
N	1	Anzahl der Parameter
p_i	[p_i]	Änderung der Ausgangsgröße des Simulationsmodells bei der DSA in Folge der Änderung der i -ten Eingangsgröße; Kapitel 3.3.1 auf S. 77

p_{Ref}	$[p_{Ref}]$	Referenzwert einer Ausgangsgröße bei der DSA; Kapitel 3.3.1 auf S. 77
\dot{q}	W/m ²	Spezifische Heizleistung; Gl. 2.2, S. 59
Q_{el}	kWh	Hilfsstrombedarf (Strombedarf von Pumpen, Reglern u.a.) für die Berechnung von e_p nach [DIN4701]
\dot{q}_i	W/m ²	Interne Gewinne bezogen auf die Energiebezugsfläche des Gebäudes; Gl. 2.2, S. 59
Q_{IG}	W/m ²	Interne Gewinne; Abb. 3.7, S. 75
Q_{nutz}	kWh	Nutzenergie; Gl. 3.1, S. 73
Q_{PC}	kWh/m ² a	Interne Gewinne durch die im Passiv-Solarhaus befindlichen PC, Bezugsfläche ist die Energiebezugsfläche des Gebäudes; Tab. 2.5, S. 51
Q_{prim}	kWh	Primärenergieaufwand; Gl. 3.1, S. 73
Q_{rh}	kWh oder kWh/m ² a	Energie, die zur Raumheizung aufgewendet werden muss, Bezugsfläche ist die Energiebezugsfläche des Gebäudes
Q_{sol}	kWh oder kWh/m ² a	Energie, die von der thermischen Solaranlage bereitgestellt wird, Bezugsfläche ist die Kollektorfläche
Q_{Strom}	kWh/d	Gemessener Stromverbrauch des Passiv-Solarhauses am Tag; Gl. 2.3, S. 60
Q_{TWW}	kWh oder kWh/m ² a	Energie, die zur Erwärmung des Trinkwassers erforderlich ist, Bezugsfläche ist die Energiebezugsfläche des Gebäudes
rF	%	Tagesmittel der gemessenen relativen Feuchte; Gl. 2.3, S. 60
s, s_i	1	Standardabweichung bzw. Standardabweichung des i -ten Parameters
s_N^2	1	Stichprobenvarianz definiert nach [Rohlfss97] bei dem Monte Carlo Verfahren als Maß für die Gesamtsensitivität der Zielgröße; Gl. 3.15, S. 89
t_R	a	Energetische Rücklaufzeit eines solaren Heizsystems bezüglich eines fossilen nach [Achatz00] und [Jenseit99]; Kapitel 3.4 auf S. 92
T	°C	Temperatur
T_{amb}	°C	Umgebungstemperatur
T_{Boden}	°C	Erdbodentemperatur; Abb. 3.7, S. 75
T_{EWU}	°C	Austrittstemperatur des Erdreichwärmeübertragers
T_i	°C	mittlere Innentemperatur; Gl. 2.2, S. 59
T_{max}	°C	maximale Raumtemperatur; Abb. 3.7, S. 75
T_{Ra}	°C	Raumsollwert; Abb. 3.7, S. 75

U	W/m ² K	Wärmedurchgangskoeffizient Werte für das Passiv-Solarhaus in Kapitel 1.1.2 auf S. 20
U_{Glas}	W/m ² K	Wärmedurchgangskoeffizient der Fensterscheiben im Passiv-Solarhaus; Kapitel 1.1.2 auf S. 20
V	m ³	Volumen des Passiv-Solarhauses; Kapitel 1.1.1 auf S. 18
V_{Gesamt}	m ³	siehe auch V ; Tab. 2.5, S. 51
V_P	m ³	Volumen des Pufferspeichers; Abb. 3.7, S. 75
V_{Zone}	m ³	Volumen einer thermischen Zone im Passiv-Solarhaus; Tab. 2.5, S. 51
w	[w]	Erwartungswert der Zielgröße nach N Simulationen bei dem Monte Carlo Verfahren definiert nach [Rohlfss97]; Gl. 3.16, S. 89
w_i	[w]	Wert der Zielgrößen nach der i -ten Simulation bei dem Monte Carlo Verfahren; Kapitel 3.3.4 auf S. 88
x	1	Zufallszahl aus dem Intervall $[i_{min}, i_{max}]$ beim Monte Carlo Verfahren. Nach der Verwerfungsmethode wird entschieden, ob der Parameter i in der nächsten Simulation mit diesem Wert belegt wird; Kapitel 3.3.4 auf S. 88
y	1	Zufallszahl aus dem Intervall $[0, 1]$ beim Monte Carlo Verfahren, die für die Verwerfungsmethode zur Neubelegung eines Parameters benötigt wird; Kapitel 3.3.4 auf S. 88

Griechische Symbole

Symbol	Einheit	Bedeutung
β_{Koll}	°	Kollektorneigungswinkel; Abb. 3.7, S. 75
γ_i	1	i -ter Simulationsdurchgang bei der reduzierten bzw. vollständigen Faktoranalyse; Kapitel 3.3.2 auf S. 80
Δi	[i]	Änderung der Eingangsgröße des Simulationsmodells bei der DSA; Kapitel 3.3.1 auf S. 77
Δp_i	[p_i]	Änderung der Ausgangsgröße des Simulationsmodells bei der DSA infolge der Änderung der i -ten Eingangsgröße bezogen auf den Referenzwert p_{Ref} ; Gl. 3.4, S. 77
Δp_{tot}	[p]	Änderung der Ausgangsgröße des Simulationsmodells bei der DSA infolge der Änderung aller Eingangsgrößen bezogen auf den Referenzwert p_{Ref} ; Gl. 3.6, S. 78
$\Delta Q_{Speicher}$	kWh	Differenz an innerer Energie im Saisonspeicher des Passiv-Solarhauses
ε	1	relative Energieeinsparung des solaren bezüglich des fossilen Heizsystems; Gl. 3.3, S. 75
ε_{WRG}	1	Rückwärmzahl Wärmerückgewinnung; Abb. 3.7, S. 75
χ^2	1	Chi-Quadrat-Verteilung (zur Definition siehe [DIN55350-22]), mittels dieser lassen sich in Abhängigkeit von der Anzahl der Simulationen beim Monte Carlo Verfahren Konfidenzintervalle für s_N^2 und w angeben; Kapitel 3.3.4 auf S. 88

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
Anm	Anmeldung; thermische Zone Anmeldung im Passiv-Solarhaus
BEG	Büro EG; gleichnamige thermische Zone im Passiv-Solarhaus
BHKW	Blockheizkraftwerk
BOG	Großraumbüro OG; gleichnamige thermische Zone im Passiv-Solarhaus
DDC	wörtlich: Direct dynamic control; Gebäudeleittechnik
DG	Dachgeschoss
DSA	Differentielle Sensitivitätsanalyse; Kapitel 3.3.1 auf S. 77
EG	Erdgeschoss
EWÜ	Erdreichwärmeübertrager
FaktA	Vollständige oder reduzierte Faktoranalyse; Kapitel 3.3.2 auf S. 80
HKA	Heizkraftanlage, üblich zur Bezeichnung eines Klein-BHKWs
Kant	Kantine; gleichnamige thermische Zone im Passiv-Solarhaus
KEA	Kumuliertes Energieaufkommen
Komm	Kommunikation; gleichnamige thermische Zone im Passiv-Solarhaus
M	Mischer
NHR	Nachheizregister; dezentrale Luft-Wasser-Wärmeübertrager im Passiv-Solarhaus
OG	Obergeschoss
PC	Personalcomputer; z.B. in Kapitel 2.2 auf S. 33
PE	Polyethylen
PID	Proportional-Integral-Differential; Reglertyp im Passiv-Solarhaus
Pt	Platin; Als Pt-100-Sensor im Passiv-Solarhaus eingesetzter Temperatursensor
RBEG	Rundbau EG; siehe auch Anm
RBOG	Rundbau OG; gleichnamige thermische Zone im Passiv-Solarhaus
SR	Seminarräume; gleichnamige thermische Zonen im Passiv-Solarhaus
VHR	Vorheizregister; zentraler Luft-Wasser-Wärmeübertrager im Passiv-Solarhaus
Werk	Werkstatt; gleichnamige thermische Zone im Passiv-Solarhaus
WRG	Wärmerückgewinnung

Einleitung

Dem Bausektor kommt unter ökologischen Gesichtspunkten eine besondere Bedeutung zu: So können dem Bereich “Bauen und Wohnen” nach [Wallbaum00] Emissionen von ca. 400 Mio. t Kohlendioxid (CO_2) entsprechend 45 % der CO_2 -Emissionen Deutschlands 1999 zugeordnet werden. Eine Aufteilung dieser Emissionen nach den Verursachern zeigt, dass etwa zwei Drittel auf die Haushalte entfallen, wobei ein Fünftel der Gesamtemissionen allein bei der Beheizung der Wohngebäude entsteht.

Diese Zahlen verdeutlichen das große Einsparpotenzial in diesem Sektor, das sich jedoch nicht auf die Reduzierung des Energieverbrauchs während der Lebenszeit der Gebäude beschränkt. Vielmehr ist ebenfalls der “ökologische Rucksack” der Gebäude zu betrachten, der bei der Erstellung entsteht - einerseits aufgrund der Menge des eingesetzten Materials, andererseits aber auch maßgeblich durch die Art der Produktion [Wallbaum00].

Zumindest zur Reduzierung des Energieverbrauchs für Raumheizung und Warmwasserbereitung sind seit Beginn der 80er Jahre mit dem Bau von Niedrigenergiehäusern positive Tendenzen erkennbar, die Errichtung der ersten Passivhäuser etwa 10 Jahre später setzt diesen Trend konsequent fort. So wurde 1990/91 in Darmstadt der erste Prototyp eines Passivhauses mit 4 Wohneinheiten errichtet. 1997 wurde die erste Passivhaussiedlung mit 22 Wohneinheiten in Wiesbaden realisiert, Ende 1999 waren bereits mehr als 300 Wohnungen im Passivhausstandard in Deutschland bezogen [Feist00], etwa 300 weitere befinden sich im Bau [Kiefer02], zu Beginn des Jahres 2001 sind mehr als 1000 Wohneinheiten im Passivhausstandard bezogen [Feist01]. Allein durch das EU-Projekt CEPHEUS¹ sind in fünf europäischen Ländern bis 2000 in 15 Teilprojekten 256 Wohneinheiten im Passivhausstandard mit wissenschaftlicher Begleitung entstanden [Görg00].

Im gleichen Zug sind die baulichen Mehrkosten deutlich gesunken: Lagen sie 1991 noch bei ca. 48000 Euro pro Wohneinheit, so betragen sie 2000 noch etwa 7500 Euro pro Wohneinheit nach [Feist00] oder 100 – 150 Euro pro m^2 nach [Kiefer02]. Dem steht jedoch bei konsequentem Einsatz energieeffizienter Geräte eine Energieeinsparung von fast 90 % verglichen mit durchschnittlichen Energieverbräuchen aus dem Wohnungsbau gegenüber (für Raumheizung und Trinkwassererwärmung). Umfangreiche Messkampagnen (z.B. [Pfluger01] und [Oesen01]) belegen diese Werte und Nutzerbefragungen zeigen, dass das Konzept Passivhaus akzeptiert wird. Somit kann zu Recht festgestellt werden, dass das Konzept Passivhaus erfolgreich im Wohnungsbau Einzug gehalten hat - mit weiterhin positiver Tendenz.

1. Cost efficient passive houses as european standard.

Im Bereich der kommerziellen Gebäude geht diese Entwicklung deutlich langsamer voran, auch wenn das Potenzial bei Bürogebäuden ebenfalls hoch ist: So machen nach [EnergieagenturNRW] die Betriebskosten pro Jahr 47 % der Objektnutzungskosten aus, von den Betriebskosten entfallen wiederum 54 % auf den Energiebedarf und damit nicht zuletzt auf Heizung, Kühlung und Beleuchtung der Gebäude. Wenn auch nicht so zahlreich wie im Wohnungsbau, so gibt es doch auch für den Sektor der Bürogebäude seit einigen Jahren wegweisende Beispiele: 1998 wurde das europaweit erste Bürogebäude im Passivhaus-Standard von der Firma Wagner & Co Solartechnik in Cölbe bei Marburg errichtet, es folgten weitere Gebäude (vgl. z.B. [Seeberger01], [Uhde98] und [Oehler01]). Aufgrund der Vorreiterrolle, die diese Projekte im Bereich der kommerziellen Bauten einnehmen, ist eine detaillierte messtechnische Untersuchung wichtig, um daraus Schlüsse für künftige Gebäude zu ziehen. Ferner ist aber auch ein theoretisches Verständnis des Zusammenspiels von Gebäude, Heizungs- und Lüftungssystem erforderlich. Insbesondere ist eine Klassifizierung der Parameter hinsichtlich ihrer Relevanz für bestimmte Zielgrößen erforderlich, um einerseits den Planungsprozess künftiger Projekte zu vereinfachen und andererseits durch Konzentration auf die relevanten Parameter verlässliche und zeitsparende Simulationen, z.B. zur energetischen Optimierung, durchführen zu können.

Für das Passiv-Verwaltungsgebäude der Firma Wagner & Co erfolgte die messtechnische Untersuchung im Rahmen eines mehrjährigen Forschungsvorhabens². Dabei kam der Einbindung der thermischen Solarenergienutzung ein besonderes Augenmerk zu.

Die Analyse und Bewertung der Vermessung des Gebäudes sowie der Subsysteme aktiv-solares Heizsystem und Lüftungssystem stellt somit einen Kernbereich der Arbeit dar. Im Mittelpunkt steht dabei die Frage, ob das Passivhaus-Konzept auch bei kommerziell genutzten Gebäuden funktioniert. Im einzelnen sollen dabei folgende Punkte überprüft werden:

- Sind die Energieverbräuche so gering wie prognostiziert?
Dies betrifft insbesondere die Einhaltung des Zielwerts für den Heizwärmebedarf von 15 kWh/m²a und der maximalen Heizlast von 10 W/m² sowie dem gesamten Primärenergiebedarf von 120 kWh/m²a (vgl. z.B. [Afjei00]).
- Sind die Subbereiche (Lüftungssystem und aktiv-solare Heizsystem) sinnvoll konzipiert und dimensioniert?
Für das Lüftungssystem ist dabei das Zusammenspiel des Erdreichwärmeübertragers mit der Wärmerückgewinnung zu untersuchen, beim aktiv-solaren Heizsystem ist das Konzept der saisonalen Energiespeicherung mittels eines Pufferspeichers sowie der Betrieb des Blockheizkraftwerks (BHKW) zur fossilen Nachheizung zu betrachten.

2. Im Rahmen des Programms "Solaroptimiertes Bauen" erfolgte durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) eine Förderung des Projekts: "Passiv-Verwaltungsgebäude Cölbe: Messtechnische Begleitung, systemtechnische Untersuchungen" mit der Förderkennzahl 0335006L.

- Kann im Gebäude eine thermische Behaglichkeit gewährleistet werden?
Getrennt nach Sommer- und Winterperiode sind dazu die Gebäudetemperaturen auszuwerten und zu analysieren, insbesondere ist dabei zu zeigen, dass eine sommerliche Überhitzung nicht auftritt.

Auf der Basis der für die Beantwortung der Fragen notwendigen detaillierten Systembetrachtungen sollen weitergehende Untersuchungen angestellt werden. So ist es entscheidend, die energetisch relevanten Parameter für die Betriebszeit zu extrahieren. Ihre Kenntnis ist insbesondere wichtig, wenn durch theoretische Simulationen das Verhalten des Gesamtsystems (Gebäude, Heizungs- und Lüftungssystem) untersucht werden soll. Aufgrund der Vielzahl der Parameter ist es unerlässlich, die relevanten Parameter bestimmen zu können, um bei deren Belegung besondere Sorgfalt walten zu lassen. Umgekehrt können irrelevante Parameter z.B. durch Modellvereinfachungen eliminiert werden, was einen deutlichen Zeitgewinn nicht nur bei den Simulationen selbst liefern kann, sondern auch die Erstellung statischer Planungsinstrumente für das Gesamtsystem als einfache und schnelle Alternative zur dynamischen Simulation überhaupt erst ermöglicht.

Aufgrund des nach [John02] großen Potenzials der Nutzung der thermischen Solarenergie im Mehrfamilienhausbereich und der Schwierigkeit der Verallgemeinerung der Nutzung des untersuchten Bürogebäudes, sollen Parameterstudien an Wohngebäuden durchgeführt werden. Die Hydraulik und das Lüftungssystem sind dabei an die des Passiv-Solarhauses in Cölbe angelehnt. Dass im Bereich von Parametersensitivitäten noch erheblicher Forschungsbedarf besteht, zeigt sich z.B. in der Einsetzung einer internationalen Arbeitsgruppe [Task28], die im Rahmen ihrer Untersuchungen zum Thema “Sustainable Building” (Nachhaltiges Bauen) u.a. ebenfalls Fragen zur Parameterrelevanz behandelt. Bezüglich des Aspekts der Parameterbedeutung stehen in dieser Arbeit folgende Aspekte im Mittelpunkt:

- Welche Algorithmen kommen zur Untersuchung der Sensitivität von Parametern bezüglich einer bestimmten Zielgröße in Frage?
- Welche Parameter sind für eine energetische Bewertung des Gesamtsystems aus Heizung, Lüftung und Gebäude als solches relevant?
- Was kann über die energetische Amortisation von Gebäuden mit thermischer Solarenergienutzung im Vergleich zu Gebäuden mit rein fossilen Heizsystemen aufgrund dieser Untersuchungen ausgesagt werden?

Gemäß den hier formulierten Fragen gliedert sich die Arbeit in zwei große Bereiche: Im ersten Teil befindet sich eine detaillierte Analyse der Messdaten des Passiv-Bürogebäudes der Firma Wagner & Co, im zweiten Teil erfolgen die Sensitivitätsuntersuchungen.

Der erste Teil der Arbeit beginnt in Kapitel 1 mit einer Vorstellung des Gebäudes hinsichtlich der Architektur und der Baukonstruktion. Hier wird ebenfalls die Haustechnik sowie die Betriebsführung erläutert.

Kapitel 2 gibt zunächst einen Überblick über die installierten Sensoren zur Erfassung der über 240 Messpunkte. Daran schließt sich eine Auswertung der Messdaten an, wobei zunächst eine Bilanz des Energieverbrauchs über drei Messjahre gezogen wird, bevor getrennt nach den Bereichen aktiv-solares Heizsystem, Lüftungssystem und Innenraumklima eine detaillierte Messdatenanalyse erfolgt. Den Schluß des Kapitels bildet eine statistische Betrachtung des Heizenergieverbrauchs mittels einer multivariaten Regression.

Kapitel 3 beginnt mit einer Vorstellung des durch Simulationen untersuchten Gebäudes inklusive des aktiv-solaren Heizsystems sowie der Ankopplung des Lüftungssystems. Im Anschluß daran erfolgt eine Beschreibung der gängigsten Algorithmen für Sensitivitätsuntersuchungen, deren Eigenschaften an einem Beispielszenario für das zuvor beschriebene System herausgearbeitet werden. Auf dieser Grundlage werden dann Untersuchungen zur Parameterrelevanz für den Primärenergiebedarf des Gebäudes durchgeführt. Ferner wird ein energetischer Vergleich zu einem rein fossil beheizten baugleichen Gebäude gezogen, wobei der Vergleich anhand des Primärenergiebedarfs während der Nutzung unter Einbeziehung des energetischen Mehraufwands für das Solarsystem erfolgt.

In Kapitel 4 werden die in der Einleitung formulierten Fragen beantwortet, ferner findet sich dort eine Zusammenfassung der wichtigsten Inhalte der Arbeit.

1 Das Passiv-Solarhaus Cölbe

In diesem Kapitel wird das Projekt “Passiv-Verwaltungsgebäude Cölbe: Messtechnische Begleitung und systemtechnische Untersuchungen” [Antrag97] vorgestellt. Das Projekt wurde im Rahmen des Förderkonzepts “Solar optimiertes Bauen - Teilkonzept 3” (TK3)¹ gefördert [TK395]. Erklärtes Ziel dieses vom Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie 1995 aufgelegten Programms ist es, anhand von gebauten Objekten eine energetische Optimierung der Gebäude (inkl. Haustechnik) und damit eine Minimierung des Primärenergiebedarfs zu erreichen. Folglich kommt den realisierten Projekten eine Vorreiterrolle für künftig zu errichtende Gebäude zu. Dem entsprechend handelt es sich bei dem untersuchten Gebäude um ein Pilotprojekt: Europaweit erstmalig wurde ein Bürogebäude im Passivhausstandard errichtet [Feist00], mittlerweile hat das Konzept Passivhaus auch in diesem Bereich weiter Einzug gehalten, vgl. z.B.[Uhde98] und [Seeberger01]. Obgleich viele Komponenten also erst relativ neu und mit kleiner Stückzahl auf dem Markt erhältlich waren (z.B. die Fenster), liegen die Baukosten bezogen auf die Nettogrundfläche mit etwa 1200 Euro/m² [Schweitzer99] im unteren Bereich des sich nach DIN 276 ergebenden Kostenrahmens [SBJournal01].

Im Folgenden soll nun das untersuchte Gebäude detailliert beschrieben werden, dabei wird zunächst die Architektur und Bauausführung des Gebäudes betrachtet, danach liegt das Augenmerk auf der implementierten Haustechnik. Insbesondere steht dabei die hydraulische Realisierung des solarunterstützten Heizsystems im Mittelpunkt und die Ankopplung des Luftverteilsystems zur Belüftung und gegebenenfalls Erwärmung des Gebäudes.

1.1 Das Projekt: Passiv-Verwaltungsgebäude in Cölbe

Bei dem untersuchten Objekt handelt es sich um das Verwaltungsgebäude der Firma Wagner & Co. Als Erweiterung des bestehenden Firmengebäudes beinhaltet es verschiedene Funktionsbereiche [Rustige97]. In erster Linie bietet es Büroarbeitsplätze, darüber hinaus befinden sich aber auch Räumlichkeiten für einen Seminarbetrieb, eine Kantine mit angeschlossener Küche sowie eine Werkstatt und ein Ausstellungsbereich im Gebäude. Das Zusammenspiel dieser verschiedenen Nutzungsbereiche insbesondere auch in Hinblick auf die implementierten Betriebsführungsstrategien wird ebenfalls in diesem Kapitel erläutert.

1. Weitere Informationen über dieses Förderprogramm sind im Internet unter [SBMonitor02] abrufbar, eine Beschreibung des Passiv-Solarhauses sowie eine Auswahl der Projektveröffentlichungen findet sich bei [Voss98].

1.1.1 Architektur

Das Gebäude wurde als kompakter Baukörper ($A/V = 0.36 \text{ m}^{-1}$) mit drei Geschossen als Stahlbetonskelett-Konstruktion realisiert, vgl. Abbildung 1.1.



Abbildung 1.1: Das Passiv-Bürogebäude der Firma Wagner & Co Solartechnik. Das Bild zeigt die Ansicht von Westen, der in das Gebäude integrierte Saisonspeicher prägt maßgeblich das Gebäudedesign.

Architektonisch prägt der Saisonspeicher (87 m^3) das Gebäudedesign, um den Speicher ist das Gebäude als Rundbau erweitert. In diesem nach Westen orientierten Gebäudeteil fallen die schmalen, hohen Fenster auf. Sie tragen zum Einen zu einer Verminderung der sommerlichen Überhitzung bei, zum Anderen ermöglichen die Oberlichter eine bessere Raumausleuchtung in den dort befindlichen Bürozononen bei minimaler Blendung.

Bei einer Grundfläche von knapp 730 m^2 ergibt sich insgesamt eine Energiebezugsfläche von 1948 m^2 , wobei das Gebäude nicht unterkellert ist. Als Dachgestaltung wurde ein Pultdach gewählt, auf dessen Südseite sich ein Kollektorfeld (64 m^2) befindet.

Das Gebäude ist im Süden durch ein Nachbargebäude und durch Büsche verschattet, lediglich die Ost- und Westfassade sind freistehend. Insgesamt beträgt der Fensteranteil an der Fassade 45 %, die Verteilung auf die Orientierungen ist Tabelle 1.1 zu entnehmen.

Tabelle 1.1: Fensterflächenanteil je Orientierung. Dabei wird der gesamte Rundbau der Orientierung West zugerechnet.

Orientierung	Nord	Süd	Ost	West
Fensteranteil in %	42	60	42	34

Die Grundrisse der drei Stockwerke zeigt Abbildung 1.2.

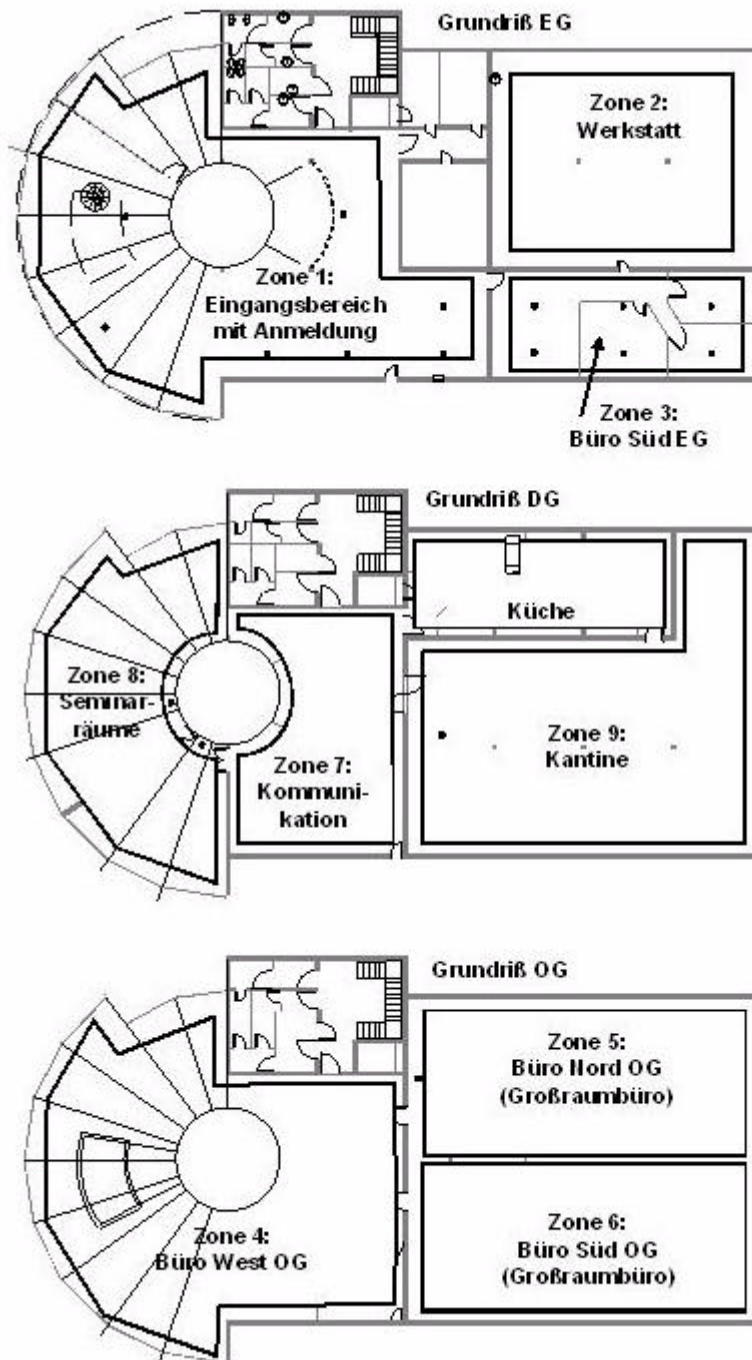


Abbildung 1.2: Grundrisse der drei Etagen des Passiv-Bürogebäudes. Eingezeichnet sind die jeweiligen Zonen und ihre Nutzung.

Im Erdgeschoss befindet sich ein großzügig gestalteter Empfangs- und Ausstellungsbereich, ferner befindet sich im westlichen Teil der Postversand. Im östlichen Bereich ist eine kleine Bürozone mit drei Einzelbüros sowie die Werkstatt. Darüber hinaus ist das Klein-BHKW sowie die Zu- und Abluftventilatoren samt Wärmerückgewinnung im Erdgeschoss unterge-

bracht. Im ersten Stock befinden sich ausschließlich Büroarbeitsplätze in Form von zwei Großraumbüros. In diesen Bereich ist der Raum für die zentralen Rechner (“Server-Raum”) integriert. Im zweiten Stock befindet sich die Küche mit angeschlossener Kantine, des weiteren sind hier zwei Seminarräume mit vorgelagertem Kommunikationsbereich.

1.1.2 Baukonstruktion

Das Gebäude steht auf einer 0.5 m starken Bodenplatte aus Beton, die gegen das Erdreich durch eine 24 cm starke Foamglass-Schicht gedämmt ist, vgl. Abbildung 1.3.



Abbildung 1.3: Eine insgesamt 24 cm starke Foamglass-Schicht dämmt das Gebäude gegen das Erdreich.

Die Außenwände bestehen aus Leichtbauelementen in Holztafelbauweise, die mit 30 cm Mineralwolle ausgefüllt und nach innen durch Gipskartonplatten abgeschlossen sind. Im Dachbereich beträgt die Dämmstärke sogar 40 cm . Bei den Hüllflächen werden so U -Werte zwischen 0.1 und 0.14 W/m^2K erreicht. Zur Erhöhung der Winddichtigkeit umschließt eine PE-Folie das Gebäude und ist an den Fenster- und Türrahmen luftdicht verklebt. Die Fenster sind als Dreifach-Wärmeschutzverglasung mit Edelgasfüllung ausgeführt ($U_{Glas} = 0.7 W/m^2K$), die Fensterrahmen bestehen aus ausgeschäumten Rahmenprofilen. Insgesamt erzielen die Fenster einen U -Wert von 0.85 W/m^2K bei einem Gesamtenergie-durchlass von $g = 0.46$ und sind möglichst wärmebrückenfrei ausgeführt. Abbildung 1.4 und

Abbildung 1.5 veranschaulichen die baulichen Maßnahmen zur Erzielung des Passivhausstandards.

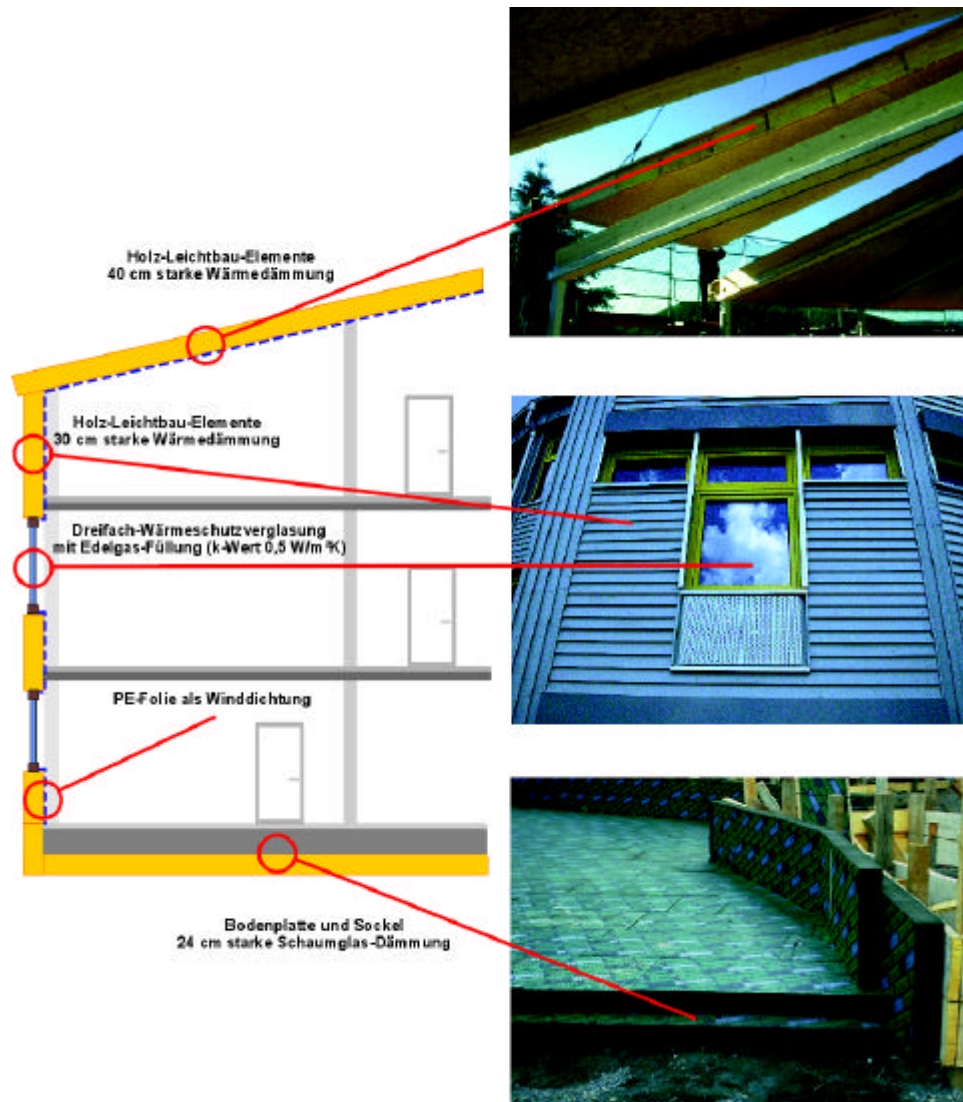


Abbildung 1.4: Bauliche Maßnahmen zur Erzielung des Passivhausstandards.

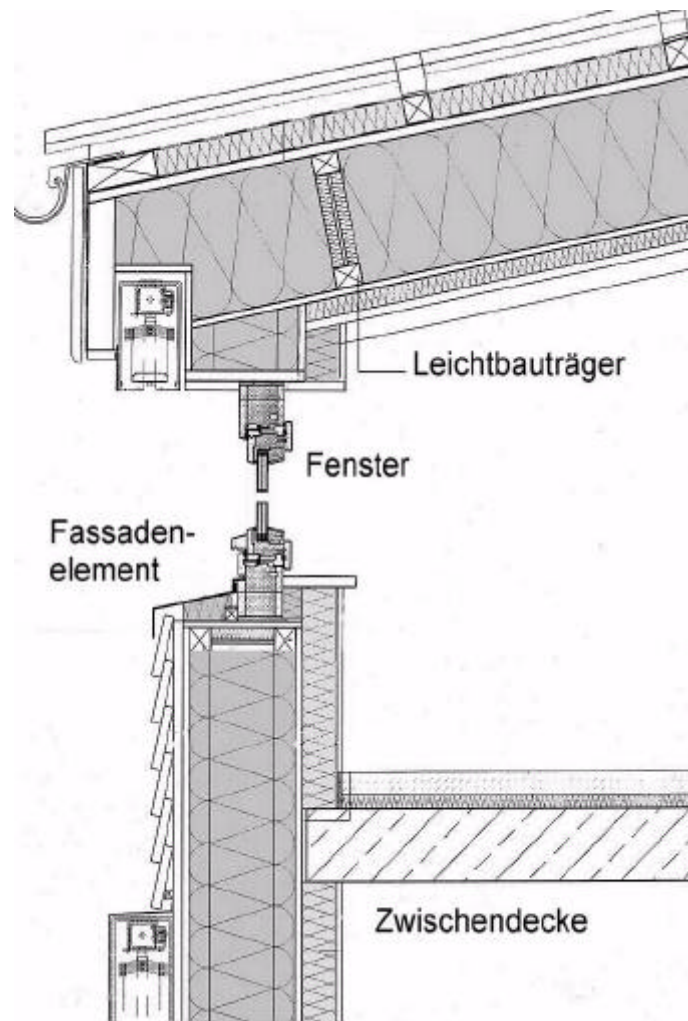


Abbildung 1.5: Schematischer Querschnitt durch das Gebäude.

Das Gebäude verfügt ausschließlich über eine außenliegende Verschattung, ein zusätzlicher innenliegender Blendschutz ist nicht installiert.

1.1.3 Haustechnik

Die im Gebäude implementierte Haustechnik lässt sich zwei Bereichen zuordnen: zum Einen dem Lüftungssystem, bestehend aus Erdreichwärmeübertrager und Wärmerückgewinnung sowie dem Luftverteilsystem und zum Anderen dem solargestützten Heizsystem, bestehend aus einem Kollektorfeld, das den saisonalen Pufferspeicher belädt, mit einem Klein-BHKW als Nachheizmöglichkeit und einem angeschlossenen Trinkwarmwasserspeicher.

Während [Rustige97] Details zur Planung der Hydraulik beschreibt, beschäftigt sich [Scheuren02] u.a. speziell mit dem Kollektorfeld und [John02] mit dem Pufferspeicher. Der Erdreichwärmeübertrager ist in [Beisel99] detailliert untersucht worden. Einige Aspekte zur Ausführung und Konzeption sind des weiteren in [SBJournal01] behandelt.

Das Lüftungssystem

Als Passivhaus verfügt das Gebäude über eine Zu- und Abluftanlage, die einen mittleren Luftwechsel von 0.5 /h sicherstellt, so dass sich ein Hauptluftvolumenstrom von ca. 3500 m³/h ergibt. Die Luft wird über einen Hauptluftventilator (Motorleistung 3 kW_{el}) durch den Erdreichwärmeübertrager (EWÜ) angesaugt. Der Erdreichwärmeübertrager besteht aus vier Betonrohren (Durchmesser: je 0.5 m), die jeweils 32 m lang sind und in 1.5 m Tiefe mit einem Rohrabstand von 0.15 m verlegt sind. Insgesamt ergibt sich eine Wärmeübertragungsfläche von rund 200 m², die aber nur zur Hälfte im Freien verlegt ist, der Rest befindet sich unter der Bodenplatte des Gebäudes. Nachdem die Frischluft im Erdreichwärmeübertrager vorklimatisiert wurde, erreicht sie die Wärmerückgewinnung (WRG), die aus vier Kreuzstrom-Wärmeübertragern besteht. Wenn keine Vorerwärmung erfolgen soll, kann die WRG stufenweise gebypassed werden, was für den Erdreichwärmeübertrager anders als z.B. bei dem von [Meyer98] beschriebenen solaroptimierten Bürogebäude nicht möglich ist, so dass der EWÜ in Cölbe ganzjährig in Betrieb ist.

Der Wärmerückgewinnung sind ein Vorheizregister (Luft-Wasser-Wärmeübertrager, 42 kW Nennleistung) zur zentralen Nacherhitzung des Zuluftvolumenstroms sowie neun dezentrale Luft-Wasser-Wärmeübertrager zur zonenweisen Erwärmung der Frischluft mit Nennleistungen zwischen 2 und 6 kW nachgeschaltet. Diese insgesamt 10 Luft-Wasser-Wärmeübertrager werden vom solar unterstützten Heizsystem gespeist.

Das aktiv-solare Heizsystem

Das aktiv-solare Heizsystem besteht aus 64 m² Kollektorfläche (solar-roof), die auf der südlichen Dachhälfte mit einem Neigungswinkel von 28° installiert sind. Die Kollektoren beladen den Edelstahlspeicher mit einem Fassungsvermögen von 87 m³ in drei möglichen Einspeisehöhen. Als Nachheizung steht ein Klein-BHKW (12.5 kW_{th}; 5.5 kW_{el}) zur Verfügung. An den Großspeicher ist auch ein Trinkwarmwasserspeicher (300 l) angeschlossen. Zur Erhöhung der Laufzeit des Klein-BHKWs kann dieses ebenfalls den benachbarten Altbau mit thermischer Energie versorgen.

Die Hydraulik mit dem angekoppelten Lüftungssystem ist Abbildung 1.6 zu entnehmen.

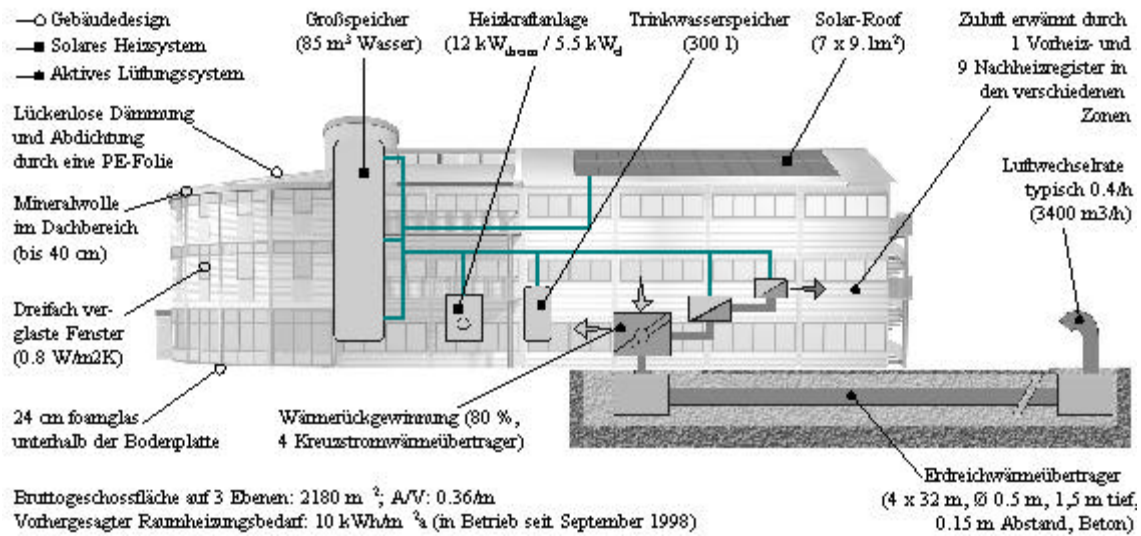


Abbildung 1.6: Skizze des Passiv-Solarhauses und der wichtigsten wärmetechnischen Komponenten.

1.1.4 Betriebsführung

Das Gebäude ist mit einer DDC-Anlage ausgestattet, die zum Einen die Messdaten der etwa 240 im Haus befindlichen Sensoren ebenso wie die ca.60 Stellsignale von Pumpen, Reglern und Ventilen erfasst. Zum Anderen sind Regel- und Steueralgorithmen für die Systeme Beleuchtung, Außenjalousien, Lüftung und Heizung sowie eine Zutrittskontrolle mit der frei programmierbaren DDC-Anlage implementiert worden.

Das aktiv-solare Heizsystem

Die Solaranlage arbeitet im low-flow-Betrieb mit einem Volumenstrom von 12 l/m²h. Während die Primärkreispumpe in Abhängigkeit von der in Kollektorebene gemessenen Einstrahlung eingeschaltet wird, ist die Sekundärkreispumpe temperaturgesteuert (Vergleich der unteren Speichertemperatur mit der Vorlauftemperatur im Primärkreis). Das Ziel der implementierten Beladestrategie besteht darin, die Schichtung im Speicher aufzubauen und aufrecht zu halten, d.h. es wird immer in der größtmöglichen Höhe eingespeist. Der Rücklauf des Heizkreises wird ebenfalls temperaturabhängig in drei verschiedenen Höhen in den Speicher eingespeist.

