

**Vorausschauende selbstadaptierende
Heizungsregelung
für Solarhäuser**

Vom Fachbereich Maschinenbau
der Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieurin

genehmigte
Dissertation

von
Dipl.-Phys. Ute Thron
geboren am 3. Januar 1969 in Karl-Marx-Stadt
(heute Chemnitz)

2001

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. Stefan Kabelac

2. Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. Manfred Gietzelt

Tag der Promotion: 15. Februar 2001

Kurzdarstellung

Herkömmliche Heizungsregelungen haben den Nachteil, daß sie auf die beträchtlichen zusätzlichen Energieeinträge in Gebäuden mit hohem Solaranteil zu spät reagieren. Die in der Folge auftretenden Überhitzungen führen zu einer unzureichenden Nutzung der solaren Gewinne zur Substitution von Heizenergie. Der hier verfolgte Ansatz zur Erhöhung des solaren Nutzungsgrades und damit zur Einsparung von Heizenergie besteht in der Einbeziehung der Einstrahlung und einer Wettervorhersage in die Regelstrategie. Über ein Modell des dynamischen Gebäudeverhaltens kann die Raumlufttemperatur vorhergesagt und auf zu erwartende Überhitzungen bereits vor deren Eintreten reagiert werden. Dieses Modell sollte durch die Regelung selbsterlernbar sein, um einen breiten praktischen Einsatz in verschiedenen Gebäuden zu ermöglichen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird ein solcher Algorithmus zur vorausschauenden und selbstadaptierenden Regelung der Heizung in Gebäuden mit erhöhten passiv solaren Energiegewinnen entwickelt. Wünschenswert ist zudem eine Funktionsfähigkeit des Algorithmus in einem vermarktbareren Gerät. Daraus ergeben sich Forderungen nach einer preiswerten, einfach zu konfigurierenden und zu bedienenden Hardware, die ohne nennenswerte Veränderungen in Gebäuden mit verschiedenem dynamischen Verhalten einsetzbar ist.

Das Konzept ist zunächst für kleinere Gebäude mit Pumpenwarmwasserheizung vorgesehen. Die entwickelte Regelung beeinflusst die Raumtemperatur eines ausgewählten Referenzraums mit Hilfe der Vorlauftemperatur des Heizsystems. Ein reglerinternes Modell beschreibt die dynamische Reaktion der Regelgröße in Bezug auf die Einflußgrößen Vorlauftemperatur, solare Einstrahlung und Außentemperatur. Die Parameter dieses Modells werden während des Betriebs aus Meßdaten erlernt. Die durchgeführten Untersuchungen zur Identifizierbarkeit der Modellparameter dienen der Ermittlung einer geeigneten Modellstruktur und Identifikationsmethode.

Der entwickelte Algorithmus wird eingehend in einer Simulationsumgebung sowie einer experimentellen Umgebung (Testhäuser des ISFH in Emmerthal) untersucht. Die Simulationsuntersuchungen dienen der Ermittlung des Einflusses einzelner Parameter des Algorithmus auf das Regelverhalten, der Quantifizierung der Energieeinsparung gegenüber einer konventionellen Regelung sowie dem Nachweis, daß die Regelung in Gebäuden mit unterschiedlichem dynamischen Verhalten und an verschiedenen Heizungssystemen ohne aufwendige Anpassungen eingesetzt werden kann. Als Referenzregelung wird eine Heizkennlinie in Verbindung mit Heizkörperthermostatventilen verwendet. Die berechneten relativen Energieeinsparungen betragen bis zu 9% für ein Niedrigenergiehaus in Massivbauweise mit einem Radiatorheizsystem. Mit Hilfe der Simulationstests wird der Einfluß der thermischen Gebäudekapazität und des Dämmstandards, sowie der Trägheit des Heizsystems auf die Eigenschaften der Regelung bezüglich der Energieeinsparung und des thermischen Komforts untersucht. Es zeigt sich, daß die relativen erreichbaren Energieeinsparungen um so höher liegen, je besser das Gebäude gedämmt, je massiver es ausgeführt und je träger das Heizsystem ist.

Experimentelle Untersuchungen werden mit einer auf einem Personalcomputer und einer in einen Microcontroller implementierten Version des Algorithmus durchgeführt. Beide Regler stellen auch unter den erschwerten Bedingungen eines praktischen Einsatzes in langfristigen Tests ihre Funktionsfähigkeit unter Beweis. Das bereits in den Simulationstests ermittelte Betriebsverhalten läßt sich in der Praxis nachweisen. Der Microcontroller mit der vorausschauenden selbstadaptierenden Heizungsregelung ist als Prototyp verfügbar.

Abstract

Conventional heating controls show the disadvantage of reacting too late to the considerable energy gains in buildings with a high solar fraction. The resulting overheatings lead to an incomplete use of the solar gains for the substitution of heating energy. The approach followed up here, integrates the solar radiation and a weather forecast into the control strategy. With the help of a building model, the expected indoor temperature can be predicted and so the control reacts on expected overheatings before they occur. This model should be self-adaptive to enable a broad practical use in different buildings.

In the framework of this thesis, an algorithm for predictive and adaptive heating control in buildings with high solar gains is developed. The algorithm should work in a marketable hardware. Therefore the device has to be cheap, easy to configure and to use and applicable in buildings with different dynamic behaviour without remarkable modifications.

First, the concept is designed for small buildings with a warm water heating system. The algorithm controls the indoor temperature of a reference room with the supply temperature of the heating system. The internal model of the controller describes the dynamic reaction of the controlled variable to influences of the supply temperature, the irradiance and the ambient temperature. The parameters of this model are learnt during operation. The investigations carried out for the identification of the parameters concerned the determination of a suitable model structure and the identification method.

The developed algorithm is tested in simulation and in an experimental environment (test buildings of the Institut für Solarenergieforschung in Emmerthal). The tests serve for the determination of the influence of single parameters of the algorithm to the control behaviour and the quantitative assessment of energy savings in comparison to a conventional control. Furthermore, it was proved that the algorithm can be used in buildings with different dynamic behaviour and different heating systems without further information. A heating curve in combination with thermostatic valves was used as reference control. The simulated relative energy savings amount to 9% for a massive low energy house with warm water heating system and radiators. With the help of the simulations, the influence of the thermal building capacity, the insulation standard and the inertia of the heating system on the energy savings and the thermal comfort is investigated. It is shown, that the possible relative energy savings increase with better insulation, higher building capacity and higher inertia of the heating system.

Experimental investigations are carried out with both a personal computer and a microcontroller implemented version of the algorithm. Both controllers proved their ability to function under real conditions in a long term test. The behaviour of operation already determined in simulation is shown also in practice. The microcontroller with the predictive adaptive heating control is available as prototype.

Schlagworte

Heizungsregelung
vorausschauend
selbstadaptierend

Keywords

Heating control
predictive
adaptive

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	13
1.1	Problemstellung	13
1.2	Stand der Technik	15
1.2.1	Marktgängige Konzepte	15
1.2.2	Nichtkonventionelle Regelkonzepte für Gebäude	16
1.3	Ziele und Struktur der Arbeit	20
2	Gebäude und Heizsystem	23
2.1	Energiebilanz eines Gebäudes	23
2.2	Das Heizsystem	25
2.3	Zielgrößen	28
2.3.1	Energieeinsparung	28
2.3.1.1	Heizenergiebedarf	28
2.3.1.2	Solarer Anteil und Nutzungsgrad passiv solarer Gewinne	29
2.3.2	Thermischer Komfort	32
2.3.2.1	Bedeutung der Soll-Istwert-Abweichung für den thermischen Komfort	32
2.3.2.2	Größen zur Bewertung des thermischen Komforts	33
2.4	Einflußgrößen und detaillierte Modellbildung	37
2.4.1	Bilanz einer thermischen Zone	37
2.4.2	Wärmetransportvorgänge innerhalb einer thermischen Zone	38
2.4.3	Wärmetransport zwischen Gebäude und Umgebung	39
2.4.4	Solare Gewinne	41
2.4.5	Interne Quellen	44
2.4.5.1	Dynamisches Verhalten der Rohrstrecke	45
2.4.5.2	Dynamisches Verhalten des Heizkörpers	46
2.4.5.3	Wärmeübergang zwischen Heizkörper und Raum	47
2.5	Vereinfachte Modellbildung	49

2.5.1	Reduktion der Eingangsgrößen	49
2.5.2	Modell mit konzentrierten Parametern	50
3	Der Regelalgorithmus	55
3.1	Regelungsprinzipien	55
3.1.1	Das klassische Regelungsprinzip	55
3.1.2	Das vorausschauende Regelungsprinzip	57
3.2	Die Vorhersage der Regelgröße Raumtemperatur	59
3.2.1	Modell des Systems Gebäude	60
3.2.2	Vorhersage der Regelgröße	62
3.2.3	Wettervorhersage	65
3.2.3.1	Vorhersage der Einstrahlung	65
3.2.3.2	Vorhersage der Außentemperatur	66
3.3	Berechnung der Stellgröße Vorlauftemperatur	67
3.3.1	Allgemeine Ableitung des Regelgesetzes aus der Kostenfunktion . . .	67
3.3.2	Optimaler Verlauf der Stellgröße Vorlauftemperatur	69
3.4	Aspekte der Implementierung	70
3.4.1	Die Struktur des Algorithmus	70
3.4.2	Das Meßprinzip	73
3.5	Untersuchungen zur Reglerkonfiguration	74
3.5.1	Untersuchungen zur Modelleignung	74
3.5.1.1	Bewertungskriterien für die Modellgüte	75
3.5.1.2	Modellbewertung anhand von Daten außerhalb des Identifikationszeitraums	77
3.5.1.3	Modellbewertung anhand von Daten innerhalb des Identifikationszeitraums	78
3.5.2	Test der Identifikationsmethode	82
3.5.3	Test verschiedener Kostenfunktionen	84
4	Dynamische Simulationstests	87
4.1	Randbedingungen der Simulationstests	87
4.1.1	Das Gebäudemodell	88
4.1.2	Die TRNSYS Beschreibungsdatei	89
4.1.3	Simulation des Heizkörpers	91
4.2	Der Referenzfall	91
4.2.1	Simulation der konventionellen Heizungsregelung	91
4.3	Wirkung der Einflußgrößen auf das Regelverhalten	95

4.3.1	Einfluß von Parametern der Regelung	95
4.3.2	Regelverhalten unter Einfluß gemessener Störgrößen	97
4.3.3	Regelverhalten unter Einfluß ungemessener Störgrößen	99
4.3.3.1	Auswirkung von zusätzlichen internen Gewinnen	100
4.3.3.2	Auswirkung von zusätzlichen Lüftungswärmeverlusten	101
4.3.3.3	Auswirkung von Meßabweichungen	103
4.4	Vergleich mit konventioneller Heizungsregelung	106
4.4.1	Regelverhalten	106
4.4.2	Heizenergieverbrauch und thermischer Komfort	109
4.4.3	Passiv solare Gewinne	112
4.4.4	Aspekte des Heizsystems	113
4.4.5	Einfluß der Wettervorhersagequalität	117
4.5	Variation von Gebäudeparametern	119
4.5.1	Der Einfluß der solaren Empfangsfläche	119
4.5.2	Der Einfluß des Dämmstandards	123
4.5.3	Der Einfluß der thermischen Gebäudekapazität	128
4.5.4	Der Einfluß des Heizsystems	134
4.5.4.1	Variation der Trägheit des Heizsystems	134
4.5.4.2	Variation der Stellgröße	137
5	Experimentelle Untersuchungen	141
5.1	Experimenteller Aufbau	141
5.1.1	Sensorik und Datenerfassung	142
5.1.1.1	PC-Regelung	142
5.1.1.2	Regelung durch Microcontroller	144
5.1.1.3	Test der Sensorik	145
5.2	Allgemeines Regelverhalten	148
5.2.1	Das Regelverhalten der PC-Regelung	148
5.2.2	Das Regelverhalten der Microcontrollerregelung	155
5.3	Ergebnisse der experimentellen Parameteridentifikation	158
5.4	Ergebnisse der Online-Wettervorhersage	159
5.5	Betriebserfahrungen	160
6	Zusammenfassung und Diskussion	163

A	Systemtheoretische Grundlagen	167
A.1	Einführung und Definitionen	167
A.2	Modelle zur Beschreibung des dynamischen Systemverhaltens	168
A.2.1	Sprung- und Impulsantwortmodelle	168
A.2.2	Transferfunktionenmodelle	172
A.3	Das Übertragungsverhalten linearer Elementarkomponenten	174
A.4	Bestimmung der Modellparameter	176
A.4.1	Methode der kleinsten Quadrate	176
A.4.2	Rekursive Methode der kleinsten Quadrate	177
B	Daten zu den Testumgebungen	181
B.1	Der Aufbau der Experimentierhäuser des ISFH in Emmerthal	181
B.2	Die Simulationsgebäudemodelle	183
B.2.1	Das geometrische Grundmodell	183
B.2.2	Basismodell Niedrigenergiehaus in Massivbauweise	186
B.2.3	Variationen	187

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
A	Fläche	m^2
A	Polynom in z	
\mathbf{A}	Matrix der Koeffizienten der Modellausgangsgröße	
A_{ap}	Aperturfläche	m^2
A_{eff}	effektive Aperturfläche	m^2
A_F, A_f	Fensterfläche	m^2
a_i	Modellparameter	
ANN	Artificial Neural Network	
A_{oi}	Wandfläche	m^2
B	Polynom in z	
\mathbf{B}	Matrix der Koeffizienten der Modelleingangsgröße	
b_i	Modellparameter	
bw	Achsenabschnitt der Heizkennlinie	$^{\circ}C$
C	Wärmekapazität	$kJ K^{-1}$
C_{HK}	Wärmekapazität des Heizkörpers	$kJ K^{-1}$
cl	Komfortparameter 0..9	
C_i	Wärmekapazität der Luft einer thermischen Zone	$kJ K^{-1}$
C_W	Wärmekapazität eines Wandknotens einer thermischen Zone	$kJ K^{-1}$
$c_{p,ag}$	Spezifische Wärmekapazität des Abgases bei konstantem Druck	$kJ kg^{-1}K^{-1}$
$c_{p,L}$	Spezifische Wärmekapazität der Luft bei konstantem Druck	$kJ kg^{-1}K^{-1}$
$c_{p,w}$	Spezifische Wärmekapazität des Heizungswassers	$kJ kg^{-1}K^{-1}$
d	Dicke, Abstand	m
\hat{d}_i	Sprungantwortkoeffizienten der Störgrößen	
DMC	Dynamic Matrix Control	
e	Regeldifferenz	
E_{pr}	Primärenergie	J, kJ
eThV	elektronisches Thermostatventil	
F_{12}	Einstrahlzahl	
FBH	Fußbodenheizung	
F_{ij}^{2*}	Verteilfaktor bei Strahlungsaustausch	
FPE	Final Prediction Error	