Da das Klein-BHKW nicht in Teillast betrieben werden kann, arbeitet es ausschließlich mit dem Saisonspeicher als Puffer² und nicht direkt in den Heizkreis des Passivhauses. So sorgt

2. Wenn das Klein-BHKW zur Heizungsunterstützung für den Altbau genutzt wird, erfolgt die Wärme-lieferung direkt, da die thermische Leistung des Klein-BHKW in diesem Fall stets kleiner ist als die Heizlast des Altbaus.

das Klein-BHKW dafür, dass im Pufferspeicher ein Bereitschaftsvolumen³ stets auf 65 °C gehalten wird, um den Trinkwarmwasserspeicher auf einem Temperaturniveau von 60 °C zu halten und gegebenenfalls den anfallenden Raumheizbedarf decken zu können. Die Nachheizung des Trinkwarmwasserspeichers wird über zwei im Speicher befindliche Sensoren geregelt.

Bei gleichzeitigem Auftreten von Heiz- und Brauchwasserbedarf entspricht die Vorlauftemperatur dem Maximum der angeforderten Werte, das stets auf der Trinkwarmwasserseite anfällt. Bei höheren wasserseitigen Heizvorlauftemperaturen würde bei den eingestellten Kapazitätsstromverhältnissen an den Luft-Wasser-Wärmeübertragern die Zuluft 50 °C überschreiten, so dass eine Staubverschmelzung eintreten könnte. Aus diesem Grund erfolgt im Heizkreis eine Rücklaufbeimischung, um die wasserseitige Soll-Vorlauftemperatur entsprechend zu begrenzen.

Die beschriebene Hydraulik ist in Abbildung A.1, S. 105 im Anhang dargestellt.

Das Lüftungssystem

Wie bereits in Kapitel 1.1.3 erwähnt, besteht keine Möglichkeit, den Erdreichwärmeübertrager zu bypassen, was dazu führt, dass er während eines Tages sowohl einen Heiz- als auch einen Kühlertrag liefern kann. Insbesondere kann dies auch während der Heizzeit zur Frischluftkühlung und im Sommer zur Frischluftherwärmung führen, was in Kapitel 2.2.5 auf S. 45 quantifiziert wird.

Die Wärmerückgewinnung ist dagegen regelbar. Im Laufe der Zeit wurden dafür verschiedene Regelstrategien implementiert. In den ersten zwei Jahren des Monitoring (05/99-04/00 und 05/00-04/01) wurde die WRG eingesetzt, sobald im Gebäude Heizbedarf bestand, im dritten Jahr (05/01-04/02) ergab sich der Zuluftsollwert als das Minimum der angeforderten Luftsollwerte der neun thermischen Zonen. Während die Regelung der ersten zwei Jahre zur Folge hatte, dass in einigen thermischen Zonen die Zuluft insbesondere in den Übergangszeiten eine höhere Temperatur als gefordert hatte, so dass zum Teil durch Fensterlüftung die gewünschte Temperatur "eingestellt" wurde, führte die Strategie des dritten Jahres dazu, dass der aktiv zu deckende Heizbedarf stark anstieg, da die WRG nur noch einen sehr viel geringeren Anteil an der Deckung des Raumheizbedarfes hatte. Diese Aspekte werden bei der Präsentation der Messergebnisse in Kapitel 2.2.5 auf S. 45 ausführlicher diskutiert.

3. Die Größe des Bereitschaftsvolumens wird in Abhängigkeit von der Jahreszeit gewählt, d.h. sie ist während der Heizzeit größer als außerhalb.

Das Gerüst der Heizungsregelung für das zentrale Vorheizregister (VHR) und die neun dezentralen Nachheizregister (NHR) läßt sich wie folgt beschreiben, vgl. auch Abbildung 1.7.

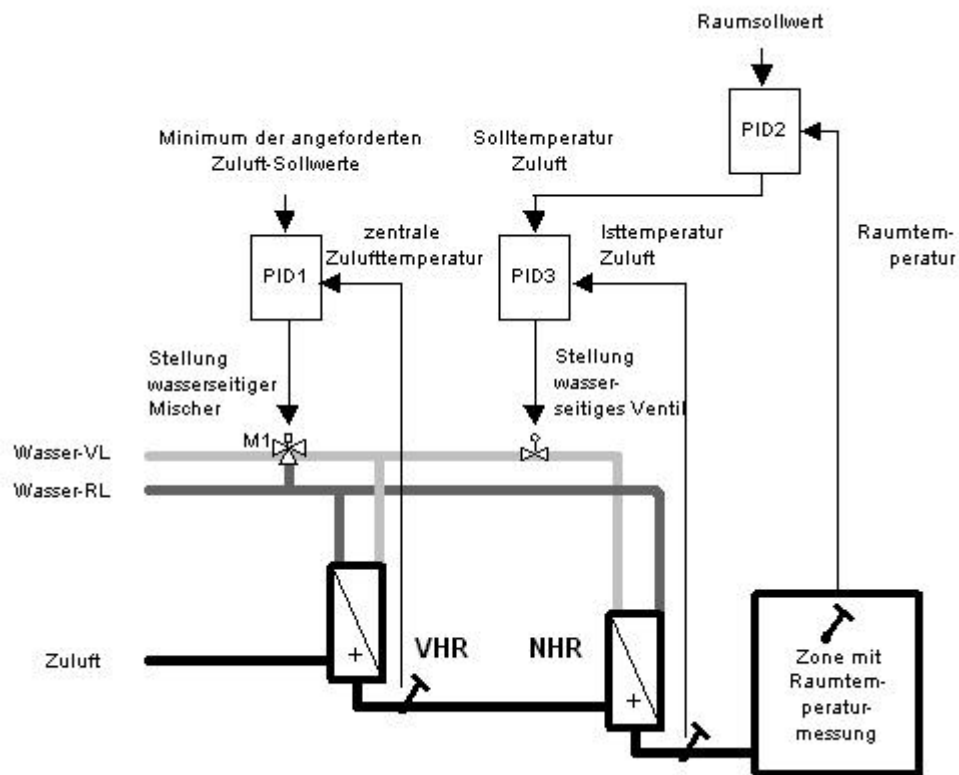


Abbildung 1.7: Gerüst der Heizungsregelung für das zentrale Vorheizregister und die neun dezentralen Nachheizregister.

Um den in den jeweiligen Zonen anfallenden Heizbedarf möglichst effizient zu decken, wird die Zuluft zentral im VHR auf das Minimum der geforderten Zuluft-Sollwerte erwärmt. Proportional zur Differenz aus Momentanwert und diesem Minimum definiert sich die Stellung des wasserseitigen Mischers M1 (und damit des Wasservolumenstroms), die über den Proportional-Integral-Differential-Regler (PID-Modul) PID1 eingeregelt wird. Die erforderliche Wasservorlauftemperatur berechnet sich ebenfalls aus der geforderten Zulufttemperatur. Diese regelt ein zentraler Mischer, wobei auf das Maximum der vom Vor- und den neun Nachheizregistern geforderten Wasservorlauftemperaturen eingeregelt wird.

In den Nachheizregistern werden im PID-Modul PID2 der Raummittelwert der Zone und der Raum-Sollwert miteinander verglichen und resultieren in einem der Differenz proportionalen Zuluft-Sollwert. Dieser Wert wird im PID-Modul PID3 mit der realen Zulufttemperatur verglichen. Proportional zur Abweichung wird der wasserseitige Volumenstrom variiert, während der Luftvolumenstrom konstant bleibt. Die Wasservorlauftemperatur berechnet sich wie schon

im VHR direkt aus der geforderten Zulufttemperatur. Details zu den implementierten Regelstrategien und den Resultaten sind in [Spieler00] und [Spieler00b] zu finden.

Sommerliche aktive Nachtauskühlung

Das das Gebäude nicht über eine aktive Klimatisierungsanlage verfügt⁴, wurden bauliche Vorkehrungen zur Vermeidung einer sommerlichen Überhitzung getroffen.

So sind im Speicherbereich die Geschossdecken durchbrochen, um im Sommer eine Kühlung des Gebäudes durch einen Kamineffekt zu ermöglichen: Unterschreitet im Sommer (nachts) die Außentemperatur die mittlere Gebäudetemperatur, werden die Oberlichter in allen Stockwerken automatisch geöffnet, kühle Luft durchströmt thermosiphonisch getrieben das Gebäude. Um den Abkühlungseffekt zu unterstützen, wurden in allen Etagen nicht abgehängte Rasterdecken realisiert, damit die Gebäudemasse optimal an die Raumlufte angekoppelt ist. Das Prinzip der thermosiphonisch getriebenen Durchströmung ist in Abbildung 1.8 veranschaulicht.

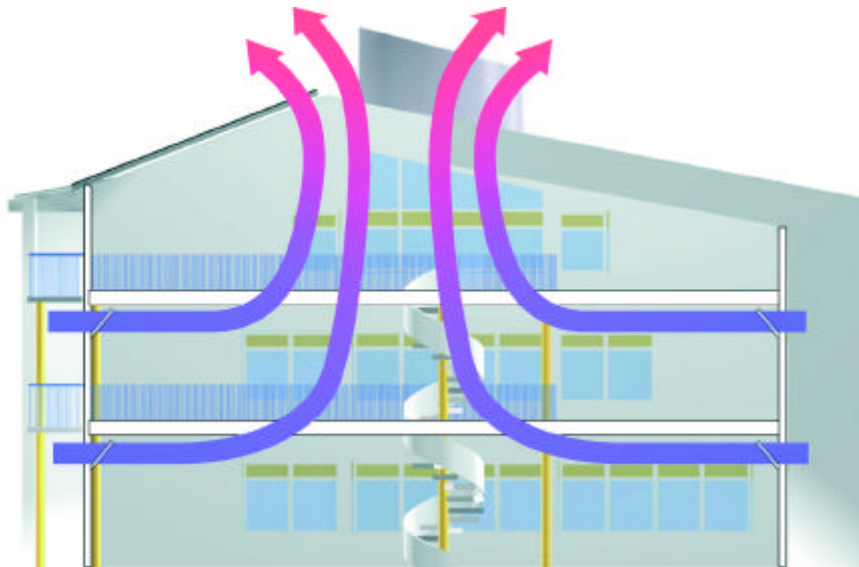


Abbildung 1.8: Thermosiphonisch getriebene Durchströmung des Gebäudes zur Vermeidung der Überhitzung des Gebäudes.

Beleuchtung und Verschattung

Obwohl durch die im Haus befindliche DDC die Möglichkeit zur automatisierten Steuerung und Regelung bestand, erfolgte die Lichtregelung ebenso wie die Steuerung der außenliegenden Verschattung weitgehend manuell.

4. Lediglich im Serverraum mußte ein Klimagerät mit einer elektrischen Leistungsaufnahme von 1.2 kW installiert werden, Ende des Jahres 2002 erfolgte eine Nachrüstung auf 8 kW, wobei die Abwärme des Klimageräts für die Wärmerückgewinnung zur Verfügung steht.

Im Fall der Beleuchtung war von Seiten der DDC-Firma eine Regelung über Helligkeitssensoren vorgesehen, die in allen Zonen über den Schreibtischplätzen angebracht waren. Tatsächlich ergab es sich aber nach Bezug des Gebäudes, dass die wenigsten dieser Sensoren die Helligkeit an den Arbeitsplätzen maßen, da die Inneneinrichtung anders als geplant erfolgte, was zum Teil auch an einer höheren Personenbelegung als ursprünglich angenommen lag. Zur Stromeinsparung werden die Leuchten allerdings einmal mittags und einmal spätabends zentral ausgeschaltet.

Da das Gebäude nicht über innenliegende Jalousien als Blendschutz verfügt, werden die Außenjalousien von den Nutzer/innen z.T. auch als Blendschutz eingesetzt. Dadurch bedingt ließ sich eine automatisierte Steuerung nicht zufriedenstellend implementieren, so dass die Jalousien überwiegend manuell betrieben werden⁵.

1.2 Zusammenfassung

Seit September 1998 ist das Passiv-Solarhaus der Firma Wagner & Co Solartechnik in Cölbe bei Marburg in Betrieb - und damit das europaweit erste Bürogebäude nach dem Passivhausstandard. Die baulichen Maßnahmen wie gute Wärmedämmung, Winddichtigkeit des Gebäudes durch eine umschließende PE-Folie sowie Dreifach-Wärmeschutzverglasung ermöglichen in Kombination mit einer Lüftungsanlage mit hocheffizienter Wärmerückgewinnung das Erreichen des Passivhausstandards. Zur Deckung des verbleibenden Heizbedarfes sowie des ganzjährigen Brauchwasserbedarfs verfügt das Gebäude über eine Solaranlage, die einen Saisonspeicher belädt, ein Klein-BHKW dient als Nachheizmöglichkeit. Zur Datenaufnahme bei der detaillierten Vermessung des Gebäudes dient eine DDC-Anlage, die ferner sämtliche Steuer- und Regelaufgaben im Gebäude übernimmt.

5. Automatismen greifen lediglich zur Schadensprävention bei sehr hohen Windstärken ein, die Jalousien werden dann automatisch hochgefahren.

2 Messtechnische Untersuchungen und statistische Analysen

2.1 Motivation und Vorgehen

Das Passiv-Bürogebäude ist seit September 1998 in Betrieb, seit Mai 1999 erfolgt eine weitgehend lückenlose Messdatenaufnahme. Wie in [Antrag97] festgelegt, sollen drei Messjahre detailliert ausgewertet werden. Da es sich bei dem untersuchten Objekt um das europaweit erste Bürogebäude im Passivhausstandard handelt, ist die Analyse und vor allem die Bewertung des Gebäudeverhaltens von besonderer Bedeutung, um daraus Schlüsse für künftig zu errichtende vergleichbare Gebäude zu ziehen.

Im folgenden Kapitel soll zunächst die Messausrüstung für die verschiedenen Subsysteme aktiv-solares Heizsystem, Lüftungssystem sowie Innenräume vorgestellt werden. Auf dieser Basis werden im Anschluss die gemessenen Energieströme präsentiert ebenso wie einige Auswertungen zum Gebäudeklima. Das Ziel ist dabei, einerseits einen zeitlichen Vergleich zwischen den drei Messjahren zu ziehen und andererseits zu einer Bewertung der betrachteten Subsysteme zu gelangen.

Der letzte Teil des Kapitels beschäftigt sich mit statistischen Methoden zur Vorhersage des Raumheizverbrauchs aus ausgewählten Messgrößen. Einer solchen Analyse kommt insofern besondere Bedeutung zu, als die Simulation derartig komplexer Systeme nur bedingt und mit hohem Zeitaufwand möglich ist, vgl. z.B. [Katipamula98]. Insbesondere wenn es um die Abschätzung des Effekts von Energieeinsparmaßnahmen geht - beispielsweise durch Reduktion des Strombedarfs durch den Einsatz von energiesparenden Geräten - stellt diese Methode ein probates Mittel dar, um schnell eine Prognose aufstellen zu können, ohne aufwändige dynamische Simulationsrechnungen durchführen zu müssen.

2.1.1 Erfassung der klimatischen Randbedingungen

Auf dem Dach des Gebäudes werden folgende klimatische Randbedingungen erfasst: die Globalstrahlung in der Kollektorebene (CM11-Pyranometer), die Umgebungstemperatur (kalibrierter Pt-100-Sensor) sowie die Windgeschwindigkeit.

2.1.2 Vermessung des aktiv solaren Heizsystems

Im gesamten aktiv-solaren Heizsystem befinden sich ca. 100 Temperatursensoren sowie mehrere Volumenstrommessgeräte. Allein zur Vermessung des Großspeichers werden ca. 50 Sensoren eingesetzt. Dabei handelt es sich durchweg um Pt-100-Sensoren, von denen 29 an den Speichermantel angeklebt wurden, während die übrigen Sensoren im Inneren des Speich-

ers in 12 verschiedenen Höhen zur Vermessung des vertikalen und des horizontalen Temperaturprofils angebracht sind. Dafür wurden die Pt-100-Sensoren an Stäben in den Speicher eingebracht (Tauchfühler), wobei sechs Stäbe nur jeweils einen Messpunkt an der Spitze besitzen, während die anderen sechs Stäbe an jeweils drei Punkten Sensoren besitzen. Wie auch in [John02] beschrieben, wurde zur Erhöhung der Messgenauigkeit sowie aus Kostengründen für die Vermessung des Saisonspeichers ein an der Universität Marburg entwickelter Multiplexer eingesetzt. Dieser ist über einen Eingang mit der DDC verbunden, eine Steuerung sorgt dafür, dass alle drei Sekunden ein anderer Multiplexer-Kanal (entsprechend einem Temperaturmesspunkt) von der DDC ausgelesen und gespeichert wird.

Sämtliche Tauchfühler im Speicher sowie in der übrigen Hydraulik wurden in 10 K -Schritten zwischen ca. 20 °C und 70 °C im Wasserbad kalibriert. Für die Messfehler ergeben sich somit Werte bis maximal 0.1 K.

Zur Volumenstrommessung im Primärkreis dient ein Ringkolbenzähler, ebenso wie in acht der neun Nachheizregistern (NHR) und dem Küchen-Nachheizregister. Ansonsten wurden in der restlichen Hydraulik Flügelradzähler eingesetzt.

An dieser Stelle sei bereits angemerkt, dass bis auf einen falsch herum eingebauten Zähler im NHR 2 alle Ringkolbenzähler auch nach einer Reinigung durch die Universität Marburg nur sehr kurze Zeit funktionierten. Über die möglichen Ursachen kann nur spekuliert werden: Zum Einen waren die Zähler bereits eingebaut, als die komplette Anlage abgedrückt wurde, zum Anderen handelt es sich um ein offenes System, so dass u.U. Schmutzpartikel ein Zusetzen der empfindlichen Ringkolbenzähler bewirkt haben könnten. Aufgrund der geringen Volumenströme in den Nachheizregistern konnten dort jedoch keine robusteren Flügelradzähler eingebaut werden, so dass keine Erfassung der wasserseitigen Volumenströme in den Nachheizregistern möglich ist. Wie der Ansicht der Hydraulik in Abbildung A.2, S. 106 im Anhang zu entnehmen ist, erfolgt in den Nachheizregistern jeweils eine Rücklaufbeimischung zur Einstellung der gewünschten Vorlaufstempertemperatur an den Luft-Wasser-Wärmeübertragern, jedoch ist auch hier aus der jeweiligen Mischerstellung keineswegs der Vorlauf-Volumenstrom zu berechnen, da dieser empfindlich von den Mischerstellungen in den übrigen Nachheizregistern sowie einer eventuellen Trinkwasserspeicher-Beladung abhängt. Letztlich kann also nur indirekt über die Wärmeübertragerbilanz und durch Kenntnis des luftseitigen Kapazitätsstroms auf den wasserseitigen Volumenstrom geschlossen werden, was aber erhebliche Ungenauigkeiten mit sich bringt, vgl. auch Kapitel 2.1.3 ab S. 31.

2.1.3 Vermessung des Lüftungssystems

Im gesamten Lüftungssystem befinden sich fast 80 Temperaturfühler (Pt-100 Sensoren), dabei entfallen knapp 60 allein auf den Erdreichwärmeübertrager. Wie im Fall des Saisonspeichers wurde auch hier ein baugleicher Multiplexer eingesetzt. Zur detaillierten Untersuchung des Erdreichwärmeübertragers wurden Temperatursensoren im Luftstrom und im Erdreich installiert. Die Sensoren im Erdreich befinden sich nicht nur im Einflussbereich der Rohre sondern auch weit davon entfernt. Die Positionierung erfolgte im freien Gelände sowie unter der Bodenplatte des Gebäudes und in unterschiedlichen Tiefen im Erdboden, vgl. auch [Beisel99] sowie die Abbildung A.3, S. 107 im Anhang.

Darüber hinaus wird mit drei Haarhygrometern die relative Feuchte vor und nach dem Erdreichwärmeübertrager sowie in der Abluft direkt vor der Wärmerückgewinnung gemessen. Zur Bestimmung des Luftvolumenstroms dienen zentral in der Frisch- und Fortluft und in allen Nachheizregistern Messblenden. Diese messen den dynamischen Druck als Maß für den Volumenstrom, per eingebautem Mikroprozessor wird der tatsächliche Volumenstrom berechnet. Dieser Prozessor ermöglicht auch die Einregelung eines vorgegebenen (variablen) Sollwerts, wobei der Hersteller¹ für die Regelung eine Genauigkeit von 5 – 20 % vom Istwert je nach Verhältnis vom eingestellten Volumenstrom zu dem gerätespezifischen Nennvolumenstrom angibt. Insbesondere bei den Hauptluftvolumenströmen liegen die Istwerte deutlich unterhalb der Nennvolumenströme, so dass die entsprechenden Werte mit Unsicherheiten behaftet sind.

Während sämtliche eingesetzte Temperaturfühler ebenso wie die im aktiv-solaren Heizsystem eingesetzten Fühler kalibriert wurden² (vgl. 2.1.2), war dies für die Messblenden nicht möglich. Gerade an diesen Stellen wäre eine genauere Messung wünschenswert gewesen, da schon die Wasservolumenströme nicht gemessen werden konnten.

2.1.4 Vermessung des Innenraumklimas

Zur Beurteilung des Innenraumklimas stehen 24 Temperaturfühler (Pt-100 Sensoren) zur Verfügung, jedoch wurde keine ortsaufgelöste Feuchtemessung durchgeführt, ebenso wurden aus zeitlichen Gründen keine Messungen der operativen Raumtemperatur durchgeführt. Die Sensoren befinden sich in weißen Plastikgehäusen, die auf Putz an den Wänden montiert wurden, oftmals sind sie zeitweise am Tag sonnenbeschienen.

Leider konnten diese Temperaturfühler nicht kalibriert werden, da die Sensoren in den Plastikgehäusen nicht wassergeschützt sind, so dass keine Kalibrierung im Wasserbad möglich

1. Gebrüder Trox GmbH, Neukirchen.
2. Die für den Erdreichwärmeübertrager bestimmten Fühler wurden allerdings in einem Temperaturbereich von 0 °C bis 40 °C kalibriert.

war. Eine Kalibrierung in einem selbst realisierten “Windkanal” erwies sich als zu ungenau, da es nicht gelang, eine isotherme Umgebung für die Sensoren herzustellen.

Um trotzdem zumindest einen Anhaltspunkt für die Messgenauigkeit zu haben, wurde an einigen Messstellen temporär eine Vergleichsmessung mit stand-alone Loggern³ durchgeführt, deren Temperatursensoren zuvor im Wasserbad kalibriert wurden. Jedoch ist auch dieser Vergleich mit Messunsicherheiten behaftet. So war eine Anbringung der Logger-Sensoren unmittelbar neben den DDC-Sensoren nicht möglich, stattdessen wurden die Logger schattig und möglichst zugeschützt platziert. Die DDC-Sensoren sind zwar durch ein weißes Plastikgehäuse vor direkter Einstrahlung geschützt, sind aber nicht permanent verschattet. Zudem befinden sie sich zum Teil direkt neben Türen, was sich ebenfalls auf die Messung auswirken dürfte, da die Vergleichsmessung zwangsläufig während des Betriebs stattfand und die Pt-100-Sensoren eine stark unterschiedliche Zeitkonstante im Vergleich zu den Logger-Sensoren haben. Es ist also zu erwarten, dass sich zwischen den Logger- und den DDC-Messwerten eine tages- und jahreszeitliche Abhängigkeit der Abweichungen (verursacht durch Sonneneinstrahlung und Luftbewegung infolge des Betriebs im Gebäude) ergibt.

Somit kann aus dieser kurzen Vergleichsperiode nur sehr bedingt auf eine etwaige Messgenauigkeit in den gesamten Messjahren geschlossen werden.

Insgesamt ergibt sich beim Vergleich zwischen Logger und DDC, dass die DDC stets höhere Werte misst als die Logger. Tabelle 2.1 gibt eine Übersicht über die gemessenen Abweichungen in den Zonen

Tabelle 2.1: Abweichungen zwischen den von der DDC gemessenen Raumtemperaturen und den entsprechenden Logger-Werten. Vergleichszeitraum ist der 17.07.-1.10.01.

	Anm	BEG	RBOG	BOG (nord)	BOG (süd)	Kant
DDC-Logger in K	1.8	1.0	1.5	1.4	0.9	0.4

Für alle weiteren Auswertungen wurde darauf verzichtet, eine pauschale Korrektur vorzunehmen, da bei der DDC-Messung zusätzlich von einem Repräsentationsfehler durch die Temperatursensoren ausgegangen werden muss. So müsste zur Messung der tatsächlichen Raumtemperatur eine sog. Schwarzkugel-Messung durchgeführt werden. Da der Repräsentationsfehler aber insbesondere in Relation zur Differenz zwischen DDC und Logger nicht quantifiziert werden kann, wird auf eine Korrektur der DDC-Messwerte gemäß der Abweichungen aus Tabelle 2.1 verzichtet, vielmehr liegen die DDC-Werte zu Grunde, wenn in den folgenden Ausführungen von Raumtemperaturen gesprochen wird.

3. 4-Kanal Miniatur Datenlogger von Firma Synotech, Linnich.

2.1.5 Übermittlung und Sicherung der Messdaten

Sämtliche Datenpunkte im Gebäude werden von der DDC einmal in der Minute abgefragt, wobei jedoch kein Minutenmittel- sondern nur ein Momentanwert registriert wird. Einmal am Tag werden die gesamten Daten der letzten 24 Stunden aus der DDC automatisiert exportiert und per Email an die Universität in Marburg geschickt, wo sie in mehreren Datenbanken gespeichert werden, zum Teil erfolgt auch bereits eine automatisierte Aggregation der Daten.

2.1.6 Zusammenfassung

Das Passivbürogebäude wird mit ca. 240 Sensoren umfangreich vermessen, von einer DDC-Anlage werden ferner etwa 60 Stellsignale von Mischern, Pumpen, etc. erfasst. Die Messdatenaufnahme erfolgt seit Mai 1999 weitgehend lückenlos, so dass im Mai 2002 drei Messjahre mit minutenaufgelösten Daten vorliegen. Die Daten werden einmal am Tag automatisch aus der DDC ausgelesen und an die Universität Marburg geschickt. Dort werden sie gespeichert und aufbereitet, was zum Teil automatisiert erfolgt.

2.2 Messergebnisse

In diesem Abschnitt soll ein Querschnitt der umfangreichen Vermessung präsentiert werden. Getrennt nach den Subsystemen aktiv-solares Heizsystem, Lüftungssystem und Innenraumklima geht es weniger um die Präsentation von Einzelmessungen als vielmehr um komprimierte Daten, die Rückschlüsse auf das "Funktionieren" des Gebäudes unter dem jeweiligen Aspekt zulassen. Bevor diese Teilbereiche aber diskutiert werden, erfolgt als erstes eine Betrachtung der primärenergetisch zu bewertenden Energieströme sowie der Heizlast.

Um entsprechende Jahresaggregate vergleichen zu können, wird nach einem kurzen Abschnitt über allgemeine Betriebserfahrungen zunächst eine Analyse der klimatischen Randbedingungen (Umgebungstemperatur und Globalstrahlung) der drei Messjahre durchgeführt.

2.2.1 Allgemeine Betriebserfahrungen

Das Passiv-Bürogebäude war ohne Vorbild, daher lagen in vielen Bereichen noch keine Erfahrungen vor. Das machte sich bereits während der Bauphase bemerkbar, da die Bauarbeiter und zum Teil auch Handwerker nicht über die spezifischen Anforderungen eines Passivhauses informiert waren. Nicht zuletzt dank des engagierten Bauherren gelang aber die Umsetzung gemäß der Planung. Diese Erfahrungen verdeutlichen die Notwendigkeit einer Qualitätssicherung der Bauausführung, wie z.B. auch [Michael01] und [Zimmer01] betonen. Denn während die Planungsphase durch die Projektierung nach dem Passivhaus-Projektierungs-Paket [PHPP98] abgedeckt wird und Komponenten wie Fenster aber auch ganze Bausysteme mittlerweile durch das PHI⁴ als "Passivhaus tauglich" zertifiziert werden (vgl. z.B. [Feist01] und [Betschart01]), gibt es keine Garantien für die Bauphase, vergleichbar dem

“solaren Garantieverfahren”, bei dem Planer, Installateur und Komponentenlieferant dem Kunden eine Art Funktionsgarantie beim Kauf einer thermischen Solaranlage geben, vgl. [Uecker01]. Ein ähnliches Modell wäre für die Errichtung von Passivhäusern sicher wünschenswert.

Der mangelnde Erfahrungsschatz betrifft ferner auch die Nutzung der DDC für Steuer- und Regelaufgaben für dieses spezielle Anforderungsprofil. So hatte die DDC-Firma⁵ für die Regelung der Lüftungsanlage Standardalgorithmen implementiert, die in dem Gebäude mit seinen diametral unterschiedlichen Anforderungen im Vergleich zu konventionellen Bürogebäuden nicht zu zufriedenstellenden Ergebnissen führen konnten. Dies betraf auch die Regelung des Heizsystems.

Somit erforderte die Anpassung und Umsetzung von neuen Regelalgorithmen sehr viel Zeit, was sich auch daran zeigt, dass es nach Bezug des Gebäudes ca. ein halbes Jahr in Anspruch nahm, bis zum Einen die Messdatenerfassung zuverlässig funktionierte und das Gros der Regel- und Steueralgorithmen ebenfalls den speziellen Verhältnissen angepasst war. Erschwerend kam hinzu, dass keine nachvollziehbare Dokumentation über die seitens der DDC-Firma implementierten Algorithmen vorlag.

Eine Konsequenz für vergleichbare Projekte in der Zukunft muss in jedem Fall die zeitliche Berücksichtigung dieser Instandsetzungsarbeiten sein, die stets unerlässlich sein dürften und in diesem Projekt mangels entsprechender Vorerfahrungen (insbesondere mit einer DDC für wissenschaftliche Zwecke) unterschätzt wurden.

2.2.2 Analyse der klimatischen Randbedingungen

Praktisch alle relevanten Kennzahlen, wie z.B. der Solarertrag oder der Ertrag der Wärmerückgewinnung, sind von der Umgebungstemperatur und/ oder der Solarstrahlung abhängig. Daher ist es notwendig, zunächst für diese Größen jeweils einen Jahresvergleich durchzuführen. Die gemessene Umgebungstemperatur und die Globalstrahlung werden pro Jahr in zwei Zeiträume untergliedert.

Um für jedes Jahr den gleichen Stichprobenumfang, d.h. die gleiche Anzahl an Daten zu haben, werden die beiden Zeiträume statisch definiert⁶ und nicht den jeweiligen Gegebenheiten angepasst, wie z.B. Beginn und Ende des Betriebs der Wärmerückgewinnung zur Vorwärmung der Luft.

4. Passivhaus Institut, Darmstadt.

5. AGEKO Leitsystemtechnik GmbH, Münster.

6. Danach ist der Sommer vom 1.6.-15.9. im jeweiligen Jahr definiert und der Winter umfasst die übrige Zeit.

Für die gemessene Umgebungstemperatur wurden Tagesmittelwerte gebildet, die gemessene Globalstrahlung (in Kollektorebene) wurde zu Tagessummen zusammengefasst. Zum jeweiligen Jahresvergleich wurden die relativen Häufigkeiten pro Zeitraum über den jeweiligen Klassenbreiten aufgetragen, wobei als Klassenbreite für die Strahlung $0.6 \text{ kWh/m}^2\text{d}$ und für die Temperatur 1 K gewählt wurde..

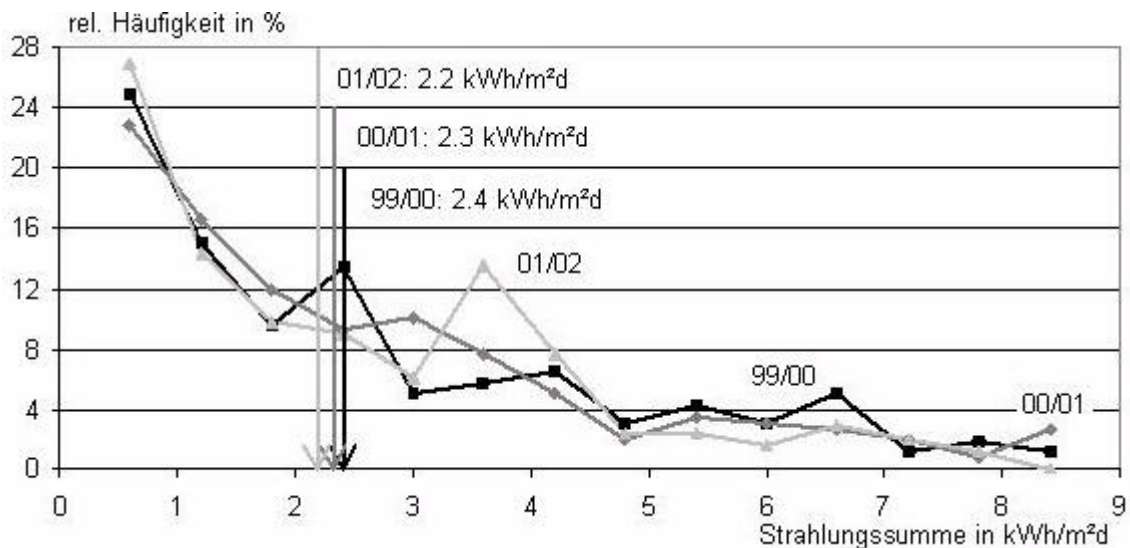


Abbildung 2.1: Relative Häufigkeiten in % pro $0.6 \text{ kWh/m}^2\text{d}$ der Tagessummen der gemessenen Globalstrahlung für die drei Winterperioden. Eingezeichnet sind zudem die Mittelwerte der drei Zeiträume.

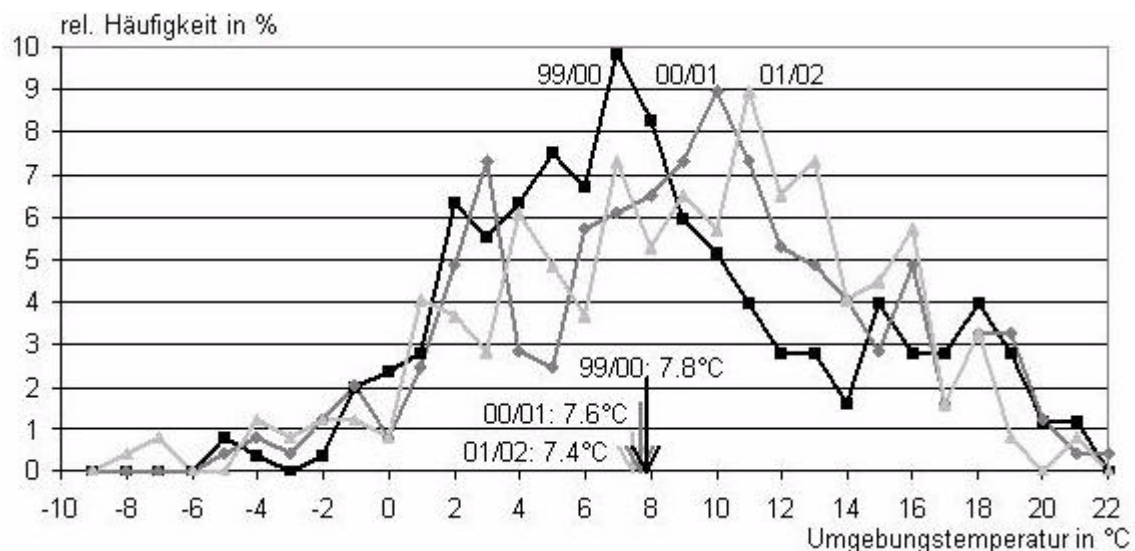


Abbildung 2.2: Relative Häufigkeiten in % pro 1 K der Tagesmittelwerte der gemessenen Umgebungstemperatur für die drei Winterperioden. Eingezeichnet sind zudem die Mittelwerte der drei Zeiträume.

Betrachtet man zunächst die Verteilungen der Globalstrahlung, so fällt auf, dass es im Winter 01/02 ein ausgeprägtes Maximum bei mittleren Strahlungssummen ($3\text{--}4 \text{ kWh/m}^2\text{d}$) gab, das in den anderen beiden Winterperioden bei etwas niedrigeren Werten und nicht so ausgeprägt

auftritt. Dagegen kamen höhere Strahlungssummen ($6-7 \text{ kWh/m}^2\text{d}$) 99/00 häufiger vor als in den beiden Vergleichszeiträumen. Insgesamt unterscheiden sich die jeweiligen Mittelwerte jedoch kaum voneinander.

Bei den Tagesmittelwerten der Umgebungstemperatur unterscheiden sich die jeweiligen Verteilungen etwas deutlicher: So treten 01/02 am häufigsten Temperaturen von etwa $11 \text{ }^\circ\text{C}$ auf, während dieses Maximum 00/01 bei etwa $10 \text{ }^\circ\text{C}$, und 99/00 bei etwa $7 \text{ }^\circ\text{C}$ liegt. Auffallend ist weiterhin, dass nur im Winter 01/02 tiefe Temperaturen unter $-6 \text{ }^\circ\text{C}$ auftraten, was in den anderen Zeiträumen nicht der Fall war.

Insgesamt ergibt sich aber bei Betrachtung der Globalstrahlung und der Umgebungstemperatur, dass unter Beachtung etwaiger Besonderheiten für die betrachteten Zeiträumen ein Vergleich der gemessenen Energieströmen statthaft ist.

Für die jeweiligen Sommerperioden ergeben sich die Darstellungen in Abbildung 2.3 und Abbildung 2.4.

Zwischen den Verteilungen für die Sommer 00 und 01 ergeben sich nur leichte Unterschiede: So lag 01 das Maximum der relativen Häufigkeiten bei etwa $5.5 \text{ kWh/m}^2\text{d}$, während es 00 etwas niedriger bei $4.5 \text{ kWh/m}^2\text{d}$ lag. Dagegen waren sonnenreichere Tage 99 deutlich häufiger, da hier das Maximum bei knapp $6.6 \text{ kWh/m}^2\text{d}$ liegt, während die Verteilungen von 99 und 01 in diesem Bereich nur schwach ausgeprägte Maxima haben. Dieser Trend spiegelt sich auch in den jeweiligen Mittelwerten wider: So lag das Mittel 99 um etwa $0.5 \text{ kWh/m}^2\text{d}$ höher als in den beiden Vergleichszeiträumen, in denen die Mittelwerte praktisch identisch waren.

Bei der Umgebungstemperatur unterscheiden sich die zugehörigen Verteilungen etwas deutlicher. Während es für 99 und 00 jeweils ein deutlich ausgeprägtes Maximum gibt, das 99 erwartungsgemäß höher liegt ($20 \text{ }^\circ\text{C}$ im Vergleich zu $18 \text{ }^\circ\text{C}$), treten 01 zwei Maxima auf, wobei das eine ebenfalls bei etwa $18 \text{ }^\circ\text{C}$ liegt und das andere bei deutlich höheren Werten ($21 \text{ }^\circ\text{C}$).

Somit lässt sich aus den betrachteten Verteilungen für die Sommerperioden der Schluß ziehen, dass der Sommer 99 sonnenreicher und wärmer war als die beiden anderen, während warme sonnige Tage 01 jedoch noch häufiger auftraten als im Sommer 00.

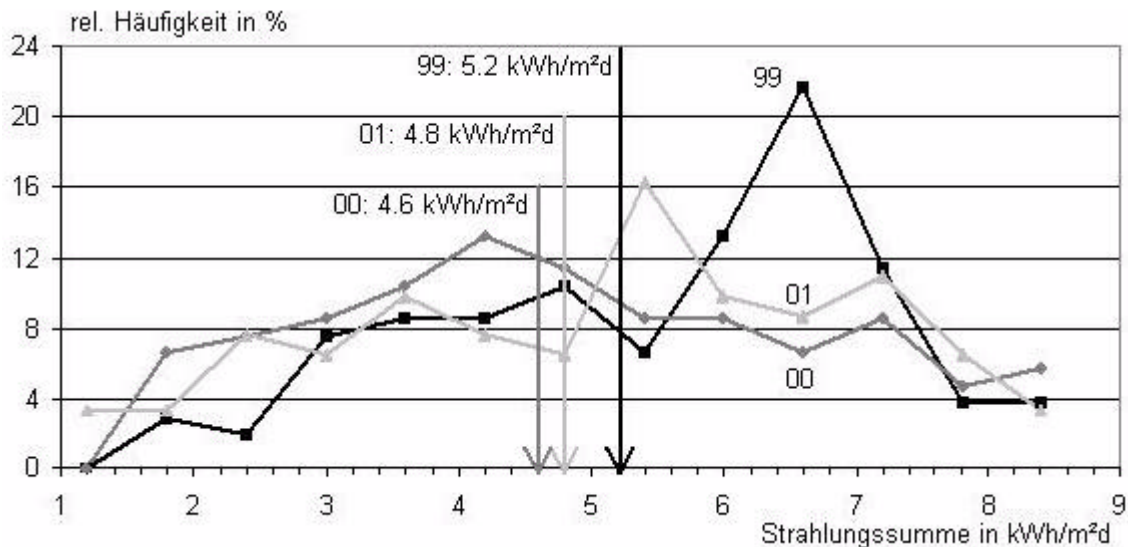


Abbildung 2.3: Relative Häufigkeiten in % pro 0.6 kWh/m^2 der Tagessummen der gemessenen Globalstrahlung für die drei Sommerperioden. Eingezeichnet sind zudem die Mittelwerte der drei Zeiträume.

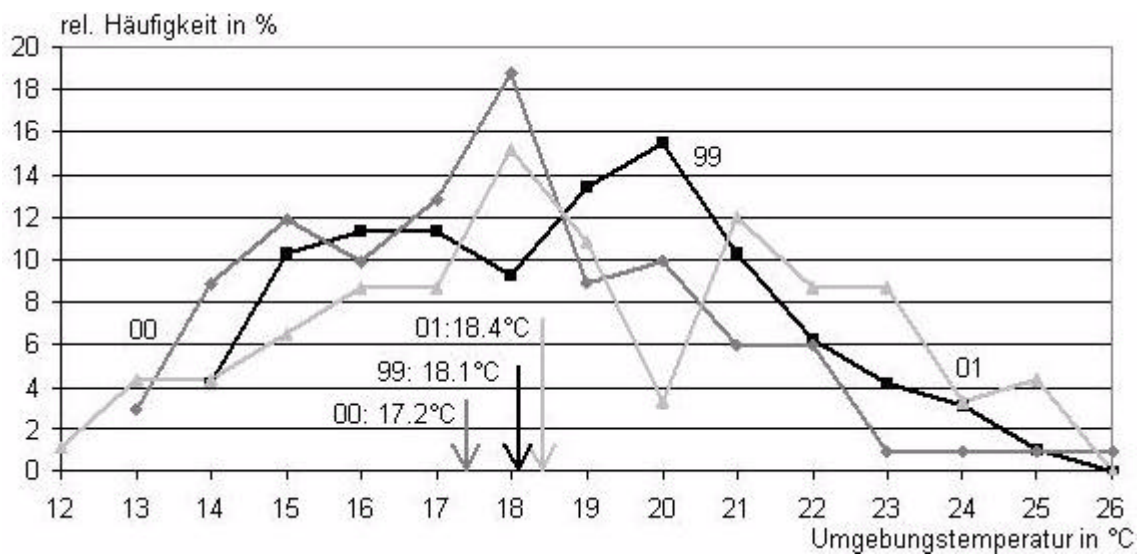


Abbildung 2.4: Relative Häufigkeiten in % pro 1 K der Tagesmittelwerte der gemessenen Umgebungstemperatur für die drei Sommerperioden. Eingezeichnet sind zudem die Mittelwerte der drei Zeiträume.