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
g	Gesamtenergiedurchlaßgrad	
g_{TWD}	Gesamtenergiedurchlaßgrad der transparenten Dämmung	
\mathbf{G}	Dynamische Matrix der Impulsantwortkoeffizienten	
G_n	Globale Bestrahlungsstärke	W m^{-2}
GPC	Generalized Predictive Control	
G_{sv}	Globale solare Bestrahlungsstärke, süd, vertikal	W m^{-2}
$\hat{G}_s(t)$	zeitlicher Verlauf der Globalstrahlung	W m^{-2}
$\hat{G}_0(t)$	maximale Amplitude der Globalstrahlung	W m^{-2}
h_{ag}	spezifische Enthalpie des Abgases	kJ kg^{-1}
h_a	spezifische Enthalpie der Außenluft	kJ kg^{-1}
H_o	Brennwert	kJ kg^{-1}
H_u	Heizwert	kJ kg^{-1}
H_n	Strahlungssumme	J m^{-2}
\hat{H}_s	Einstrahlungssumme	kWh m^{-2}
i	Laufindex	
ISFH	Institut für Solarenergieforschung GmbH Hameln/ Emmerthal	
j	Laufindex	
J	Kostenfunktion	
\mathbf{J}	Kostenfunktion in Matrixschreibweise	
K	Konstante zur Bewertung der zukünftigen Einstrahlungssumme	Wh m^{-2}
k	Index, aktueller Zeitschritt	
k	Wärmedurchgangskoeffizient, Wärmeleitwert	$\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$
k_{eff}	effektiver Wärmedurchgangskoeffizient für Sonnenkollektoren	$\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$
k_{HK}	Wärmedurchgangskoeffizient des Heizkörpers	$\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$
k_{TWD}	Wärmedurchgangskoeffizient der transparenten Dämmung	$\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$
k_W	Wärmedurchgangskoeffizient der Wand	$\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$
k_{HR}	konventionelle Heizungsregelung	
l, L	Länge	m
L_{12}	Wärmeleitwert für Strahlungsaustausch	W K^{-1}
M	Regelhorizont	
\dot{m}_{ag}	Massenstrom des Abgases	kg s^{-1}
\dot{m}_B	Massenstrom des Brennstoffs	kg s^{-1}
MC	Microcontroller	
MPC	Model based Predictive Control	
mThV	mechanisches Thermostatventil	
\dot{m}_W	Massenstrom des Heizungswassers	kg s^{-1}
n	Heizkörperexponent	
n	Luftwechselrate	h^{-1}
na	Ordnung des A-Polynoms	
nb	Ordnung des B-Polynoms	
NEH	Niedrigenergiehaus	
nm	Modellordnung	
N_{sol}	Nutzungsgrad solarer Gewinne	
N_{wg}	Nutzungsgrad von Wärmegewinnen	
Nu	Nußelt-Zahl	

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
P	Vorhersagehorizont	
PC	Personalcomputer	
PH	Passivhaus	
PMV	Predicted Mean Vote	
PPD	Predicted Percentage of Dissatisfied	%
Q	Wichtungsfunktion der Sollwertabweichung	
$\dot{q}_{HK,N}$	Wärmestromdichte	$W m^{-2}$
\dot{Q}_B	Heizleistungsbedarf	W, kW
$\dot{Q}_{g,L}$	interne konvektive Gewinne	W, kW
$\dot{Q}_{g,oi}$	wandspezifischer Anteil des Strahlungsanteils der internen Gewinne	W, kW
\dot{Q}_H	Heizleistung	W, kW
\dot{Q}_{HK}	Wärmeverluststrom des Heizkörpers	W, kW
$\dot{q}_{HK,N}$	Wärmestromdichte des Heizkörpers bei Normbedingungen	$W m^{-2}$
\dot{Q}_{inf}	Wärmestrom durch Infiltration	W, kW
\dot{Q}_{int}	interne Gewinne	W, kW
\dot{Q}_L	konvektiver Wärmestrom zum Luftknoten	W, kW
\dot{Q}_l	Lüftungswärmeverluste	W, kW
\dot{Q}_{lw}	Wärmestrom durch langwelligen Strahlungsaustausch mit anderen Wänden	W, kW
\dot{Q}_{Nu}	Nutzleistung	W, kW
$\dot{Q}_{Nu,K}$	Nutzleistung eines Heizkessels	W, kW
$\dot{Q}_{Nu,koll}$	Nutzleistung eines thermischen Solarkollektors	W, kW
$\dot{Q}_{oi,L}$	konvektiver Wärmestrom zwischen Luftknoten und innerer Oberfläche	W, kW
\dot{Q}_{oi}	Wärmestrom zu einem Wandtemperaturknoten	W, kW
\dot{Q}_{sol}	Direkte solare Gewinne	W, kW
$Q_{sol,N}$	Genutzte solare Energie	J, kWh
$Q_{sol,nN}$	Nicht genutzte solare Energie	J, kWh
$Q_{sol,ges}$	Eingetragene solare Energie durch alle Fenster	J, kWh W, kW
\dot{Q}_{tr}	Transmissionswärmeverluste	W, kW
\dot{Q}_V	Wärmeverlustleistung	W, kW
\dot{Q}_v	Wärmestrom durch Ventilation	W, kW
\dot{Q}_{ZRB}	Wärmeströmen aus anderen Zonen oder aufgrund einer Randbedingung	W, kW
r_a	äußerer Rohrradius	m
r_i	innerer Rohrradius	m
R	Wichtungsfunktion des Regelaufwands	
R	Wärmewiderstand	$m^2K W^{-1}$
R_a	Wärmeleitwiderstand zwischen Wandinnenoberfläche und Außenluft	$m^2K W^{-1}$
R_{Hi}	Wärmeübergangswiderstand zwischen Heizkörper und Innenluft	$m^2K W^{-1}$
R_{HR}	Wärmeübergangswiderstand zwischen Stellventil und Heizkörper	$m^2K W^{-1}$

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
R_k	konvektiver Wärmeübergangswiderstand	$\text{m}^2\text{K W}^{-1}$
R_L	Lüftungswärmewiderstand zwischen Innen- und Außenluft	$\text{m}^2\text{K W}^{-1}$
R_{oi}	Wärmeübergangswiderstand zwischen Wandinnenoberfläche und Innenluft	$\text{m}^2\text{K W}^{-1}$
R_r	Strahlungswärmewiderstand	$\text{m}^2\text{K W}^{-1}$
Re	Reynolds-Zahl	
S	Dynamische Matrix der Sprungantwortkoeffizienten	
SAK	Anzahl der Sprungantwortkoeffizienten	
s_i	Sprungantwortkoeffizienten	
st	Steigung der Heizkennlinie	
t	Zeit	s
Δt	Zeitschritt	s
Δt	Temperaturdifferenz	K
t_{SA}	Zeitpunkt des Sonnenaufgangs	h, dezimal
t_{SU}	Zeitpunkt des Sonnenuntergangs	h, dezimal
T_0	Verdampfungstemperatur einer Wärmepumpe	K
T_a	Außentemperatur	$^{\circ}\text{C}$
T_c	Verflüssigungstemperatur einer Wärmepumpe	K
T_r	Raumtemperatur	$^{\circ}\text{C}$
TRS	Raumtemperatursollwert	$^{\circ}\text{C}$
Trl	Rücklauftemperatur	$^{\circ}\text{C}$
Trl	Vorlauftemperatur	$^{\circ}\text{C}$
TWD	Transparente Wärmedämmung	
TZ	Totzeit	
u	Modelleingangsgröße, Stellgröße	
Δu	Stellgrößeninkrement	
U	innere Energie	J, kJ
$\Delta \mathbf{U}$	Vektor der Stellgrößeninkremente	
\dot{V}	Volumenstrom	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
V, V_N	Verlustfunktion	
vsHR	vorausschauende selbstadaptierende Heizungsregelung	
w	Strömungsgeschwindigkeit	m s^{-1}
w	Gewichte	
WV	Wettervorhersage	
WSV '95	Wärmeschutzverordnung 1995	
x	Eingangsgröße	
X	Vektor der Eingangsgröße	
y	Modellausgangsgröße, Regelgröße	
y_o	freie Systemantwort	
y_f	erzwungene Systemantwort	
y_r	Sollwert der Regelgröße	
Y	Vektor der Ausgangsgröße	
Y_o	Vektor der freien Systemantwort	
Y_f	Vektor der erzwungenen Systemantwort	
z	komplexe Variable	