Nach dem Vergleich der klimatischen Randbedingungen der Zeiträume innerhalb der drei Messjahre soll nun zunächst die Entwicklung der primärenergetisch bewerteten Energieströme dargestellt werden, bevor danach eine detailliertere Betrachtung der Bilanzen getrennt nach den Subsystemen erfolgt.

2.2.3 Relevante Energieströme

Die relevanten Energieströme für das Gebäude sind in Abbildung 2.5 dargestellt.

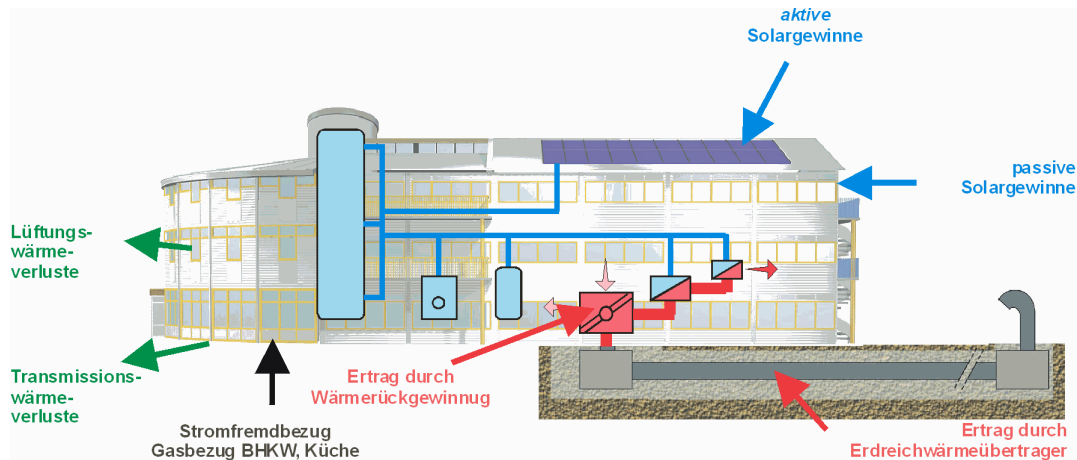


Abbildung 2.5: Relevante Bilanzgrößen des Gebäudes.

Die Beiträge lassen sich wieder in die Bereiche aktiv-solares Heizsystem, Lüftungssystem sowie Gebäude als solches unterteilen. Für das aktiv-solare Heizsystem ist der Kollektorertrag zu bilanzieren, wobei der Ertrag sekundärseitig am Wärmeübertrager berechnet wird, so dass die Wärmeübertrager- und Leitungsverluste bereits berücksichtigt sind. Desweiteren ist der Gasbezug des Klein-BHKWs zu bilanzieren, der nach [DIN4701] primärenergetisch bewertet werden soll.

Angesichts des niedrig zu erwartenden Werts für den Raumheizbedarf muss der Einsatz eines Klein-BHKWs zunächst erstaunen, da dieses so nur auf eine geringe Zahl von Betriebsstunden im Jahr käme⁷. Der Einsatz rechtfertigt sich aber daraus, dass der benachbarte Altbau der Firma einen sehr hohen Wärmebedarf hat. Sofern der Neubau keine oder eine geringere thermische Leistung als die maximal mögliche des Klein-BHKWs anfordert, wird dieses zur Unterstützung der Wärmeversorgung des Altbaus eingesetzt. Wenn im Folgenden der Gasbezug des Klein-BHKWs erwähnt wird, bezieht sich dieser jedoch ausschließlich auf den Zeitraum, in dem das BHKW das Passiv-Solarhaus mit Strom und Wärme versorgt.

Für das Lüftungssystem fallen die Erträge des Erdreichwärmeübertragers sowie der Wärmerückgewinnung an. Wie in 2.2.5 ab S. 45 noch weiter ausgeführt wird, arbeitet der EWÜ stets im Mischbetrieb, das heißt Heizen und Kühlen treten zu allen Jahreszeiten auf, so dass es stets auch zu einem Fehlertrag kommt (z.B. Kühlen während der Heizzeit). Um dies zu berücksichtigen, ist mit "Ertrag des EWÜ" stets die vorzeichenrichtige Summe von Kühlertrag (negativ) und Heizertrag (positiv) des EWÜ gemeint.

7. Im Zeitraum 99/00 belief sich diese z.B. auf ca. 1800 h/a .

Des Weiteren sind für das Gebäude noch der Fremdstrombezug sowie der Gasbezug für die Küche zu bilanzieren. Die passiven solaren Gewinne des Gebäudes konnten nicht gemessen werden, hier liegt nur eine Zahl aus der Projektierung nach [PHPP98] der Planungsphase vor.

Als Verlustterme für das Gebäude sind die Lüftungs- sowie die Transmissionsverluste zu nennen. Diese Beiträge können jedoch nicht einzeln bilanziert werden, sondern schlagen sich letztlich im Heizwärmebedarf des Gebäudes nieder.

Im weiteren Verlauf dieses Unterkapitels werden alle Energien bezogen auf die Energiebezugsfläche des Gebäudes von 1948 m² angegeben. In Abbildung 2.6 sind die gemessenen Energien für die drei Messjahre dargestellt (im Fall des EWÜ der Ertrag), in Abbildung 2.7 die Differenzen zwischen den jeweiligen Jahren in Prozent bezogen auf den Mittelwert aus allen Jahren.

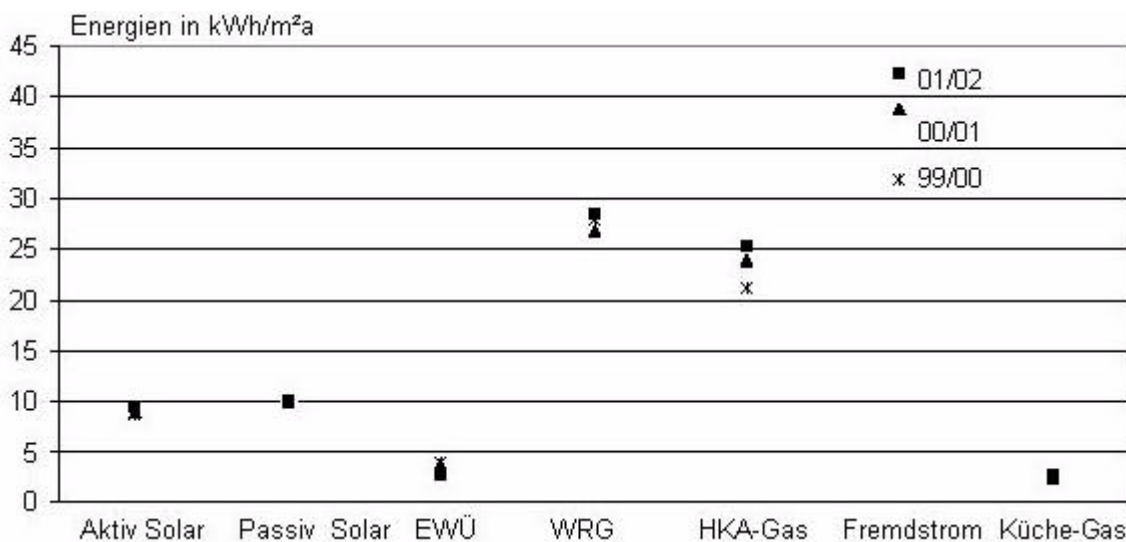


Abbildung 2.6: Gemessene Energien für die Jahre 99/00-01/02. Lediglich der Wert für die passiven solaren Gewinne wurde nicht gemessen sondern berechnet nach [PHPP98]. Dargestellt sind in dieser Abbildung die Nutzenergien, lediglich die Punkte “HKA-Gas” und “Küche-Gas” beziehen sich auf den mit dem Heizwertⁱ bewerteten Gasbezug.

- i. Als Heizwert wurde der vom Gaslieferanten angegebene Wert eingesetzt, dieser lag in den Jahren 1999-2001 im Mittel bei 9.74 kWh/m³.

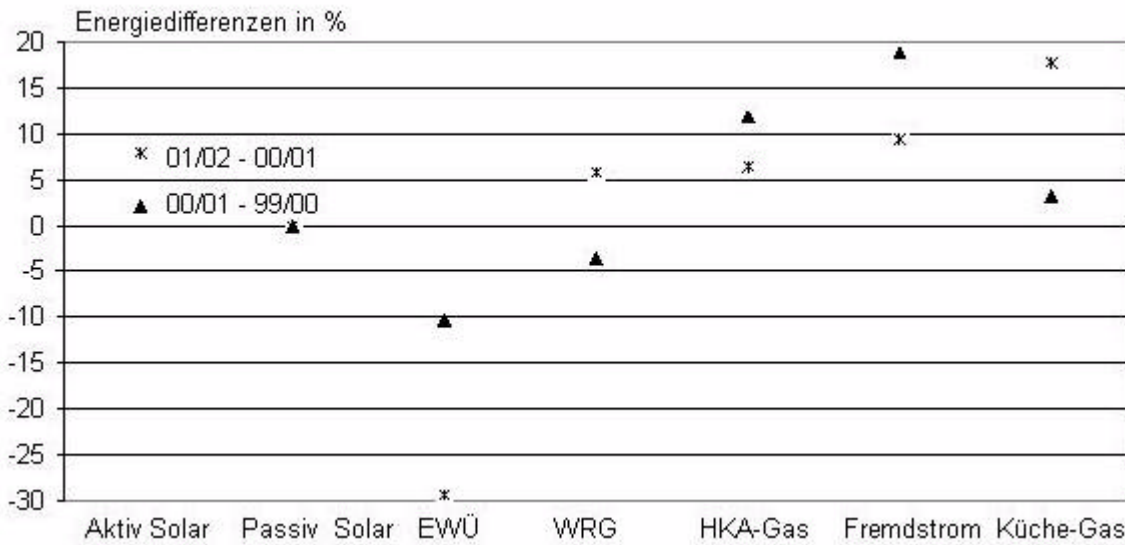


Abbildung 2.7: Aufgetragen sind die relativen Abweichungen in den Nutzenergien zwischen den Messjahren, Bezugsgröße ist der jeweilige Mittelwert aus den drei Jahren.

Während eine detaillierte Betrachtung der Erträge des Lüftungs- und aktiv-solaren Heizsystems in 2.2.4 ab S. 43 bzw. in 2.2.5 ab S. 45 erfolgen soll, steht in diesem Abschnitt die Analyse der fossilen Energieströme im Mittelpunkt.

Ein wesentlicher Trend, der sich aus den beiden Darstellungen ergibt, ist die Zunahme im Fremdstrombezug, die zwischen 00/01 und 01/02 etwa 4 % und von 99/00 auf 00/01 sogar fast 18 % beträgt. Bewertet man den Gas- und Fremdstrombezug primärenergetisch nach [DIN4701]⁸, so ergibt sich die Darstellung in Abbildung 2.8.

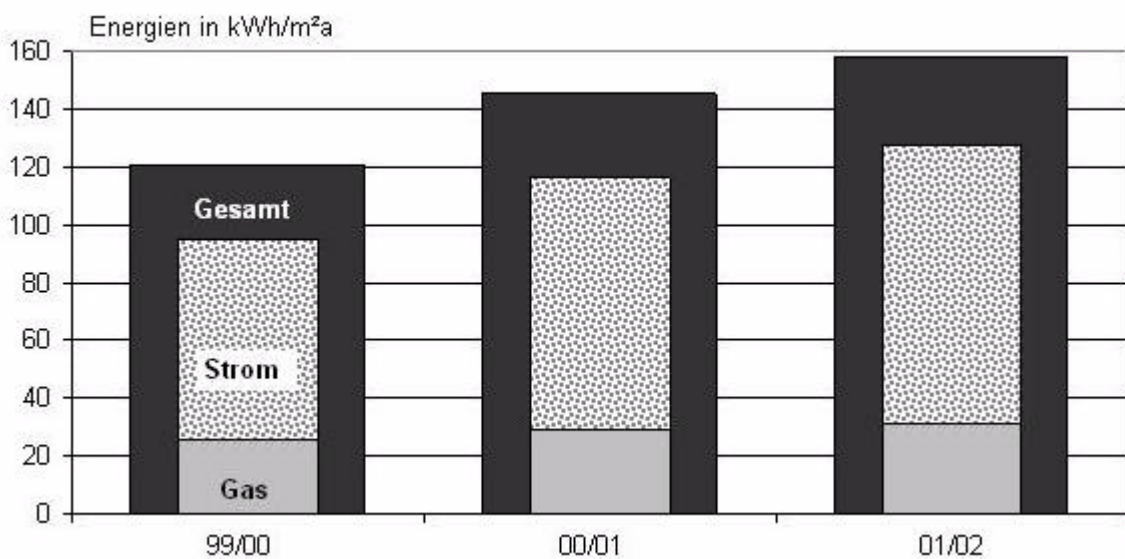


Abbildung 2.8: Gas- und Fremdstrombezug primärenergetisch bewertet für die drei Messjahre.

8. Danach wird der primärenergetische Aufwand zur Bereitstellung von einer kWh Gas bzw. Strom mit $f_{p, Gas} = 1.1$ bzw. $f_{p, el} = 3$ bewertet.

Bemerkenswert an diesem Diagramm ist, dass in der ersten Periode die primärenergetisch bewertete Gesamtenergie sogar unter $120 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ liegt. Dieser Wert wird für Wohnhäuser im Passivhausstandard als Obergrenze angesehen, vgl. z.B. [Afjei00]. Da in diesem Gebäude jedoch der Strom überwiegend für Büro Zwecke benötigt wird, ist der Anstieg in den drei Jahren nicht erstaunlich, bedingt durch die Zunahme an Bürogeräten sowie der im Bürobereich Beschäftigten.

Der ebenfalls zu verzeichnende Anstieg im Gasbezug ist jedoch nicht durch den erhöhten Strombedarf zu erklären, da das Klein-BHKW wärme gesteuert und nicht stromgesteuert betrieben wird. Der erhöhte Gasbezug kann somit als Ausdruck des gestiegenen Raumheizbedarfes sowie des erhöhten Bedarfes zur Brauchwassererwärmung gewertet werden.

Bei Auswertung des Trinkwarmwasserbedarfes findet sich diese Vermutung bestätigt. Vom ersten auf das zweite Messjahr ist der Anstieg am höchsten, vom zweiten auf das dritte Messjahr steigt der Trinkwarmwasserbedarf zwar nicht in der Summe an, liegt aber während der Heizzeit um 16 % über dem des Jahres 00/01. Die Werte im einzelnen sind Tabelle 2.2 zu entnehmen.

Tabelle 2.2: Erforderliche Energie zur Brauchwassererwärmung für die drei Messjahre sowie die Heizperioden (WRG-Betriebszeit) innerhalb der Jahre.

	99/00	00/01	01/02
Summe kWh/m ² a	2.8	3.3	2.9
Summe kWh/m ² a für Okt-Apr	1.8	1.7	2.0

Zu dem gestiegenen Warmwasserbedarf passt auch der Anstieg im Gasbezug für die Küche, was auf einen verstärkten Seminarbetrieb hindeutet: So werden im Rahmen von z.B. Handwerkerschulungen in den Pausen auch Speisen angeboten, die in der hauseigenen Küche zubereitet werden.

Der Raumheizenergieverbrauch ist während der drei Messjahre ebenfalls kontinuierlich gestiegen, während sich die maximale Heizlast praktisch nicht verändert hat, die Werte sind Tabelle 2.3 zu entnehmen.

Tabelle 2.3: Gemessener Raumheizenergieverbrauch und maximale Heizlast (Tagesmittel) bezogen auf die Energiebezugsfläche des Gebäudes für die drei Messjahre. Beim Wert für den Winter 99/00 ist anzumerken, dass am ersten Tag der Heizperiode (9.11.99) ein noch höherer Wert von 9.5 W/m^2 gemessen wurde, dieser Wert ist jedoch Ausdruck einer nicht funktionierenden Regelentscheidung und wird daher außer Acht gelassen, vgl. dazu auch 2.2.1 ab S. 33.

	99/00	00/01	01/02
Raumheizenergieverbrauch kWh/m ² a	12.4	14.7	15.0
Max. Heizlast W/m ²	8.4	8.0	8.1

Auffallend ist der Anstieg des Raumheizenergieverbrauchs vom ersten auf das zweite Jahr, die Werte des zweiten und dritten Jahres sind praktisch identisch entgegen dem bundesweiten Trend aufgrund einer insgesamt kühleren Witterung im Vergleich zum Vorjahr [Wittke02]. Da die klimatischen Randbedingungen in den drei Jahren vergleichbar waren, ist diese Entwicklung offensichtlich durch interne Ursachen bedingt. Der niedrige Werte in 99/00 könnte z.B. mit darauf beruhen, dass in dieser Heizperiode Algorithmen zur Heizungsregelung über die DDC noch nicht optimal funktionierten, was bis zur nächsten Heizperiode in 00/01 aber der Fall war. Diese These würde gestützt durch den geringen Unterschied zum Wert der Heizperiode 01/02.

Angesichts des Maximalwertes der Heizlast aus allen drei Jahren von 8.4 W/m^2 ist wichtig festzustellen, dass der Wert stets unter 10 W/m^2 liegt. Dieser Wert wird von [Endbericht02] als obere Grenze für das Passivhaus-Konzept genannt: Die Heizleistung ist dann stets so gering, dass sie allein über die aus hygienischen Gründen erforderliche Zuluft ins Gebäude eingebracht werden kann, ohne dass ein zusätzliches Heizsystem erforderlich ist.

Die Abhängigkeit der Heizlast von den klimatischen Randbedingungen wird in 2.2.7 ab S. 59 noch näher behandelt.

Abschließend bleibt festzustellen, dass der gemessene Raumheizenergieverbrauch nie über der für Passivhäuser nach [PHPP98] gesetzten Grenze von $15 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ liegt. Allerdings ist für diese Größe ebenso wie für den Strom- und Gasbezug eine deutliche Zunahme über die drei Jahre zu verzeichnen. Eine wichtige Ursache für den steigenden Strombezug ist einerseits eine Zunahme an Bürogeräten sowie andererseits eine steigende Zahl von Beschäftigten in diesem Bereich. Für den Anstieg des Raumheizenergieverbrauchs vom ersten zum zweiten Winter dürfte die Korrektur von Regelalgorithmen in der DDC eine wichtige Rolle gespielt haben.

2.2.4 Bewertung des aktiv-solaren Heizsystems

Im Folgenden soll zunächst der Betrieb der Solaranlage näher betrachtet werden. Dafür wurden der Solarertrag (gemessen im Sekundärkreis, also abzüglich der Leitungs- und Wärmeübertragerverluste) sowie die Einstrahlung (gemessen in Kollektorebene) als Monatswerte über der Zeit aufgetragen, wie Abbildung 2.9 zu entnehmen ist.

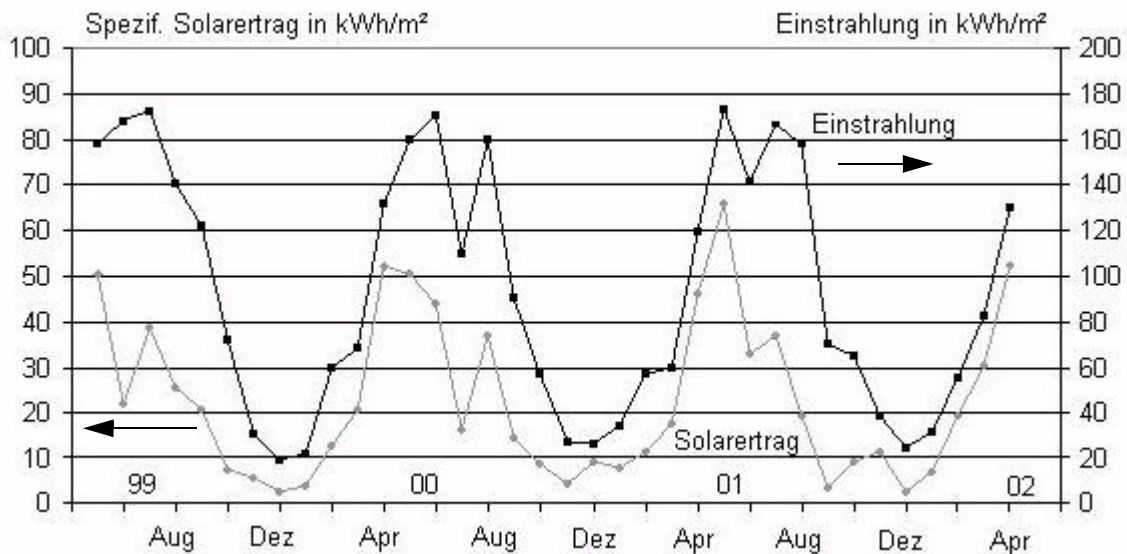


Abbildung 2.9: Aufgetragen sind der Solarertrag bezogen auf die Kollektorfläche sowie die Einstrahlung in Kollektorebene für die drei Messjahre auf Basis von Monatssummen.ⁱ

- i. Auffallend ist der geringe Wert der Einstrahlung im Juli (insbesondere im Jahr 2000). Um einen Messfehler beispielsweise durch Verschattung des Strahlungsmessgerätes auszuschließen, wurden Messwerte eines nahe gelegenen Standorts (Marburg-Wehrda) herangezogen, die den im Passiv-Solarhaus in Cölbe gemessenen Wert aber bestätigten.

Der Verlauf des gemessenen Solarertrags ist interessant hinsichtlich des Ladezustands des Saisonspeichers. So ist in allen drei Jahren der Solarertrag in den Monaten Juni-August niedriger als in anderen Monaten mit vergleichbarer Einstrahlung (oder sogar höherer Einstrahlung im Fall des Julis). Dieser verminderte Ertrag geht darauf zurück, dass der Saisonspeicher zu dieser Zeit bereits sehr stark aufgeheizt ist und eine weitere Beladung nur noch bedingt möglich ist, auch wenn das ganze Jahr über Energie zur Trinkwassererwärmung erforderlich ist. Allerdings ist die benötigte Energie zur Trinkwassererwärmung so gering, dass daraus keine nennenswerte Verlängerung der Kollektorlaufzeit resultiert. Aufgrund des gewählten Verhältnisses von Kollektorfläche zu Speichervolumen sind Stillstandszeiten im Sommer unumgänglich, da das maximale Strahlungsangebot anfällt, wenn der Energiebedarf des Gebäudes am geringsten ist.

Den zeitlichen Verlauf des Speicherzustands zeigt Abbildung 2.10 exemplarisch für ein Messjahr beginnend am 1. Mai 1999, der gewählte Zeitraum kann als typisch für entsprechende Sequenzen der drei Messjahre angesehen werden.

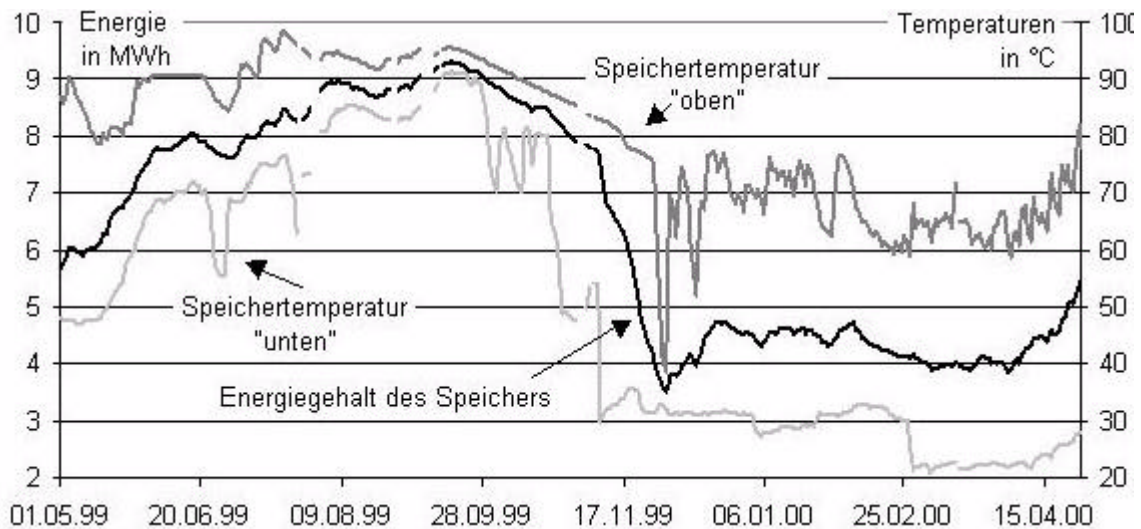


Abbildung 2.10: Dargestellt sind Tagesmittelwerte der Temperatur oben und unten im Speicher sowie der berechnete Speicherenergiegehalt. Die Lücken in den Meßkurven resultieren aus Messdatenausfällen.

Auch die Abbildung 2.10 veranschaulicht, dass sich die Speichertemperaturen bereits relativ früh im Sommer auf einem sehr hohen Niveau befinden. Von Mitte September bis zur ersten Novemberwoche kühlt sich der obere Teil des Speichers lediglich aufgrund von Verlusten ab. Die daraus ermittelte Verlustleistung beträgt etwa 950 W bei 95 °C, der mittlere Wärmedurchgangskoeffizient des Speichers beträgt nach [John02] 0.12 W/m²K. Dieser niedrige Wert zeigt, dass die Dämmung des Speichers sehr gut ausgeführt wurde, so dass die zusätzliche Erwärmung des Gebäudes durch die gerade im Sommer maximale Speicherverlustleistung vernachlässigbar ist.

Nach Beginn der Heizzeit Anfang Dezember ist der obere Speicherbereich rasch entladen, die Temperatur oben im Speicher sinkt kurzzeitig sogar auf 40 °C ab, bevor durch das Klein-BHKW ein Bereitschaftsvolumen im oberen Speicherdrittel wieder auf eine Temperatur von 60 – 70 °C aufgeheizt wird. Ein Unterschreiten dieser Temperatur wurde in den darauffolgenden Jahren durch entsprechende Anpassungen an den Regelstrategien verhindert.

Insgesamt wird durch die Solaranlage eine solare Deckung von $f_{sol} = 40\%$ erreicht, wobei diese als Verhältnis der solar bereitgestellten Energie Q_{sol} bezogen auf die Summe von solarer

und fossiler Energie Q_{BHKW} definiert ist (wie üblich ohne Berücksichtigung von z.B. Speicher- und Leitungsverlusten oder internen Gewinnen des Gebäudes):

$$f_{sol} = \frac{Q_{sol}}{Q_{BHKW} + Q_{sol}} \quad (2.1)$$

Auch sind aufgrund der guten Speicherisolation die Speicherverluste sehr gering, so dass die hohen Temperaturen im Speicher lange aufrecht erhalten werden können. Die Dreischicht- Be- bzw. Entladung sorgt zudem dafür, dass die Temperaturschichtung im Speicher aufgebaut und nicht zerstört wird. Allerdings kommt es im Sommer zu Stillstandszeiten der Solaranlage, in der keine weitere Speicherbeladung mehr möglich ist. Diese Stillstandszeiten ließen sich durch eine Verkleinerung des Verhältnisses aus Kollektorfläche zu Speichervolumen verringern. Dass das Verhältnis dennoch so hoch gewählt wurde, kann nach [ISE00] als “konsequente Demonstration der Produktpalette der Firma Wagner & Co Solartechnik” gewertet werden.

2.2.5 Bewertung des Lüftungssystems

Nach einer energetischen Bilanzierung der Erträge des Erdreichwärmeübertragers und der Wärmerückgewinnung soll insbesondere das Zusammenspiel aus zentraler Zuluftvorerwärmung durch die Wärmerückgewinnung und dezentraler Nacherhitzung durch die Luft-Wasser-Wärmeübertrager betrachtet werden.

Energiebilanz des Erdreichwärmeübertragers und der Wärmerückgewinnung

Bei der Betrachtung dieses Teilaspekts soll die Frage im Mittelpunkt stehen, ob der Erdreichwärmeübertrager trotz seines fehlenden Bypasses als energetisch rentabel angesehen werden kann. So kommt es aufgrund des Dauerbetriebs des Erdreichwärmeübertragers zu jeder Jahreszeit dazu, dass der EWÜ zeitweise Fehlerträge liefert. So liefert er stundenweise außerhalb der Heizzeit (definiert durch das Bypassen der Wärmerückgewinnung) Heizerträge, obwohl diese nicht erwünscht sind. Umgekehrt treten während der Heizzeit (wenn mindestens die WRG in Betrieb ist) immer wieder Kühlerträge auf, die von der WRG und oder den Luft-Wasser-Heizregistern kompensiert werden müssen. Die Bedeutung der Fehlerträge soll nach den beiden genannten Zeiträumen getrennt diskutiert werden.

Im Sommer wird zur Kühlung des Gebäudes, wie bereits in Kapitel 1.1.3 ab S. 22 beschrieben, von der aktiven Nachtlüftung Gebrauch gemacht, während tagsüber die Luft nur durch den Erdreichwärmeübertrager vortemperiert wird. Da insbesondere an heißen Tagen die Umgebungstemperatur schon sehr früh morgens über der Erdtemperatur liegt, liefert der EWÜ tagsüber tatsächlich praktisch ausschließlich wie gewünscht einen Kühlertrag. Am Abend sinkt die Umgebungstemperatur unter die Temperatur des Erdreiches, der EWÜ beginnt zu heizen. Zu

diesem Zeitpunkt liegt jedoch die Umgebungstemperatur auch so weit unter der mittleren Gebäudetemperatur, dass die aktive Nachtlüftung beginnt.

Der Kühlertrag der aktiven Nachtlüftung kompensiert bei weitem den unerwünschten Heiz-ertrag des EWÜ, wie exemplarisch mit Abbildung 2.11 verdeutlicht werden kann.

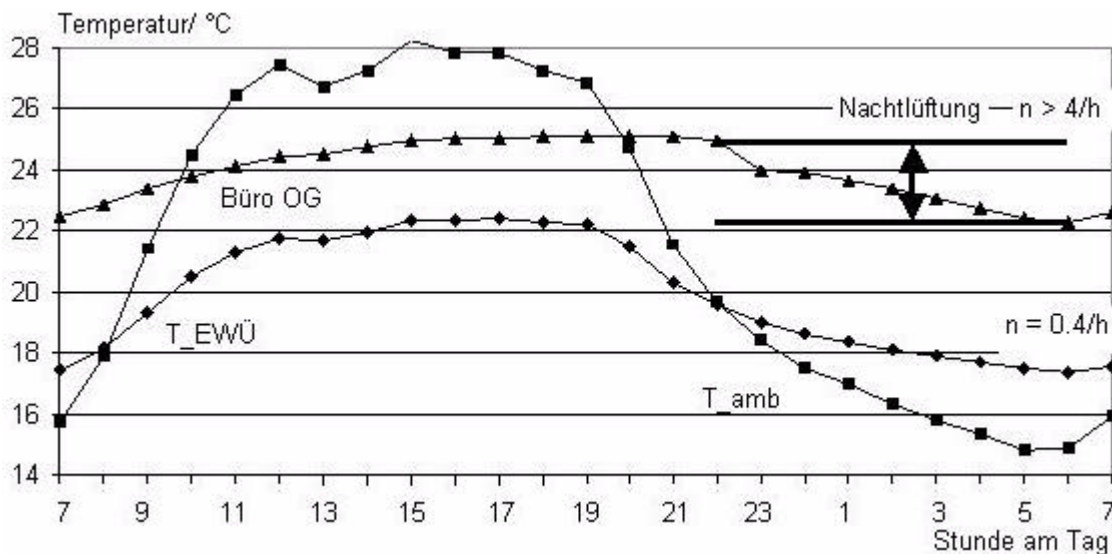


Abbildung 2.11: Stundenmittelwerte der gemessenen maximalen Gebäudetemperatur (Büro OG), der Austrittstemperatur des EWÜ ($T_{EWÜ}$) und der Umgebungstemperatur (T_{amb}) für den 1. August 2000. Eingezeichnet ist der Effekt im Absinken der Gebäudetemperatur bedingt durch die aktive Nachtlüftung. Eingelesen ist ferner der Luftwechsel tagsüber durch die Lüftungsanlage (ca. 0.4/h) sowie der sich etwa bei der aktiven Nachtlüftung ergebende (mindestens 4/h).

So erkennt man, dass an dem beispielhaft ausgewählten 1.8.00 die Austrittstemperatur des EWÜ bereits ab ca. 8 Uhr am Morgen unter der Umgebungstemperatur liegt, so dass der Erdreichwärmeübertrager bis ca. 22 Uhr eine Überhitzung des Gebäudes vermindern hilft. Nach 22 Uhr jedoch kann dem Gebäude nicht die Frischluft bei Umgebungstemperatur zugeführt werden, stattdessen wird diese vom EWÜ unerwünscht vorerwärmt, was aber andererseits auch der Regeneration der Erdreichtemperaturverteilung nützt. Ungefähr zur gleichen Zeit kommt es aber zur Durchströmung des Gebäudes mit der abgekühlten Umgebungsluft infolge der aktiven Nachtlüftung. Es kann durch Abschätzungen davon ausgegangen werden, dass der durch thermosiphonischen Auftrieb zustande gekommene Luftwechsel mehr als zehnmal so hoch ist wie der durch die Lüftungsanlage verursachte. Somit wird die unerwünschte Erwärmung durch den Erdreichwärmeübertrager in jedem Fall kompensiert. Abbildung 2.11 ist aber auch zu entnehmen, dass trotz der Kühlmaßnahmen die Gebäudetemperatur in Hitzeperioden allmählich ansteigt, da die Temperatur am Morgen des Folgetags über der des Ausgangstags liegt.

Als Fazit läßt sich für den exemplarisch betrachteten Sommerfall ziehen, dass der Erdreichwärmeeübertrager nachts einen unerwünschten Fehlertrag liefert, der allerdings vom Betrag her nicht ins Gewicht fällt und somit durch die aktive Nachtlüftung kompensiert wird. Trotzdem wäre für diese Zeiten eine Bypassmöglichkeit wünschenswert. Denn da sich Beginn und Ende der aktiven Nachtlüftung an der mittleren Gebäudetemperatur orientieren, kann es unterstützt durch den Fehlbetrieb des EWÜ zu einem Aufschaukeln der Temperatur in einzelnen Gebäudebereichen kommen, die durch die gezielte Nachtlüftung nicht genügend gekühlt werden können. Dagegen dürfte der positive Aspekt des nächtlichen Heizens - die Kühlung des Erdreichs - eher unerheblich sein, da sich im Fall des Erdreichs Temperaturlausgleichsprozesse auf sehr großen Zeitskalen abspielen.

Zu Fehlerträgen des EWÜ kommt es aber auch in der Heizzeit und zwar insbesondere tagsüber in den Übergangszeiten, wenn ausschließlich die WRG zur Vorerwärmung der Luft genutzt wird und weniger in der "Kern-Heizzeit", wenn zusätzlich die Luft-Wasser-Wärmeeübertrager zur Nacherwärmung der Zuluft in Betrieb sind. Doch ähnlich wie im Sommer fallen die Fehlerträge des Erdreichwärmeeübertragers auch zu dieser Zeit betragsmäßig nicht ins Gewicht, wie Abbildung 2.12 veranschaulicht.

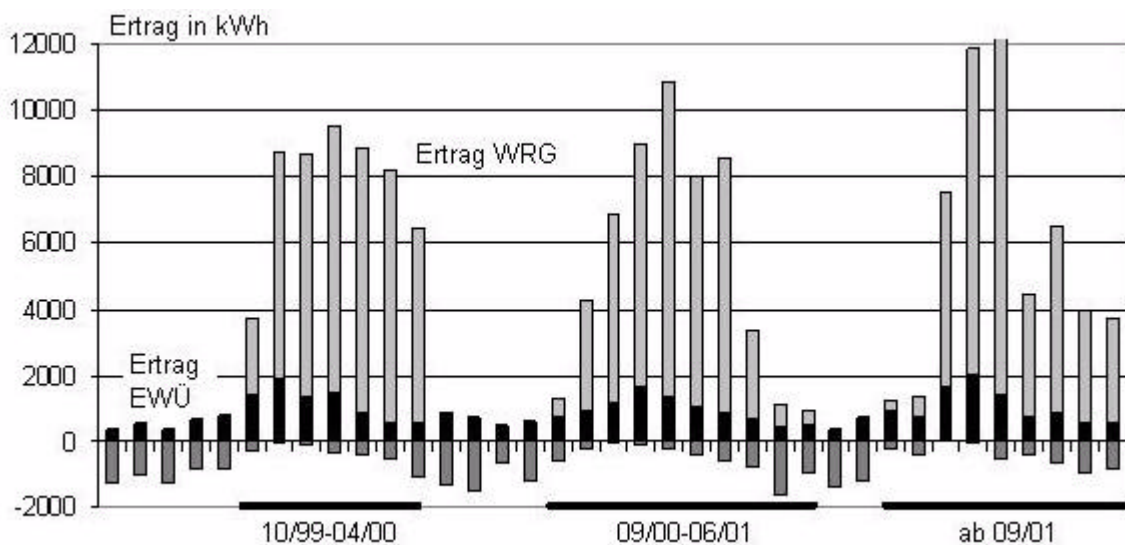


Abbildung 2.12: Aufgetragen sind die Erträge von EWÜ und WRG über die gemessenen drei Jahre (05/99-04/02), Kühlerträge haben ein negatives Vorzeichen, Heizerträge sind positiv aufgetragen. Markiert sind jeweils die Zeiträume, in denen die WRG in Betrieb ist.

Zwar arbeitet der EWÜ ganzjährig im Mischbetrieb, d.h. Heizen und Kühlen treten zusammen in allen Zeiträumen auf, aber der Ertrag der WRG in der Heizzeit liegt mindestens eine Größenordnung über dem Fehlertrag des Erdreichwärmeeübertragers und kompensiert diesen, ohne dass dazu fossile Energie etwa durch die Nacherwärmung in den Luft-Wasser-Wärmeeübertragern erforderlich wäre.

Ein Aspekt, der EWÜ in der Heizzeit positiv angerechnet wird, ist die Frostsicherung, vgl. z.B. [Benkert00]. So darf die Außenluft vor Eintritt in die WRG -2 °C ⁹ nicht unterschreiten, um ein Einfrieren des Kondensats auf der Fortluftseite zu verhindern. Ermittelt man die Anzahl der Stunden, in denen dies im Passiv-Solarhaus der Fall war und vergleicht sie mit den Fehlerträgen durch den EWÜ im gleichen Zeitraum, so ergibt sich die Darstellung in Abbildung 2.13, konkret sind zur Frostsicherung die in Tabelle 2.4 aufgelisteten Energiebeträge erforderlich.

Tabelle 2.4: Erforderliche Energie zur Frostsicherung der WRG. Zusätzlich ist die Anzahl der Stunden angegeben, in der die Außentemperatur -2 °C unterschritt.

Zeitraum	Stundenzahl	Energie in kWh
09/99-04/00	154	461
10/00-06/01	272	807
09/01-05/02	392	1305

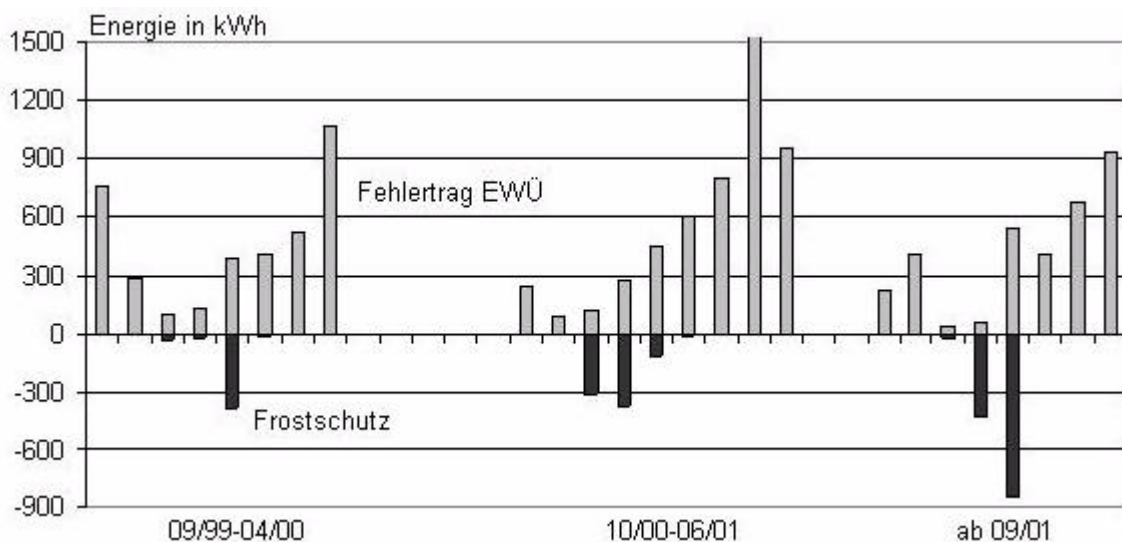


Abbildung 2.13: Aufgetragen ist in grau der Betrag des Fehlertrags des EWÜ (also vorzeichenfrei), während des WRG-Betriebs sowie die zur Frostsicherung der WRG erforderliche Energie in schwarz.

Während der EWÜ die Frostsicherung stets gewährleisten konnte, wäre andernfalls z.B. ein elektrischer Heizstab erforderlich gewesen. Im Fall der realisierten Hydraulik in Cölbe wäre es jedoch auch denkbar gewesen, die Frostsicherung mittels eines weiteren Luft-Wasser-Registers zu realisieren, was primärenergetisch im Vergleich zur elektrischen Heizung die bessere Wahl gewesen wäre und hinsichtlich des Installationsaufwands ebenfalls vertretbar gewesen wäre.

9. Nach [DIN4701] liegt die Grenztemperatur bei einer Rückwärmzahl von mindestens 0.8 sogar bei -2.5 °C .

Die Bedeutung von Erdreichwärmeübertragern für die Frostsicherung von Wärmerückgewinnungen wird z.B. in [Otte00] und [Dibowski00] kritisch hinterfragt. Neben dem hohen Investitions- und Flächenbedarf für die Realisierung von Erdreichwärmeübertragern wird speziell in [Dibowski00] auch der Aspekt genannt, dass die Erdreichtemperatur gerade dann am tiefsten sein kann, wenn die niedrigsten Werte der Umgebungstemperatur auftreten, so dass der EWÜ eben nicht mehr als Frostsicherung ausreicht und noch eine zusätzliche Maßnahme, wie z.B. ein Heizstab ohnehin erforderlich ist.

Zusammenfassend muss der Nutzen des EWÜ im Passiv-Solarhaus Cölbe also durchaus kritisch hinterfragt werden. Unstrittig ist sein Beitrag zur Vorkühlung der Zuluft tagsüber im Sommer, obgleich er nachts häufig einen Fehlertrag liefert, der aber weitgehend unerheblich ist, da er durch die aktive Nachtkühlung ausgeglichen werden kann. Die Vorerwärmung der Luft im Winter fällt im Vergleich zum Ertrag der hocheffizienten Wärmerückgewinnung dagegen kaum ins Gewicht, so dass der EWÜ für diesen Zeitraum verzichtbar wäre. Die Frostsicherung ließe sich z.B. durch einen weiteren Luft-Wasser-Wärmeübertrager realisieren, was auch bei primärenergetischer Betrachtung akzeptabel wäre.

Unter Berücksichtigung der Bewertung des EWÜ für die Heizzeit muß also die Frage gestellt werden, ob die Investitionskosten des EWÜ von ca. 25600 Euro [Schweitzer03] tatsächlich sinnvoll sind, insbesondere wenn man den im allgemeinen nicht zu unterschätzenden Flächenverbrauch des EWÜ berücksichtigt.

Eine Alternative wäre z.B. die “adiabate Kühlung”¹⁰ [Reuscher99] zur sommerlichen Kühlung der Zuluft, für Heizung und Kühlung wäre der Einsatz eines Wärmepumpen-Kompaktgeräts denkbar, wie es z.B. [Bühning01] vorstellt. Derartige Systeme zeichnen sich mittlerweile durch hohe Arbeitszahlen aus, sodass ihr Einsatz auch primärenergetisch gerechtfertigt ist und erfordern im Vergleich zum EWÜ maximal halb so hohe [Bühning01] Investitionskosten. Zudem entfällt der Flächenverbrauch, der insbesondere im städtischen Bau nicht nur ein finanzielles Problem darstellen kann. Allerdings entfallen bei einem EWÜ Wartungsaufgaben praktisch vollständig, was bei den genannten aktiven Systemen (Wärmepumpen-Kompaktgerät, “adiabate Kühlung”) nicht der Fall ist.

10. Diese Bezeichnung entspricht mehr einer intuitiven Beschreibung als einer physikalischen Bezeichnung, vgl. für die Definition von adiabate z.B. [Cerbe96]. Das Prinzip besteht darin, dass der Abluftvolumenstrom befeuchtet wird, durch die Verdunstung des Wasser sinkt die Temperatur und kühlt somit in einem nachgeschalteten Wärmeübertrager die Zuluft.

Zusammenspiel von Wärmerückgewinnung und dezentralen Luft-Wasser-Wärmeübertragern

Reicht während der Heizzeit die Vorerwärmung durch WRG bzw. WRG und EWÜ nicht aus, so werden die Luft-Wasser-Wärmeübertrager zur Nacherhitzung der Zuluft genutzt. Dabei dient das zentrale Vorheizregister (VHR) zur Erhitzung der Zuluft auf das Minimum der von den neun thermischen Zonen geforderten Zulufttemperatur-Sollwerte. Darüber hinaus kann dann eine dezentrale Nacherhitzung je nach zonalem Bedarf erfolgen.

Die WRG lässt sich in dieses Konzept unterschiedlich einbinden. So richtete sich die Bypass-Regelung in den ersten beiden Winterperioden nach dem maximalen zonalen Heizbedarf. Das führte dazu, dass in Zonen mit geringerem Heizbedarf die Zulufttemperatur überschritten wurde. Diesen Zonen wurde folglich mehr Raumheizenergie zugeführt als angefordert, was zum Teil zu vermehrter Fensterlüftung führte. In der letzten Heizperiode wurde von diesem Konzept abgerückt, die Bypass-Regelung wurde nun nach der minimalen zonalen Zuluft-Solltemperatur ausgerichtet. Dieses Konzept verhinderte zwar die zonale Überschreitung der Zuluft-Solltemperatur, hatte jedoch andererseits den verstärkten Einsatz einzelner Nachheizregister zur Folge bei gleichzeitigem Minderertrag der Wärmerückgewinnung.

Dieser Effekt soll nun im Folgenden quantifiziert werden, wobei zunächst eine Einordnung der thermischen Zonen gemäß ihres Heizwärmebedarfs erfolgen soll.

Grundsätzlich lassen sich die thermischen Zonen¹¹ wie in Tabelle 2.5 und Tabelle 2.6 veranschaulicht charakterisieren.

Tabelle 2.5: Charakteristik der thermischen Zonen des Gebäudes. Bei den Werten für die internen Gewinne Q_{PC} bezogen auf die jeweilige Zonengrundfläche nur aufgrund der installierten PC wurde von der Normzahl der Arbeitsstunden von 2750 h/a nach [Volz] sowie einer Leistungsaufnahme von 70 W pro Gerät ausgegangen. Auch muß diese Zahl als Abschätzung betrachtet werden, da die Personenzahl und damit die Anzahl der PC pro Zone nicht konstant war.

Zone	Anmeldung	Werkstatt	Büro EG	Rundbau OG
Abkürzung	RBEG	Werk	BEG	RBOG
$A_{Fenster}/A_{Wand}$ in %	30	15	13	14
$A_{F,Sued}/A_{Wand}$ in %	67	0	30	17
$A_{F,Ost}/A_{Wand}$ in %	0	38	17	0
$A_{F,West}/A_{Wand}$ in %	36	0	0	18
V_{Zone}/V_{Gesamt} in %	19	10	5	18
Q_{PC}^i in kWh/m ² a	1.2	1.1	13.6	7.0
Nutzung	Kundenempfang und Ausstellung, Postbereich integriert	Handwerkliche Arbeiten, Lagerbetrieb	Einzelarbeitsplätze und kleinere Gruppenbüros	Bürozone und kleiner Kommunikations bereich
Besonderheiten	Häufiges Öffnen der Außentür	Häufiges Öffnen der Außentore	keine	Geschossdecke und -boden im Speicherbereich durchbrochen

i. Zum Zeitpunkt der Arbeit waren Flachbildschirme nur an wenigen Arbeitsplätzen im Einsatz.

11. Gemäß der Anzahl der Nachheizregister verfügt das Gebäude über neun thermische Zonen. Für diese Übersicht hinsichtlich der Nutzung wurden jedoch die zwei Großraumbüro-Zonen im OG zusammengefasst.

Tabelle 2.6: Fortsetzung von Tabelle 2.5.

Zone	Großraumbüro OG	Kommunikation	Seminarräume	Kantine
Abkürzung	BOG	Komm	SR	Kant
$A_{Fenster}/A_{Wand}$ in %	22	7	14	22
$A_{F,Sued}/A_{Wand}$ in %	32	30	0	55
$A_{F,Ost}/A_{Wand}$ in %	24	0	0	14
$A_{F,West}/A_{Wand}$ in %	0	0	14	0
V_{Zone}/V_{Gesamt} in %	18	6	9	14
Q_{PC} in kWh/m ² a	18.7	0	0	0
Nutzung	Büroarbeitsplätze	Aufenthaltszone bei Seminar betrieb	Seminare, interne Besprechungen	Kantine, größere Veranstaltungen
Besonderheiten	Hohe Personen- und PC-Dichte	Nur temporäre Nutzung	Häufige Nutzung für interne Zwecke	Kantinenbetrieb nur zwischen ca. 12 und 14 Uhr

Auffallend sind die gravierenden Unterschiede in den internen Lasten, wobei dafür die PC-Anzahl als Maß genommen wurde. Diese sind Hauptursache für den unterschiedlichen zonalen Heizbedarf. Nicht zu vernachlässigen ist aber auch die Raumgeometrie, so ist die Zone Anmeldung nur von einer Person permanent besetzt. Da aber gerade diese Zone nicht nur eine große Flächenausdehnung hat sondern auch im Bereich des Saisonspeichers nach oben geöffnet ist, wird die tatsächliche Raumtemperatur eher als niedriger empfunden als das in einer Zone mit hoher Personendichte der Fall ist. Hinzu kommt in der Zone Anmeldung das häufige Öffnen der Schiebetüren nach außen, was jedes Mal zu einer Zugserscheinung führt.

Die quantitativen Unterschiede zwischen den Zonen werden deutlich, wenn man den Anteil der jeweiligen Zone am Gesamtheizbedarf im Vergleich zum Volumenanteil betrachtet, wie ihn Abbildung 2.14 zeigt.

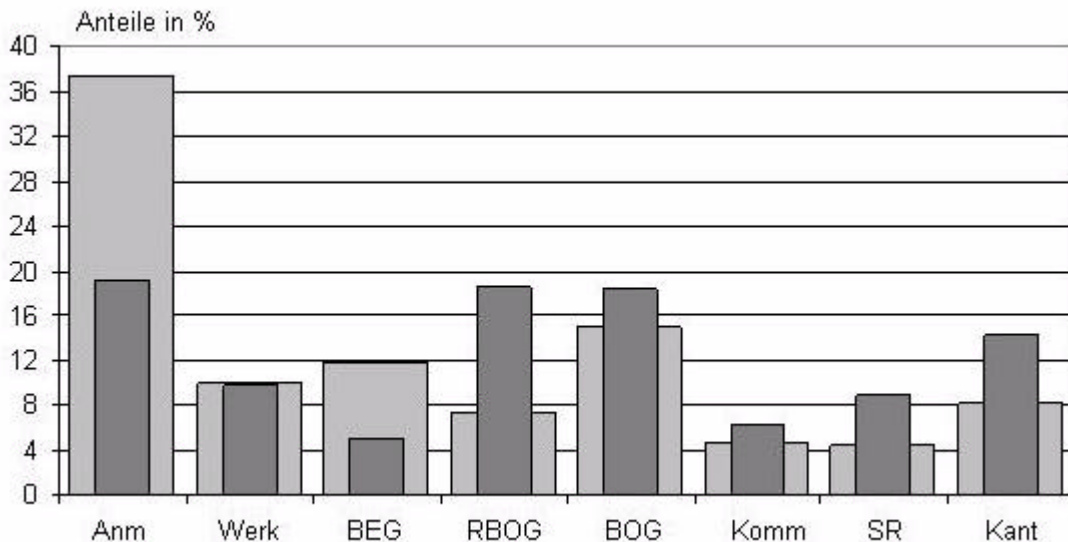


Abbildung 2.14: Aufgetragen sind die Anteile der Zonen am Gesamtheizenergieverbrauch exemplarisch für den Winter 99/00 in hellgrau. Die schmalen dunklen Balken zeigen den Volumenanteil der jeweiligen Zone am Gesamtvolumen des Gebäudes.

Die Auftragung in Abbildung 2.14 macht zum Einen die Bedeutung der dezentralen Zuluft-nacherwärmung deutlich, zum Anderen zeigt sie aber die Schwierigkeiten bei der Regelung der zentralen Erwärmungskomponenten. Wie bereits in 1.1.4 ab S. 24 dargestellt, gab es daher Änderungen an der Betriebsführungsstrategie. Infolgedessen wurde die WRG im Winter 01/02 weitaus weniger als 100 %¹² eingesetzt im Gegensatz zu den Vorjahren, obgleich die Außentemperatur als wichtigster Indikator für den Heizbedarf im Gebäude im Winter 01/02 zum Teil sogar unter den Werten des Vorjahres lag. Die Auswirkungen der geänderten Betriebs-

12. 100 % Wärmerückgewinnung bedeutet, dass die gesamte Frisch- bzw. Abluft über die vier Kreuzstromwärmeübertrager geführt wird, bei 0 % Wärmerückgewinnung wird der gesamte Frisch- bzw. Abluftvolumenstrom mittels der Bypassklappen an den Wärmeübertragern vorbeigeführt. Die Angabe in % bezieht sich also auf die Stellung der Bypassklappen an und ist damit ein Maß für den Luftvolumenstrom, der durch die Wärmerückgewinnung geführt wird.

führungsstrategien machen sich erwartungsgemäß vor allem in den Übergangszeiten bemerkbar. Diesen Effekt veranschaulicht Abbildung 2.15.

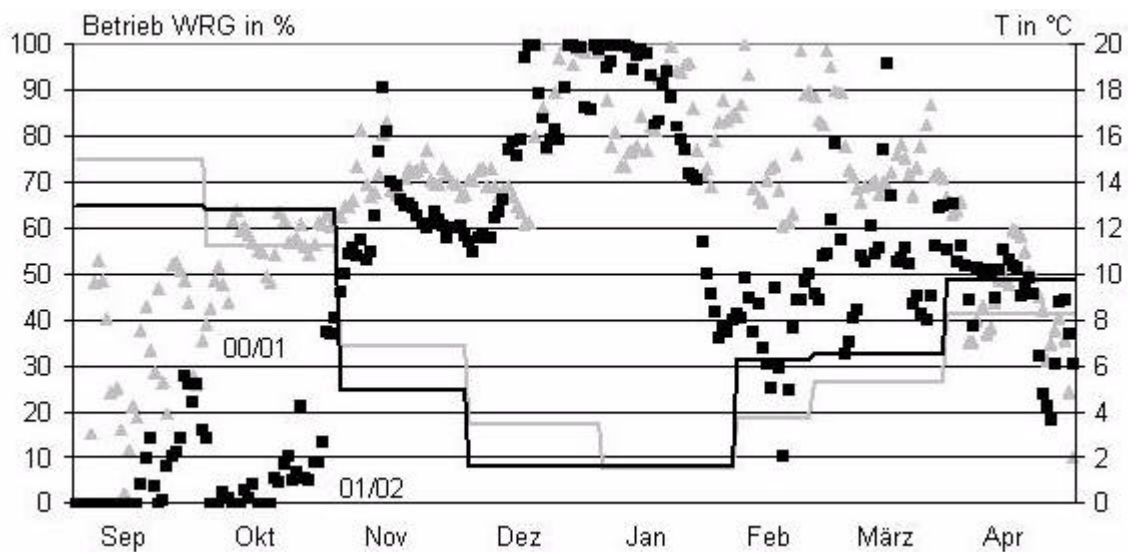


Abbildung 2.15: Aufgetragen ist der Betrieb in % der WRG für den Winter 00/01 (graue Dreiecke) und den Winter 01/02 (schwarze Quadrate). Zusätzlich ist das jeweilige Monatsmittel der Außentemperatur als durchgezogene Linie (grau: 00/01, schwarz: 01/02) eingezeichnet.

Die eingeschränkte Zulufterwärmung durch die WRG muß zwangsläufig von den Luft-Wasser-Wärmeübertragern kompensiert werden, was allerdings beim gemessenen (gesamten) Raumheizbedarf nicht ins Gewicht fällt. Dieser betrug im Zeitraum 05/00-04/01 $14.7 \text{ kWh/m}^2\text{a}$, in der darauffolgenden Periode $15.0 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ und ist somit quasi konstant geblieben, wenn klimatische Einflüsse unberücksichtigt bleiben. Angesichts des gleichbleibenden Heizenergieverbrauchs bei stark angestiegenen internen Gewinnen und tendenziell kühlerer bis vergleichbarer Witterung liegt der Schluss nahe, dass der Raumheizbedarf stark gestiegen ist. Diese Vermutung ist jedoch nicht zutreffend, da der Anstieg der internen Lasten insbesondere in der Zone BOG erfolgte, die aber für den gesamten Raumheizenergieverbrauch nur eine untergeordnete Rolle spielt, vgl. Abbildung 2.14.

Allerdings blieb auch nach Änderung des WRG-Betriebs die Grundproblematik im Gebäude bestehen, wie sich auch in [Mende02] widerspiegelt. Die Temperatur in der Zone Anmeldung wurde nach wie vor als eher zu kühl empfunden, im Bereich des Großraumbüros war es weiterhin tendenziell zu warm, was aber nach [Mende02] größtenteils akzeptiert wurde, indem durch entsprechende Kleidung darauf reagiert wurde. Als viel gravierender wurde von der Belegschaft die fehlende Möglichkeit zur Heizungsregelung eingestuft, ein Ergebnis, das auch z.B. die Untersuchung von [Hübner01] zeigt.

Abbildung 2.16 zeigt die Monatsmittelwerte der gemessenen Raumtemperaturen des Anmeldebereiches im Vergleich zu denen des Großraumbüros.

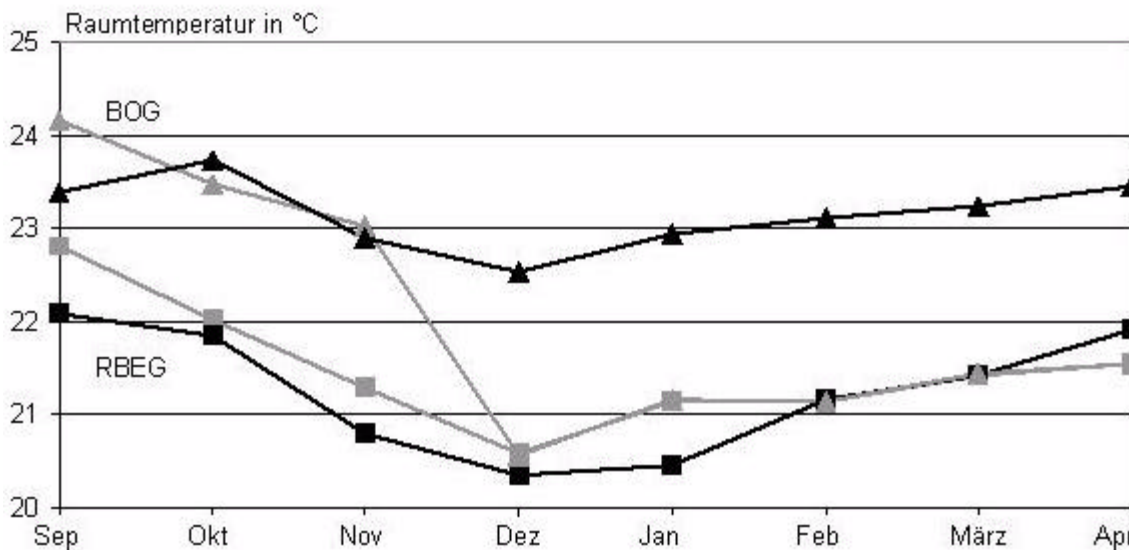


Abbildung 2.16: Vergleich der Monatsmittelwerte der gemessenen Raumtemperaturen für die Zonen Anmeldung (RBEG) und Großraumbüro (BOG). Die grauen Kurven gehören zum Winter 00/01, die schwarzen zum Winter 01/02. Dabei werden die Messwerte im RBEG jeweils durch Quadrate symbolisiert, die entsprechenden Werte im BOG durch Dreiecke.

Anders als bei [Schwab96] beschrieben, bewegt sich das Temperaturniveau in der Heizzeit selbst in der kühlest Zone (RBEG) in dem aus dem Wohnungsbau bekannten Bereich, vgl. z.B. [Pfluger01] - was aber nach den vorherigen Ausführungen in jedem Fall als erwünscht angesehen werden kann.

Grundsätzlich fällt bei allen Messkurven das Absinken der Temperatur zu Beginn der “Kernheizzeit” auf, also zu Beginn der Periode, in der eine Nacherhitzung der Luft durch die Luft-Wasser-Wärmeübertrager notwendig ist. Während im Winter 00/01 die Werte für die beiden Zonen quasi zusammenfallen, lagen die Temperaturen im gesamten Winter 01/02 im Großraumbüro um etwa 1.5 K über denen in der Anmeldung, wobei die Differenz während der Kernheizzeit tendenziell noch größer war. Dieser geringe Temperaturunterschied ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die internen Lasten des Großraumbüros so groß waren¹³, dass sich die klimatischen Randbedingungen hier weniger stark auswirkten als in der Zone Anmeldung. Sie waren ebenfalls der Grund für das höhere Temperaturniveau. Hinsichtlich der Änderung der WRG-Betriebsführungsstrategie ist das Absinken der Raumtemperaturen in der Zone Anmeldung im Winter 01/02 im Vergleich zu den Werten des Winters 00/01 als Zeichen

13. So hat das gesamte Großraumbüro einen Anteil von ca. 70 % am Gesamtstrombedarf des Gebäudes, maßgeblich durch Bürogeräte verursacht, das heißt der Stromverbrauch unterliegt nur in geringem Maße jahreszeitlichen Schwankungen.

dafür zu werten, dass die Nacherhitzung durch das Luft-Wasser-Register nicht ausreichte, um den Heizbedarf zu decken.

Zusammenfassend läßt sich sagen, dass der zonal stark unterschiedliche Heizwärmebedarf zu Problemen bei der ausreichenden Beheizung der Zonen mit einem hohen Heizbedarf führte, während es in Zonen mit einem geringen Heizbedarf tendenziell zu einer Überschreitung des Raumsollwertes während der Heizperiode kam. Da diese Problematik während der Planungsphase unterschätzt und somit der Beitrag der zentralen Komponenten zur Lufterwärmung überschätzt wurde, ist insbesondere der Luft-Wasser-Wärmeübertrager für die Zone Anmeldung nicht ausreichend groß dimensioniert, so dass die Raumtemperatur dort als eher zu kühl empfunden wird.

Dieses Problem läßt sich mit der implementierten Technik offenbar auch nicht lösen, stattdessen wäre für diese Zone der zusätzliche Einsatz einer (Wasser-) Radiator-Heizung zu erwägen, was von der bestehenden Realisierung der Hydraulik prinzipiell möglich wäre. Dieser Radiator könnte in der Nähe des Empfangstresens installiert werden, was auch das subjektive Temperaturempfinden der dort Beschäftigten positiv beeinflussen würde.

2.2.6 Analyse der Raumtemperaturen für den Sommerfall

Entscheidend für die Bewertung des Konzeptes Passivhaus ist auch der Sommerfall, da aufgrund der guten Dämmung und der in diesem Gebäude zonenweisen hohen internen Lasten eine Überhitzung im Sommer zu befürchten sein könnte. Nach [AKP5] standen Bauexperten dem Funktionieren von Passivhäusern im Sommer tatsächlich kritischer gegenüber als das bezüglich des Winters der Fall war. Auch ist die Vermeidung der sommerlichen Überhitzung nach wie vor ein Forschungsgegenstand, wie z.B. die Arbeiten von [Wittwer98] und [Christoffers98] exemplarisch für die Aspekte Verglasung und Verschattung zeigen.

Im Folgenden sollen nun exemplarisch an vier Zonen im Gebäude die Innenraumtemperaturen in den drei Sommerperioden untersucht werden. Für die ersten beiden Sommerperioden wurde dies ausführlich bereits in [Spieler01] behandelt.

Für alle folgenden Auswertungen der Raumtemperaturen werden ausschließlich die über die DDC erfassten Temperaturmesswerte zu Grunde gelegt, die während einer Vergleichsmessung mit stand-alone Loggern gemessenen Temperaturen wurden aus den in Kapitel 2.1.4 ab S. 31 dargestellten Gründen nicht zur Korrektur der unkalibrierten DDC-Temperatursensoren verwendet.

Als Zonen wurden zum Einen die drei im Rundbau befindlichen Bereiche (Anm, RBOG, Komm) gewählt sowie das Großraumbüro im Obergeschoss (BOG). Zwischen den drei Rundbau-Zonen findet ein Luftaustausch statt, da das Gebäude in diesem Bereich rund um den Sai-

sonspeicher über durchbrochene Geschossdecken verfügt. An diesen drei Zonen sollte sich die Temperaturschichtung im Gebäude erkennen lassen. Davon abgetrennt ist das BOG, in dem aufgrund der hohen internen Lasten die Überhitzungsgefahr am größten ist. Wie in 2.2.4 ab S. 43 ausgeführt wurde, tragen die Speicherverluste aufgrund der sehr guten Dämmung nicht zu einer Erwärmung im Gebäude bei.

Für die drei Sommerperioden¹⁴ 99-01 wurden eine Klassifizierung der Häufigkeit der gemessenen Raumtemperaturen vorgenommen, d.h. es wurden Quantile (zur genauen Definition vgl. [DIN55350-21]) der Stundenmittelwerte gebildet. Somit läßt sich eine Aussage darüber treffen, wieviel Prozent der Werte oberhalb einer entsprechenden Temperatur liegen. Die Ergebnisse dieser Auswertung sind Tabelle 2.7 bis Tabelle 2.9 zu entnehmen, die graphische Darstellung befindet sich im Anhang in Abb. A.4, S. 81 und Abb. A.5, S. 82.

Tabelle 2.7: Auswertung der Quantile der Stundenmittelwerte der gemessenen Raumtemperaturen für die Zonen Anmeldung (RBEG), Rundbau OG (RBOG), Kommunikation (Komm) sowie das Großraumbüro im OG (BOG) für den Sommer 99.

	RBEG	RBOG	Komm	BOG
>24 °C in 50 %	ab 13 h	ab 12 h	ab 10 h	ab 10 h
>26 °C	nie	16 – 22 h : >5 %	12 – 24 h : >5 % 15 – 22 h : >16 %	14 – 21 h : >5 % 17 – 18 h : >16 %
>25 °C	11 – 3 h : >5 % 13 – 23 h : >16 %	immer: >5 % 13 – 24 h : >16 %	immer: >5 % 11 – 1 h : >16 %	10 – 24 h : >5 % 11 – 23 h : >16 %
>24 °C	immer: >16 % 13 – 23 h : >50 %	immer: >16 % 12 – 24 h : >50 %	immer: >50 % 15 – 23 h : >84 %	immer: >16 % 12 – 22 h : >50 %

Tabelle 2.8: Gleiche Darstellung wie in Tabelle 2.7 für den Sommer 00.

	RBEG	RBOG	Komm	BOG
>24 °C in 50 %	15 – 19 h	nie	nie	nie
>26 °C	nie	nie	12 – 2 h : >5 %	nie
>25 °C	nie	14 – 22 h : >5 %	immer: >5 % 12 – 6 h : >16 %	9 – 6 h : >5 % 14 – 21 h : >16 %
>24 °C	9 – 2 h : >5 % 12 – 23 h : >16 %	immer: >5 % 9 – 5 h : >16 %	immer: >16 %	immer: >16 % 15 – 19 h : >50 %

14. Als Sommerperiode wurde wieder der Zeitraum vom 1.6.-15.9. eines jeden Jahres definiert.

Tabelle 2.9: Gleiche Darstellung wie in Tabelle 2.7 und Tabelle 2.8 für den Sommer 01.

	RBEG	RBOG	Komm	BOG
>24 °C in 50 %	nie	nie	13 – 21 h	11 – 21 h
>26 °C	nie	nie	12 – 22 h : >5 % 14 – 21 h : >16 %	14 – 20 h : >5 %
>25 °C	15 – 19 h : >5 %	10 – 21 h : >5 % 16 – 18 h : >16 %	10 – 1 h : >5 % 18 – 22 h : >33 %	9 – 24 h : >5 % 15 – 19 h : >33 %
>24 °C	11 – 23 h : >5 % 14 – 20 h : >16 %	8 – 2 h : >5 % 13 – 20 h : >33 %	7 – 4 h : >5 % 13 – 21 h : >50 %	7 – 3 h : >5 % 11 – 21 h : >50 %

Grundsätzlich erkennt man, dass die Temperaturen im gesamten Gebäude 1999 höher lagen als in den darauffolgenden Sommerperioden. Allerdings ergeben sich durchaus Unterschiede zwischen den Zonen. So war das Temperaturniveau in den beiden Rundbauzonen im Erdgeschoss und im ersten Obergeschoss im Sommer 00 am geringsten, im Sommer 01 lag es etwas unter dem vom Sommer 99. Dieses Ergebnis läßt sich gut mit den klimatischen Randbedingungen in den jeweiligen Zeiträumen in Einklang bringen. So war der Sommer 99 sonnenreicher als die beiden anderen Vergleichszeiträume, insbesondere traten 99 mehr Tage mit einer hohen Einstrahlung auf. Da die Mittelwerte der Umgebungstemperaturen 99 und 01 sehr ähnlich waren, spiegeln die Raumtemperaturverhältnisse in den beiden Zonen offenbar die unterschiedlichen Strahlungsbedingungen wider. Anders verhielt es sich bei den Zonen Komm und BOG. In diesen beiden Zonen lag das mittlere Temperaturniveau 01 eher niedriger als in den beiden Vergleichsjahren, allerdings traten deutlich mehr Temperaturspitzen auf. Da dieser Effekt nicht mit den klimatischen Randbedingungen korreliert ist, wie das bei den Zonen RBEG und RBOG der Fall ist, liegt es nahe, hier nach anderen Erklärungsansätzen zu suchen. So ist eine Hauptursache vor allem in den gestiegenen internen Lasten zu vermuten, die insbesondere im BOG zu den häufigeren hohen Temperaturen geführt haben. Die Tatsache, dass diese Temperaturen schneller abgebaut wurden als 99, macht diese Annahme zudem plausibel, da gegen Abend die Anzahl der Beschäftigten, und damit einhergehend auch die Zahl der sich in Betrieb befindlichen PC, abnahm, so dass die Raumtemperatur wieder absinken konnte.

Betrachtet man die Zeitintervalle, in denen die höchsten Temperaturen erreicht werden, so lagen diese immer während der Arbeitszeit. Dies bedeutet auch, dass es zeitweise durchaus zu Überhitzungserscheinungen kam, insbesondere wenn die Temperaturen sogar über 26 °C stiegen. Bezieht man die Anzahl der Stunden, in denen die Raumtemperatur im BOG oberhalb von 26 °C liegt, auf die Normzahl der Arbeitsstunden im Jahr (2750 h/a nach [Volz]), so ergibt sich für den Sommer 99 ein Wert von 3 % , für 00 ein Wert von 2 % und für den Sommer 01

von knapp 3.5 % . Somit kann also die Überhitzung noch als unkritisch eingestuft werden, auch wenn es zeitweilig zu hohen Raumtemperaturen kommt.

Insgesamt zeigen die gemessenen Raumtemperaturen, dass das Passivhaus-Konzept auch im Sommer funktioniert. Insbesondere die aktive Nachtlüftung verhindert also ein Aufheizen des Gebäudes im Verlauf der Sommerperiode, so dass kein Klimagerät zu Kühlzwecken notwendig ist. Die Anzahl der Überhitzungsstunden (Raumtemperatur oberhalb von 26 °C) im Jahr kann in der kritischen Zone, dem Großraumbüro im Obergeschoss, mit bisher maximal 3.5 % als akzeptabel angesehen werden. Die ebenfalls hohen Temperaturen im Dachgeschoss im Rundbau sind dagegen unproblematisch, da sich hier keine Arbeitsplätze befinden. Die Aufheizung ist lediglich auf thermischen Auftrieb sowie möglicherweise auf Abwärme aus der benachbarten Großküche zurückzuführen ist und wird nicht durch hohe interne Lasten hervorgerufen.

2.2.7 Statistische Vorhersagbarkeit der Heizlast

Die Simulation komplexer Gebäude ist im allgemeinen zeitaufwendig und gelingt oft nur mit mäßiger Genauigkeit, da nicht alle Randbedingungen und Parameter exakt bekannt sind. Insbesondere um schnell Fehlfunktionen (beispielsweise bei der Bereitstellung der Raumheizenergie während der Heizzeit) zu detektieren, können statistische Vorgehensweisen hilfreich sein, wie sie z.B. [Katipamula98] mit der multivariaten Regression beschreibt. Anders als eine einfache Regressionsanalyse, bei der z.B. nach [Kissock98] nur die Umgebungstemperatur als unabhängige Variable betrachtet wird, trägt die multivariate Regression der komplexen Wechselwirkung bei Gebäuden besser Rechnung, auch wenn sie nie eine dynamische Gebäudesimulation ersetzen kann. In diesem Kapitel soll zusätzlich die gemessene Heizlast mit der theoretisch zu berechnenden Heizgerade nach [Endbericht02] verglichen werden.

Theoretische Heizgerade

Gemäß [Endbericht02] läßt sich nach der Formel (2.2) die Heizleistung berechnen, die theoretisch dem Gebäude zugeführt werden muss. Als geeigneten Zeitraum für diesen Zusammenhang schlagen die Autoren einen Tag vor, d.h. die Berechnung basiert auf Tagesmittelwerten.

$$\dot{q} = \frac{H}{A_{EB}}(T_i - T_{amb}) - q_i, \text{ wobei:} \quad (2.2)$$

\dot{q} : Heizleistung in W/m² ,

H : spezifische Wärmeverlustleistung des Gebäudes in W/K ,

A_{EB} : Energiebezugsfläche in m² ,

T_i : mittlere Gebäudeinnentemperatur in °C ,

T_{amb} : Umgebungstemperatur in °C ,

\dot{q}_i : spezifische interne Gewinne in W/m² .

Mit den Werten aus [Endbericht02] ergeben sich die Heizgeraden, wie in Abbildung 2.17 bis Abbildung 2.19 dargestellt.

Ermittlung der Regressionsgleichung

Im ersten Schritt wurde für einen Winter (00/01) die Abhängigkeit der Heizlast von den klimatischen Randbedingungen (Umgebungstemperatur T_{amb} , Einstrahlung I_{Glob} und relative Feuchte rF) sowie vom Stromverbrauch (Q_{Strom}) als Maß für die internen Gewinne überprüft. Dabei wurde also folgender Ansatz zu Grunde gelegt:

$$\dot{q} = a_1 \cdot T_{amb} + a_2 \cdot I_{Glob} + a_3 \cdot rF + a_4 \cdot Q_{Strom} , \quad (2.3)$$

wobei die Koeffizienten a_1 bis a_4 durch die Regression zu bestimmen sind.

Die Analyse wurde auf der Basis von Tageswerten einer Heizperiode (00/01) mit Hilfe des Programms [SPSS98] und [Bühl02] durchgeführt. Dabei ergab sich, dass die relative Feuchte irrelevant ist, während die Abhängigkeit von allen anderen Faktoren relevant ist. Offensichtlich hat aber die Strahlung keinen dominierenden Einfluss auf die Heizlast. Wäre dies der Fall, so müsste die Heizleistung bei hohen Einstrahlungen, die in diesen Breiten stets mit tiefen Außentemperaturen einhergehen, quasi konstant bleiben. Stattdessen ist aber Abbildung 2.17 bis Abbildung 2.19 für alle drei Jahre zu entnehmen, dass die gemessenen Werte der Heizlast bei tiefen Außentemperaturen keineswegs unterhalb der Heizgerade konstant verlaufen sondern ebenfalls hoch sind bzw. ansteigen. Abbildung 2.17 bis Abbildung 2.19 zeigen weiterhin, dass auch die Außentemperatur als alleinige Variable zur Vorhersage der Heizlast nicht ausreicht, da die Werte der gemessenen Heizlast in den Abbildungen stark streuen.

Die mit [SPSS98] ermittelte Regressionsgleichung wurde im zweiten Schritt auch auf die entsprechenden Tageswerte der beiden anderen Heizperioden zur Vorhersage der jeweiligen Heizlast angewendet. Abbildung 2.17 bis Abbildung 2.19 zeigen die gemessene Heizlast, die

Werte der multivariaten Regression sowie die theoretische Heizgerade in Abhängigkeit von der tagesmittleren Außentemperatur für die drei Heizperioden.

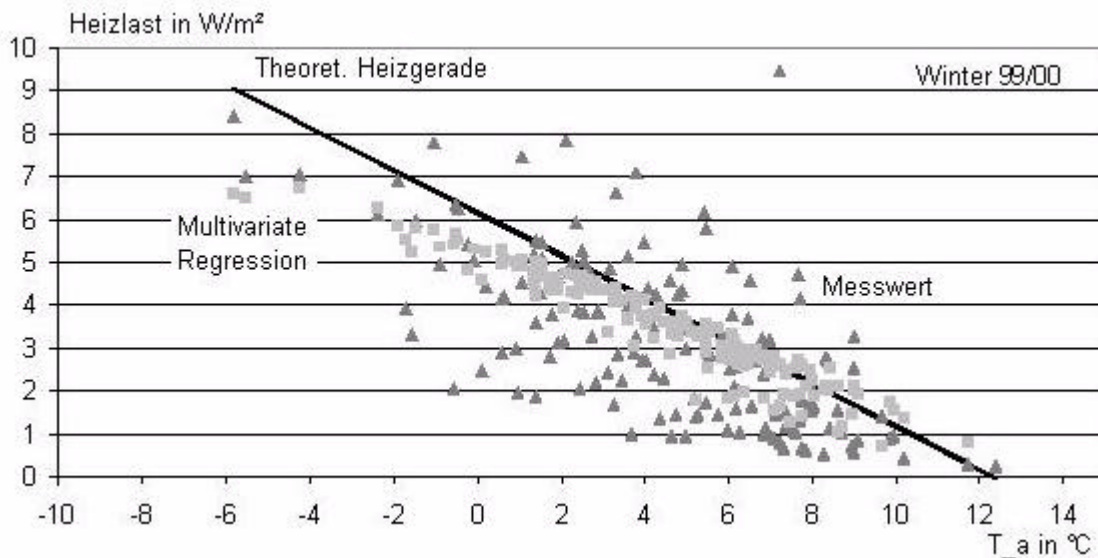


Abbildung 2.17: Aufgetragen sind neben der theoretischen Heizgeraden die gemessene sowie die mit der multivariaten Regression berechnete Heizlast über der tagesmittleren Außentemperatur für die Heizperiode 99/00. Die Messwerte werden durch die dunkelgrauen Dreiecke symbolisiert, die Werte der Regression durch die hellgrauen Quadrate, die theoretische Heizgerade ist als schwarze Linie eingezeichnet.

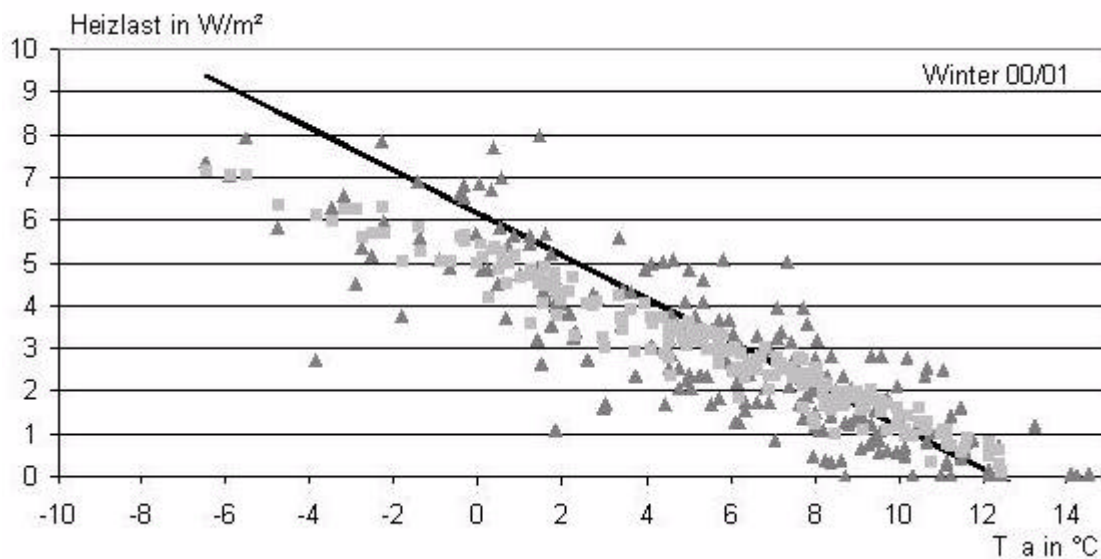


Abbildung 2.18: Gleiche Darstellung und Symbolik wie in Abbildung 2.17 für die Heizperiode 00/01. Dieser Zeitraum wurde für die multivariate Regression zu grunde gelegt.

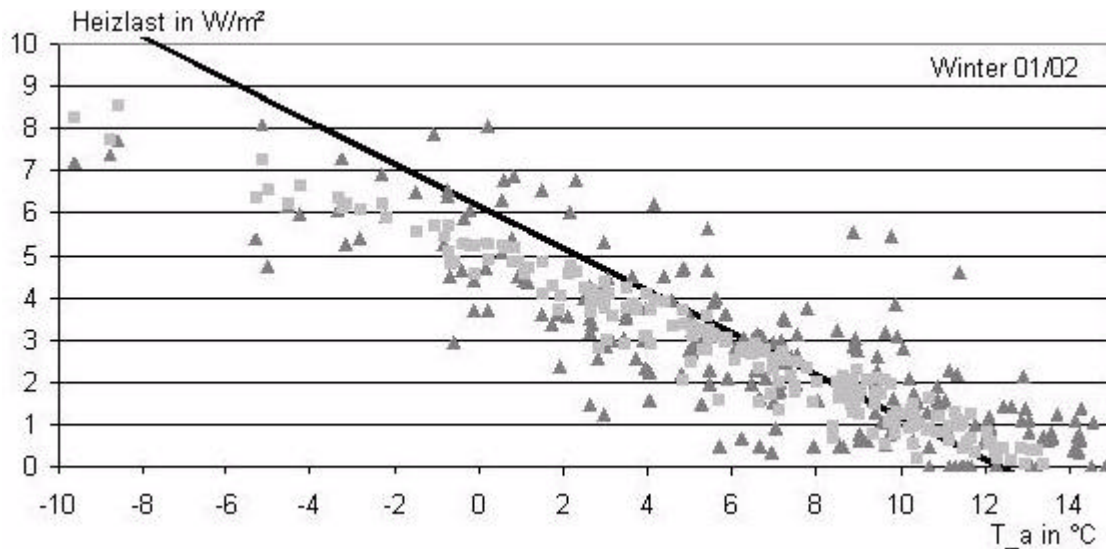


Abbildung 2.19: Vergleich der gemessenen Heizlast mit der aus der Regression berechneten sowie der theoretischen Heizgerade. Zur Symbolik vergleiche Abbildung 2.17.

Die theoretische Heizgerade stellt in allen drei Heizperioden eine mäßige Approximation der tatsächlichen Heizlast dar. Insbesondere im Winter 99/00 liegt die tatsächliche Heizlast unterhalb der Heizkurve, was zum niedrigen Jahresheizbedarf aus den zuvor bereits erläuterten möglichen Ursachen passt. In allen drei Wintern ist jedoch keine Systematik dergestalt zu erkennen, dass bei tiefen Außentemperaturen die gemessene Heizlast den theoretischen Wert der Heizkurve stärker unterschreitet. Dieser Effekt wird bei Gebäuden beobachtet, in denen die passiven solaren Gewinne einen deutlichen Einfluss auf den Raumheizbedarf haben (vgl. z.B. [Pfluger00] oder [Oesen01]), was im Passiv-Solarhaus in Coelbe wahrscheinlich mit bedingt aufgrund der Dominanz der internen Gewinne nicht der Fall ist.

Der Vergleich der multivariaten Regression mit den Messwerten ergibt für die Jahre 99/00 und 01/02 bezogen auf die gesamte Heizperiode einen mittleren Fehler von unter 10 %. Im Winter 99/00 wurde durch die Regression die tatsächliche Heizlast überschätzt, während sie im Winter 01/02 etwa um den gleichen Wert unterschätzt wurde. Eine Ursache für die Überschätzung der Werte im Jahr 99/00 ist möglicherweise der insgesamt niedrigere Heizbedarf in diesem Winter im Vergleich zum Wert aus 00/01. Da die Werte für den Raumheizbedarf für 00/01 und 01/02 allerdings sehr eng beieinander liegen, erklärt sich die Unterschätzung der Heizlast durch die multivariate Regression für das Jahr 01/02 nicht aus dieser Differenz. Bei genauerer Betrachtung der Differenzen aus gemessener Heizlast und aus vorhergesagtem Wert der multivariaten Regression fällt auf, dass sich die vom Betrag größten Abweichungen immer dann ergeben, wenn sich eine der klimatischen Randbedingungen stark ändert. Dieser Effekt ist unmittelbar plausibel, da das Gebäude eine große Zeitkonstante besitzt, so dass sich diese Änderungen nicht unmittelbar in der tatsächlichen Heizlast niederschlagen, sehr wohl aber in der Regression.

Insgesamt kann die Übereinstimmung zwischen Mess- und Regressionswerten als akzeptabel angesehen werden, so dass die multivariate Regression durchaus als leistungsfähiges Instrumentarium zur Vorhersage und Überprüfung der Heizlast eingesetzt werden kann.

2.2.8 Zusammenfassung

Nach einem Vergleich der Klimadaten der drei Messjahre mit dem Ergebnis, dass die jeweiligen Jahresperioden prinzipiell vergleichbar sind, erfolgte eine detaillierte Betrachtung der Bereiche aktiv-solares Heizsystem und Lüftungssystem inklusive Erdreichwärmeübertrager und Wärmerückgewinnung. Ferner erfolgte eine detaillierte Auswertung der gemessenen Gebäudeinnentemperaturen sowie eine statistische Auswertung der Heizlast. Die umfangreichen Messdatensätze ermöglichten eine Bilanzierung und zum Teil eine Bewertung der verschiedenen Subsysteme. Außerdem war aufgrund dieser Daten mit einfachen statistischen Methoden eine Vorhersage der zu erwartenden Heizlast möglich.