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
α_a	Wärmeübergangskoeffizient an der Außenseite	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$
α_i	Wärmeübergangskoeffizient an der Innenseite	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$
$\alpha_{oi,L}$	Wärmeübergangskoeffizient zwischen Wandknoten und Luftknoten	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$
α_W	Absorptionskoeffizient der Wand	
ε	Residuen	
ε	Emissionsgrad	
ε_{wp}	Leistungszahl einer Wärmepumpe	
$\varepsilon_{wp,c}$	Carnot-Leistungszahl einer Wärmepumpe	
φ^T	Regressionsvektor	
η_K	Wirkungsgrad eines Heizkessels	
η_{TWD}	Nutzungsgrad einer transparent gedämmtem Wand	
$\eta_{wp,c}$	Carnot'scher Gütegrad einer Wärmepumpe	
γ	Verhältnis von freien Wärmegewinnen und Wärmeverlusten eines Gebäudes	
λ	Wärmeleitfähigkeit	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
λ	Vergessensfaktor	
θ	Parametervektor	
ϑ_a	Außentemperatur	$^{\circ}\text{C}$
ϑ_{abs}	Absorbiertemperatur	$^{\circ}\text{C}$
ϑ_F	Fluidtemperatur	$^{\circ}\text{C}$
ϑ_{HK}	Temperatur des Heizkörpers	$^{\circ}\text{C}$
ϑ_i	Temperatur des Luftknotens einer thermischen Zone	$^{\circ}\text{C}$
ϑ_{oi}	Temperatur eines Wandknotens einer thermischen Zone	$^{\circ}\text{C}$
ϑ_L	Lufttemperatur	$^{\circ}\text{C}$
ϑ_{op}	Operative Temperatur	$^{\circ}\text{C}$
ϑ_R	Raumtemperatur	$^{\circ}\text{C}$
ϑ_{RL}	Rücklauftemperatur	$^{\circ}\text{C}$
$\vartheta_{RL,HK}$	Rücklauftemperatur am Heizkörper	$^{\circ}\text{C}$
ϑ_{RS}	Sollraumtemperatur	$^{\circ}\text{C}$
$\bar{\vartheta}_{str}$	Flächengewichtete Wandtemperatur	$^{\circ}\text{C}$
ϑ_U	Umgebungstemperatur	$^{\circ}\text{C}$
ϑ_{VL}	Vorlauftemperatur	$^{\circ}\text{C}$
$\vartheta_{VL,HK}$	Vorlauftemperatur am Heizkörper	$^{\circ}\text{C}$
ρ	Dichte	kg m^{-3}
ρ_L	Dichte der Luft	kg m^{-3}
σ	Stefan-Boltzmann Konstante	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$
τ	Transmissionsgrad	
τ	Gebäudezeitkonstante	s
$\bar{\tau}\bar{\alpha}$	effektives Transmissions-Absorptionsprodukt eines thermischen Solarkollektors	

Kapitel 1

Einführung

1.1 Problemstellung

Die Debatte um die Begrenztheit der derzeitig dominierenden Primärenergieträger und die möglichen Klimaveränderungen aufgrund des zunehmenden CO_2 -Ausstoßes in den letzten Jahrzehnten hat zu zahlreichen Überlegungen geführt, wie der Verbrauch konventionell bereitgestellter Energie reduziert werden kann. Zwei wesentliche Ansätze lassen sich unterscheiden: zum einen Maßnahmen zur Reduktion des Energiebedarfs und zum anderen die Substitution durch regenerative Energieformen. Das Einsparpotential im Bereich der Gebäudeheizung ist erheblich. Die Raumheizung schlägt in der Bundesrepublik Deutschland mit 53% des Endenergiebedarfs bei privaten Haushalten zu Buche [70]. Läßt man den Endenergieverbrauch der Privathaushalte durch Mobilität (ca. 31%) unberücksichtigt, so macht der Raumwärmebedarf sogar 76% des Endenergiebedarfs aus [42]. Der gesamte Anteil der Raumwärme am Endenergiebedarf in der Bundesrepublik Deutschland betrug im Jahr 1995 immerhin noch 34% [49].

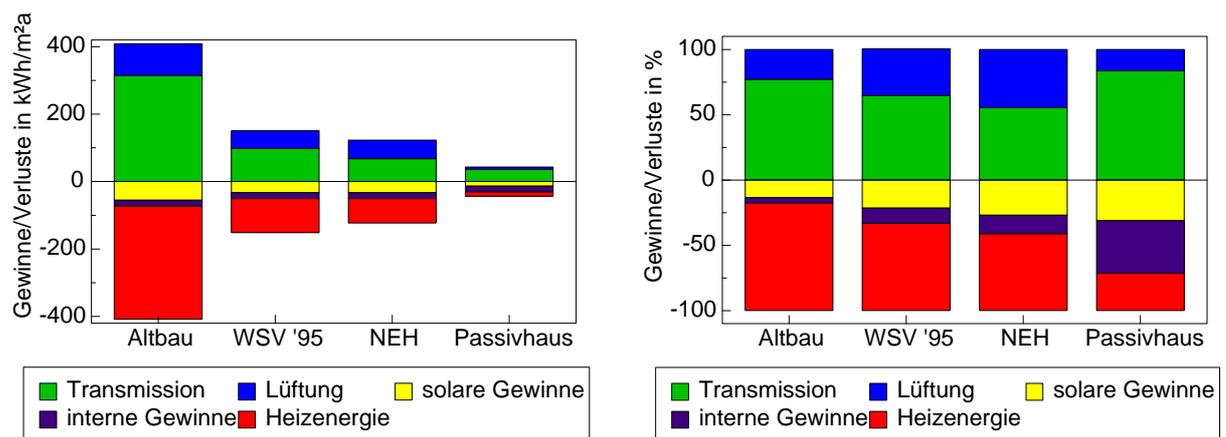


Abb. 1.1. Wärmeverluste und -gewinne von Gebäuden verschiedener Wärmeschutzstandards, links: absolute Werte, rechts: relative Werte, (WSV '95: Wärmeschutzverordnung 1995, NEH: Niedrigenergiehaus)

Gesetzgeberische Maßnahmen (Wärmeschutzverordnung [9]) haben in den letzten Jahren eine drastische Reduktion der Wärmeverluste über die Gebäudehülle insbesondere bei Neubauten im Vergleich zum Gebäudebestand gefördert (vgl. Abbildung 1.1). Ein Teil der Verluste wird in jedem Gebäude über interne Gewinne (Wärmeabgabe von Personen und elektrischen

Geräten) und passiv solare Gewinne (Solareinträge durch Fenster) gedeckt. Der verbleibende Teil muß als Heizenergie zugeführt werden. Ausgehend von der Annahme, daß sich solare und interne Gewinne für verschiedene Wärmeschutzstandards nur geringfügig verändern, wird deutlich, daß ihr relativer Anteil an der Deckung der Verluste mit besserem Dämmstandard zunimmt. Beim Niedrigenergiehausstandard kann der passiv solare Anteil bereits ca. 30% ausmachen. Solarhäuser weisen, verglichen mit konventioneller Bauweise, größere passiv solare Empfangsflächen auf und erreichen damit wesentlich höhere passiv solare Beiträge. Der

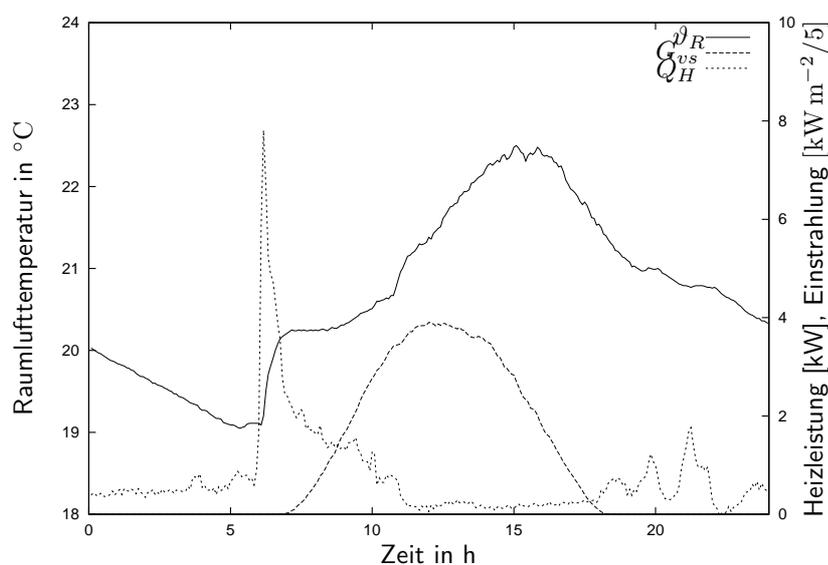


Abb. 1.2. Gemessene Raumlufttemperatur (ϑ_R), Globalstrahlung auf die Südvertikale (G_{vs}) und Heizleistung (\dot{Q}_H) im Experimentierhaus des ISFH am 5. März 1996

erhöhte passiv solare Anteil bei Gebäuden mit geringem Heizenergiebedarf bringt jedoch auch Probleme mit sich. Situationen, wie in Abbildung 1.2 verdeutlicht, treten besonders in den Übergangszeiten gehäuft auf. Dargestellt sind die Verläufe von Raumlufttemperatur und Heizleistung in einem Solarhaus (Massivbau) sowie die Wettergrößen Außenlufttemperatur und solare Einstrahlung auf die Südvertikale an einem einstrahlungsreichen Tag während der Übergangszeit. Die Heizleistung weist eine morgendliche Spitze auf, die durch die Anhebung der Raumtemperatur vom Nacht- auf den Tagessollwert entsteht. Sobald dieser erreicht ist, wird die Heizleistung auf den zur Kompensierung der Verluste notwendigen Wert reduziert. Im Verlauf des Vormittags führen die solaren Gewinne zu einer Überschreitung des Raumtemperatursollwertes. Die Regelung reagiert mit einer Verringerung der Heizleistung auf nahezu null. Da die Gewinne jedoch bei weitem die Verluste übersteigen, läßt sich eine Überhitzung in den Nachmittagstunden nicht verhindern. Übliche Maßnahmen zur Wiederherstellung des thermischen Komforts sind dann eine Reduktion der Solargewinne durch Verschattungsmaßnahmen oder eine Erhöhung der Verluste durch verstärkte Lüftung. Beide Maßnahmen verringern die solaren Gewinne und damit den solaren Anteil.

Einen anderen Ansatz verfolgt die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte Entwicklung. Durch Beeinflussung der Heizungsregelung sollen der solare Anteil erhöht und gleichzeitig Überhitzungen reduziert werden. Abb. 1.2 läßt erkennen, daß eine weitere Reduktion der Heizleistung vor Eintreten der Sollwertüberschreitung die Überhitzung zumindest teilweise reduzieren kann. Bei einer Messung der *aktuellen* Solarstrahlung kann auf eine Überhitzungsgefahr in den kommenden Stunden geschlossen werden. Jedes Gebäude reagiert jedoch verschieden

auf die eintreffenden Gewinne, was sich in einer unterschiedlichen Höhe und einem unterschiedlichen Zeitpunkt der Überhitzungen äußert. Die Reaktion der den inneren thermischen Zustand des Gebäudes beschreibenden Größen auf äußere Einflüsse wird im folgenden dynamisches (instationäres) Gebäudeverhalten genannt. Von der Trägheit des Gebäudes und des Heizsystems hängt ab, zu welchem Zeitpunkt eine Reduktion der Heizleistung starten muß, um die Überhitzungen effektiv zu verringern. Eine noch frühzeitigere Reaktion ist prinzipiell möglich, wenn zusätzlich zum aktuellen Meßwert z.B. der solaren Einstrahlung noch eine *Vorhersage* dieser Größe in die Regelstrategie Eingang findet. Da ein reines Heizsystem nur zur Erhöhung der Raumtemperatur in einem Gebäude beitragen kann, lassen sich Überhitzungen besonders dann effizient vermeiden oder reduzieren, wenn vor deren Eintreten Unterschreitungen des Raumtemperatursollwertes zugelassen werden.¹ Eine verbesserte Regelung ermittelt also nicht nur den aktuellen Wärmebedarf eines Gebäudes und sorgt für die entsprechende Zufuhr, sondern sie muß aufgrund der verzögerten Wirkung der Einflußgrößen auch zukünftige Raumzustände berücksichtigen.

Aufgrund der unterschiedlichen Reaktion jedes Gebäudes auf äußere Einflüsse, ist die Kenntnis des dynamischen Gebäudeverhaltens durch die Regelung erforderlich. Es muß daher intern im Algorithmus des Reglers mit Hilfe eines Modells abgebildet werden. Für die Ermittlung dieses Modells existieren verschiedene Möglichkeiten: das Modell kann vorab anhand des physikalischen Gebäudeaufbaus eingegeben werden. Nachteilig sind dabei die Aufwendigkeit des Verfahrens (Dateneingabe) und die geringen Korrekturmöglichkeiten. Daher ist diese Variante für einen breiten praktischen Einsatz der Regelung ungeeignet. Besser geeignet ist ein Verfahren, welches das dynamische (instationäre) Gebäudeverhalten direkt aus Meßwerten während des Betriebs ermittelt. Ein solches Verfahren wird Selbstadaptation oder Selbstidentifikation genannt und in der hier vorgestellten Heizungsregelung eingesetzt.

1.2 Stand der Technik

1.2.1 Marktgängige Konzepte

Die Heizungsanlagenverordnung [10] schreibt vor, daß „Zentralheizungen mit zentralen selbsttätig wirkenden Einrichtungen zur Verringerung und Abschaltung der Wärmezufuhr sowie zur Ein- und Ausschaltung der elektrischen Antriebe in Abhängigkeit von:

- der Außentemperatur oder einer anderen geeigneten Führungsgröße und
- der Zeit

auszustatten sind“. Die Verordnung verlangt weiterhin die Ausstattung von heizungstechnischen Anlagen „mit selbsttätig wirkenden Einrichtungen zur raumweisen Temperaturregelung“.

Als am weitesten verbreitete Art der zentralen Regelung bei Pumpenwarmwasserheizungen hat sich die Berechnung der Sollvorlauf- oder Sollkesseltemperatur als Funktion der

¹Die Aussagen lassen sich sinngemäß auch auf andere Einflußgrößen wie beispielsweise die Außentemperatur oder interne Gewinne übertragen.

Außentemperatur (witterungsgeführte Vorlauftemperaturregelung²) etabliert. Der Zusammenhang zwischen der durch einen Sensor gemessenen Führungsgröße Außentemperatur und der Regelgröße Vorlauf- bzw. Kesseltemperatur wird durch eine Regler-Heizkennlinie hergestellt, die nach DIN EN 12098-1 durch zwei oder mehr Parameter definiert ist [26]. Die Zeitabhängigkeit wird durch eine Modifikation der Kennlinie, z.B. für eine Nachtabsenkung realisiert.

Zur dezentralen Einzelraumtemperaturregelung haben sich thermostatische Heizkörperventile bewährt. Sie reduzieren den Massenstrom des Heizmittels in Abhängigkeit von der Raumtemperatur und passen so die Wärmeabgabe des betreffenden Heizkörpers an den Wärmebedarf des Raumes an. Thermostatventile erzielen im Vergleich zu Handregulierventilen Energieeinsparungen von 10-15% durch die Ausnutzung von Fremdwärme im Raum [46]. Neben den mechanischen Thermostatventilen sind seit langem elektronische Thermostatventilköpfe auf dem Markt, die eine vorprogrammierte Zeitabhängigkeit des Raumtemperatursollwertes ermöglichen. Hersteller versprechen weitere Heizeneersparungen durch die individuelle Anpassung der Raumsolltemperatur an Nutzung und Anwesenheit.

Für regelungstechnische Aufgaben im Gebäudebereich haben sich weiterhin in den letzten Jahrzehnten DDC-Regelungen (DDC - Direct Digital Control) durchgesetzt. Die Regelungsaufgabe wird dabei durch einen Microcontroller übernommen, dessen Kernstück ein Microprozessor ist. Weitergehende Optimierungsmöglichkeiten bieten Einzelraumregelsysteme, die über einen Bus vernetzt sind. Dabei erfolgt die Programmierung der Zeitfunktionen in einem zentralen Microcomputer. Die Marktentwicklung der Heizungsregeltechnik war in den letzten Jahren durch folgende Erweiterungen der DDC-Regelungen gekennzeichnet:

- Einbeziehung weiterer Informationen wie z.B. Fensterkontakte, Wettergrößen
- Konzentrierung weiterer Regelfunktionen aus dem Heizungs- und Warmwasserbereich (z.B. Brennerregelung, Solaranlage, Regelung mehrerer Heizkreise) in einem Gerät
- Busintegration zur Kommunikation mit anderer Gebäudetechnik (Home-automation)
- externe Kommunikation über Modem z.B. zu Wartungszwecken
- Herstellung drahtloser Verbindungen zwischen zentralem Microcomputer, Sensoren und Aktoren
- verbesserte Visualisierung.