2.3 Zusammenfassung

Seit Mai 02 liegen drei komplette Messdatenjahre für das Passiv-Bürogebäude der Firma Wagner & Co vor. Aufgrund der mit ca. 300 Sensoren umfangreichen Vermessung des Gebäudes sind detaillierte Aussagen über die Subsysteme (aktiv-solares Heizsystem, Lüftungssystem) sowie das Funktionieren des Hauskonzepts als solches möglich. Grundsätzlich läßt sich sagen, dass das Passivhaus-Konzept auch bei der Nutzung als Bürogebäude funktioniert, so lag der Raumheizbedarf nie über $15 \text{ kWh/m}^2\text{a}$, die maximale Heizlast war stets geringer als 10 W/m^2 . Der primärenergetisch bewertete Energiebedarf des Gebäudes stieg von $120 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ in 05/99-04/00 auf fast $160 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ in 05/01-04/02, bedingt durch die Anschaffung weiterer Bürogeräte und eine steigende Anzahl der im Bürobereich Beschäftigten. Wenn auch ein Großteil der im Gebäude Beschäftigten die fehlende Möglichkeit zur Heizungsregelung beklagte, herrschte insgesamt Zufriedenheit über das Innenraumklima, obgleich insbesondere der Empfangsbereich im Winter als zu kühl empfunden wurde, während es im Bereich des Großraumbüros tendenziell zu warm war, was aber von den Beschäftigten offenbar durch Anpassen der Bekleidung toleriert wurde. Die gemessenen Raumtemperaturen bestätigten die Meinungen der Nutzer/innen in diesem Punkt. In Bezug auf die eher geringen Temperaturen im Empfangsbereich scheint eine Abhilfe unter Nutzung der implementierten Lüftungskomponenten schwierig: Die dezentrale Nacherhitzung der Luft durch die Auslegung des entsprechenden Luft-Wasser-Wärmeübertragers ist begrenzt, während die zentrale Erwärmung der Zuluft durch die Wärmerückgewinnung, den Erdreichwärmeübertrager und das Luft-Wasser-Vorheizregister nur bis auf die von der Zone mit dem minimalen Heizbedarf geforderten Solltemperatur möglich ist.

Die energetische Rentabilität des Erdreichwärmeübertragers kann nur eingeschränkt bestätigt werden. Zwar garantiert er die Frostsicherheit für die Wärmerückgewinnung, jedoch arbeitet er durch die fehlende Bypass-Möglichkeit ganzjährig im Mischbetrieb, d.h. er liefert Fehlerträge zu jeder Jahreszeit. Diese müssen im Heizfall von der hocheffizienten Wärmerückgewinnung kompensiert werden, deren Ertrag aber etwa zehnmal so hoch wie der des Erdreichwärmeübertragers war.

Im Fall des Solarsystems zeigte sich, dass die Kollektorfläche größer als notwendig ist, was aber lediglich zur Folge hatte, dass der Saisonspeicher schon relativ früh im Sommer aufgeladen war.

Die Analyse der Innenraumtemperaturen im Sommer bestätigte auch während dieser Zeiträume das Funktionieren des Hauskonzeptes: Nur in etwa 3 % der Normarbeitsstunden im Jahr lagen die Temperaturen in der wärmsten Bürozone des Gebäudes oberhalb von $26\text{ }^{\circ}\text{C}$, was als akzeptabel angesehen werden kann. Das Gebäude kommt somit ohne eine aktive Klimatisierung aus.

Somit zeigt die Queranalyse der Messdaten insgesamt, dass das Hauskonzept funktioniert. Das ist insbesondere deswegen bemerkenswert, als während der Planungsphase noch keine Erfahrungen von einem als Passivhaus ausgeführten Bürogebäude vorlagen.

3 Sensitivitätsanalysen für Gebäude mit solaren Heizsystemen

Während in den vorausgegangenen Kapiteln alle Untersuchungen auf Messwerten basierten, werden in diesem Kapitel Modelle für fiktive Gebäude erstellt, wobei sich das hydraulische Konzept des Heizsystems an den zuvor behandelten des Passiv-Solarhauses Cölbe orientiert. Die damit durchgeführten Simulationen werden zur Untersuchung von Parametersensitivitäten verwendet.

3.1 Motivation und Vorgehen

Insbesondere bei der Simulation von Gebäuden mit solarem Heizsystem gibt es eine Vielzahl von Parametern, deren Einfluss auf die jeweilige Zielgröße oft nur qualitativ verstanden ist, zumal der Einfluss eines Parameters im allgemeinen auch von dem Wertebereich abhängt, der ihm zugeordnet wird. Die Ermittlung der Sensitivität der Zielgröße(n) bezüglich der Eingangsparameter ist aus einer Vielzahl von Gründen wichtig, vgl. auch [Lomas92]. Insbesondere ist es entscheidend, die relevanten Parameter zu kennen, da deren Eingangswerte mit besonderer Genauigkeit belegt werden müssen. Auch lässt es die Kenntnis der weniger oder kaum relevanten Parameter möglicherweise zu, ein theoretisches Modell zu vereinfachen und so z.B. die Rechenzeit bei Simulationen zu verkürzen. Auf der anderen Seite lassen sich daraus auch wichtige Hinweise für die Praxis ableiten, wenn es um die Durchführung von Experimenten oder sogar um die Erstellung von Planungsrichtlinien geht, bei denen so eine Konzentration auf die wesentlichen Aspekte erfolgen kann.

Im Mittelpunkt dieses Kapitels stehen Parameteruntersuchungen an einem zuvor definierten Referenzsystem, bestehend aus einem Reihenhaus (3 Wohneinheiten mit je 4 Bewohner/innen) mit einem aktiv-solaren Heizsystem, das einen Saisonspeicher belädt. Bei den anschließenden Parameteruntersuchungen soll zum Einen der Einfluss der Parameter auf die Zielgröße, das kumulierte Energieaufkommen, untersucht werden, zum Anderen sollen eventuelle Korrelationen zwischen den Parametern quantifiziert werden.

Die Definition des Referenzsystems erfolgt im ersten Kapitel in Anlehnung an die Vorgaben aus dem [Task26] für das aktiv-solare Heizsystem sowie den [Task28] im Falle des Gebäudes. Für die Umsetzung der Referenzbedingungen für das Heizsystem sei auch auf [John02] verwiesen.

Das zweite Kapitel gibt zunächst einen Überblick über die gängigen Algorithmen zur Untersuchung von Parametereinflüssen und behandelt drei Verfahren ausführlich, die dann verwendet werden.

Im dritten Kapitel werden schließlich die Ergebnisse der Verfahren bei Anwendung auf das vorgestellte Referenzsystem diskutiert.

3.2 Das untersuchte System

3.2.1 Das Gebäude

Die Definition des Gebäudes sowie der zugehörigen Randbedingungen geht auf Vorgaben des [Task28] zurück. Es handelt sich dabei um drei Reihenhaus-Segmente, die jeweils von vier Personen (2 Erwachsene, 2 Kinder) bewohnt werden. Den groben Aufbau zeigt Abbildung 3.1.

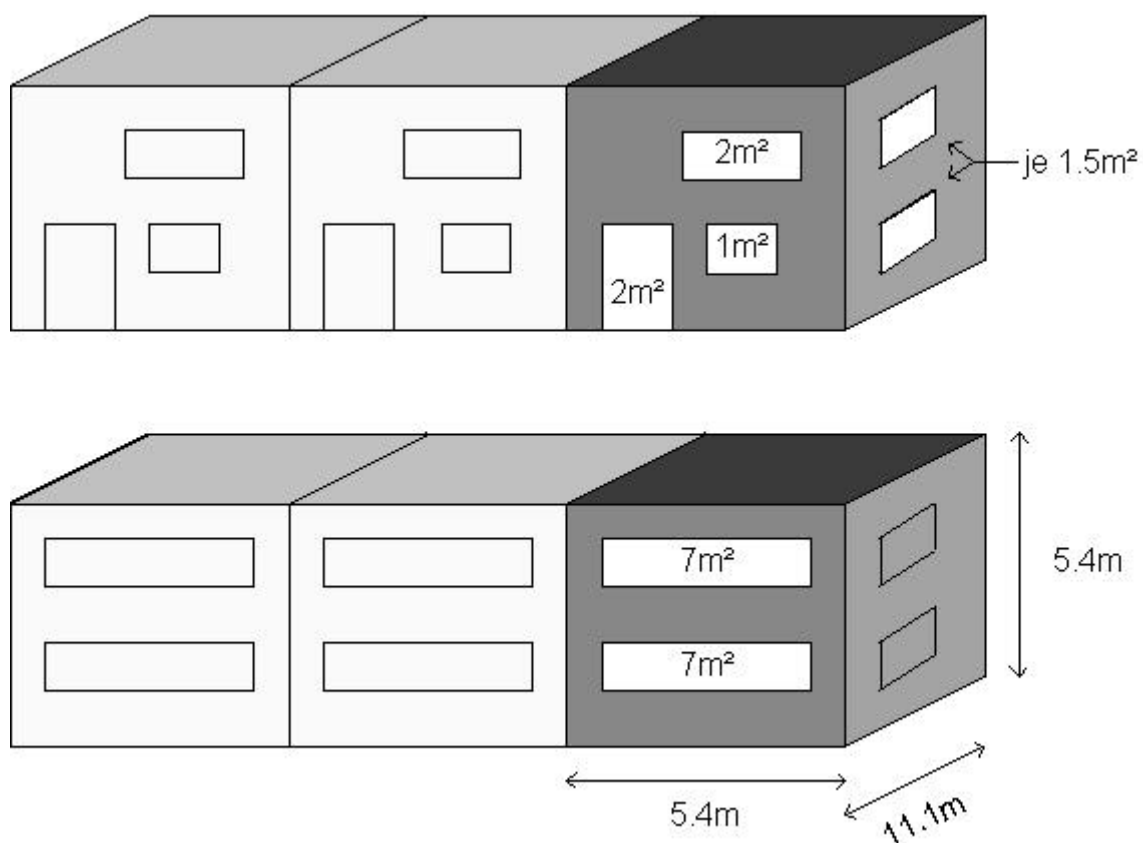


Abbildung 3.1: Nord- und Südansicht des definierten Reihenhauses.

Um eine Anpassung an die jeweiligen nationalen Gebäudestandards zu ermöglichen, werden im [Task28] keine Vorgaben für die zu verwendenden Baumaterialien und Dämmstoffdicken gemacht. In Deutschland ist damit die [EnEV02] bindend, die anders als die [WSchVO95]

keine Vorgaben allein an die Gebäudedämmung richtet, sondern die verwendete Anlagentechnik mitberücksichtigt.

Während die beiden äußeren Segmente jeweils nur aus einer Zone bestehen, ist das mittlere Segment in drei Zonen unterteilt: Das Erdgeschoss besteht je zur Hälfte aus einer nach Norden und einer nach Süden orientierten Zone. Das erste Obergeschoss bildet die dritte Zone.

Die wichtigsten Gebäudeeckdaten sind Tabelle 3.1 bis Tabelle 3.3 zu entnehmen..

Tabelle 3.1: Eckdaten des untersuchten Reihenhauses - mittleres Segment

Fläche	Größe m ²
Südfassade	29.2
Nordfassade	29.2
Dach/ Boden	60

Tabelle 3.2: Eckdaten des Reihenhauses - Endsegmente

Fläche	Größe m ²
Ost- und Westfassade	60
Dach und Boden	60

Tabelle 3.3: Fensteranteil an den jeweiligen Fassaden

Fassade	Fensteranteil %
Südfassade	48
Nordfassade	10
Ostfassade	5
Westfassade	5

Das Gebäude wurde ebenso wie die im Folgenden beschriebene Hydraulik mittels [TRNSYS] simuliert. In [TRNSYS] werden Gebäude mittels eines Mehrzonen-2*-Knoten-Netzwerkmodells abgebildet. Jeder thermischen Zone wird dabei ein Lufttemperaturknoten zugeordnet sowie ein Sternknoten. Letzterer approximiert den langwelligen Strahlungsaustausch der Hüll-

flächen im Vergleich zum Vorgehen bei einem vollständigen Netzwerkmodell. Die jeweiligen Modelle sind detailliert in [Feist94] behandelt. Bei [TRNSYS] wird vor der eigentlichen Simulation ein Input-File erzeugt, in dem sämtliche Bauteile durch Transferfunktionen modelliert werden. Grundlegend findet sich dieses Verfahren, bei dem die Wärmetransportgleichung mittels Laplace-Transformation gelöst wird, z.B. in [Clarke85] beschrieben. Der Hauptvorteil dieses Verfahrens ist die höhere Rechengeschwindigkeit, da die Transferfunktionen nur einmal zu Beginn der Simulation gelöst werden und während der Simulation keine Berechnung in jedem Zeitschritt erforderlich ist.

3.2.2 Die Haustechnik

Das Gebäude ist mit einer Luftheizung ausgestattet, die von einer solarunterstützten Heizanlage gespeist wird. Das hydraulische Design erfolgte in Anlehnung an das solare Heizsystem des Passivhauses in Cölbe, vgl. dazu auch [John02]. Dort sowie in [Scheuren02] finden sich auch Details zur Implementierung in [TRNSYS].

Das Solarsystem besteht aus einer Kollektoranlage, die einen Saisonspeicher belädt. Dabei ist die solare Einspeisung in drei verschiedenen Höhen möglich, während stets aus der untersten Schicht entnommen wird. Die Einspeisung des Lastrücklaufs ist ebenso wie die Lastentnahme in drei verschiedenen Höhen möglich. Die Last setzt sich aus dem Trinkwarmwasser- und dem Heizbedarf zusammen. Als Nachheizmöglichkeit steht ein Klein-BHKW (12.5 kW_{th} ; 5.5 kW_{el}) zur Verfügung, das den oberen Speicherteil belädt. Der zusätzlich vorhandene Trinkwasserspeicher (375 l) wird über einen externen Wärmeübertrager beladen, dabei beginnt die Beladung, wenn im oberen Teil die Solltemperatur unterschritten wird und endet, wenn die Solltemperatur im unteren Speicherteil wieder erreicht ist. Gemäß des verwendeten Verbrauchsprofils erfolgt eine Beladung des Trinkwasserspeichers etwa zweimal pro Tag.

Während die Kollektoranlage im low-flow-Betrieb mit konstantem Volumenstrom betrieben wird, ist der Lastvolumenstrom variabel, bedingt durch die nicht konstante Last.

Die Anbindung des Gebäudes an das solare Heizsystem erfolgt mittels Luft-Wasser-Wärmeübertragern, ebenfalls in Anlehnung an die im Passiv-Solarhaus in Cölbe realisierte hydraulische Verschaltung. Für das gesamte Gebäude ist ein orts- und zeitabhängiger Luftwechsel festgelegt. Die Luft wird zunächst durch die Wärmerückgewinnung vorerwärmt und dann gegebenenfalls in den Wärmeübertragern nacherhitzt, um den jeweils gewünschten Raumsollwert zu erreichen.

Die realisierte Hydraulik zeigt Abbildung 3.2 bzw. Abbildung 3.3.

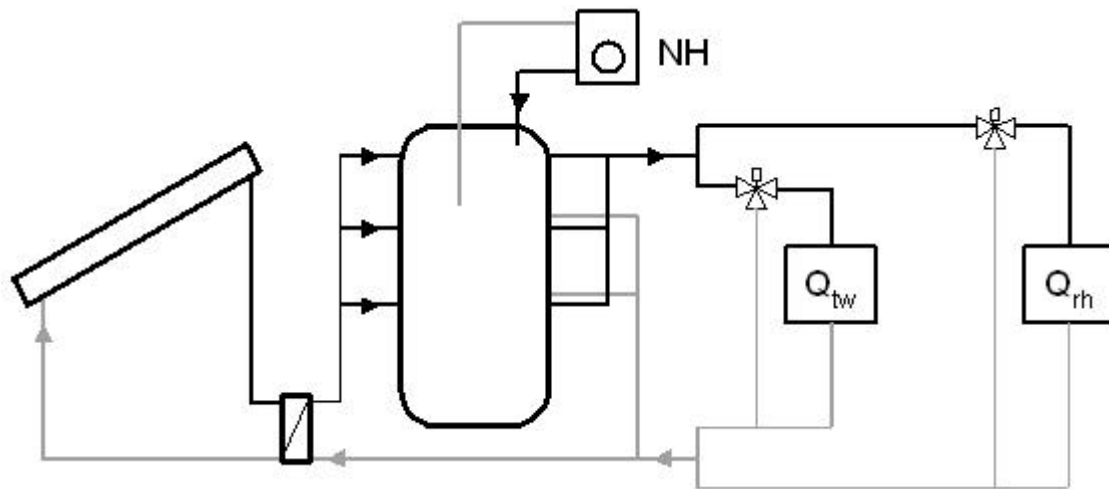


Abbildung 3.2: Skizze der realisierten Hydraulik, dargestellt ist die Solaranlage aus Kollektor, Wärmeübertrager und Saisonspeicher. Symbolisch ist die Nachheizung des oberen Speicherbereiches durch die fossile Nachheizung (NH) sowie die hydraulische Anbindung der Last angedeutet, bestehend aus der Trinkwarmwasser- bzw. Raumheizlast (abgekürzt mit Q_{tw} und Q_{rh}).

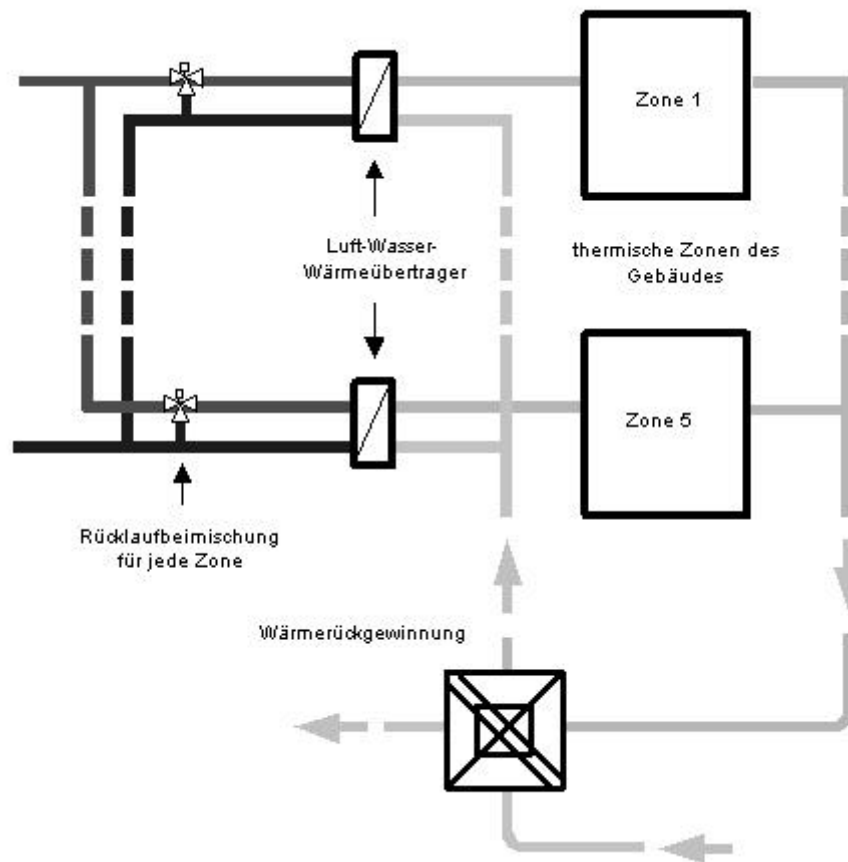


Abbildung 3.3: Detailansicht der Anbindung des Gebäudes bzw. des Lüftungspfades.

3.2.3 Festlegung der Randbedingungen

Die Parametervariationen für das zuvor beschriebene System wurden exemplarisch für einen europäischen Standort (Zürich) durchgeführt, wobei die für die Simulation relevanten Klimadaten als Stundenwerte vorliegen. Der Wetterdatensatz wurde aus dem [Task26] entnommen und ist mit deutschen Klimazonen vergleichbar: So entspricht der Standort Zürich in etwa den Testreferenzjahren¹ TRY04 und TRY05 nach [Blümel86].

Eine Charakterisierung des Standorts ist Tabelle 3.4 zu entnehmen.

Tabelle 3.4: Charakterisierung der klimatischen Bedingungen des Standorts Zürich.

Standort	mittlere Umgebungstemperatur °C	Strahlungssumme kWh/m ² a	Heiztage ⁱ d	Gradtagszahl ⁱⁱ Kd/a
Zürich	9.1	1088	207	3345

- i. Heiztage sind nach [Recknagel00] die Tage, an denen das Tagesmittel der Außentemperatur unter 15 °C liegt.
- ii. Die Gradtagszahl ist nach [Recknagel00] grob gesagt das Produkt aus der Zahl der Heiztage sowie der Differenz zwischen der mittleren Raumtemperatur (20 °C) und der mittleren Außentemperatur.

Für die internen Gewinne des Gebäudes, resultierend aus Wärmeabgabe der Personen sowie der elektrischen Geräte im Haus, wurden die Vorgaben des [Task28] verwendet. Um detailliert den Einfluss der internen Gewinne untersuchen zu können, wurde nicht die Annahme nach [EN832] verwendet, die pauschal 5 W/m² zugrunde legt, falls keine Informationen über Bewohner/innen und Geräte existieren. Für die Simulationen standen zwei Profile zur Verfügung, das eine beschreibt den Basisfall, bei dem keine sparsamen Haushaltsgeräte eingesetzt werden, das andere gehört zum Szenario, in dem nur besonders sparsame Geräte verwendet werden (Sparsamer Fall). Der Basisfall liefert spezifische interne Gewinne von 4.3 W/m², der Sparsame Fall liefert 3.7 W/m². Eine detaillierte Auflistung der Beiträge befindet sich im Anhang in Tabelle C.1 auf S. 110. Gleich ist in beiden Szenarien die Verteilung der Gewinne über das Jahr. Neben einem Tagesprofil der Werte in Stundenauflösung werden im Jahr zwei Zeiträume unterschieden: Normalbetrieb und Ferienzeit. Während der Monate Januar bis Mai sowie September bis Dezember wird von prinzipieller Personenanwesenheit ausgegangen,

1. Zur Definition und Zuordnung der Testreferenzjahre vergleiche [VDI6020].

während der Ferienmonate Juni bis August ist das nicht der Fall. Abbildung 3.4 und Abbildung 3.5 zeigen den Tagesverlauf der internen Gewinne für die jeweiligen Szenarien und Zeiträume.

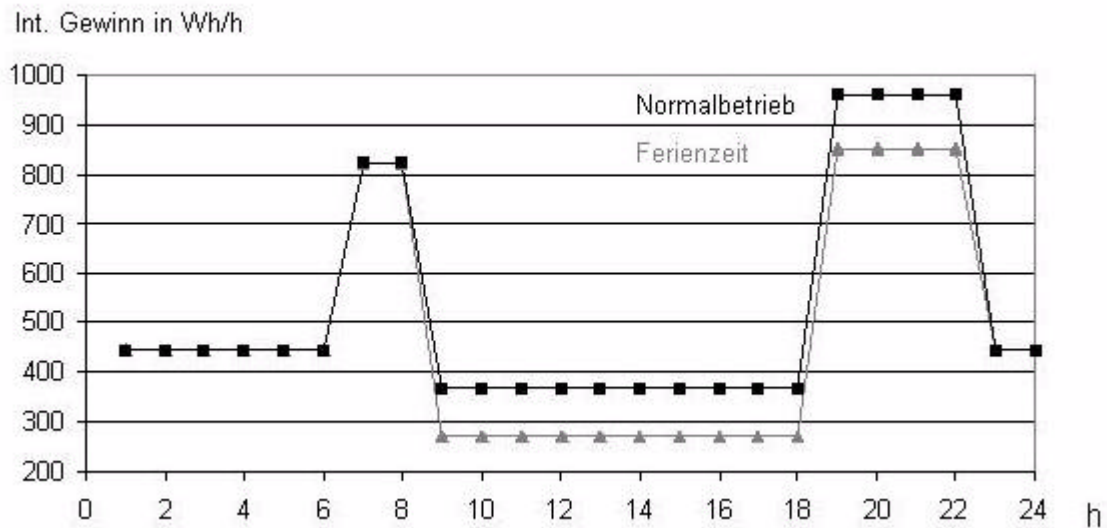


Abbildung 3.4: Tagesprofil der internen Gewinne für den Basisfall während des Normalbetriebs sowie der Ferienzeit im Jahr.

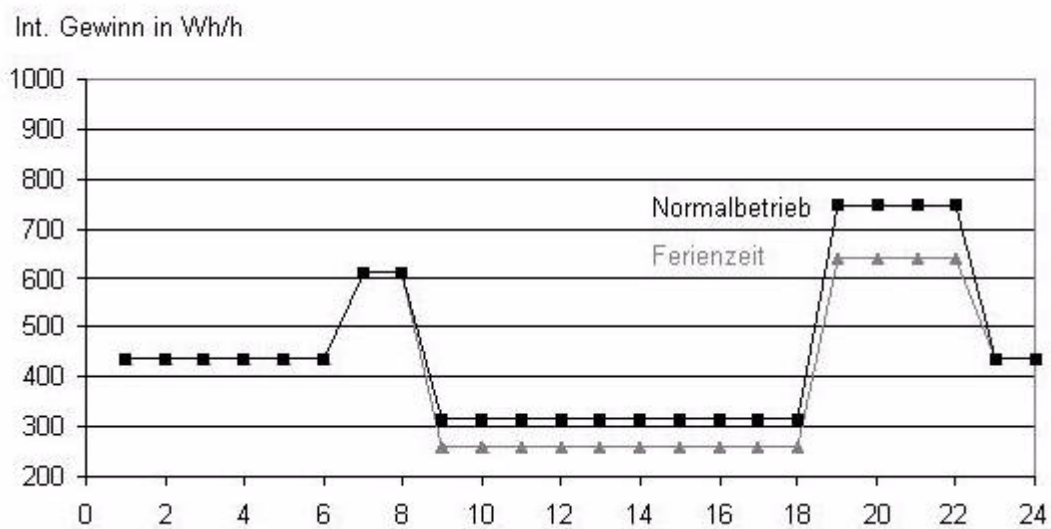


Abbildung 3.5: Tagesprofil der internen Gewinne für den Sparsamen Fall während des Normalbetriebs sowie der Ferienzeit im Jahr.

Für den Trinkwarmwasserverbrauch wurde auf das von [Jordan01] entwickelte Profil zurückgegriffen. In Zeitschritten von sechs Minuten wird die Wasserentnahme bei 45 °C aus dem Trinkwarmwasserspeicher modelliert.

Im Folgenden sollen nun die Parameter dargestellt werden, die für die Sensitivitätsuntersuchungen variiert werden.

3.2.4 Definition der freien Parameter und der Zielgrößen

Mit der zunehmenden Verbreitung einer energiesparenden Bauweise hat auch die Diskussion um die Beurteilung solcher Bauten Aufwind erhalten. So ist z.B. die Schadstoffbelastung gerade bei energieeffizientem Bauen sehr entscheidend, da dieses nicht unbedingt gesundheitsverträgliches Bauen bedeutet, wie z.B. [Schulze00] betont. Insbesondere die Formaldehyd-Belastung durch die verwendeten Baustoffe in den Innenräumen sollte danach ein wichtiges Auswahlkriterium darstellen. Eine Kombination von Schlüsselfaktoren zur Beurteilung der Nachhaltigkeit von Gebäuden schlägt z.B. [Gugerli00] vor. Dabei werden die Aspekte Baumaterialien, Haustechnik und Wasseraufbereitung, Heizenergiebedarf, Ökonomie sowie Standortqualität und Vermietbarkeit² erfasst. Noch konsequenter geht der Schweizerische Ingenieur- und Architektenverein (SIA) vor, indem er in Anlehnung an die Weltkonferenz in Rio (1992) für die drei Dimensionen des nachhaltigen Bauens (Umwelt-, Sozial- und Wirtschaftsverträglichkeit) etwa 150 Einzelaspekte nennt, vergleiche dazu auch [Binz01].

Eine detaillierte Berücksichtigung dieser Aspekte wird in dieser Arbeit nicht erfolgen. Stattdessen erfolgt eine Beurteilung des Gesamtsystems ausschließlich energetisch. Dabei wird jedoch nicht nur die primärenergetisch bewertete Betriebsenergie über die Lebenszeit des Systems bilanziert, sondern ebenfalls die für die Herstellung und den Transport der verwendeten Materialien erforderliche Energie. Das heißt, es wird das kumulierte Energieaufkommen (KEA) zum Vergleich herangezogen. Was allerdings nicht berücksichtigt wird, ist die Entsorgung, auch wenn dieser Aspekt insbesondere bei den Gebäudematerialien gravierend sein kann. Jedoch ist die Datenbasis zur zuverlässigen Bilanzierung schwierig, da nach [Lalive00] bisher allenfalls Entscheidungsbäume eine Hilfestellung bei der Bewertung der Entsorgung liefern, ohne dass sich diese Verfahren jedoch mit Werten belegen ließen oder schon validiert wären. Ebenfalls unberücksichtigt bleiben aufgrund der schwierigen Datenlage Instandsetzungsmaßnahmen, auch wenn diese nach [Voss97] gerade bei komplexen Gebäuden einen nennenswerten Einfluss haben können, während sie nach [BINE99] selbst bei einem Passivhaus bezogen auf einen Zeitraum von 80 Jahren nur 2 % des Herstellungsenergieaufwands betragen, der dem für Niedrigenergiehäuser und auch dem für Bauten nach der Wärmeschutzverordnung von 1984 entspricht.

2. In der Schweiz werden diese Aspekte in einem standardisierten Verfahren gebündelt, das unter dem Namen e-top als Planungsinstrument verwendet wird.

Referenzsystem und Kriterien zur Beurteilung

Die Tatsache, dass die Energien für Instandsetzung und Entsorgung nicht berücksichtigt werden können, bestimmt die Wahl der Systemgrenzen. So soll als Referenzsystem für die Parametervariationen ein baugleiches Gebäude zu Grunde gelegt werden, dass allerdings kein solarunterstütztes Heizsystem besitzt, sondern nur über ein rein fossil versorgtes verfügt. Damit ist die Heizanlage in beiden Fällen identisch, lediglich die Kollektoranlage und der Pufferspeicher entfallen beim Referenzsystem im Vergleich zum untersuchten.

Hinsichtlich des energetischen Herstellungs- und Transportaufwands unterscheiden sich also das Referenzsystem und die untersuchten Szenarien lediglich in den Beträgen für Kollektoranlage und Saisonspeicher, ebenso fielen die Entsorgung der Baumaterialien in beiden Fällen zumindest gleich aus und muss somit beim Vergleich nicht berücksichtigt werden.

Während sich Herstellungs- und Transportenergie statisch bilanzieren lassen, sind für die Erfassung der Betriebsenergie jeweils Jahressimulationen erforderlich. So ist dabei einerseits der Gasbezug für den Betrieb der Heizanlage zu summieren, andererseits ist der gesamte Hilfsstrombedarf für die Komponenten des Heizsystems (Pumpen, Regler für das solarunterstützte Heizsystem) und des Lüftungssystems zu ermitteln. Mit dem Primärenergieaufwand Q_{prim} sowie mit Kenntnis der Nutzenergie Q_{nutz} (Raumheizbedarf Q_{rh} und Energie zur Brauchwassererwärmung Q_{TWW}) und der Differenz an innerer Energie des Solarspeichers am Ende des Simulationsjahres in Relation zu der am Beginn $\Delta Q_{Speicher}$ lässt sich gemäß der [DIN4701] die Anlagenaufwandszahl e_p berechnen:

$$e_p = \frac{Q_{prim}}{Q_{nutz}} = \frac{Q_{el} \cdot f_{p,el} + Q_{NH} \cdot f_{p,Gas}}{Q_{TWW} + Q_{rh} + \Delta Q_{Speicher}} \quad (3.1)$$

Das Vorgehen zum Vergleich des kumulierten Energieaufwands demonstriert Abbildung 3.6.

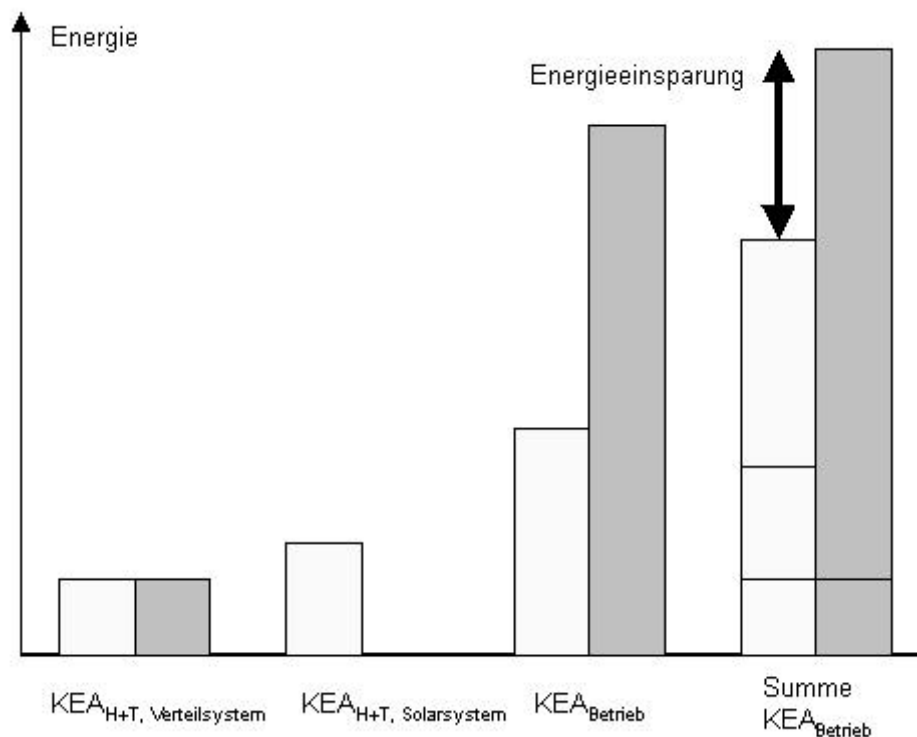


Abbildung 3.6: Vergleich des fossilen Referenzsystems (dunkle Balken) mit dem solaren System (helle Balken) anhand des kumulierten Energieaufwands, d.h. der energetischen Beiträge für Herstellung und Transport des jeweils identischen Verteilsystems sowie des Solarsystems und des Betriebs über die angenommene Nutzungsdauer von 20 Jahren.

Die Definition des Betriebszeitraumes orientiert sich wie in [John02] an der Lebensdauer der Solaranlage, genauer an der der Kollektoren als der kürzesten der energetisch relevanten Komponenten³. So kann für die Kollektoren nach [VDI2067] von einer Nutzungsdauer von 20 Jahren ausgegangen werden, die kürzere Lebensdauer von Komponenten wie z.B. Pumpen und Reglern kann als nicht ausschlaggebend gewertet werden, da die entsprechenden Herstellungsenergien im Vergleich zu denen des übrigen Solarsystems nicht relevant sind. Für ein Szenario wurde ferner getestet, dass nur eine Jahressimulation erforderlich ist, um auf den KEA-Wert für den Betrieb KEA_B von 20 Jahren zu schließen, da die Änderungen im Wert von e_p marginal sind. Dieser Wert berechnet sich dann gemäß:

$$KEA_B = e_p \cdot (Q_{rh} + Q_{TWW}) \cdot 20. \quad (3.2)$$

Mit Kenntnis der KEA -Werte für Herstellung, Transport und Betrieb KEA_{H+T} bzw. KEA_B für das fossile Referenzsystem (Index Ref) sowie das solare System (Index Sol) lässt sich

3. Nach [BINE99] sind ansonsten für Gebäude 80 Jahre üblich.

somit die relative Energieeinsparung ε des solaren Systems gegenüber dem fossilen wie folgt angeben:

$$\varepsilon = \frac{KEA_{B, Ref} - (KEA_{H+T, Sol} + KEA_{B, Sol})}{KEA_{B, Ref}} \quad (3.3)$$

Energieaufwand für Herstellung und Transport

In [John02] wurden bereits der kumulierte Energieaufwand des solaren Heizsystems ermittelt, es ergeben sich die Werte in Tabelle C.2 auf S. 111 und Tabelle C.3 auf S. 112 im Anhang. Für das Gebäude muss lediglich der energetische Mehraufwand durch die Variation der Dämmstoffdicke (Mineralwolle) berücksichtigt werden. Dabei wurde wie in [John02] mit dem von [Peter02] für die Verwendung im [Task26] festgelegten Wert von $KEA_{Mineralwolle} = 4.97 \text{ kWh/kg}$ gearbeitet. Weiterhin wurde davon ausgegangen, dass der prinzipielle Wandaufbau im Rahmen der hier durchgeführten Variationen der Dämmstoffstärke identisch ist.

Freie Parameter

Insgesamt werden 14 Parameter des Gesamtsystems variiert, die Auswahl der Parameter zeigt Abbildung 3.7.

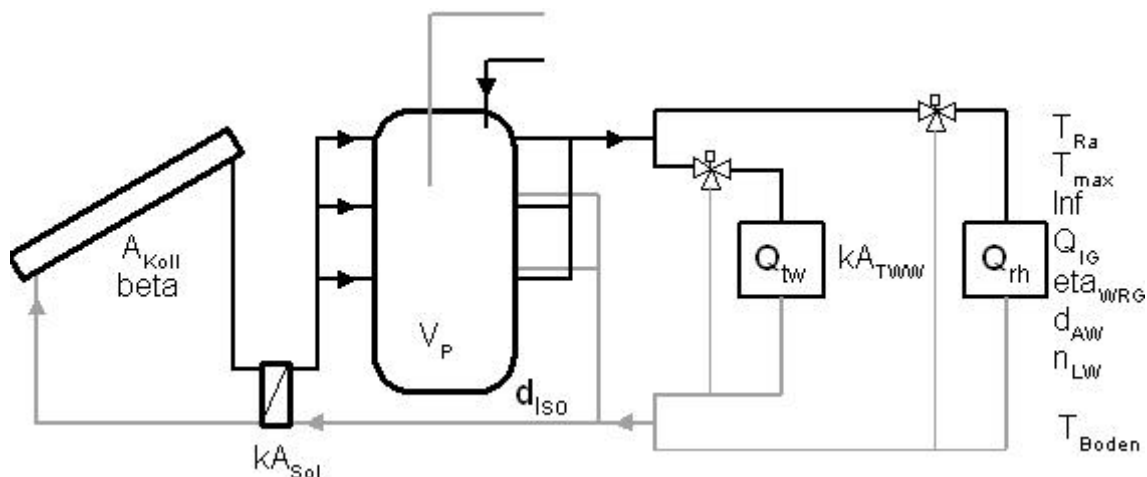


Abbildung 3.7: Freie Parameter des Gebäudes bzw. des solaren Heizsystems. Der Trinkwarmwasserbedarf Q_{tw} ist keine Parameter sondern bleibt konstant, der Raumheizbedarf Q_{rh} ist infolge der Parameteränderungen variabel.

Eine Beschreibung der Parameter sowie die zugehörigen Werte befindet sich in Tabelle C.4 auf S. 113 im Anhang.

Bei den Simulationen wurde auf die Variation der Fensterfläche in Abhängigkeit von der Orientierung verzichtet. Andernfalls wäre die Umsetzung eines detaillierten Algorithmus für die Steuerung der Verschattung unerlässlich gewesen, da es sonst zwangsläufig zu einer sommerlichen Überhitzung käme (und eine Kühlung erfolgen müsste), ohne dass der winterliche Heizbedarf im gleichen Maß sänke wie z.B. in [Vallentin00] dargestellt. Somit würde der primärenergetisch zu bewertende Kühlbetrag und damit der Gesamtenergiebedarf stark ansteigen, ohne dass das Szenario als realistisch angesehen werden könnte.

Wie in Abbildung 3.7 dargestellt, ist auch der Anlagenluftwechsel ein freier Parameter. Daher musste der Strombedarf der zugehörigen Ventilatoren ebenfalls angepasst werden. Ausgehend von einem Referenzwert aus dem [Task28] erfolgte dies nach der [DIN4701].

3.2.5 Zusammenfassung

Grundlage für die durchzuführenden Simulationsrechnungen sind drei Reihenhaus-Segmente, die über ein aktiv-solares Heizsystem mit Saisonspeicher verfügen, das zur Nacherwärmung der durch eine Wärmerückgewinnung vorgewärmten Frischluft im Heizfall zur Verfügung steht. Für insgesamt 14 Parameter des Gesamtsystems wird die Sensitivität des Primärenergiebedarfs für einen Zyklus von 20 Jahren untersucht. Als Referenzsystem dient ein baugleiches Gebäude, das von einem rein fossilen Heizsystem versorgt wird. Dafür wurde analog wie in [John02] die Kollektorfläche des solaren Heizsystems entfernt und das Volumen des Pufferspeichers auf 1 m³ gesetzt.

3.3 Algorithmen für Sensitivitätsanalysen

Sensitivitätsuntersuchungen sind sowohl beim experimentellen Arbeiten als auch bei (theoretischen) Simulationen von großer Bedeutung, da sich in beiden Fällen eine vergleichbare Ausgangssituation ergibt: Die gemessene oder simulierte Ausgangsgröße kann als Funktion von einer Vielzahl von Eingangsparametern und Randbedingungen angesehen werden⁴. Im allgemeinsten Fall weisen die Parameter untereinander Korrelationen auf, wobei weder die Korrelationen noch ihr Einfluss auf die Zielgröße quantitativ bekannt sind. Somit besteht das Ziel der Verfahren darin, mit einer möglichst geringen Anzahl von Experimenten oder Simulationen den Parametereinfluss auf eine bestimmte Zielgröße zu bestimmen sowie kaum relevante Parameter zu extrahieren.

Grundsätzlich lassen sich die Verfahren in zwei Kategorien unterteilen, zum Einen werden Parameter systematisch, zum Anderen stochastisch variiert. Die beiden gängigsten Vertreter der jeweiligen Kategorie sind die Differentielle Sensitivitätsanalyse (DSA) zur systematischen

4. Insbesondere bei Experimenten kann die Parametervariation auch in einer Streuung der Werte infolge von Messfehlern um den Mittelwert bestehen.

Parametervariation sowie die Monte Carlo Verfahren, bei denen die zu untersuchenden Parameter stochastisch variiert werden. Grundlegend werden diese Algorithmen in [Lomas92] bzw. die Monte Carlo Verfahren in [Bevington92] behandelt.

Zu den systematischen Verfahren gehört auch die Klasse der Verfahren, die unter den Begriff Faktoranalyse fallen und die in dieser Arbeit im Mittelpunkt stehen werden, die Darstellung orientiert sich dabei weitgehend an [Box78]. Des Weiteren gibt es eine Reihe von Verfahren zur systematischen Parameteruntersuchung, die auf finite Differenzenverfahren oder differentielle Analysen zurückgehen, wie z.B. in [Aude00] vorgestellt.