Trotz dieser technischen Weiterentwicklung haben sich im Bereich der Regelfunktionen kaum nennenswerte Veränderungen durchgesetzt. Der Markt wird weiterhin von witterungs- bzw. raumgeführten Regelkonzepten dominiert [65].

1.2.2 Nichtkonventionelle Regelkonzepte für Gebäude

Angestoßen durch den Trend hin zu Gebäuden mit immer geringerem Wärmebedarf sind im Bereich der Forschung und Entwicklung eine Reihe von Ansätzen zur besseren Anpassung

²Der Begriff „witterungsgeführte Vorlauftemperaturregelung“ hat sich in der Heizungstechnik durchgesetzt, obwohl es sich genaugenommen um eine Steuerung handelt.

der Heizsysteme und ihrer Regelung an den Wärmebedarf gemacht worden. Eisenmann [32] hat nachgewiesen, daß eine einfache Übertragung der für ein Gebäude nach Wärmeschutzverordnung optimierten Heizsysteme auf ein Niedrigenergiehaus zu einem beträchtlichen energetischen Mehraufwand gegenüber einem ideal flink geregelten System führt. Mehrverbräuche entstehen durch niedrigere Nutzungsgrade im Bereich der Wärmeerzeugung, -verteilung und -übergabe, wodurch ein merklicher Teil der Energieeinsparungen durch die verbesserte Wärmedämmung zunichte gemacht wird. Daraus resultiert die Forderung einer Anpassung des gesamten Heizsystems inklusive Regelung an Gebäude mit verringertem Wärmebedarf.

Verschiedene Untersuchungen widmen sich einer verbesserten Ermittlung des aktuellen Wärmebedarfs, da bei besser gedämmten Gebäuden die Außentemperatur als alleinige Führungsgröße für die zentrale Regelung zunehmend ungeeignet ist. Eine von Arend und Pfannstiel vorgeschlagene Strategie besteht in der Auswertung der Daten der Raumtemperaturregler und der Stellantriebe aller Heizkörperventile [4]. Voraussetzung ist das Vorhandensein eines Bussystems zur Erfassung der Daten und eines mathematischen Modells des Gebäudes.

Ein anderer Ansatz dieser Autoren ([3], [84]) läßt sich mit erheblich weniger Aufwand realisieren. Dabei wird der aktuelle Wärmebedarf eines Hauses aus dem Verlauf der Kesselwassertemperatur ermittelt. Der zeitliche Verlauf der Kesselwassertemperatur ist ein Maß für die individuellen Heizwünsche der Bewohner. Die Berechnung des Sollwertes für die Regelung der Kesselwassertemperatur aus der Analyse des Wärmebedarfs wurde dabei mit Fuzzy-Logik durchgeführt. Die Regelung wurde in einem Mikroprozessor implementiert, in einen Heizkessel integriert und experimentell untersucht.

Eckert et. al. [30] entwickelte eine auf Fuzzy-Logik basierende Steuerung für eine Heizungsanlage mit solarthermischen Komponenten. Sie verknüpft Energiebedarf, solares Energieangebot und Speicherzustand. Zur Strategie gehört ebenfalls eine Wetter- und Heizbedarfsvorausschau und die Ableitung entsprechender Entscheidungen.

Glorennec [44] verwendet Fuzzy-Logik für eine einfache mathematische Repräsentation des thermischen Verhaltens eines Gebäudes. Das Modell beschreibt den grundsätzlichen dynamischen Zusammenhang zwischen den Eingangsgrößen (z.B. Außen- und Vorlauftemperatur) und der Raumtemperatur. Es muß aber noch für jedes Gebäude speziell angepaßt werden. Die Funktionsfähigkeit wurde für ein Beispielmmodell durch Vergleich mit experimentellen Daten aus einem realen Gebäude nachgewiesen. Das Modell wird im Rahmen einer intelligenten Heizungsregelung verwendet.

Eine fuzzy-geregelte Heizung unter Einbeziehung der prognostizierten Einstrahlung für ein aktiv solar unterstütztes Heizsystem stellt Wittwer [87] vor. Dabei wird die Freigabe der Heizkreispumpe sowie die Vorlauftemperatur in Abhängigkeit des erwarteten Solareintrags geführt.

Klingner et. al. stellen in [53], [54] eine modelladaptive Mehrgrößenregelung für Temperatur und Luftfeuchte zum Einsatz in feldbusbasierten Haussystemen vor. Für die Modellbildung kommen Transferfunktionen zum Einsatz. Die Ansteuerung der Stellglieder nutzt ein wissensbasiertes Verfahren. Mit Hilfe von Simulationen wurde die Funktionsfähigkeit des Ansatzes nachgewiesen.

Künstliche Neuronale Netzwerke (ANNs) werden von Bellas-Velidis et. al. [7] zur Vorhersage des Energiebedarfs eines Gebäudes eingesetzt. Tests des Verfahrens wurden mit Hilfe experimenteller Datensätze durchgeführt und zeigten die prinzipielle Funktionsfähigkeit eines solchen Algorithmus. Eine Wettervorhersage ist auf Basis eines zusätzlichen ANNs imple-

mentiert. Simulations- und experimentelle Tests des Regelalgorithmus in einer PC-Version dienten zur Quantifizierung von Energieeinsparung und Komfortverbesserung. Nachteilig bei diesem Verfahren ist allerdings die lange Lernphase zum Trainieren der Netzwerke, die eine Übertragbarkeit zwischen verschiedenen Gebäuden erschwert.

Curtiss et. al. [19] verwenden ebenfalls ANNs zur Modellierung typischer Prozesse in der Heizungs- und Klimatechnik. Mit Hilfe von Simulationen konnte der Eignungsnachweis von ANNs für eine adaptive und prädiktive Regelung dieser Prozesse erbracht werden. Eine experimentelle Untersuchung unter Nutzung eines Personalcomputers wurde erfolgreich abgeschlossen.

Ein vorausschauender adaptiver Heizungsregler wird ebenfalls an der Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) entwickelt [31]. Er basiert auf der Nutzung sowohl künstlicher neuronaler Netzwerke als auch von Fuzzy-Logik. Simulations- und experimentelle Tests wurden erfolgreich durchgeführt. Derzeit wird an der Umsetzung in ein industrielles Produkt (Microcontroller) gearbeitet.

Shapiro et. al. verwenden eine Außentemperaturvorhersage zum vorausschauenden Regeln einer Heizungs- und Lüftungsanlage. Der Regler verwendet ein einfaches Modell, basierend auf einem elektrischen Netzwerk. Die Modellparameter wurden vorab auf Basis von Meßdaten „per Hand“ bestimmt und vorgegeben. Die microcontrollerimplementierte Regelung wurde in einer Testbaracke experimentell untersucht und zeigte gute Eigenschaften bezüglich des thermischen Komforts.

Eine vorausschauende Heizungsregelung unter Einbeziehung einer Wettervorhersage wurde durch Nygård Ferguson [63] entwickelt, praktisch umgesetzt und in einer Simulationsumgebung sowie experimentell untersucht. Der Algorithmus nutzt das Verfahren der stochastischen optimalen Regelung [39]. Die Abbildung des dynamischen Gebäudeverhaltens erfolgt mit einem vorab ermittelten Zustandsraummodell. Anhand der theoretischen Untersuchungen konnte gezeigt werden, daß in Gebäuden mit signifikanten solaren Gewinnen der vorausschauende Regler zu geringerem Heizenergieverbrauch führt und zwar um so mehr, je höher die Solareinträge und die Verzögerungszeit des Heizsystems sind. Bei der experimentellen Umsetzung an einem Bürogebäude konnte sowohl eine Energieeinsparung als auch eine Verbesserung des thermischen Komforts erreicht werden. Der Regelalgorithmus wurde auf einem Personalcomputer betrieben. Die Weiterentwicklung dieses Ansatzes führte zu einem vorausschauenden Regler mit adaptiven Eigenschaften, der als Hardware in der Schweiz auf dem Markt angeboten wird [18], [17]. Der Preis des Gerätes mit Sensorik liegt jedoch mit über 2800 SF für einen wirtschaftlichen Einsatz in Einfamilienhäusern zu hoch.

Ein ähnliches mathematisches Verfahren zur Realisierung eines prädiktiven Reglers verwendet Rohlffs [72]. Als internes Modell diente hier ein stark vereinfachtes RC-Netzwerk zur Beschreibung eines Solarhauses (Heliotrop). Das Potential zur Heizenergieeinsparung und Komfortverbesserung wird mit Hilfe eines vorausschauenden Reglers auf Basis zweier Wettervorhersagen mit Hilfe von Simulationen ermittelt. Die Wettervorhersagen verwenden dabei zum einen die Annahme, daß der heutige Tag genau wie der gestrige verläuft, zum anderen den theoretischen Grenzfall einer idealen Vorhersage, bei der der zukünftige Wetterverlauf exakt bekannt ist.

Kummert [57] stellt einen vorausschauenden Regler ebenfalls auf Basis der optimalen stochastischen Regelungstheorie vor. Als internes Modell dient eine Zustandsraumbeschreibung auf Basis eines RC-Netzwerks, welches aber aufgrund seiner Komplexität bisher nur vorab, unter großem rechnerischen Aufwand und mit Vorgabe geeigneter Startparameter aus Meß-

daten identifiziert werden kann. Für den entwickelten Algorithmus wurden umfangreiche experimentelle Tests an einem als Bürogebäude genutzten Solarhaus und Simulationsuntersuchungen an dem entsprechenden Gebäudemodell durchgeführt. Die Komplexität des Algorithmus verlangt derzeit die Ausführung auf einem Computer, der mindestens die Rechenleistung und Speicherkapazität eines heute gängigen Personalcomputers aufweist.

Das Verfahren der dynamischen Optimierung wurde ebenfalls in einer Arbeit von Winn und Winn [86] eingesetzt. Mit Hilfe von Computersimulationen wurde die Funktionsfähigkeit des Verfahrens und der Einfluß der Wettervorhersagequalität auf Energieverbrauch und Komfort untersucht.

Erker [33] entwickelte eine vorausschauende Heizungsregelung unter Nutzung der Generalized Predictive Control (GPC) [16]. Eine lokale Außentemperaturvorhersage wird mit Hilfe von Zeitreihen (vgl. z.B. [50]) vorgenommen. Der Ansatz verfolgt auch das in der vorliegenden Arbeit eingesetzte Referenzraumprinzip. Das interne Modell auf Basis von Transferfunktionen wird vorab aus Sprungantworten des Simulationsmodells mit Hilfe der rekursiven Methode der kleinsten Quadrate ermittelt. Eine wiederholte Streckenidentifikation, wie sie in der hier vorgestellten Entwicklung umgesetzt wurde, wird von Erker aufgrund der starken Störgrößen als kaum realisierbar und daher als nicht sinnvoll eingeschätzt. Der Algorithmus wurde jeweils für eine Warmwasserfußbodenheizung und eine Elektronachtspeicherheizung entwickelt und mit Hilfe von Simulationen getestet.

Eine vorausschauende und adaptive Regelung auf Basis von GPC wurde im Rahmen einer von Chen vorgestellten Arbeit [13] entwickelt. Für die Modellidentifikation wird ein RLS-Algorithmus mit U-D-Faktorisierung eingesetzt [5]. Der Zeitschritt für eine Neuberechnung der optimalen Regelstrategie liegt bei 15-30 min. Die Prognose von Einstrahlung und Außentemperatur nutzt sowohl lokale Meßdaten als auch die Vorhersagedaten eines Wetterdienstes.

Palsson [64] berichtet von der Anwendung einer vorausschauenden und adaptiven Regelung der Vorlauftemperatur für Wärmenetze auf Basis von GPC. Parameterstudien der Regelung wurden mit Hilfe von Simulationsexperimenten durchgeführt.

Der vorliegenden Arbeit am ähnlichsten sind die Arbeiten von Nygård Ferguson [63] und Erker [33]. Anders als dort wird hier aber die adaptive Funktion im Algorithmus von vornherein implementiert. Das Optimierungsverfahren ist hier gegenüber den dort verwendeten vereinfacht, um die Implementierbarkeit in einen Microcontroller zu ermöglichen. Die hier durchgeführten Tests des entwickelten Regelungsalgorithmus weisen eine erheblich größere Variationsbreite hinsichtlich Parametern der Regelung, des Gebäudes und des Heizsystems auf und ermöglichen so den prinzipiellen Nachweis der Übertragbarkeit und die Quantifizierung energetischer und komfortrelevanter Größen bei Einsatz in Gebäuden mit unterschiedlichen Eigenschaften. Ein experimenteller Nachweis der Funktionsfähigkeit, wie in der vorliegenden Arbeit vorgenommen, wird nur durch Nygård Ferguson erbracht.

Der Literaturüberblick macht die Vielfältigkeit der möglichen mathematischen Ansätze zur Realisierung eines vorausschauenden oder/und selbstadaptierenden Heizungsreglers deutlich. Motivationen für die Entwicklung waren stets angestrebte Heizenergie- bzw. Heizkosteneinsparungen oder ein verbesserter thermischer Komfort, häufig auch beides. Quantifizierungen des thermischen Komforts werden jedoch in den Literaturstellen nur selten angegeben. Die angegebenen Heizenergieeinsparungen der verschiedenen Regler reichen abhängig vom Gebäude, Heizsystem und Klima bis zu 41% [63] bei gleichem oder nahezu unverändertem Komfort. Vergleiche mit den hier erzielten Ergebnissen müssen daher die entsprechenden

Randbedingungen berücksichtigen. Viele der Regler verwenden eine Vorhersage von äußeren Störgrößen. Abhängig vom Dämmstandard des Gebäudes wird dabei nur die Vorhersage der Außentemperatur oder von Außentemperatur und solarer Einstrahlung als wesentlich erachtet.

Bei den Realisierungen vorausschauender Regler stellt die Modellbildung ein zentrales Problem dar. Häufig ist eine Online-Parameteridentifikation aufgrund der Komplexität der Modelle erschwert und daher nicht realisiert worden. Einige der adaptiven Varianten benötigen vor Inbetriebnahme der Regelung bereits ein nicht unerhebliches Vorwissen über das Gebäudeverhalten, wodurch die einfache Übertragbarkeit auf andere Gebäudetypen nicht gegeben ist. Nahezu alle Umsetzungen nutzen Simulationsrechnungen zur Erprobung und Quantifizierung möglicher Einsparungen. Die Variationsbreite der simulierten Gebäude- und Heizsystemmodelle ist jedoch meist gering, d.h. die Ergebnisse basieren auf einem Gebäudemodell und einem Heizsystem. Nur wenige der Regler sind in der Praxis umgesetzt und erfolgreich getestet worden. Dabei dominieren Personalcomputeranwendungen. Eine Microcontrollerimplementierung nichtkonventioneller Regelungskonzepte ist, obwohl häufig als Zielstellung formuliert, bisher nur in wenigen Einzelfällen realisiert worden. Eine Marktverbreitung solcher Regler konnte bisher überhaupt nicht erreicht werden.

1.3 Ziele und Struktur der Arbeit

Die vorliegende Arbeit hat die Entwicklung und den Test einer vorausschauenden selbstadaptierenden Heizungsregelung für kleinere Gebäude mit Pumpenwarmwasserheizung unter der wesentlichen Randbedingung der Marktüberführbarkeit zum Ziel. Basis soll ein Algorithmus sein, dessen theoretischer Ansatz so allgemein gestaltet ist, daß der Einsatz in verschiedenen Gebäuden und Heizsystemen ohne spezielle Anpassung möglich ist. Für die Modellbildung soll eine mathematische Beschreibung wenigen Parametern, über die keine Vorinformation benötigt wird verwendet werden. Die das instationäre Gebäudeverhalten beschreibenden Parameter sollen während des Betriebs erlernt werden.