3.3.1 Differentielle Sensitivitätsanalyse

Dieses Verfahren kann wohl als das gängigste überhaupt angesehen werden, vgl. auch [Macdonald01]. Die Differentielle Sensitivitätsanalyse bietet den Vorteil, dass sie sich unabhängig vom gewählten Simualtionstool leicht implementieren lässt, die Anzahl der erforderlichen Simulationen steigt allerdings linear mit der Anzahl der zu untersuchenden Parameter, bei N Parametern sind $2N + 3$ Simulationen erforderlich. Der Hauptnachteil der DSA besteht darin, dass sie den Einfluss der Parameter einzeln untersucht, so dass Korrelationen der Parameter untereinander vernachlässigt werden.

Für die DSA wird zunächst ein Referenzfall definiert, dabei werden allen Parametern ihre wahrscheinlichsten Werte zugeordnet und der Wert der Ausgangsgröße nach der Simulation wird fortan als Referenzwert angesehen. Pro Simulation wird danach die Änderung Δp_i der Ausgangsgröße p als Folge der Änderung Δi einer Eingangsgröße i bezogen auf den Referenzwert p_{Ref} betrachtet:

$$\Delta p_i = p_i - p_{Ref}. \quad (3.4)$$

Bei der Variation der Parameter sind dabei keine weiteren Annahmen über die Verteilung der Werte erforderlich, die die Parameter annehmen können. Häufig wird jedoch eine Normalverteilung zu Grunde gelegt, so dass die Variation um ± 2.33 Standardabweichungen s erfolgt⁵.

Nach [Lomas92] kann der Term $\Delta p_i / (\Delta i)$ als Abschätzung der differentiellen Sensitivität 1.Ordnung des Outputs p bezüglich des Inputs i angesehen werden. Ist das betrachtete System linear, so gilt durch Interpolation exakt:

$$dp_i = di \frac{\Delta p_i}{\Delta i}, \quad (3.5)$$

5. Bei einer Normalverteilung liegen in diesem Intervall dann 99 % aller Werte (vgl. z.B. [Bosch00]).

das heißt eine differentielle Änderung dp_i in der Ausgangsgröße läßt sich aus einer relativ großen Änderung Δp_i bei zugehöriger Variation des Inputs um Δi durch Interpolation berechnen.

Betrachtet man jeweils die Variation aller N Parameter um den relativ gesehen gleichen Betrag (z.B. ± 2.33 Standardabweichungen), so ergibt sich im Fall eines superponierbaren Systems für die totale Abweichung der Ausgangsgröße Δp_{tot} nach [Lomas92]:

$$(\Delta p_{tot}) = \left(\sum_{i=1}^N \Delta p_i \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (3.6)$$

das heisst die Abweichung des Outputs ergibt sich additiv aus den Änderungen bezüglich jeder einzelnen Eingangsgröße und die Sensitivität bezüglich jedes Parameters i ist unabhängig von den Werten der übrigen $N - 1$ Parameter.

Die Begriffe Linearität und Superponierbarkeit besitzen auch eine anschauliche Deutungsmöglichkeit wie z.B. in [Rohlfss97] behandelt. Diese Veranschaulichung soll an dem in 3.2 beschriebenen Referenzsystem illustriert werden. Der Übersichtlichkeit halber werden als Eingangsgrößen nur die drei Parameter Kollektorfläche (A_{Koll}), Größe des Pufferspeichers (V_P) und Raumsollwert (T_{Ra}) gewählt und die Sensitivität des Solarertrags (Q_{sol}) auf diese drei Eingangsgrößen betrachtet. Die Parameterwerte für den Referenzfall sowie die betrachteten Änderungen sind in Tabelle 3.5 dargestellt.

Tabelle 3.5: Parameterwerte für Referenzfall und die anschließenden Variationen.

Parameter	Wert	Variation
A_{Koll}	120 m ²	± 90 m ²
V_P	60 m ³	± 30 m ³
T_{Ra}	20 °C	± 2 K

Trägt man die prozentuale Änderung im jeweiligen Output bezogen auf den Referenzwert für die drei Parameter über den durchgeführten Simulationen auf, so ergibt sich die Darstellung in Abbildung 3.8.

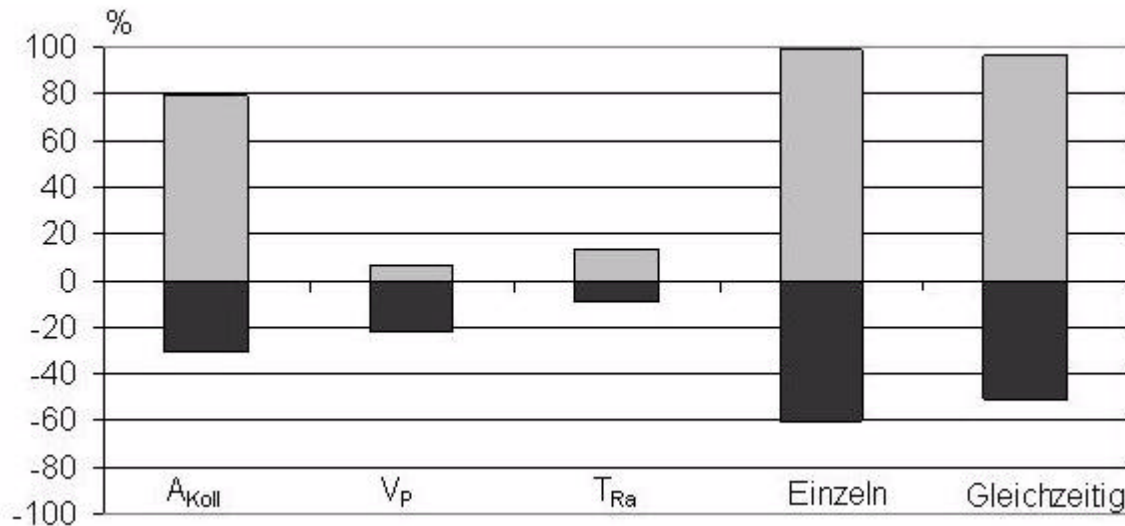


Abbildung 3.8: Sensitivität des Solarertrags bezüglich der drei Parameter A_{Koll} , V_P und T_{Ra} , aufgetragen ist ferner die jeweilige Änderung der Ausgangsgröße bei gleichzeitiger Änderung aller Parameter in negativer bzw. positiver Richtung (abgekürzt mit gleichzeitig) sowie die Summe der Änderung der Ausgangsgrößen bei Einzelvariation der Parameter (abgekürzt mit einzeln).

Ist die Sensitivität einer Ausgangsgröße bezüglich der Variation eines Parameters in negativer und positiver Richtung gleich, d.h. sind die jeweiligen Balken gleich lang, so verhält sich das System linear. Wie in Abbildung 3.8 zu sehen, verhält sich das System bezüglich keiner Parameteränderung linear (da die Balken für die jeweilige Variation in positiver und negativer Richtung nicht gleich lang sind).

Vergleicht man die Änderung bei gleichzeitiger Variation aller Parameter in einer Richtung mit der Summe der Einzelvariationen anhand der Balkenlängen in Abbildung 3.8, so verhält sich das System für diese Parameter im gewählten Wertebereich superponierbar, wenn die entsprechenden Balken gleich lang sind. Auch das ist für das vorliegende Beispiel nicht erfüllt. Insbesondere für die Variation der Parameter mit einhergehender Verringerung des Solarertrags, ergibt sich ein deutlicher Unterschied zwischen Hintereinanderausführung der Änderungen im Vergleich zur gleichzeitigen Änderung.

Für dieses Beispiel hat die DSA also nur eine sehr begrenzte Aussagekraft. So können die zu den Parametervariationen gehörigen Balkenlängen zwar möglicherweise als Hinweis auf die Bedeutung des Parameters für die Zielgröße gewertet werden, allerdings ist auch diese Aussage nur eingeschränkt gültig, da z.B. der Einfluss der Speichergröße bei Vergrößerung des Speichervolumens größer zu sein scheint als bei Änderung des Raumsollwerts in gleicher

Richtung, bei den Variationen in umgekehrter Richtung verhält es sich jedoch anders. Zudem ist das System bezüglich dieser beiden Parameter nicht linear, so dass die beobachteten Änderungen noch dazu stark vom zugrunde gelegten Wertebereich abhängen und letztlich keine Aussage darüber möglich ist, welcher Parameter entscheidender für die Bestimmung des Solarertrags ist. Aufgrund der nicht erfüllten Superponierbarkeit sind Korrelationen zwischen den Parametern zu erwarten, deren Einfluss anhand dieses Verfahrens nicht beurteilt werden kann, aber möglicherweise stärker ist als der Einfluss einer einzelnen Variable.

Insgesamt handelt es bei der Differentiellen Sensitivitätsanalyse also um ein einfach zu implementierendes Verfahren, bei dem der Einfluss der einzelnen Parameter untersucht wird, allerdings haben die Ergebnisse nur dann eine Aussagekraft, wenn das System sich linear bezüglich der jeweiligen Parameteränderungen verhält und die Sensitivitäten nicht vom Wert der übrigen Parameter abhängig sind, sondern addiert werden können, also das System superponierbar ist.

Da bei dem zu untersuchenden System offensichtlich Korrelationen zwischen den Parametern existieren, wird von einer Anwendung dieser Methode auf die Untersuchung aller Parameter abgesehen, da die Ergebnisse wie schon das Beispiel mit nur drei Parametern gezeigt hat, nicht belastbar wären.

3.3.2 Vollständige und reduzierte Faktoranalyse

Bei dieser Klasse von Verfahren kann sowohl der Einfluss einzelner Parameter untersucht werden als auch Wechselwirkungen der Parameter untereinander. Ebenso wie bei der DSA müssen die Eingangsgrößen nicht normalverteilt sein. Der große Vorteil zumindest der reduzierten Faktoranalyse liegt darin, dass die Anzahl der notwendigen Simulationen nicht linear mit der Parameterzahl steigt. So gelingt es z.B. [Fürbringer95], den Einfluss von 24 Parametern sowie der relevanten Korrelationen in 256 Simulationsläufen für die Luftströmung in einem dreigeschossigen Gebäude aufzuklären. Das jeweilige Verfahren läßt sich zwar prinzipiell leicht implementieren, erfordert aber einen recht hohen manuellen Arbeitsaufwand. Je nach Simulationstool ist aber die Integration in einen automatisierten Simulationsablauf zumindest teilweise möglich, wie in [Fürbringer99] beschrieben.

Wie bereits zu Beginn des Kapitels erwähnt, orientiert sich die Darstellung der vollständigen und reduzierten Faktoranalyse weitgehend an [Box78]. Zur Verdeutlichung des Prinzips wird zunächst die vollständige Faktoranalyse vorgestellt, die reduzierte läßt sich auf dieser Grundlage dann leicht ableiten.

Die Faktoranalyse soll für zwei Stufen betrachtet werden, d.h. für jeden Parameter werden zwei Ausprägungen, also Minimal- und Maximalwert zugelassen. Zur Illustration soll das bereits in 3.3.1 verwendete Beispiel dienen: Der Einfluss der drei Parameter A_{Koll} , V_P und T_{Ra} auf den spezifischen Solarertrag (Q_{sol}) wird untersucht. Der jeweilige Minimalwert wird

dabei durch ein “-” symbolisiert, der Maximalwert durch ein ”+”, die Zahlenwerte sind Tabelle 3.6 zu entnehmen.

Tabelle 3.6: Belegung des Minimal- und Maximalwertes der einzelnen Parameter.

Parameter	“-”	“+”
A_{Koll}	30 m ²	210 m ²
V_P	30 m ³	90 m ³
T_{Ra}	18 °C	24 °C

Bei zwei Werten pro Parameter sind 2^3 Simulationen erforderlich, die wie im Tableau in Tabelle 3.7 dargestellt realisiert wurden.

Tabelle 3.7: Realisierung der 8 Simulationen, “+” steht jeweils für die Parameterbelegung mit dem Maximal- “-” für die Belegung mit dem Minimalwert.

Lauf γ	A_{Koll}	V_P	T_{Ra}
1	-	-	-
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	-
5	-	-	+
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	+	+

Der Effekt der einzelnen Parameter auf die Zielgröße berechnet sich nun als “vorzeichenrichtige” Addition der Ergebnisse der Simulationsläufe, dividiert durch die Anzahl der Simulationen. Anschaulich wird dafür die Ergebnisspalte mit der Spalte des jeweiligen Parameters multipliziert und anschließend die Spaltensumme gebildet. Konkret ergibt sich damit:

$$A_{Koll}\text{-Effekt} = (-\gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_3 + \gamma_4 - \gamma_5 + \gamma_6 - \gamma_7 + \gamma_8) / 8$$

$$V_P\text{-Effekt} = (-\gamma_1 - \gamma_2 + \gamma_3 + \gamma_4 - \gamma_5 - \gamma_6 + \gamma_7 + \gamma_8) / 8$$

$$T_{Ra}\text{-Effekt} = (-\gamma_1 - \gamma_2 - \gamma_3 - \gamma_4 + \gamma_5 + \gamma_6 + \gamma_7 + \gamma_8) / 8$$

Bei dieser Berechnung fällt sofort ein wichtiger Unterschied zur Differentiellen Sensitivitätsanalyse auf: Der Effekt eines Parameters wurde dort untersucht, indem die anderen Parameter ihren Referenzwert zugewiesen bekamen, bei der Faktoranalyse werden jedoch auch die

anderen Parameter variiert. Somit ist die Faktoranalyse in der Lage, Korrelationen zwischen den Parametern aufzudecken und setzt keine Superponierbarkeit des Systems voraus.

Berechnung der Parameterwechselwirkungen

Per Definition berechnet sich der Einfluss der Korrelation zweier Parameter i und j (symbolisiert durch $i \times j$) aus den Werten des i -Effekts für den Minimal- und Maximalwert von j ⁶. Die konkrete Berechnungsvorschrift läßt sich leicht aus Tabelle 3.7 ablesen, indem zunächst für die Korrelation (z.B. $A_{Koll} \times V_P$) durch Multiplikation der beiden Einzelspalten eine neue Spalte erzeugt wird. Diese Vorzeichen werden an die Simulationsergebnisse multipliziert, von der anschließend die Spaltensumme, dividiert durch die Hälfte der Gesamtzahl, gebildet wird.

Anschaulich lässt sich eine Korrelation $i \times j$ damit als Differenz der Mittelwerte des i -Effekts bei den möglichen Belegungen von j auffassen. Da somit in die Berechnung des jeweiligen Effekts nur die Hälfte der Werte eingehen, verringert sich bei der Korrelationsberechnung der Divisor um die Hälfte.

Auf den Fall der obigen drei Parameter bezogen bedeutet das konkret:

$$A_{Koll} \times V_P = (\gamma_1 + \gamma_4 + \gamma_5 + \gamma_8) / 4 - (\gamma_2 + \gamma_3 + \gamma_6 + \gamma_7) / 4$$

$$A_{Koll} \times T_{Ra} = (\gamma_1 + \gamma_3 + \gamma_6 + \gamma_8) / 4 - (\gamma_2 + \gamma_4 + \gamma_5 + \gamma_7) / 4$$

$$V_P \times T_{Ra} = (\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_7 + \gamma_8) / 4 - (\gamma_3 + \gamma_4 + \gamma_5 + \gamma_6) / 4.$$

Analog läßt sich die Korrelation aller drei Faktoren bestimmen, indem zunächst die Vorzeichen der neuen $A_{Koll} \times V_P \times T_{Ra}$ -Spalte aus den drei Einzelspalten gebildet werden und dann die vorzeichenrichtige Spaltensumme der Simulationsergebnisse dividiert durch 4 ermittelt wird:

$$A_{Koll} \times V_P \times T_{Ra} = (\gamma_2 + \gamma_3 + \gamma_5 + \gamma_8) / 4 - (\gamma_1 + \gamma_4 + \gamma_6 + \gamma_7) / 4.$$

Insgesamt ergeben sich damit die in Tabelle 3.11 auf S. 87 dargestellten Ergebnisse, die nach Vorstellung der reduzierten Faktoranalyse diskutiert werden sollen.

6. Die hier zugrunde gelegte Berechnungsvorschrift für Parameterkorrelationen ist nicht identisch mit der nach [DIN55350-23], die nur für zwei Parameter definiert ist. Die hier verwendete Definition hat zur Folge, dass die berechnete Korrelationen nicht normiert ist. Eine Möglichkeit zur Normierung wäre beispielsweise, die berechneten Korrelationen auf den betragsgrößten Effekt einer Variable zu beziehen. Auf diese Umrechnung wurde im Folgenden jedoch verzichtet, um das Prinzip der Faktoranalyse besser verdeutlichen zu können.

Geometrische Deutung der Effekte bei der Faktoranalyse

Die Effekte der vollständigen Faktoranalyse lassen sich bei drei Faktoren geometrisch leicht veranschaulichen. So kann man die acht Parameterrealisierungen den Ecken eines Würfels zuordnen.

Die Effekte der drei Variablen werden dann durch die Flächen des Würfels dargestellt: Die zwei Mittelwerte, aus denen sich jeder der drei Effekte berechnet, entsprechen gerade zwei gegenüber liegenden Seiten, wie in Abbildung 3.9 dargestellt. Den Korrelationen je zweier Parameter können zwei sich schneidende einbeschriebene Diagonalfächen zugeordnet werden, entsprechend der zwei Mittelwerte aus denen sich diese Effekte berechnen. Die Wechselwirkung aller drei Parameter als Differenz zweier gemittelter Effekte wird schließlich durch die zwei im Würfel eingeschlossenen Tetraeder repräsentiert.

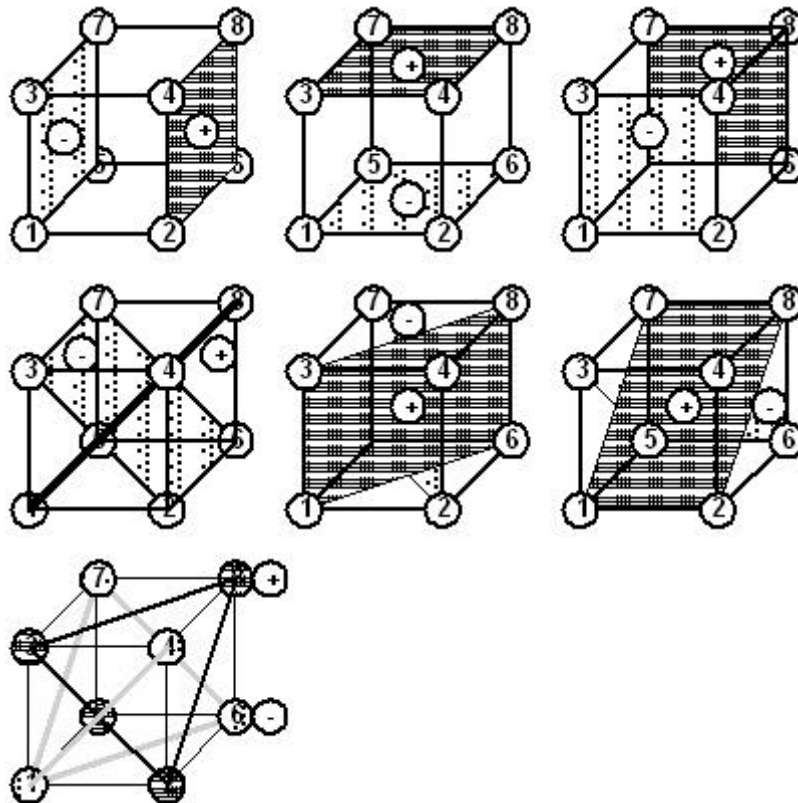


Abbildung 3.9: Geometrische Veranschaulichung der 2^3 -Faktoranalyse. Die erste Zeile symbolisiert die Berechnung der Haupteffekte der Parameter, die zweite die der Korrelationen von je zwei Parametern. Die dritte Zeile veranschaulicht die Berechnung der Wechselwirkung aller drei Parameter. Die Würfecken repräsentieren die Ergebnisse des Simulationslaufes mit der entsprechenden Nummer. Gemäß der schraffierten Fläche und ihres angegebenen Vorzeichens werden die Ergebnisse zusammengefasst.

Reduzierte Faktoranalyse

Eine vollständige Faktoranalyse wie eben vorgestellt erfordert bei N Parametern 2^N Simulationen, insbesondere bei einer großen Parameteranzahl kann dieses Verfahren also sehr zeitintensiv sein. In einem solchen Fall bietet sich eine reduzierte Faktoranalyse an. Obgleich dafür deutlich weniger Simulationsläufe erforderlich sind, geht damit kein Informationsverlust einher, allerdings ist ein Teil der Resultate gekapselt und nicht unmittelbar zugänglich.

Wie im Fall der vollständigen Faktoranalyse soll wieder von einem zweigeteilten Design ausgegangen werden, d.h. jeder Parameter wird nur mit einem Minimal- und Maximalwert belegt.

Das Prinzip der reduzierten Analyse besteht nun darin, dass für N Parameter eine Zahl $k < N$ gewählt wird. Nun werden statt der 2^N erforderlichen Simulationen nur 2^{N-k} durchgeführt. Dafür wird das Simulationsmuster⁷ zunächst nur für die $(N-k)$ Variablen aufgestellt, die entsprechenden Spalten der verbleibenden k Variablen werden aus Produkten der $(N-k)$ ersten Variablen gebildet.

Dieses Konzept soll an dem Beispiel des 2^3 -Designs verdeutlicht werden. Sinnvollerweise wird $k = 1$ gewählt, d.h. man geht zunächst vom Simulationsmuster in Tabelle 3.8 für die ersten beiden Variablen aus:

Tabelle 3.8: Simulationsmuster für das 2^{3-1} -Design.

Lauf	A_{Koll}	V_P
1	-	-
2	+	-
3	-	+
4	+	+

Die zur dritten Variablen gehörende Spalte ist in diesem Fall einfach das Produkt der ersten beiden Spalten, was durch die Schreibweise

$$3 = 12 \tag{3.7}$$

symbolisiert wird. Den Generator des 2^{3-1} -Designs erhält man daraus, indem beide Seiten mit 3 multipliziert werden:

$$3 \times 3 = 12 \times 3 \tag{3.8}$$

7. Anordnung der Kombinationen von Minimal- und Maximalwert, repräsentiert durch “+”- und “-”-Zeichen

(3.8) kann nun noch weiter vereinfacht werden. So entsteht auf der linken Seite eine Spalte, die nur aus “+”-Zeichen besteht, per Definition wird sie als neutrales Element bezüglich der hier erklärten Multiplikation mit I abgekürzt; somit läßt sich (3.8) schreiben als:

$$I = 123. \quad (3.9)$$

Diese Relation wird als Generator des Simulationsmusters bezeichnet. Allgemein kann das Design der 2^{N-k} Simulationen durch genau k Generatoren erzeugt werden. Dabei gibt die “Länge” des Generators (gemeint ist die Anzahl der Spalten auf der rechten Seite) die Ordnung des 2^{3-1} -Designs an, in diesem Fall ist das Design also 3. Ordnung. Symbolisiert wird das durch eine römische Zahl als Index, hier also 2_{III}^{3-1} .

Gehören zu einem Design im allgemeinen mehrere Generatoren, so wird die Ordnung durch die minimale Länge der entsprechenden Generatoren bestimmt.

Im obigen Beispiel ergeben sich aus dem Generator (3.9) desweiteren folgende Relationen:

$$1 = 1231 = 1123 = I23 = 23 \quad (3.10)$$

$$2 = 1232 = 1223 = 1I3 = 13. \quad (3.11)$$

Diese Identitäten gelten, da die Reihenfolge der Elemente bei der Multiplikationen vertauscht werden kann und die Multiplikation mit dem neutralen Element I den Wert selbst liefert.

Den Relationen (3.7), (3.10) und (3.11) kommt bei der reduzierten Faktoranalyse nun eine sehr wichtige Bedeutung zu. Da statt der 2^3 erforderlichen Simulationen nur 2^{3-1} ausgeführt werden, entspricht die jeweilige vorzeichenrichtige Spaltensumme eben nicht mehr dem Effekt der zugehörigen Variable, sondern wird als sogenannter Schätzer für den Einfluss des Parameters selbst und weiterer Wechselwirkungseffekte bezeichnet. Dabei beinhaltet der berechnete Schätzwert genau die Effekte, wie sie durch (3.7), (3.10) bzw. (3.11) angegeben werden. Für den Schätzer l_i ist folgende am Beispiel von (3.10) gezeigte Notation gebräuchlich:

$$l_1 \rightarrow 1 + 23 \quad (3.12)$$

Beispielsweise liefert also die vorzeichenrichtige Summe der ersten Spalte gemäß (3.10) den Effekt der ersten Variable und der Wechselwirkung der zweiten mit der dritten Variable⁸.

8. In diesem Zusammenhang kommt der Ordnung des Designs noch eine andere, anschauliche Bedeutung zu, sagt sie doch etwas über die Art der in einem Schätzer wechselwirkenden Terme aus. Allgemein kombiniert ein Schätzer bei einem Design k -ter Ordnung nur Terme, deren Länge insgesamt gerade k beträgt. Mit anderen Worten kombinieren nie (da die Ordnung immer mindestens III beträgt) die Effekte der Variablen selbst miteinander (sog. Haupteffekte), bei Ordnung IV sind die Haupteffekte mit Termen der dreifachen Wechselwirkung kombiniert, bei Ordnung V mit Termen vierfacher Wechselwirkung. Darüber hinaus sind z.B. bei Ordnung IV wiederum die Terme zweifacher Wechselwirkung miteinander kombiniert.

Nur wenn im Fall eines großen Wertes für die Summe der beiden Werte eine genauere Aufschlüsselung sinnvoll erscheint, sind weitere Simulationen erforderlich, für die ein anderer Generator zu wählen ist, so dass sich durch Kombination der beiden Simulationsmuster mit Ergebnissen die einzelnen Terme identifizieren lassen. Sollen z.B. die Effekte der einzelnen Variablen extrahiert werden, ist als Generator $I = -123$ zu wählen, denn zunächst ergeben sich folgende Schätzer:

$$l'_1 \rightarrow 1 - 23$$

$$l'_2 \rightarrow 2 - 13$$

$$l'_3 \rightarrow 3 - 12,$$

mit den Schätzern des durch $I = 123$ erzeugten Musters ergeben sich so gemäß der folgenden beiden Gleichungen die Effekte der Variablen i, j, k sowie die Korrelationen zwischen den Parametern:

$$\frac{1}{2}(l'_i + l_i) = i \tag{3.13}$$

$$\frac{1}{2}(l'_i - l_i) = jk. \tag{3.14}$$

Ein ähnliches Vorgehen ist stets möglich, um gewünschte Effekte (i.a. auch Wechselwirkungen zwischen den Variablen) zu extrahieren.

Für das Beispiel mit den Parametern A_{Koll} , V_P und T_{Ra} ergibt sich für das 2_{III}^{3-1} -Design folgendes Resultat aus Tabelle 3.9 bei Wahl des Generators $I = 123$ bzw. das in Tabelle 3.10 dargestellte Resultat bei Wahl des Generators $I = -123$.:

Tabelle 3.9: Relationen, Schätzer und Ergebnisse für das 2_{III}^{3-1} -Design mit dem Generator $I = 123$, die Einheiten der berechneten Werte entsprechen der Dimension der Zielgröße (spezifischer Solarertrag).

Relation	Schätzer	Wert / kWh/m ²
1 = 23	$l_1 \rightarrow 1 + 23$	-87.71
2 = 13	$l_2 \rightarrow 2 + 13$	35.79
3 = 12	$l_3 \rightarrow 3 + 12$	-4.2

Tabelle 3.10: Relationen, Schätzer und Ergebnisse für das 2_{III}^{3-1} -Design mit dem inversen Generator $I = -123$.

Relation	Schätzer	Wert / kWh/m ²
1 = 23	$l_1' \rightarrow 1 - 23$	-87.16
2 = 13	$l_2' \rightarrow 2 - 13$	34.98
3 = 12	$l_3' \rightarrow 3 - 12$	34.39

Aus den Ergebnissen für die Schätzer aus Tabelle 3.9 und Tabelle 3.10 lassen sich nun wie in (3.13) und (3.14) angeben die jeweiligen Effekte der drei Variablen sowie die eventuellen Korrelationen zwischen den Variablen berechnen, die entsprechenden Werte sind in Tabelle 3.11 aufgeführt.

Tabelle 3.11: Effekte der drei Variablen A_{Koll} , V_P und T_{Ra} sowie Korrelationen zwischen den Parametern

Variable	A_{Koll}	V_P	T_{Ra}	$A_{Koll} \times V_P$	$A_{Koll} \times T_{Ra}$	$V_P \times T_{Ra}$
Effekt / kWh/m ²	-87.4	35.4	15.1	-19.3	0.4	-0.3

Betrachtet man zunächst die Effekte der drei Variablen als solche, so zeigt sich, dass alle einen nennenswerten Einfluss auf die Zielgröße, den spezifischen Solarertrag, haben, wobei der der Kollektorfläche dominiert. Wie zu erwarten war, ergibt sich auch eine starke Korrelation zwischen Kollektorfläche und Speichergröße, die in der gleichen Größenordnung liegt wie der Einfluss der gewünschten Raumtemperatur. Das Vorzeichen gibt dabei an, ob eine Parameteränderung den Wert der Zielgröße in gleicher (positives Vorzeichen) oder in umgekehrter Richtung (negatives Vorzeichen) verändert. Die absoluten Werte der Effekte sind in Relation zum jeweiligen Wert der Zielgröße zu sehen (zwischen ca. 100 kWh/m²a und 370 kWh/m²a).

Physikalisch zeigt sich der große Einfluss der Kollektorfläche, dieser muss allerdings auch vor dem Hintergrund des großen Unterschieds von Minimum und Maximum gesehen werden. Diese Differenz beeinflusst das Simulationsergebnis ebenfalls. Dagegen zeigt sich, dass die Speichergröße eine geringere Rolle spielt, eine Vergrößerung des Speichervolumens vermag den Solarertrag nur gering zu erhöhen. Dem entsprechend dominiert bei der Korrelation zwischen der Kollektorfläche und dem Speichervolumen der Einfluss der Kollektorfläche, eine Erhöhung beider Parameterwerte senkt insgesamt den spezifischen Solarertrag.

Der Raumsollwert hat den geringsten Einfluss der drei Parameter. Eine Erhöhung des Raumsollwerts bewirkt eine Erhöhung des Raumheizbedarfs, was einen höheren Solarertrag ermöglicht.

Zieht man die Resultate der Differentiellen Sensitivitätsanalyse heran, so sind die Schwächen der DSA evident. Lediglich den Einfluss des Raumsollwertes vermag sie annähernd richtig vorherzusagen, insbesondere bei der Sensitivität bezüglich der Kollektorfläche aber auch bei der Sensitivität bezüglich der Speichergröße machen schon die Nichtlinearitäten eine quantitative Aussage unmöglich. Auch gibt die Differentielle Sensitivitätsanalyse naturgemäß keine Auskunft über die starke Korrelation zwischen Kollektorfläche und Speichergröße, lediglich die auffallende Nicht-Superponibilität kann als Hinweis darauf gewertet werden, dass Korrelationen zwischen den Variablen aufgetreten sind.

Dieses Beispiel illustriert also gut die Grenzen der Differentiellen Sensitivitätsanalyse im Vergleich zur reduzierten bzw. vollständigen Faktoranalyse.

Zusammenfassend läßt sich die reduzierte Faktoranalyse der Form 2_k^{N-p} so charakterisieren, dass zunächst eine vollständige Faktoranalyse für $N-p$ Parameter zu Grunde gelegt wird, also auch 2^{N-p} Simulationen erforderlich sind. Die Spalten im Simulationsmuster der übrigen p Variablen entstehen als Teilprodukte der ersten $N-p$ Spalten, daraus ergeben sich die für das Design charakteristischen p Relationen der Generatoren, deren Länge, d.h. deren Anzahl der miteinander kombinierten Spalten, mindestens der Ordnung k des Designs entspricht.

Als Ergebnis liefert die reduzierte Faktoranalyse die Effekte der einzelnen Variablen, allerdings beinhalten die Ergebnisse ebenfalls die Effekte von Wechselwirkungstermen der Ordnung $k-1$. Sofern erforderlich können diese jedoch mittels zusätzlicher Simulationen durch die Wahl von anderen Generatoren extrahiert werden.

3.3.3 Stochastische Verfahren

Obgleich die Monte Carlo Verfahren sicherlich die gängigsten dieser Verfahrensklasse sind, existieren weitere Algorithmen, wie z.B. die in [Sowa98] vorgestellte Methode der zufälligen Faktoren. Die Belegung der zu untersuchenden Parameter erfolgt hier vor der Simulation, indem zufällig eine Zeitreihe für den einzelnen Parameter erzeugt wird, die dann für die Simulation als Eingangsdatensatz dient. Eine andere Methode besteht nach [Lomas92] darin, die relevanten Parameter während der Simulation von Zeitschritt zu Zeitschritt zu variieren.

In dieser Arbeit soll jedoch ausschließlich ein Monte Carlo Verfahren vorgestellt werden und zur Anwendung kommen.

3.3.4 Monte Carlo Verfahren

Anders als die zuvor vorgestellten Verfahren zur systematischen Parametervariation stellt die Monte Carlo Simulation Anforderungen an die Verteilung der Parameter. So wird jeder Parameter als normalverteilt angenommen. Vor jeder Simulation werden alle Parameter gleichzeitig variiert. Dafür wird für jeden Input der Wert gemäß der Normalverteilung zufällig

gezogen, d.h. Werte, die in der Nähe des Mittelwerts der Verteilung liegen, werden entsprechend häufiger gezogen. Durch die unabhängige Variation aller Parameter wird auch etwaigen Korrelationen der Parameter Rechnung getragen, somit wird für das System keine Superponierbarkeit vorausgesetzt, ebenso wenig wird Linearität angenommen.

Ein Nachteil der Monte Carlo Verfahren besteht allerdings darin, dass sie keine Aussagen über die Sensitivität einzelner Parameter zulassen, vielmehr liefern sie als Resultat nur die Sensitivität der Zielgröße gegenüber der Variation der Gesamtheit der Parameter.

Als Maß für die Sensitivität dient nach [Rohlfss97] die Stichprobenvarianz s_N^2 , die durch

$$s_N^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (w_i - \bar{w})^2 \quad (3.15)$$

definiert ist. Darin bezeichnet N die Anzahl der durchgeführten Simulationen, also den Stichprobenumfang, w_i den Wert der Zielgröße für die i te Simulation und \bar{w} den Erwartungswert der N -elementigen Stichprobe, der wie folgt definiert ist:

$$\bar{w} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_i. \quad (3.16)$$

Mittels der χ^2 -Verteilung (zur Definition siehe z.B. [DIN55350-22]) lassen sich dann in Abhängigkeit vom Simulationsumfang Konfidenzintervalle für die Stichprobenvarianz und den geschätzten Erwartungswert angeben.

Was die Monte Carlo Verfahren insbesondere bei großen Parameterzahlen interessant macht ist die Tatsache, dass die Anzahl der erforderlichen Simulationen nicht von der Anzahl der zu variierenden Parameter abhängt. Vielmehr ist lediglich die Genauigkeit der Stichprobenvarianz die für die Anzahl der erforderlichen Simulationen entscheidende Größe. [Lomas92] schlägt einen Wert von 60 – 80 vor, bei einer höheren Anzahl an Simulationen seien nur noch geringe Änderungen in der Genauigkeit von s_N zu erwarten.

Monte Carlo Verfahren lassen sich ebenfalls leicht implementieren, da wahrscheinlich jede Programmiersprache das Ziehen von Zufallszahlen ermöglicht. Allerdings ist es zur Durchführung von Monte Carlo Verfahren unerlässlich, nicht nur das Bestimmen der neuen Parameterwerte zu automatisieren, sondern ebenfalls die Parameterneubelegung und den jeweils anschließenden Simulationsstart. Im Fall dieser Arbeit erfolgte das mit einer datenbankgestützten Lösung, siehe auch [Wagner00].

Zur Realisierung der Normalverteilung bei den gezogenen Werten wurde auf die Verwerfungsmethode nach [Rohlfss97] zurückgegriffen, die im folgenden vorgestellt werden soll.

Der Parameter i sei auf dem Intervall $[i_{min}, i_{max}]$ normalverteilt mit der Standardabweichung s_i . Für die Neubelegung von i werden aus $[i_{min}, i_{max}] \times [0, 1]$ zwei unabhängige, gleichverteilte Zufallszahlen (x, y) gezogen. Gilt dann $p(x) > y$ mit

$$p(x) = \exp\left(-\frac{x^2}{2s_i^2}\right),$$

so wird der Parameter i für die nächste Simulation mit x belegt, andernfalls wird der Wert verworfen und ein neues Paar (x, y) gezogen.

Erstellt man für die so gezogenen Werte x ein Histogramm, so zeigt sich, dass sie eine Normalverteilung gut widerspiegeln.

Zusammenfassend lassen sich also Monte Carlo Verfahren als eine Methode charakterisieren, mit der unabhängig von der Anzahl der zu untersuchenden Parameter nach ca. 80 Simulationsläufen eine Aussage über die Sensitivität der Zielgröße gegenüber der Gesamtheit der Parameter möglich ist, während keine Einzelsensitivitäten bestimmt werden können. Dabei werden die einzelnen Parameter als normalverteilt angenommen und stets gleichzeitig pro Simulationslauf variiert, wobei die Wahl der Werte zufällig gemäß der jeweiligen Normalverteilung erfolgt.

Die Anwendung des Monte Carlo Verfahrens erfolgt in Kapitel 3.4 ab S. 92 unter Variation aller zu untersuchenden Parameter.

3.3.5 Zusammenfassung

Aus der Klasse der systematischen Verfahren für Sensitivitätsuntersuchungen wurden mit der Differentiellen Sensitivitätsanalyse (DSA) und der vollständigen bzw. reduzierten Faktoranalyse zwei Verfahren zur Ermittlung der Sensitivität einer Zielgröße gegenüber einzelnen Parametern vorgestellt. Während die DSA jedoch Korrelationen zwischen den Parametern vernachlässigt und stattdessen Superponierbarkeit des Systems sowie zusätzlich Linearität voraussetzt, können mit der Faktoranalyse auch Korrelationen zwischen den Parametern festgestellt werden. Unter Umständen ist dafür eine sehr viel geringere Anzahl von Simulationen erforderlich, da deren Zahl bei der reduzierten Faktoranalyse nicht wie bei der DSA mit der Zahl der zu untersuchenden Parameter N gemäß $2N + 3$ ansteigt.

Monte Carlo Verfahren aus der Klasse der stochastischen Algorithmen setzen ebenfalls weder Superponierbarkeit noch Linearität des Systems voraus, allerdings gehen sie von einer Normalverteilung der einzelnen Parameter aus und klären nur die Sensitivität der Zielgröße gegenüber der Gesamtheit der Parameter auf. Bei jedem Simulationslauf werden alle Parameter gemäß ihrer Verteilung zufällig variiert. Gerade bei einer Vielzahl von zu untersuchenden Parametern besteht ein Vorteil dieser Verfahren darin, dass die Anzahl der notwendigen Simulationen nicht von der Parameterzahl abhängt.

Die wichtigsten Eigenschaften der drei vorgestellten Verfahren sind in Tabelle 3.12 gegenübergestellt.

Tabelle 3.12: Übersicht über die dargestellten Sensitivitätsalgorithmen.

	Monte Carlo Verfahren	Differentielle Sensitivitätsanalyse	Vollständige Faktoranalyse	Reduzierte Faktoranalyse
Klasse	Stochastisch	Systematisch	Systematisch	Systematisch
Anzahl Simulationen	unabhängig von Parameterzahl, ca. 100	abhängig von Parameterzahl, $2N + 3$	abhängig von Parameterzahl, 2^N	unabhängig von Parameterzahl, bedingt wählbar
Anforderungen an Parameter	normalverteilt	unkorreliert	keine	keine
Anforderungen an System	keine	Linearität, Superponierbarkeit	keine	keine
Ergebnis	Erwartungswert und Varianz der Stichprobe	Abweichungen der Zielgröße vom Referenzfall	Einfluss der jew. Parameter, Korrelationen	Einfluss der jew. Parameter, Korrelationen
Aussage	Gesamtsensitivität	Einzelsensitivitäten	Einzelsensitivitäten	Einzelsensitivitäten

3.4 Primärenergetische Bewertung der untersuchten Varianten

3.4.1 Extraktion der relevanten Parameter

Wie in den vorausgegangenen Abschnitten beschrieben wurden für die reduzierte Faktoranalyse insgesamt 64 Simulationen durchgeführt. Die Auswertung der Sensitivität der Anlagenaufwandszahl e_p bezüglich der 14 Parameter für den Standort Zürich zeigt Abbildung 3.10. Dabei erfolgt die Variation der Parameter wie in Tabelle C.4 auf S. 113 dargestellt.

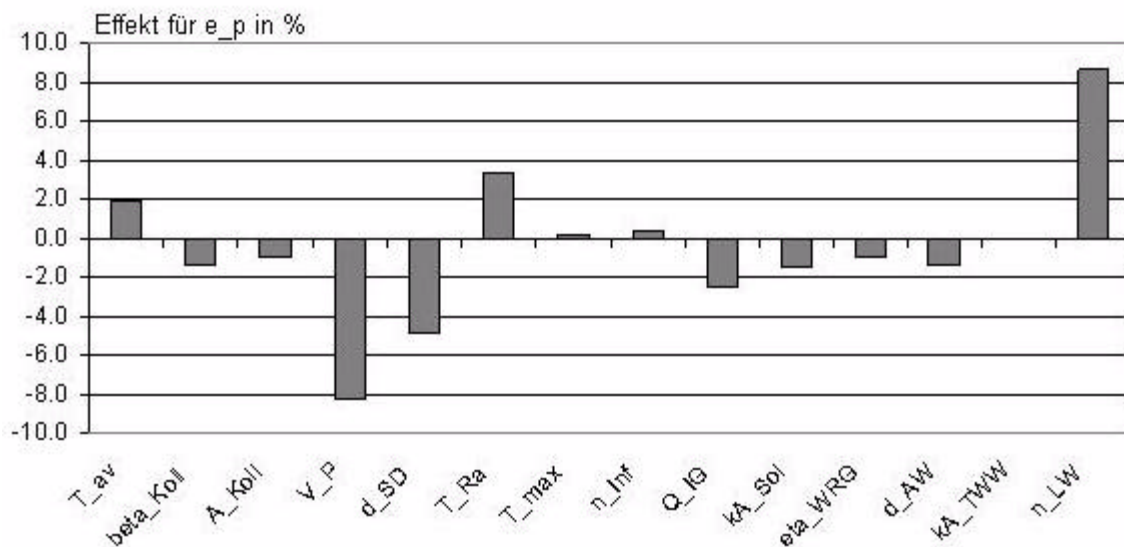


Abbildung 3.10: Sensitivität der Anlagenaufwandszahl e_p in % bezogen auf den Mittelwert von e_p der Simulationen für den Standort Zürich.

Den größten Einfluss haben danach die Speichergröße sowie die Speicherdämmung (V_P und d_SD), der Raumsollwert (T_Ra) und der Anlagenluftwechsel (n_LW); eine eher untergeordnete Rolle spielen die internen Gewinne (Q_IG), alle anderen Parameter fallen praktisch nicht ins Gewicht. Der geringe Einfluss der Rückwärmzahl der Wärmerückgewinnung dürfte sich aus der relativ geringen Differenz zwischen Minimal- und Maximalwert (vgl. Tabelle C.4 auf S. 113) erklären. Minimum und Maximum (70 % und 90 %) orientieren sich an marktüblichen Werten.

Offenbar bewirkt eine Vergrößerung des Pufferspeichervolumens eine drastische Senkung des fossilen Nachheizbedarfs, indem der Solareintrag erhöht wird. Diese These lässt sich belegen, wenn man den Effekt von 12.6 % des Speichervolumens bezüglich des Solarertrags betrachtet.

Auf die Bedeutung der Speicherdämmung weist bereits [John02] hin, eine gute Dämmung bewirkt eine merkliche Reduzierung der Anlagenaufwandszahl.

Der Effekt des Raumsollwertes erklärt sich wie folgt: Eine Erhöhung des Raumsollwertes erhöht den Raumheizbedarf, der Effekt beträgt 30 % . Aufgrund der Definition von e_p könnte man nun erwarten, dass eine Erhöhung des Raumheizbedarfs eine Reduzierung von e_p zur Folge hat, was aber durch die Simulation widerlegt wird. Offenbar ist also durch den starken Anstieg des Raumheizbedarfs keine Steigerung des solaren Anteils an der Raumheizungsunterstützung mehr möglich, folglich muss der erhöhte Verbrauch durch das fossile Nachheizsystem gedeckt werden, so dass letztlich der Wert für e_p steigt.

Der deutliche Einfluss des Anlagenluftwechsels auf e_p ist dagegen unmittelbar einleuchtend, bewirkt doch eine Erhöhung der Luftwechselrate einen steigenden Hilfsstrombedarf der Ventilatoren und somit eine Erhöhung von e_p . Ferner steigen die Lüftungswärmeverluste, was ebenfalls indirekt einen Anstieg von e_p zur Folge hat.

Eine Erhöhung der internen Gewinne senkt e_p , dieser Effekt ist vermutlich wie der Einfluss der Erhöhung des Raumsollwertes zu erklären. So bewirkt eine Erhöhung der internen Gewinne zwar eine Reduktion des Raumheizbedarfes (Effekt: 12.9 %), dies hat aber keine Vergrößerung von e_p zur Folge, da der fossile Nachheizbedarf bei unverändertem Solarertrag (Effekt: -4.5 %) offensichtlich sinkt, so dass sich letztlich e_p verkleinert.

Mittelt man über alle Simulationsläufe der reduzierten Faktoranalyse, so ergibt sich für e_p ein Wert von 1.50 . Dieser hohe Wert ist angesichts der zum Teil großen Wertebereiche einzelner Parameter und der daraus resultierenden ungünstigen Parameterkonstellationen jedoch nicht verwunderlich.

Zur Illustration der Erläuterungen der Parametereffekte befinden sich die Darstellungen des Einflusses der Parameter auf den spezifischen Solarertrag, den Raumheizbedarf und die fossile Nachheizenergie im Anhang in Abb. C.1, S. 114 bis Abb. C.5, S. 116.

Wie in 3.3.2 ab S. 80 dargestellt lässt die Faktoranalyse jedoch auch Schlüsse auf Korrelationen zwischen den Parametern zu. Im Beispiel Zürich spielen Parameterkorrelationen für die Zielgröße e_p eine untergeordnete Rolle, wie Abbildung 3.11 zeigt.

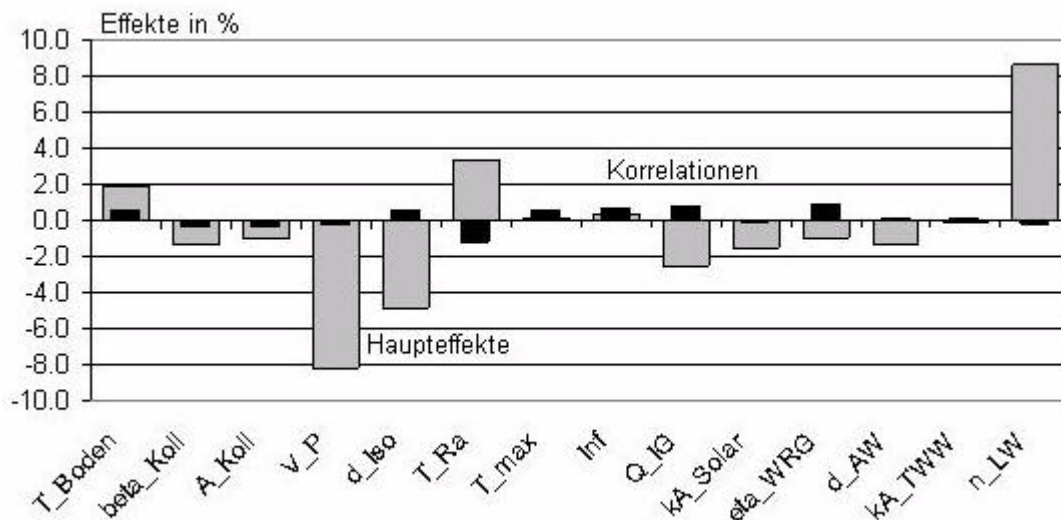


Abbildung 3.11: Die grauen Balken stellen den Effekt des jeweiligen Parameters auf die Zielgröße e_p dar, die schwarzen Balken symbolisieren den Einfluss der Korrelationen auf e_p , mit der die jeweilige Variable im Schätzer verbunden ist, vgl. 3.3.2 ab S. 80.

Diese Aussage gilt jedoch nur für e_p , da sich die Korrelationen bezüglich dieser Zielgröße zu kompensieren scheinen. Insbesondere für den Solarertrags ergibt sich ein ganz anderes Bild, die Korrelationen dominieren hierbei zum Teil sogar die Effekte der Parameter, aber auch für den Raumheizbedarf und die fossile Nachheizenergie spielen die Korrelationen eine wichtige Rolle. Die Gegenüberstellung der Parametereffekte mit dem Einfluss der Korrelationen befindet sich in Abb. C.4, S. 115 bis Abb. C.6, S. 116 im Anhang.

Auswertung und Vergleich des Monte Carlo Verfahren mit der Faktoranalyse

Das Monte Carlo Verfahren wurde mit 100 Simulationen durchgeführt. Den Verlauf des Erwartungswertes sowie der Standardabweichung (berechnet nach [DIN55350-23]) zeigt Abbildung 3.12.

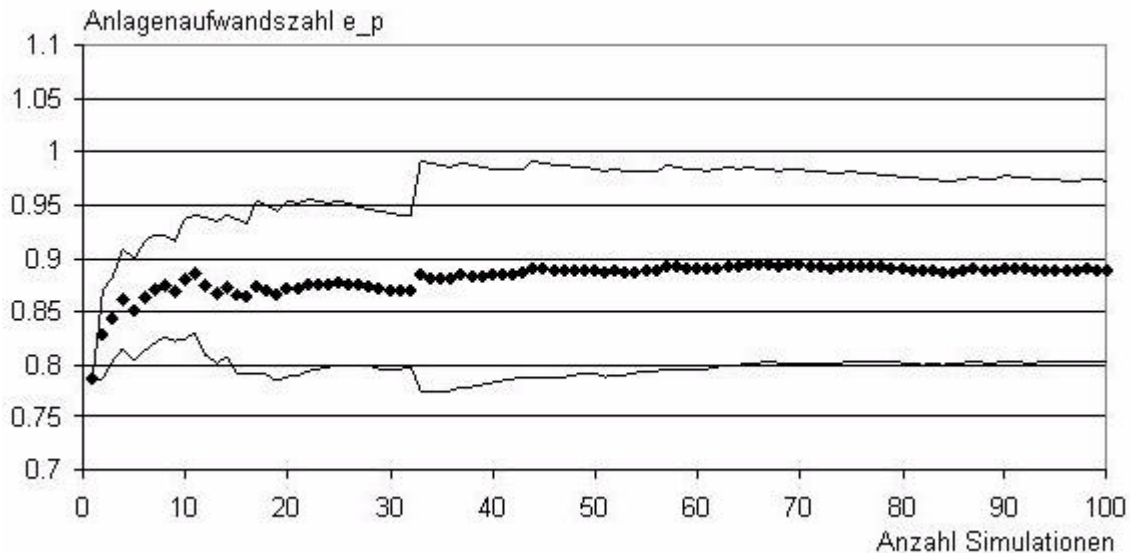


Abbildung 3.12: Die schwarzen Rauten symbolisieren den Verlauf des Erwartungswertes w_N , in Abhängigkeit von der Anzahl der Simulationen N , die Linien ober- und unterhalb die Entwicklung der Standardabweichung dargestellt als $w_N + s_N$ und $w_N - s_N$.

Zum Einen zeigt die Darstellung in Abbildung 3.12, dass sich der Wert des Erwartungswertes sowie der Standardabweichung nach etwa 80 Simulationen praktisch nicht mehr ändert.

Zum Anderen liegt der sich so ergebende Wert für e_p von 0.89 deutlich unter dem Mittelwert aus der Faktoranalyse von 1.50. Diese Abweichung ist nach [Fürbringer95] jedoch nicht verwunderlich, da das Monte Carlo Verfahren die Parameter gemäß einer Normalverteilung belegt und somit häufiger Werte nahe des Mittelwertes der jeweiligen Verteilung wählt als die jeweiligen "Ränder". Somit sind extrem ungünstige Parameterkonstellation unwahrscheinlich. Diese treten bei der Faktoranalyse durch die ausschließliche Betrachtung des Minimums sowie des Maximums für jeden Parameter und der sich durch Kombination der Parameterwerte ergebenden Konfigurationen auf.

Zudem verhält sich das betrachtete System nicht linear, was zusätzlich die Abweichung zwischen den beiden Mittelwerten erklärt, die eben kein Effekt der unterschiedlichen Anzahlen der Simulation ist.

Die Standardabweichung s_N ergibt sich bei dem Monte Carlo Verfahren nach 100 Simulationen zu $s_N = 0.09$, was etwa 10 % des Erwartungswertes entspricht und als Sensitivität von e_p bezüglich der Gesamtheit der Parameter interpretiert werden kann. Dieser Wert ist vergli-

chen mit den Einzelsensitivitäten aus der Faktoranalyse relativ klein, was wiederum ein Effekt der verschiedenen Parameterbelegungen ist.

Als Schluss lässt sich daraus ziehen, dass es aufgrund des nichtlinearen Verhalten des Systems sehr entscheidend auf die gewählten Parameterintervalle ankommt, wie sensitiv sich die Zielgröße e_p gegenüber den Parameteränderungen verhält. Daraus kann man ebenfalls ableiten, dass auch die Lage der Intervalle, d.h. die Wahl des Mittelwerts für die wichtigen Parameterverteilungen, eine Rolle spielt.

Für das betrachtete Szenario lieferte das Monte Carlo Verfahren also eine Aussage über die Linearität des Systems, die allein aus der Faktoranalyse nicht gewonnen werden konnte. Der Einfluss der wichtigen Parameter ließe sich durch Verschieben der jeweiligen Intervalle bzw. durch Verändern der Intervalllänge weiter untersuchen.

Vergleich der kumulierten Energieaufkommen für das solare und das fossile System

Zum Vergleich der *KEA* -Werte wurde das fossile Referenzsystem mit den Parameterwerten der Solar-Szenarien belegt, die den minimalen und den maximalen Wert für e_p lieferten.

Je nach verwendeter Parameterkonstellation bei der Faktoranalyse ergeben sich für e_p sehr unterschiedliche Werte, die resultierenden Bereiche zeigt Tabelle 3.13.

Tabelle 3.13: Übersicht über die Werte der Anlagenaufwandszahlen des fossilen ($e_{p,Ref}$) sowie des solaren Systems ($e_{p,Sol}$) aufgrund der verschiedenen Parameterkonstellationen bei der Faktoranalyse.

	Zürich
$e_{p,Ref}$	1.71 ... 1.85
$e_{p,Sol}$	0.99 ... 1.92

Ein Ergebnis der Simulationen ist, dass es Parameterkonstellationen gibt, bei denen das solare System schlechter abschneidet als das fossile Referenzsystem, wie auch die Darstellung in Abbildung 3.13 zeigt. Für die Darstellung in Abbildung 3.13 wurde ebenfalls das solare Sze-

nario mit dem minimalen Wert für e_p bzw. das mit dem maximalen Wert für e_p mit der entsprechenden fossilen Realisierung verglichen.

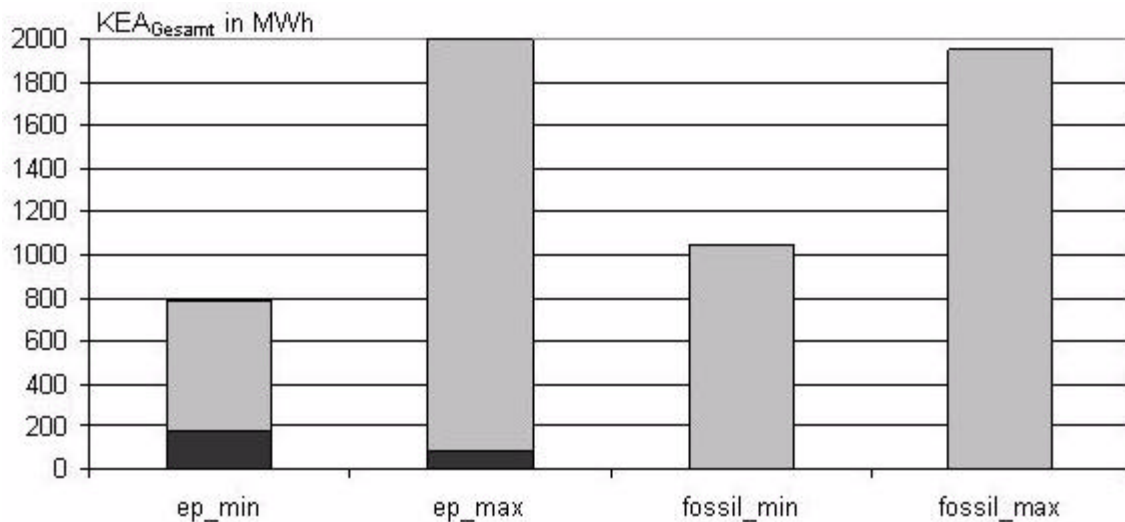


Abbildung 3.13: Aufgetragen ist der kumulierte Energieaufwand für Herstellung und Transport beim Solarsystem in schwarz, der Energieaufwand für den Betrieb ist in grau dargestellt. Verglichen sind die Solarszenarien mit der minimalen und maximalen Anlagenaufwandszahl (ep_min, ep_max) mit den entsprechenden Realisierungen des fossilen Systems (fossil_min, fossil_max).

Während maximal eine Energieeinsparung von 24 % unter den gewählten Parameterbedingungen möglich ist, rentiert sich das solare System im ungünstigsten Fall nicht. Bei dieser Realisierung (minimale Kollektorfläche (30 m²) mit einem Neigungswinkel von 90 °) ist der Solarertrag so gering, dass das fossile Nachheizsystem die Temperatur des Bereitschaftsvolumens im Pufferspeicher aufrechterhalten muss und so letztlich eine höhere Anlagenaufwandszahl als im fossilen Fall ohne den Saisonspeicher resultiert. In der Praxis sollten derartige solare Anlagenkonfigurationen allerdings nicht auftreten.

Bei den Angaben über die relative Energieeinsparung ist zu beachten, dass sie nicht das Ergebnis einer Optimierungsrechnung sind, somit kann die maximal mögliche Energieeinsparung noch größer als die hier ermittelten 24 % sein. Eine Auswahl von geeigneten Optimierungsalgorithmen und insbesondere ein Vergleich der Verfahren findet sich detailliert in [Krause03].

3.4.2 Zusammenfassung

Für den Standort Zürich wurden eine reduzierte Faktoranalyse mit 14 Parametern (Q_{IV}^{14-9} - Design) sowie eine Monte Carlo Analyse durchgeführt. Dabei war die Anlagenaufwandszahl e_p die Zielgröße. Während im ersten Schritt die bezüglich e_p relevanten Parameter extrahiert wurden, konnte im zweiten Schritt das kumulierte Energieaufkommen für das untersuchte System mit solar unterstütztem Heizsystem (solares System) mit dem eines mit rein fossiler Nachheizung (fossiles System) bei ansonsten gleicher Hydraulik und gleichem Gebäude verglichen werden.

Bei der Extraktion der relevanten Parameter bezüglich e_p ergaben sich vier relevante Parameter, Korrelationen spielten eine untergeordnete Rolle. Unter Einbeziehung des Monte Carlo Verfahrens konnte gezeigt werden, dass sich das System nicht-linear verhält und der Einfluss der Parameter vermutlich auch von der Lage der gewählten Parameterintervalle abhängig ist.

Beim Vergleich des kumulierten Energieaufkommens zeigte sich, dass das Solarsystem in den hier betrachteten Konfigurationen nach 20 Jahren eine Energieeinsparung von mindestens 24 % gegenüber dem fossilen System ermöglicht. Die tatsächliche Einsparung dürfte jedoch weitaus größer sein, da der niedrigere Erwartungswert für die Anlagenaufwandszahl e_p beim Monte Carlo Verfahren im Vergleich zu den bei dieser Berechnung zugrunde gelegten Werten für e_p auf ein deutlich geringeres optimales e_p schließen lässt. Eine energetische Rücklaufzeit t_R ⁹ nach [Achatz00] oder [Jenseit99] als Maß für die Zeit, nach der sich ein Solarsystem energetisch rentiert hat, kann nicht seriös angegeben werden.

Eine weitere wichtige Erkenntnis aus der Faktoranalyse ist auch, dass bei der Dimensionierung eines solar unterstützten Heizsystems Gebäudeparameter für die energetische Amortisation durchaus relevant sein können, während für die energetische Anlagenaufwandszahl nur wenige Parameter des Solarsystems von Bedeutung sind.

9.
$$t_R = \frac{KEA_{H+T,Sol}}{(e_{p,Ref} - e_{p,Sol}) \cdot (Q_{rh} + Q_{TWW})}$$

3.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel standen Sensitivitätsuntersuchungen an einem Wohngebäude mit einem aktiv-solaren Heizsystem im Mittelpunkt. Bei dem untersuchten Gebäude handelte es sich um ein Reihenhaus bestehend aus drei Segmenten. Das solar unterstützte Heizsystem verfügte über einen Saisonspeicher, als fossile Nachheizmöglichkeit stand ein Klein-BHKW zur Verfügung. Für die Sensitivitätsuntersuchungen wurde die Anlagenaufwandszahl e_p als Zielgröße festgelegt, insgesamt wurde der Einfluss von 14 Parametern sowohl aus dem Gebäude selbst als auch aus dem solarunterstützten Heizsystem untersucht. Die Differentielle Sensitivitätsanalyse (DSA) und die reduzierte Faktoranalyse als Verfahren zur Untersuchung von Einzelsensitivitäten wurden exemplarisch an dem System unter Variation von nur drei Parametern (Kollektorfläche A_{Koll} , Speichervolumen V_P und Raumsollwert T_{Ra}) getestet. Dabei zeigte sich, dass die Parameter A_{Koll} und V_P bezüglich des Solarertrags stark korreliert sind, außerdem ergab sich, dass sich das System weder superponierbar noch linear verhält. Aufgrund dieser Voruntersuchung wurde für die Analyse bei Variation aller 14 Parameter nur die reduzierte Faktoranalyse sowie das Monte Carlo Verfahren zur Ermittlung der Gesamtsensitivität von e_p verwendet. Dabei ergaben sich sechs relevante Parameter (Speichervolumen und -Isolierung, Raumsollwert und Anlagenluftwechsel, eingeschränkt die internen Gewinne sowie die Erdbodentemperatur), wobei Korrelationen bezüglich e_p eine untergeordnete Rolle spielten.

Im zweiten Schritt erfolgte ein Vergleich anhand des kumulierten Energieaufwands des sogenannten solaren Systems mit einem baugleichen Gebäude, das nicht über eine Solaranlage verfügt sondern ausschließlich von dem Klein-BHKW versorgt wird (fossiles System). Während der energetische Mehraufwand für Herstellung und Transport für das solare System statisch ermittelt werden konnte, wurden für die Bestimmung der zum Betrieb beider Systeme erforderlichen Energie Jahressimulationen durchgeführt.

Bereits aufgrund der betrachteten Parameterwerte bei der reduzierten Faktoranalyse zeigte sich, dass gegenüber dem fossilen System eine relative Energieeinsparung von mindestens 24 % möglich ist.

Ein wichtiges Ergebnis hinsichtlich der Entwicklung von Planungsinstrumenten für die Auslegung von Solaranlagen ist auch, dass sowohl Gebäudeparameter als auch Parameter des solarunterstützten Heizsystems für die Anlagenaufwandszahl relevant sind.

4 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit umfasst zwei Themenkreise. Zum einen wird eine Auswertung und Analyse der Messdaten des Passiv-Solarhauses in Cölbe vorgenommen. Zum anderen werden theoretische Untersuchungen für ein fiktives Gebäude mit einer Hydraulik durchgeführt, die der des Passiv-Solarhauses in Cölbe vergleichbar ist.

Für die Untersuchung des Passiv-Solarhauses in Cölbe standen folgende Fragen im Mittelpunkt. Zum Einen sollte geprüft werden, ob die gemessenen Energieverbräuche so niedrig wie prognostiziert sind, zum Anderen war zu zeigen, dass eine sommerliche Überhitzung vermieden werden kann.

Im Fall der Parameteruntersuchungen erfolgte zunächst eine Auswahl geeigneter Algorithmen zur Untersuchung von Parametersensitivitäten, bevor die für eine energetische Bewertung des Gesamtsystems aus Gebäude und aktiv-solarem Heizsystem relevanten Parameter extrahiert wurden.

Das untersuchte Gebäude war das europaweit erste Bürogebäude im Passivhausstandard. Daher konnte in vielen Bereichen nicht auf Vorerfahrungen zurückgegriffen werden. Insbesondere betrifft das den Einsatz konventioneller Regel- und Steueralgorithmen einer DDC-Anlage für die speziellen Anforderungen eines Passivhauses, aber z.B. auch die Auslegung und Betriebsführung des Lüftungssystems.

Für die erste Fragestellung lässt sich das Fazit ziehen, dass das Passiv-Solarhaus hinsichtlich des Raumheizenergieverbrauchs sogar die Anforderungen an Passiv-Wohnhäuser erfüllt. So lag der gemessene Raumheizenergieverbrauch in allen drei Jahren nie oberhalb von $15 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ ¹. Die gemessene spezifische Heizleistung war mit maximal 8.4 W/m^2 ebenfalls geringer als die obere Grenze für Passiv-Wohnhäuser, die nach [Endbericht02] mit 10 W/m^2 angegeben wird.

Aufgrund der überwiegenden Nutzung als Bürogebäude war der Stromverbrauch erwartungsgemäß hoch, so dass der primärenergetisch bewertete Fremdenergiebezug (Strom und Gas) von $120 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ im Zeitraum 05/99-04/00 auf fast $160 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ in 05/01-04/02 anstieg.

1. Dieser Wert wird als Zielwert für den Raumheizenergieverbrauch bei Passivhäusern angegeben, vgl. z. B. [Afjei00].

Die Solaranlage erbrachte während der drei Messjahre einen Ertrag von $8 - 10 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ ². Es zeigte sich, dass die Kollektorfläche größer als nötig ausgelegt wurde, so dass der Saisonspeicher bereits relativ früh in der jeweiligen Sommerperiode sehr stark aufgeheizt war, was eine weitere solare Beladung begrenzte.

Für das Lüftungssystem läßt sich feststellen, dass der Erdreichwärmeübertrager stets die Frostsicherheit der Wärmerückgewinnung garantierte. Nachteilig erwies sich die fehlende Bypass-Möglichkeit für den Erdreichwärmeübertrager. Dadurch lieferte er zu allen Jahreszeiten Fehlerträge. Während der Heizzeit konnten die unerwünschten Kühlerträge des Erdreichwärmeübertragers jedoch stets von der Wärmerückgewinnung kompensiert werden, deren Ertrag typisch eine Größenordnung höher lag.

Bei der Nacherwärmung der lüftungsseitig zentral vorerwärmten Luft ergaben sich Probleme aus dem zonal stark unterschiedlichen Raumheizbedarf. Dies führte dazu, dass eine Zone im Gebäude (Empfangsbereich) tendenziell niedrigere Temperaturen während der Heizzeit aufwies im Vergleich zu den übrigen Gebäudezonen. Hier wäre der zusätzliche Einsatz einer (Wasser-) Radiator-Heizung zu erwägen.

Im Sommer gelang es, ohne eine aktive Klimatisierung eine Überhitzung des Gebäudes zu vermeiden. Dies galt auch in dem Bereich des Großraumbüros, in dem hohe interne Lasten anfallen. Maßgeblichen Anteil an der Kühlung des Gebäudes hat die aktive Nachtkühlung, der durch thermosiphonischen Antrieb bedingte Luftwechsel im Gebäude liegt dabei um etwa eine Größenordnung über dem Anlagenluftwechsel (ca. $4 / \text{h}$ versus $0.4 / \text{h}$).

Zur Beurteilung der Innenraumtemperaturen im Gebäude wurden exemplarisch für die drei Sommerperioden die gemessenen Raumtemperaturen in den drei Etagen des Rundbaus sowie im Großraumbüro im ersten Stock ausgewertet. Es zeigte sich, dass im Sommer 2001 im Vergleich zu den anderen Messjahren im Großraumbüro sowie im Rundbau-Dachgeschoss vermehrt Temperaturspitzen erreicht wurden. Diese waren offensichtlich weniger durch die klimatischen Randbedingungen bedingt sondern waren eine Folge der im Vergleich zu den Vorjahren drastisch angestiegenen internen Lasten. Insgesamt lagen jedoch die gemessenen Innenraumtemperaturen im Großraumbüro als der kritischsten Zone in allen drei Jahren bezogen auf die Normzahl der Arbeitsstunden im Jahr nach [Volz] nur in maximal 3.5 % oberhalb von $26 \text{ }^\circ\text{C}$. Diese Überschreitung kann als unproblematisch angesehen werden.

Eine Untersuchung der Abhängigkeit der gemessenen Heizlast von den klimatischen Randbedingungen ergab, dass weder die Strahlung noch die Außentemperatur allein zur Vorhersage der tatsächlichen Heizlast geeignet sind. Insbesondere zeigte ein Vergleich mit der nach [Endbericht02] berechneten Heizgerade, dass die passiven solaren Gewinne bei diesem

2. entsprechend $244 - 304 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ bezogen auf die Kollektorfläche.

Gebäude nicht von großer Bedeutung sind. So stieg gerade bei sehr niedrigen Außentemperaturen im Winter die Heizlast an, obwohl bei derartigen Temperaturverhältnissen die Einstrahlung tendenziell sehr hoch ist. Wurden zur Vorhersage der Heizlast mittels einer multivariaten Regression neben den externen Faktoren Globalstrahlung und Außentemperatur auch die internen Gewinne herangezogen, ergab sich eine akzeptable Übereinstimmung. Somit stellt die multivariate Regression durchaus eine Alternative zu aufwändigeren dynamischen Simulationen dar, um schnell etwaige Fehlfunktionen des Heizsystems zu detektieren.

Zusammenfassend läßt sich zur Messdatenanalyse des Passiv-Solarhauses sagen, dass die detaillierte Vermessung des Gebäudes über drei Jahre wichtig war, um zu einer Bewertung der Haustechnik in dem als Passivhaus ausgeführten Gebäudes zu gelangen. Darüber hinaus konnten aber auch viele Erkenntnisse gesammelt werden, die über das konkrete Projekt hinaus relevant sind. Das betrifft z.B. die Erfahrungen im Umgang mit der DDC-Anlage oder auch die Realisierung des Lüftungssystems. Wichtig ist auch festzuhalten, dass in keinem der Subsysteme (aktiv-solares Heizsystem und Lüftungssystem) Probleme auftraten, die den Betrieb maßgeblich beeinträchtigten. Sowohl im Winter als auch im Sommer konnte im Gebäude ein akzeptables Temperaturniveau ermöglicht werden, so dass die Akzeptanz der Nutzer/innen insgesamt gut ist.

Die Erkenntnisse aus dem Betrieb des aktiv-solaren Heizsystems im Passiv-Solarhaus Cölbe bildeten auch die Grundlage zur Definition des Heizsystems in dem fiktiven Gebäude nach Vorgaben aus dem [Task28]. Insgesamt wurde der Einfluss von 14 Parametern auf die Anlagenaufwandszahl³ betrachtet.

Für die Untersuchung von Sensitivitäten wurden drei Algorithmen vorgestellt. Aufgrund des nichtlinearen und nur bedingt superponierbaren Systemverhaltens wurde in der Arbeit keine Differentielle Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Stattdessen erfolgte eine Untersuchung der Einzelsensitivitäten mittels einer reduzierten Faktoranalyse, die Gesamtsensitivität wurde mittels eines Monte Carlo Verfahrens bestimmt.

Bezüglich des Vergleichs der verschiedenen Algorithmen zur Sensitivitätsuntersuchung ist die Leistungsfähigkeit der reduzierten Faktoranalyse an dem betrachteten System ein wichtiges Ergebnis. Die Faktoranalyse stellt insbesondere bei einer hohen Parameteranzahl ein geeignetes Mittel dar, um durch eine vergleichsweise geringe Anzahl von Simulationen den Einfluss der einzelnen Parameter zu ermitteln und gleichzeitig etwaige Parameterkorrelationen zu detektieren.

3. Nach [DIN4701] ist sie als Verhältnis aus primärenergetischem Aufwand zur gelieferten Nutzenergie definiert.

Als Ergebnis der Sensitivitätsanalyse bei Wahl der Anlagenaufwandszahl als Zielgröße lieferte die Faktoranalyse vier relevante Parameter: Die Pufferspeichergröße, die Speicherdämmung, der Raumsollwert und der Anlagenluftwechsel. Damit zeigt sich zugleich die Bedeutung der Wahl der Systemgrenzen, die in Anlehnung an die Energieeinsparverordnung[EnEV02] sowohl das Heizsystem als auch das Gebäude einschließen. Tatsächlich sind sowohl Parameter des Solarsystems als auch Gebäudeparameter für die Anlagenaufwandszahl als Zielgröße von Bedeutung. Die relativ geringe Anzahl an relevanten Parametern könnte wiederum die Entwicklung von Planungsinstrumenten als Alternative zu dynamischen Simulationen ermöglichen.

Um die relative Energieeinsparung eines Gebäudes mit aktiv-solarem Heizsystem im Vergleich zu einem baugleichen Gebäude mit rein fossiler Nachheizung zu ermitteln, wurden die vorgelagerten Primärenergieverbräuche zur Herstellung und zum Transport der für die Solaranlage erforderlichen Komponenten ermittelt. Bei den im Rahmen der Sensitivitätsuntersuchungen gewählten Parameterwerten zeigte sich, dass das solare System nach 20 Jahren eine Energieeinsparung von maximal 24 % liefert und sich im ungünstigsten Fall nicht rentiert. Allerdings kann davon ausgegangen werden, dass die Energieeinsparung bei optimaler Wahl der Parameter über den ermittelten 24 % liegt.

Anhang

A Hydraulik und Position der Messfühler im Passiv-Solarhaus Cölbe

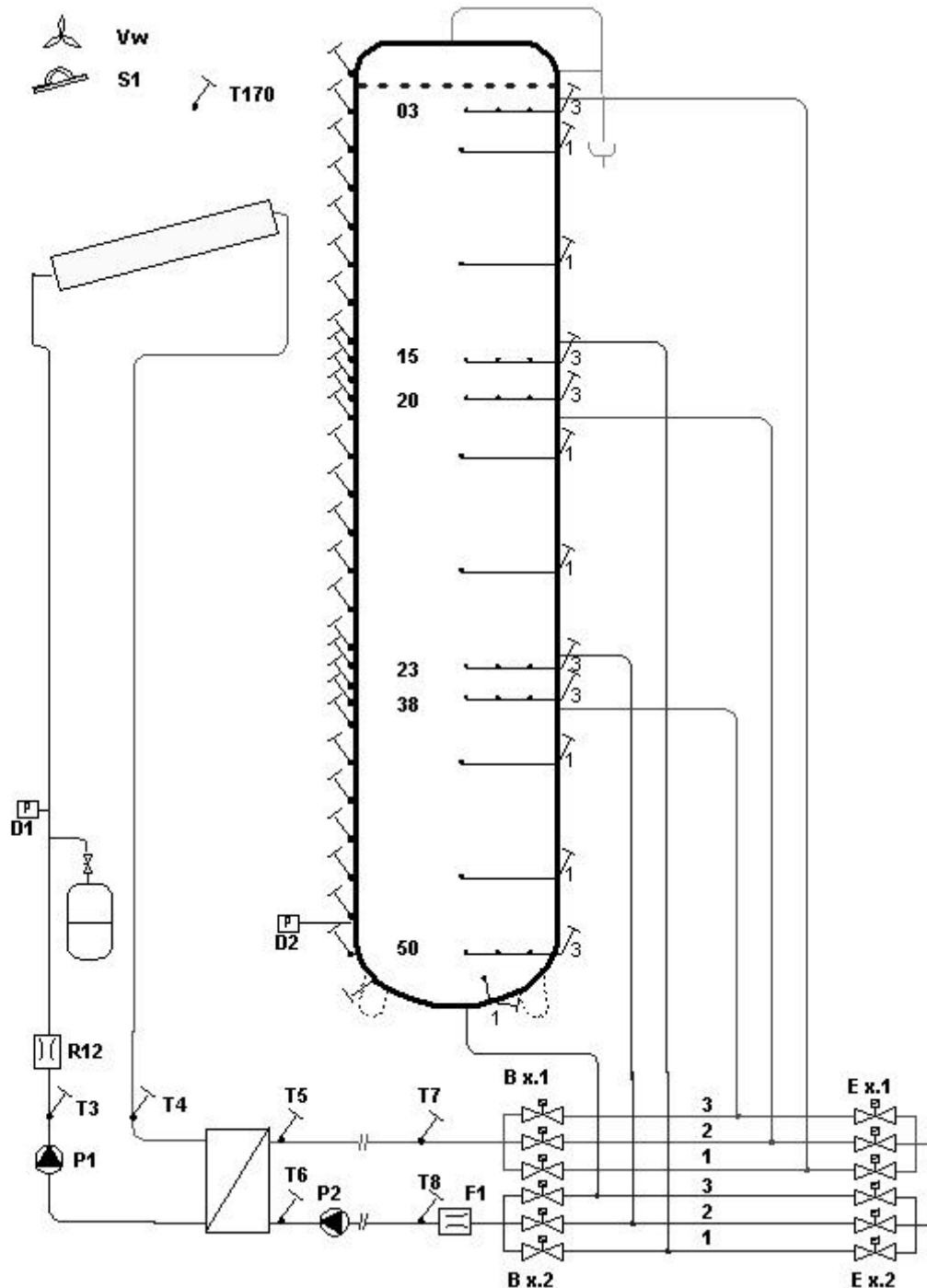


Abbildung A.1: Hydraulische Verschaltung des Solarkreises bestehend aus Primär- und Sekundärkreis sowie dem Saisonspeicher. In der Abbildung finden die folgenden Kürzel Verwendung: "T" für Pt-100-Sensoren, "R" für Ringkolbenzähler, "P" für Pumpen, "D" für das Überdruckventil, "F" für Flügelradzähler, "B" für die Beladventile und "E" für die Entladeventile des Speichers.

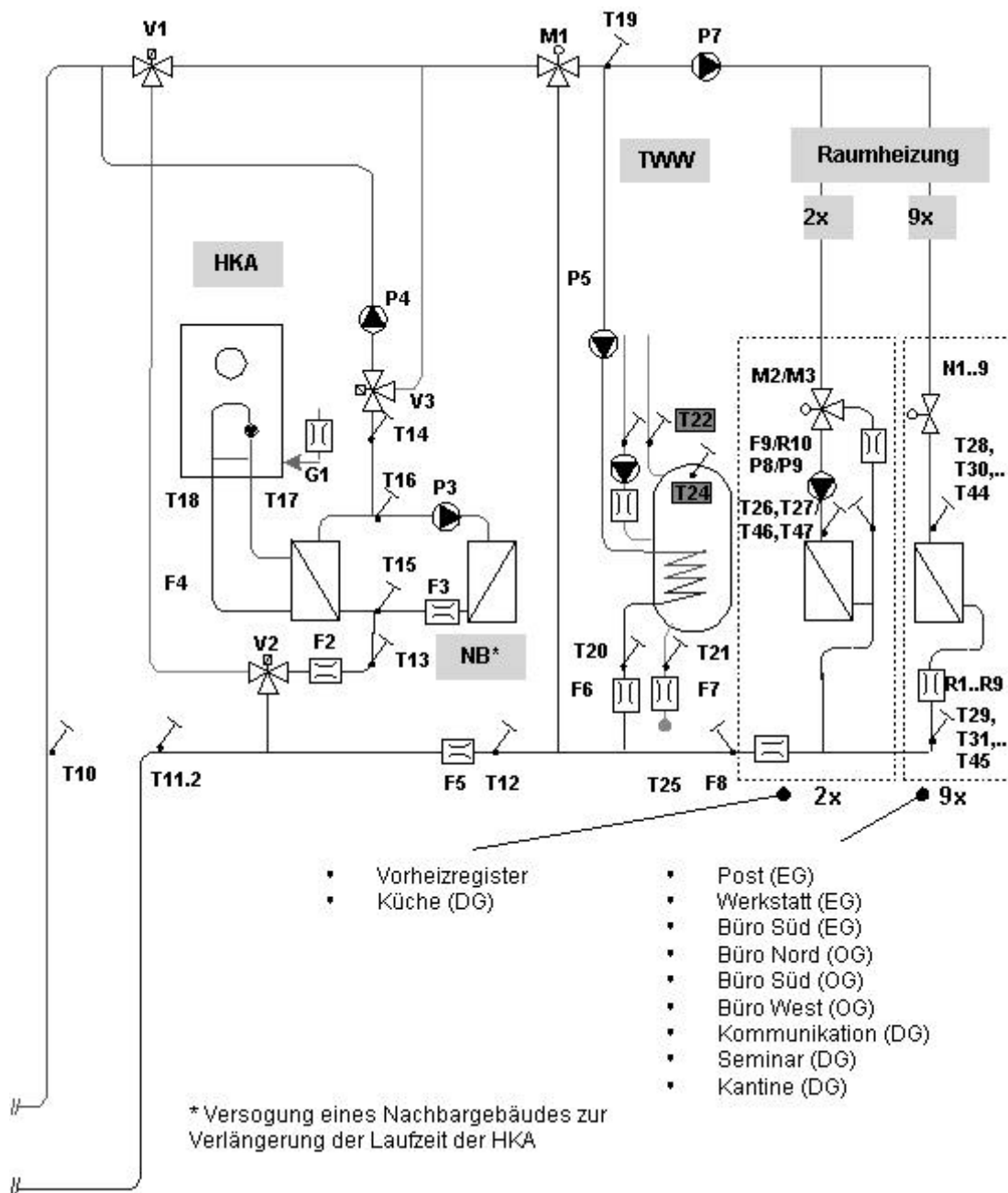


Abbildung A.2: An den Pufferspeicher ist die Last, bestehend aus dem Trinkwarmwasserspeicher, dem zentralen Vorheizregister, dem Küchen-Register sowie den 9 Nachheizregistern, hydraulisch angebunden. Ferner ist das Klein-BHKW angebunden, das auch den benachbarten Altbau mit Wärme versorgen kann, symbolisiert durch den Wärmeübertrager mit der Bezeichnung NB. Darüber hinaus wurden zusätzlich zu den in Abbildung A.1 genannten die folgenden Abkürzungen verwendet: "V" für Dreiwege-Ventil, "HKA" für Heizkraftanlage (Klein-BHKW), "G" für Balgengaszähler und "M" für Mischer.

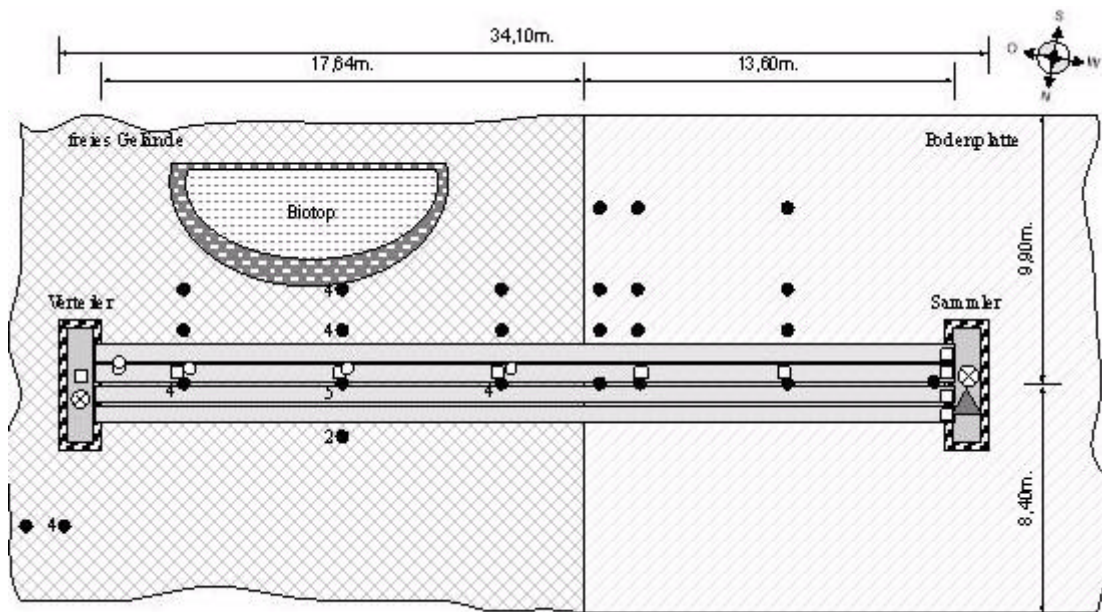


Abbildung A.3: Skizze zur Vermessung des Erdreichwärmeübertragers in Cölbe aus[Beisel99]. Die ausgefüllten Punkte markieren die Temperaturmessung in 1.5 m Tiefe, eine evtl. nebenstehende Zahl gibt die Anzahl der Sensoren in verschiedenen Tiefen an, die an einer Messlanze befestigt sind. Die Quadrate symbolisieren eine Lufttemperaturmessung im Rohr, die weißen Kreise eine Temperaturmessung an der Rohrwand. Die gekreuzten Kreise markieren den Ort der Feuchtemessung, das graue Dreieck die Volumenstrommessung.

B Messergebnisse

B.1 Anlagen zu Kapitel 2.2.6

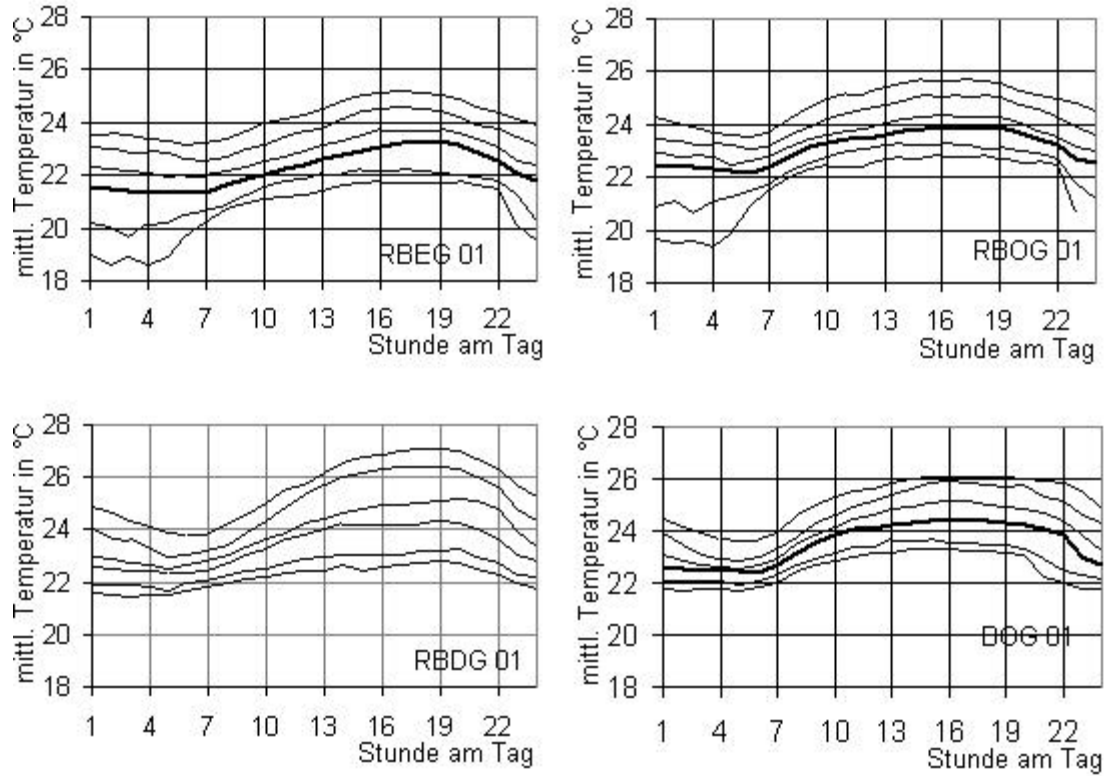


Abbildung B.1: Aufgetragen (von unten nach oben) sind im jeweiligen Diagramm die 5% -, 16% -, 50% -, 84% - und 95% -Quantile für die jeweilige mittlere Zonentemperatur (Stundenmittelwerte, Sample-Intervall 1 min) für den Sommer 2001.

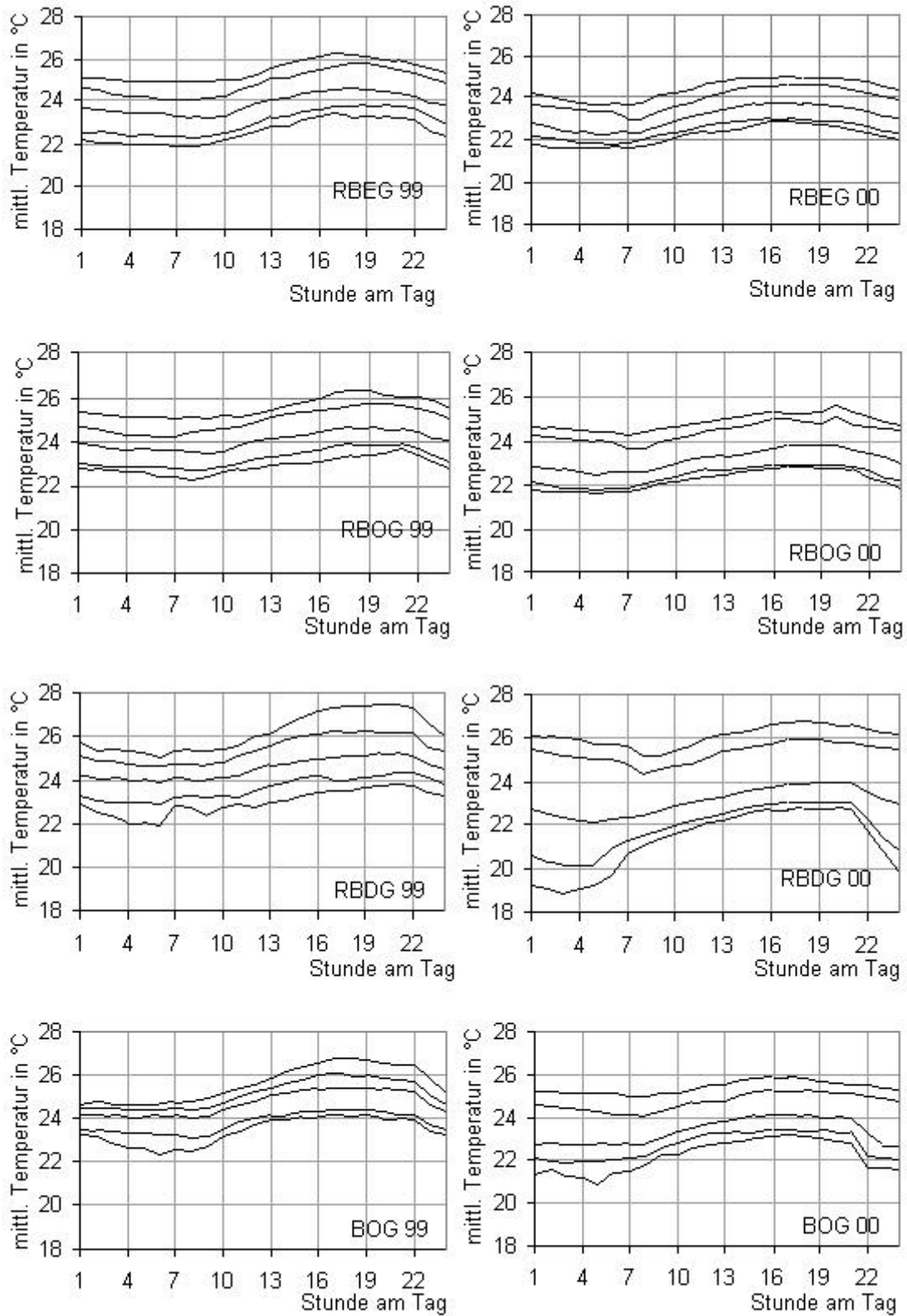


Abbildung B.2: Gleiche Darstellung wie in Abbildung B.1 für die Sommer 1999 und 2000.

C Sensitivitätsuntersuchungen

C.1 Anlagen zu Kapitel 3.2.3

Tabelle C.1: Auflistung der internen Gewinne für den Basisfall sowie unter Einsatz energiesparender Geräte (Sparsamer Fall) nach [Task28]. Im Basisfall ergibt sich aus den internen Gewinnen eine Leistung von 4.3 W/m^2 , im sparsamen Fall von 3.7 W/m^2 . Beide Werte liegen somit unter dem von der [EN832] angegebenen Wert von 5 W/m^2 .

Posten	Basisfall kWh/a	Sparsamer Fall kWh/a
Trinkwarmwasser-Einheit	526	526
Kühlschrank	350	128
Gefrierschrank	550	299
Backofen, Mikrowelle, Kaffeemaschine	64	64
Herd	107	107
Spülmaschine	86	44
Waschmaschine	84	38
Trockner	128	214
Beleuchtung	850	300
Sonstiges	574	574
Ventilatoren	383 (2x25 W)	383 2x25 W
Bewohner/innen (2+2)	1203	1203

C.2 Anlagen zu Kapitel 3.2.4

Tabelle C.2: Kumulierter Energieaufwand des hydraulischen Verteilsystems, dabei werden nur die Komponenten berücksichtigt, die im Vergleich zum rein fossilen bei einem solar unterstützten Heizsystem dazu kommen. Die Dimensionierung erfolgte nach [John02]. Wie in [John02] wurde für alle hier aufgeführten Materialien der gleiche Wert für KEA_{spez} von $KEA_{spez} = 26.83 \text{ kWh/kg}$ angenommen, der Beitrag der Rohrdämmung kann vernachlässigt werden.

Komponente	Anzahl bzw. Länge	Masse kg	Materialien	KEA_{gesamt} MWh
Solarkreispumpe	2	6	Bronze, Edelstahl usw.	0.16
Ventil	6	3	Messing o.ä.	0.08
Wärmeübertrager	1	15	Kupfer	0.4
Solarkreisrohre (28 mm)	40 m	44	Kupfer	1.19
Verteilerrohre (28 mm)	52 m	57.7	Kupfer	1.55
Dämmung der Rohre	0.12 m ³	7.3		0
				3.54

Tabelle C.3: Kumulierter Energieaufwand für die Herstellung des Saisonspeichers in Abhängigkeit vom Speichervolumen und von der Dämmstärke. Die Speicherdimensionierung erfolgte in Anlehnung an [Scheuren02] und [John02]. Für den kumulierten Energieaufwand für den Transport des Großspeichers wird für alle Speicherkonfigurationen nach [John02] mit dem Wert $KEA_{Speicher, Transport} = 4.2 \text{ MWh}$ gerechnet.

Speichervarianten				Bemerkung
Geometrie		Wert		
V	m^3	30	90	Festlegung nach [Scheuren02].
H	m	7.2	9.9	
D	m	2.3	3.4	
Dämmstärke d_D		Masse Mineralwolle kg		
20	cm	738	1474	Dämmstärke von Deckel und Boden entspricht 60 % von der des Mantels. $\rho = 60 \text{ kg/m}^3$
50	cm	2050	3966	
Blechstärke		Masse Stahl kg		
3	mm	1484	3047	inklusive 5 % Aufschlag für Verstärkungen. $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$
d_D in cm	Stahl	KEA_H Großspeicher MWh (MWh/m^3)		
20	legiert	43.47 (1.45)	89.04 (0.98)	$KEA_{Mineralwolle} = 4.97 \text{ kWh/kg}$, $KEA_{Stahl} = 10.35 \text{ kWh/kg}$, $KEA_{Stahl, legiert} = 26.82 \text{ kWh/kg}$. Werte nach [Peter02].
50	legiert	49.99 (1.67)	101.42 (1.13)	

C.3 Anlagen zu Kapitel 3.2.4

Tabelle C.4: Freie Parameter, deren Einfluß auf die Anlagenaufwandszahl e_p untersucht wird. Angegeben ist jeweils der Minimal- und Maximalwert. Diese Werte wurden für die reduzierte Faktoranalyse verwendet, für das Monte Carlo Verfahren stellen sie die Intervallgrenzen dar, zwischen denen eine Normalverteilung zu Grunde gelegt wurde.

Parameter			Werte	
Name	Abkürzung	Einheit	Minimum	Maximum
Erdbodentemperatur	T_{Boden}	°C	8.7	10.7
Kollektor-Neigungswinkel	β_{Koll}	°	30	90
Kollektorfläche	A_{Koll}	m ²	30	210
Volumen Pufferspeicher	V_P	m ³	30	90
Speicherdämmung	d_{SD}	m	0.2	0.5
Raum-Sollwert	T_{Ra}	°C	18	24
maximale Raumtemperatur	T_{max}	°C	26	30
Infiltration (Fugenlüftung)	Inf	h ⁻¹	0.01	0.1
Interne Gewinne ⁱ	Q_{IG}	W/m ²	3.7	4.3
Wärmeübertragungskoeffizient Solarwärmeübertrager	kA_{Solar}	kJ/hK	90 % · 504 · A_{Koll}	110 % · 504 · A_{Koll}
Rückwärmzahl Wärmerückgewinnung	ϵ_{WRG}	%	70	90
Dämmstärke Außenwände ⁱⁱ	d_{AW}	m	0.1	0.3
Wärmeübertragungskoeffizient Trinkwasserwärmeübertrager	kA_{TWW}	kJ/hK	6000	7200
Anlagenluftwechsel	n_{LW}	h ⁻¹	0.4	0.6

- i. Angegeben ist die sich jeweils ergebende mittlere Leistung, für die Simulation wurden die zugehörigen Zeitschemata aus Tabelle C.1 auf S. 110 verwendet.
- ii. Variiert wird dabei lediglich die Stärke der Mineralwolldämmung, der übrige Wandaufbau bleibt unverändert.

C.4 Anlagen zu Kapitel 3.4.1

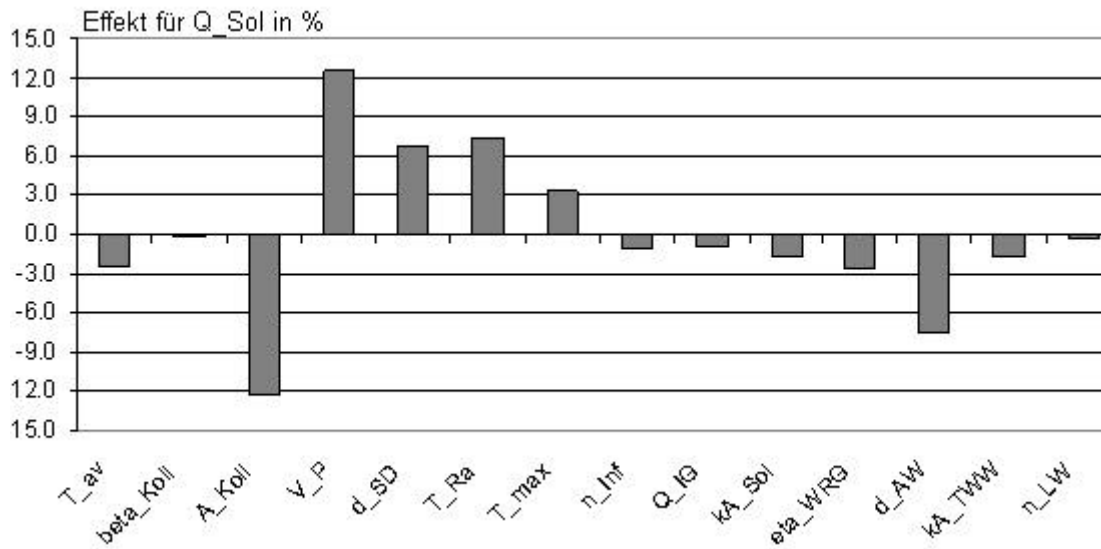


Abbildung C.1: Sensitivität des spezifischen Solarertrags in % bezogen auf den Mittelwert des spezifischen Solarertrags aller Simulationen.

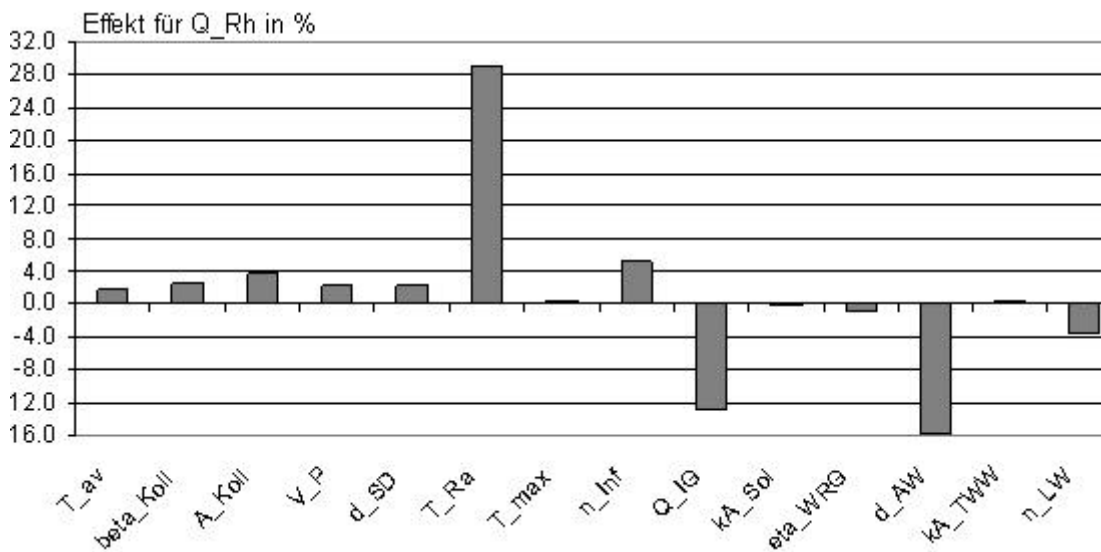


Abbildung C.2: Sensitivität des Raumheizenergieverbrauchs in % bezogen auf den Mittelwert des Raumheizenergieverbrauchs aller Simulationen.

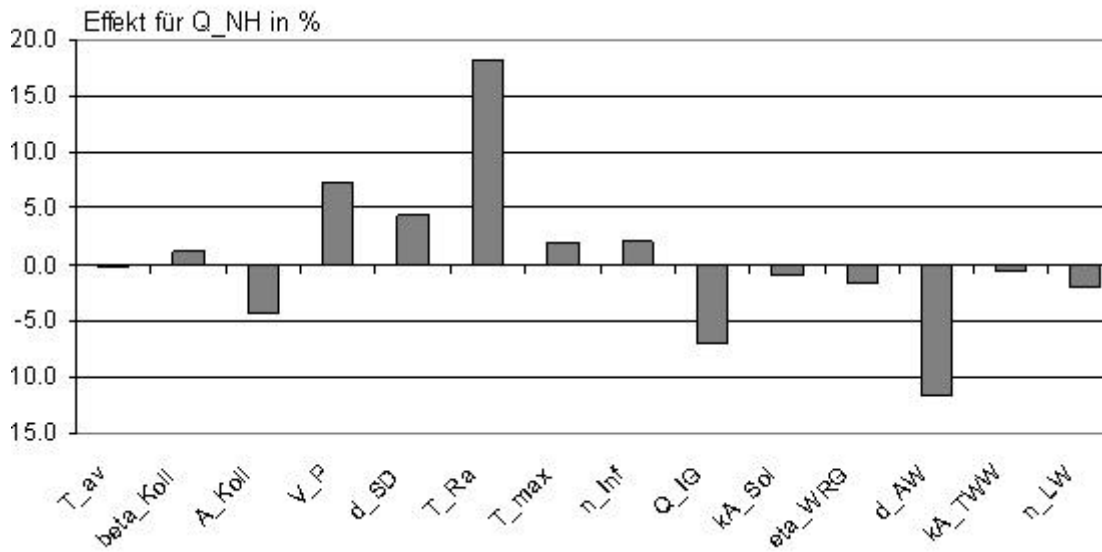


Abbildung C.3: Sensitivität der fossilen Nachheizenergie in % bezogen auf den Mittelwert der fossilen Nachheizenergie aller Simulationen.

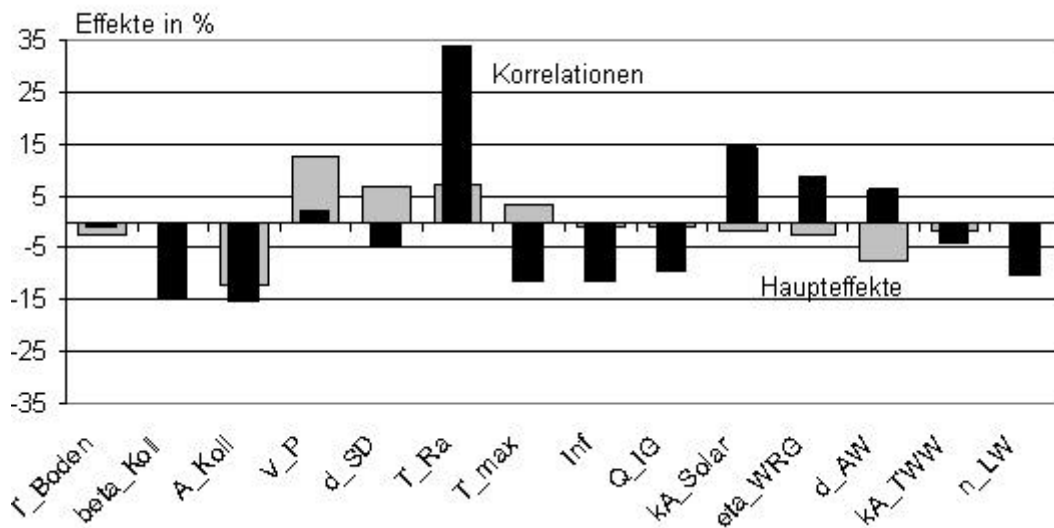


Abbildung C.4: Die grauen Balken stellen den Effekt des jeweiligen Parameters auf den spezifischen Solarertrag dar, die schwarzen Balken symbolisieren den Einfluß der Korrelationen.

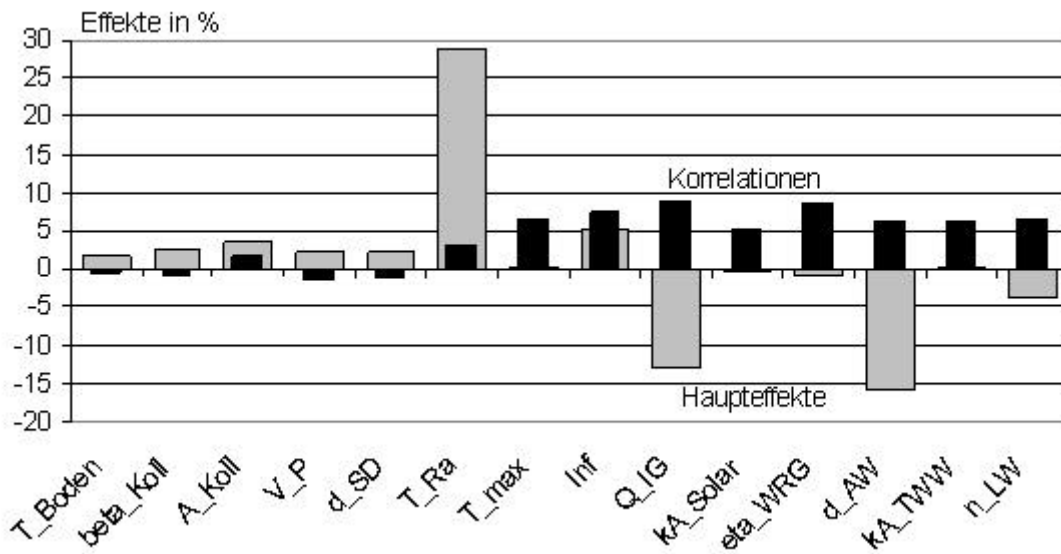


Abbildung C.5: Die grauen Balken stellen den Effekt des jeweiligen Parameters auf den Raumheizenergieverbrauch dar, die schwarzen Balken symbolisieren den Einfluß der Korrelationen.

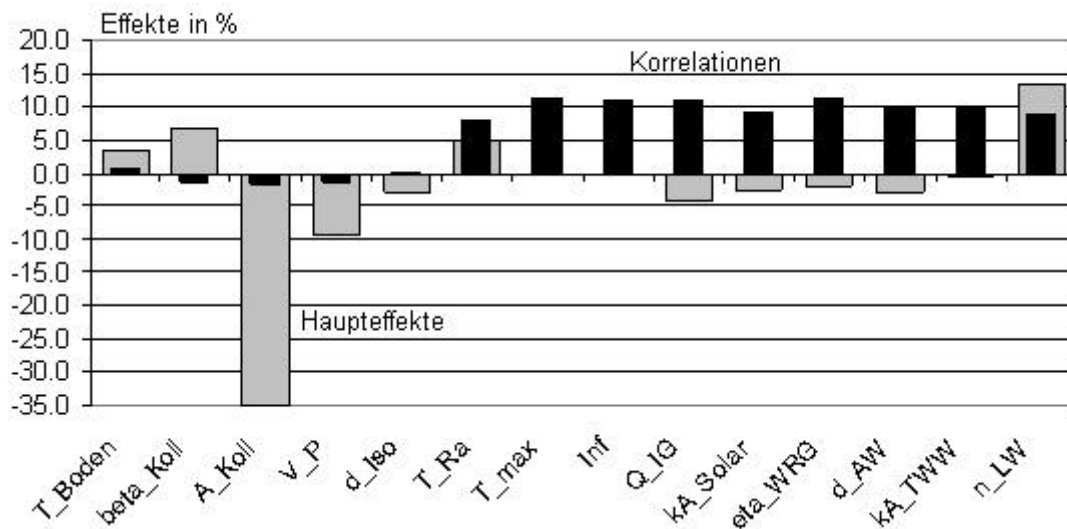


Abbildung C.6: Die grauen Balken stellen den Effekt des jeweiligen Parameters auf den fossilen Nachheizbedarf dar, die schwarzen Balken symbolisieren den Einfluß der Korrelationen.

Literaturverzeichnis

- [Achatz00] Achatz, B.: Energetische Amortisationszeit und ökologische Eigenschaften von Solaranlagen, in: Tagungsband Solares Heizen 2000, Freiburg 2000, S. 51-57
- [Afjei00] Afjei, T.: Kostengünstige Wärmepumpen-Heizsysteme für Niedrigenergie und MINERGIE-Häuser, in: EnergieEffizientes Bauen 3/2000, Urbach 2000, S. 58-64.
- [AKP5] Feist, W. (Hg): Energiebilanz und Temperaturverhalten, Protokollband Nr. 5 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, Darmstadt 1997.
- [Antrag97] Universität Marburg: Passiv-Verwaltungsgebäude Cölbe: Messtechnische Begleitung und systemtechnische Untersuchung, Marburg 1997.
- [Aude00] Aude, P.; Tabary, L; Depecker, P.: Sensitivity analysis and validation of buildings' thermal models using adjoint-code method, in: Energy and Buildings 31, 2000, S. 267-283.
- [Beisel99] Beisel, S.: Vermessung, Modellierung und Bewertung des Erdreichwärmübertragers beim Passiv-Solarhaus Cölbe, Diplomarbeit am Fachbereich Physik der Universität Marburg, Marburg 1999.
- [Benkert00] Benkert, S.; Heidt, F.D.: Auslegung von Erdwärmetauschern und Validierung des Programms GAEA, Tagungsband der 4. Passivhaus-Tagung, Kassel 2000, S. 321-327.
- [Betschart01] Betschart, W.: Das Passivhaus hautnah erlebt - ein Erfahrungsbericht, in: Tagungsband der 5. Passivhaus-Tagung, Böblingen 2001, S.185-194.
- [Bevington92] Bevington, P. R.; Robinson, D. K.: Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences, 2. Auflage, McGraw-Hill Verlag, New York u.a. 1992.
- [BINE99] Fachinformationszentrum Karlsruhe (Hg): Bewertung der Energie- und Stoffströme im Planungsprozess von Gebäuden, Projektinfo 10/99, BINE Informationsdienst, Bonn 1999.
- [Binz01] Binz, A.: Überlegungen zur Nachhaltigkeit von Passivhäusern, in: Tagungsband der 5. Passivhaus-Tagung, Böblingen 2001, S. 131-137.
- [Blümel86] Blümel, K.: Entwicklung von Testreferenzjahren (TRY) für Klimaregionen der Bundesrepublik Deutschland. Report-Nr. BMFT FB T 86 051, Karlsruhe 1986.
- [Bosch00] Bosch, K.: Einführung in die angewandte Statistik, Vieweg Verlag, Braunschweig u.a. 2000.
- [Box78] Box, G. E. P.; Hunter, W. G.; Hunter, J. S.: Statistics for Experimenters, John Wiley & Sons Verlag, New York 1978.
- [Bühl02] Bühl, A.; Zöfel, P.: SPSS 11: Einführung in die moderne Datenanalyse unter Windows, Pearson Studium, 8.Auflage, München u.a. 2002.

- [Bühring01]** Bühring, A.; Russ, C.: Lüftungs-Kompaktgeräte. Messergebnisse, Erfahrungen, Hersteller, in: Tagungsband der 5. Passivhaus-Tagung, Böblingen 2001, S. 165-175.
- [Cerbe96]** Cerbe, G.; Hoffmann, H.J.: Einführung in die Thermodynamik, Carl Hanser Verlag, 11. Auflage, München 1996.
- [Christoffers98]** Christoffers, D.; Kneser, P.; Schramm, U.: Saisonale Abschattung von transparent gedämmten Wänden mit Hilfe von Prismenscheiben, in: Forschungsverbund Sonnenenergie (Hg): Solare Gebäudetechniken, Köln 1998, S. 63-67.
- [Clarke85]** Clarke, J.A.: Energy simulation in building design, J W Arrowsmith Ltd Verlag, Bristol 1985.
- [Dibowski00]** Dibowski, G.; Hovermann, C.; Wortmann, R.: Die Erdwärmetauscher im EWT-Verbundprojekt, Tagungsband der 4. Passivhaus-Tagung, Kassel 2000, S. 311-320.
- [DIN4701]** Deutsches Institut für Normung e.V., (DIN) (Hg): Energetische Bewertung heiz- und raumluftechnischer Anlagen. Teil 10: Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung. Beuth Verlag, Berlin 2000.
- [DIN55350-21]** Deutsches Institut für Normung e.V., (DIN) (Hg): Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik. Teil 21: Zufallsgrößen und Wahrscheinlichkeitsverteilungen, Beuth Verlag, Berlin 1982.
- [DIN55350-22]** Deutsches Institut für Normung e.V., (DIN) (Hg): Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik. Teil 22: Spezielle Wahrscheinlichkeitsverteilungen. Beuth Verlag, Berlin 1987.
- [DIN55350-23]** Deutsches Institut für Normung e.V., (DIN) (Hg): Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik. Teil 23: Beschreibende Statistik. Beuth Verlag, Berlin 1983.
- [EN832]** Deutsches Institut für Normung e.V., (DIN) (Hg): Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Berechnung des Heizenergiebedarfs: Wohngebäude, Deutsche Fassung der Euronorm 832, Beuth Verlag, Berlin 1998.
- [Endbericht02]** Schnieders, J.; Feist, W.: Passiv-Verwaltungsgebäude Wagner & Co in Cölbe - Messdatenauswertung mit Hilfe der dynamischen Gebäudesimulation. Endbericht, Darmstadt 2002.
- [EnergieagenturNRW]** Energieagentur NRW (Hg): Auf dem Weg zum energieeffizienten Bürogebäude. Ein Leitfaden, Wuppertal ohne Jahr.
- [EnEV02]** Bundesministerium für Verkehr-, Bau- und Wohnungswesen (BmVWBW): Energieeinsparverordnung. Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden, Berlin 2002.
- [Feist94]** Feist, W.: Thermische Gebäudesimulation, Müller Verlag, Heidelberg 1994.

-
- [Feist00] Feist, W.: Passivhaus - Faktor 10 zum Anfassen, in: Tagungsband der 4. Passivhaus-Tagung, Kassel, 2000, S. 11-19.
- [Feist01] Feist, W.: Passivhaus 2001 - Fakten, Entwicklungen, Tendenzen, in: Tagungsband der 5. Passivhaus-Tagung, Böblingen 2001, S.3-11.
- [Fürbringer91] Fürbringer, J. M.; Roulet, C. A.: Study of the errors occurring in measurement of leakage distribution in buildings by multifan pressurization, in: Building and Environment 26, 1991, Vol. 1, S.1-12.
- [Fürbringer95] Fürbringer, J. M.; Roulet, C. A.: Comparison and combination of factorial and Monte-Carlo design in sensitivity analysis, in: Building and Environment 30, Vol. 4, 1995, S. 505-519,.
- [Fürbringer99] Fürbringer, J. M.; Roulet, C. A.: Confidence of simulation results: Put a sensitivity analysis module in your MODEL, in: Energy and Buildings 30, 1999, S. 61-71.
- [Görg00] Görg, M.: Eine Zwischenbilanz zur Expo, in: EnergieEffizientes Bauen 2/2000, Urbach 2000, S. 30-40.
- [Gugerli00] Gugerli, H.: Ökologische Optimierung von Passivhäuser, in: Tagungsband der 4. Passivhaus-Tagung, Kassel 2000, S. 551-564.
- [Hübner01] Hübner, H.: Passivhäuser für Mieter - Bedürfnisse, Erfahrungen, Potentiale, in: Tagungsband der 5. Passivhaus-Tagung, Böblingen 2001, S.309-319.
- [ISE00] Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE (Hg): Portrait Nr. 3: Verwaltungsgebäude Wagner Solartechnik, Freiburg 2000.
- [Jenseit99] Jenseit, W.; Lützkendorf, Th.; Eiermann, O.: Der kumulierte Energieaufwand (KEA) im Baubereich. Arbeitspapier im Rahmen des UBA-F&E-Vorhabens 1040123, Öko-Institut (Hg), Darmstadt u.a. 1999.
- [John02] John, R.: Validierung eines Rechenmodells für Großspeicher zur Auslegung solarer Heizsysteme, Dissertation am Fachbereich Physik der Universität Marburg, Marburg 2002.
- [Jordan01] Jordan, U.; Vajen, K.: Realistic Domestic Hot-Water Profiles in Different Time Scales (published by [Task26]), 2001.
- [Katipamula98] Katipamula, S.; Reddy, T.A.; Claridge, D.E.: Multivariate Regression Modeling, in: Journal of Solar Energy Engineering Vol. 120, 1998, S. 177-184.
- [Kissock98] Kissock, J.K.; Reddy, T.A.; Claridge D.E.: Ambient-Temperature Regression Analysis for Estimating Retrofit Savings for Commercial Buildings, in: Journal of Solar Energy Engineering Vol. 120, 1998, S. 168-176.
-

- [Kiefer02]** Kiefer, K.: Monitoringbericht 2001 zum Förderprogramm Wärmeerzeugung im Passivhaus der EnBW Energie Baden-Württemberg AG, Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE (Hg), Freiburg 2002.
- [Klein94]** Klein, S.A.: TRNSYS - A Transient Simulation Model, Manual zur Programmversion 14.1, Madison 1994.
- [Krause03]** Krause, M.: Dissertation am Fachbereich Maschinenbau der Universität Kassel, voraussichtlich 2003.
- [Lalive00]** Lalive d'Epinau, A. E.: Die Umweltverträglichkeit als eine Determinante des architektonischen Entwurfs, Dissertation an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, (Diss. ETH Nr. 13610), Zürich 2000.
- [Lomas92]** Lomas, K. J.; Eppel, H.: Sensitivity analysis techniques for building thermal simulation programs, in: Energy and Buildings, Vol. 19, 1992, S. 21-44.
- [Macdonald01]** Macdonald, I.; Strachan, P.: Practical application of uncertainty analysis, in: Energy and Buildings, Vol. 33, 2001, S. 219-227.
- [Mende02]** Von Mende, M.: Energieeffizienz und Solarenergienutzung im Nichtwohnungsbau - Auswertung der Befragung zur Nutzerakzeptanz, Wagner & Co (Hg) (unveröffentlicht), Cölbe 2002.
- [Meyer98]** Meyer, C.: Solaroptimiertes Bürogebäude, in: Statusbericht "Solar optimiertes Bauen", Freiburg 1998, S. 273-278.
- [Michael01]** Michael, K.: Qualitätssicherung bei Planung und Bauausführung von Passivhäusern, in: Tagungsband der 5. Passivhaus-Tagung, Böblingen 2001, S. 255-260.
- [Oehler01]** Oehler, S.: Lüftung in Passivhäusern. Gute & schlechte Erfahrungen - als Planer & Benutzer, in: Tagungsband der 5. Passivhaus-Tagung, Böblingen 2001, S.113-120.
- [Oesen01]** Von Oesen, M.: 2 Jahre Passivhaussiedlung "Lummerlund" in Hannover Kronsberg - Messergebnisse und Erfahrungen, in: Tagungsband der 5. Passivhaus-Tagung, Böblingen 2001, S. 196-208.
- [Otte00]** Otte, J.: Hocheffiziente, semizentrale Lüftungstechnik für den Geschoßwohnungsbau, in: Tagungsband der 4. Passivhaus-Tagung, Kassel 2000, S. 299-309.
- [Peter02]** Peter, M.: SHC-Task 26, Solar Combisystems, Subtask C, Material Demand, (to be published by [Task26]), 2002.
- [Pfluger00]** Pfluger, R.; Peper, S.: Ergebnisse der Messungen in der Passivhaussiedlung Hannover Kronsberg, in: Tagungsband der 4. Passivhaus-Tagung, Kassel 2000, S. 443-456.
- [Pfluger01]** Pfluger, R.: Passivhäuser im sozialen Geschosswohnungsbau, in: Tagungsband der 5. Passivhaus-Tagung, Böblingen 2001, S.177-183.

-
- [PHPP98]** Feist, W. u.a.: Passivhaus-Projektierungspaket, Anforderungen an qualitätsgeprüfte Passivhäuser, Passivhaus-Institut (Hg), Darmstadt 1998.
- [Pfluger01]** Pfluger, R.: Passivhäuser im sozialen Geschosswohnungsbau, in: Tagungsband der 5. Passivhaus-Tagung, Böblingen 2001, S. 177-183.
- [Recknagel00]** Recknagel, H.; Sprenger, E.; Schramek, E. R.: Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik, Oldenbourg Verlag, 69. Auflage, München u.a. 1999.
- [Reuscher99]** Reuscher, R.: Kühlen und Heizen mit niedrigstem Energieaufwand mittels Systemen zur "adiabaten Kühlung" und durch hocheffiziente Wärmerückgewinnung, in: Tagungsband des zweiten Fachforums Innovative Lüftungstechnik, Regensburg 1999, S.99-127.
- [Rohlffs97]** Rohlffs, K.: Modellierung des thermischen Verhaltens komplexer Gebäude und Untersuchungen zum Potential prädiktiver Regelung im thermischen Bereich, Diplomarbeit an der Fakultät für Physik der Universität Freiburg, Freiburg 1997.
- [Rustige97]** Rustige, U.: Projektierung einer Nutzwärmeerzeugungsanlage für das Kundenzentrum der Firma Wagner & Co Solartechnik GmbH, Diplomarbeit an der Fachhochschule Gießen-Friedberg, Gießen 1997.
- [Seeberger01]** Seeberger, P.: Passiv-Bürohaus Lamparter - Projektpräsentation und erste Messergebnisse, in: Tagungsband der 5. Passivhaus-Tagung, Böblingen 2002, S.320-326.
- [SBJournal01]** Voss, K.; Löhnert, G.; Wagner, A.: SolarBau-Monitor. Energieeffizienz und Solarenergienutzung im Nichtwohnungsbau, Informationsdienst BINE, Bonn 2001.
- [SBMonitor02]** SolarBau-Monitor: www.solarbau.de.
- [Scheuren02]** Scheuren, J.: Energetische Bewertung solarer Heizsysteme mit Großspeichern, Diplomarbeit am Fachbereich Physik der Universität Marburg, Marburg 2002.
- [Schulze00]** Schulze Darup, B.: Ökologische Bewertung von Passivhäusern, Tagungsband der 4. Passivhaus-Tagung, Kassel 2000, S. 541-549.
- [Schwab96]** Schwab, A., Schulze-Kegel, D.: Energetische Diagnose von Gebäuden, Universität-GH-Siegen, FB Physik, Arbeitsgemeinschaft Solar Nordrhein-Westfalen, Siegen 1996.
- [Schweitzer99]** Schweitzer, K.: Neubau eines Verwaltungsgebäudes mit Passivhausstandard. SolarBau Schlußbericht, Cölbe 1999.
- [Schweitzer03]** Schweitzer, K.: Mündliche Mitteilung, Marburg 2003.
- [Sowa98]** Sowa, J.: Comparison of methods of including stochastic factors into deterministic models of indoor air quality, in: Energy and Buildings 27, 1998, S. 301-308.
-

- [Spieler00]** Spieler, A.; Wagner, R.; Schweitzer, K.; u.a.: Passiv-Verwaltungsgebäude: Erste Betriebserfahrungen mit dem Wagner-Passiv-Solarhaus, in: Tagungsband der 4. Passivhaus-Tagung, Kassel 2000, S.435-441.
- [Spieler00b]** Spieler, A.; Wagner, R.; Beisel, S.: Verwaltungsgebäude mit Passivhausstandard: Mess- und Simulationsergebnisse der ersten Heizperiode, in Tagungsband des 10. Symposium thermische Solarenergie, Staffelstein 2000, S.203-207.
- [Spieler01]** Spieler, A.; Wagner, R.; Vajen, K.: Passiv Solarhaus Cölbe: Analyse des Sommerfalls, in: Tagungsband der 5. Passivhaus-Tagung, Böblingen, 2001, S.327-334.
- [SPSS98]** SPSS Version 8.0, SPSS GmbH Software, München 1998.
- [Stark00]** Stark, T.: Solartechnik wird schön - Marktübersicht, in: Energieeffizientes Bauen 3/2000, Urbach 2000, S. 23-34.
- [Task26]** Weiss, W.: Solar Combisystems. IEA (International Energy Agency, <http://www.iea-shc.org/task26>), 12.98-12.02.
- [Task28]** Hastings, R.: Sustainable Building, IEA (International Energy Agency, <http://www.iea-sb.org/task28>), 2001-2005.
- [TK395]** Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie: Förderkonzept "Solar optimiertes Bauen", Bonn 1995.
- [TRNSYS]** Transient Simulation Program, vgl. auch [Klein94].
- [Uecker01]** Uecker, M.: Zur Vermessung, Simulation und Langzeitüberwachung großer solarintegrierter Wärmeversorgungsanlagen, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 6 Nr. 453, VDI Verlag, Düsseldorf 2001.
- [Uhde98]** Uhde, R.: Büro in Passivhausbauweise, in: Sonderdruck aus sbz 17 und 18/1998, Gentner-Verlag, Stuttgart 1998, S.13-16.
- [Vallentin00]** Vallentin, R.: Solarer Städtebau mit Passivhäusern? - Eine kritische Betrachtung, in: Tagungsband der 4. Passivhaus-Tagung, Kassel 2000, S. 225-267.
- [VDI2067]** Verein Deutscher Ingenieure e.V. (Hg): Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen: Grundlagen und Kostenrechnung, VDI-Verlag, Düsseldorf 1994.
- [VDI6020]** Verein Deutscher Ingenieure (Hg): Anforderungen an Rechenverfahren zur Gebäude- und Anlagensimulation. Gebäudesimulation, Beuth Verlag, Berlin 2001.
- [Volz]** Volz, G.: Besseres Licht mit weniger Strom in Schulen und Verwaltungsgebäuden, Seminar-Dokumentation, IMPULS-Programm Hessen (Hg), Darmstadt, ohne Jahr.
- [Voss97]** Voss, K.: Experimentelle und theoretische Analyse des thermischen Gebäudeverhaltens für das energieautarke Solarhaus Freiburg, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 1997.

- [Voss98] Solarbau-Monitor (Homepage): www.solarbau.de/monitor/doku/proj02/mainproj.htm
- [Wagner00] Wagner, R.; Spieler, A.: Automated Archiving and Processing of Measures Data from a Passive Solar Office Building: One solution with databases, in: Proceedings of the 3rd ISES Europe Solar Congress, Kopenhagen, 2000, o.S. (CD).
- [Wallbaum00] Wallbaum, H.; Herbst, B., Herzog, K.: Das Ziel verfehlt? Ein Vergleich von Niedrigenergiehäusern (NEH) und Passivhäusern (PH) nach dem MIPS-Konzept unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Aspekte, Wuppertal Institut (Hg), in: EnergieEffizientes Bauen 2/2000, Urbach 2000, S. 4-9.
- [Wittke02] Wittke, F; Ziesing, H.-J.: Kühle Witterung treibt Primärenergieverbrauch in die Höhe, Wochenbericht Nr. 7/2002, 69. Jahrgang, DIW, Berlin 2002.
- [Wittwer98] Wittwer, V.: Innovationen für die Verglasung von Gebäuden, in: Forschungsverbund Sonnenenergie (Hg), Solare Gebäudetechniken, Köln 1998, S. 58-62.
- [WSchVO95] Bundesministerium für Verkehr-, Bau- und Wohnungswesen (BmVBW): Wärmeschutzverordnung. Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden, Bonn 1995.
- [Zimmer01] Zimmer, M.: Fabrik als Passivhaus - Erfahrungen mit dem Bauprozess, in: Tagungsband der 5. Passivhaus-Tagung, Böblingen 2001, S.43-50.