Notwendige Einstellungen und Vorabinformationen über das Heizsystem sollen durch einen Heizungsinstallateur eingebbar, die Bedienung für den Bewohner einfach gestaltet sein. Das Konzept soll zunächst auf den Einsatz in kleineren Gebäuden (Wohn- und Bürogebäude mit entsprechenden Innentemperaturen) ausgerichtet sein, soll jedoch die Möglichkeit der Erweiterung auch auf größere Gebäude einschließen. Dieser Anspruch zieht die Forderung nach geringen Anschaffungs- und Betriebskosten nach sich. Aus diesem Grund soll auf eine Wettervorhersage durch einen Wetterdienst verzichtet werden, da die entstehenden laufenden Kosten derzeit weit oberhalb der bei einem gut gedämmten kleineren Gebäude erreichbaren Heizkostenersparnis liegen. Stattdessen soll eine Wettervorhersage auf Basis lokaler Daten und unter Verwendung einer minimalen Anzahl von möglichst preiswerten Sensoren implementiert werden. Der Algorithmus soll bezüglich seiner Anforderungen an Rechenkapazität und Speicherplatz die Implementierbarkeit in einen heute marktverfügbaren Microcontroller ermöglichen.

Der entwickelte Algorithmus soll die Raumtemperatur über die Verstellung der Vorlauf-temperatur einer Pumpenwarmwasserheizung regeln. Diese Variante stellt eine Möglichkeit unter vielen dar. Abhängig vom Heizsystem kann es auch sinnvoll sein, z.B. den Massenstrom oder die Rücklauf-temperatur zu beeinflussen. Der Algorithmus sollte daher, obwohl

für die Stellgröße Vorlauftemperatur optimiert und umfassend getestet, auch die prinzipielle Möglichkeit der Nutzung anderer Stellgrößen enthalten.

Die Funktionsfähigkeit unter den genannten Randbedingungen (Einsatz in kleineren Gebäuden mit Pumpenwarmwasserheizung) wird sowohl mit Hilfe von Simulationen als auch experimentell nachgewiesen. Die vorliegende Arbeit nimmt eine umfassende Charakterisierung des entwickelten Algorithmus hinsichtlich der genannten Forderungen mit Hilfe von Simulationsrechnungen vor. Dazu zählt insbesondere die Quantifizierung von erreichbaren Energieeinsparungen und Komfortveränderungen im Vergleich zu einer konventionellen Regelung, Bewertung der Auswirkung auf das gesamte Heizsystem und der Nachweis der Übertragbarkeit auf andere Gebäude und Heizsysteme. Der experimentelle Nachweis der Funktionsfähigkeit wird für ein Beispielgebäude (Versuchshaus des Instituts für Solarenergieforschung (ISFH) in Emmerthal) und ein Beispielheizsystem (Pumpenwarmwasserheizung) erbracht. Am Schluß der Untersuchungen steht der Aufbau des Regelsystems mit Hilfe eines kostengünstigen, industriell gefertigten Microcontrollers und dessen experimenteller Test.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in sechs Kapitel. Kapitel 2 dient der Definition der Ziel- und Einflußgrößen der Heizungsregelung. Die in den Ergebniskapiteln verwendeten Parameter zur Quantifizierung der Zielgrößen Energieeinsparung und thermischer Komfort werden hier eingeführt. Simulation und Regelalgorithmus benötigen Modellbildungen zur Beschreibung des dynamischen Gebäudeverhaltens mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad. In Kapitel 2 werden die für die Simulationsumgebung verwendete detaillierte Modellbildung und ein stark vereinfachtes Modell für den Regelalgorithmus vorgestellt. Zum Verständnis dieses Abschnitts sind systemtheoretische Kenntnisse notwendig. Ein kurzer Überblick über die verwendeten Grundlagen findet sich im Anhang A.

In Kapitel 3 wird die entwickelte vorausschauende selbstadaptierende Heizungsregelung von den theoretischen Grundlagen der einzelnen Module bis zur Synthese in einem Algorithmus erläutert. Die Beschreibung der selbstadaptierenden Funktion baut auf der in Kapitel 2 entwickelten vereinfachten Modellbildung auf. Der zweite Teil dieses Kapitels präsentiert Ergebnisse von Untersuchungen zum Design des Algorithmus, die die Auswahl der entsprechenden Konfiguration begründen.

Kapitel 4 beschreibt die mit Hilfe einer dynamischen Gebäudesimulation durchgeführten Tests des Regelalgorithmus. Die Simulationsumgebung wird in kurzer Form erläutert, Details zu den einzelnen Gebäudemodellen finden sich in tabellarischer Form im Anhang B.2. Die Darstellung der Simulationsergebnisse gliedert sich in Untersuchungen zum Einfluß von Parametern der Regelung, einen Vergleich mit einer konventionellen Heizungsregelung sowie eine Variation von Gebäude und Heizsystem. Zur Bewertung kommen die in Kapitel 2 definierten Zielgrößen zum Einsatz.

Die experimentelle Testumgebung sowie die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen präsentiert Kapitel 5. Der Ergebnisteil umfaßt die Tests mit Implementierungen des Regelungsalgorithmus in einen Personalcomputer und einen Microcontroller.

Eine zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse und ein Ausblick findet sich in Kapitel 6.

Dem primär an Ergebnissen interessierten Leser seien die Kapitel 4 und 5 empfohlen. Zum Verständnis dieser Kapitel werden vor allem die in Abschnitt 2.3 eingeführten Größen benötigt.

Eine Beschreibung der Funktionsweise der vorausschauenden selbstadaptierenden Heizungsregelung liefert Kapitel 3. Sie baut auf den Erläuterungen in Abschnitt 2.4 auf. Kapitel 3 greift ebenfalls auf die im Anhang A erläuterten systemtheoretischen Grundlagen zurück.

Kapitel 2

Gebäude und Heizsystem

Jedes Gebäude steht in ständiger dynamischer Wechselwirkung mit seiner Umgebung. Diese thermische Wechselwirkung kann mit Hilfe von Energiebilanz- und Wärmetransportgleichungen mathematisch beschrieben werden (Abschnitt 2.1). Sie bilden die Grundlage für die Ermittlung der durch ein Heizsystem zuzuführenden Wärmeleistung. Zweck einer Heizungsanlage ist die Bereitstellung eines hohen thermischen Komforts bei gleichzeitig möglichst geringem Heizenergieverbrauch. In Abschnitt 2.3 werden Parameter zur Quantifizierung dieser beiden Zielgrößen definiert. Eine optimierte Regelstrategie für die Heizung basiert auf einer möglichst genauen Ermittlung des aktuellen und zukünftigen Wärmebedarfs. Dazu müssen die Wärmeleistungen in der Energiebilanz durch einfach meßbare Größen mit Hilfe einer Modellbildung beschrieben werden (Abschnitt 2.4). Im Heizungsregelalgorithmus wird ein Modell des Gebäudes mit reduziertem Detaillierungsgrad benötigt. Eine Modellvereinfachung wird in Abschnitt 2.5 erläutert.

2.1 Energiebilanz eines Gebäudes

Ein Gebäude dient dazu, Personen oder Gegenstände von den äußeren Wettererscheinungen abzuschirmen und ein für den jeweiligen Zweck angemessenes Innenklima herzustellen. Dabei soll neben der Bereitstellung einer bestimmten Temperatur und Luftfeuchte für Beleuchtung, Belüftung usw. gesorgt sein. Nutzer beeinflussen die thermische Bilanz als Wärme- und Feuchtequellen sowie durch Veränderung von Eigenschaften der Gebäudehülle.

Über seine Hülle steht das Gebäude in Kontakt mit der Umgebung. Innerhalb des Gebäudes herrschen im allgemeinen an Oberflächen und in der Raumluft unterschiedliche Temperaturen. Der Energieaustausch innerhalb des Gebäudes und zwischen Gebäude und Umgebung wird durch die Fouriersche Wärmeleitungsgleichung, die Navier-Stokes Gleichungen und das Planck'sche Strahlungsgesetz beschrieben. Für eine Vielzahl der auftretenden Wärmeübergänge im und am Gebäude müssen gekoppelte Formen der Gleichungen betrachtet werden. Eine analytische Lösung dieser Gleichungen ist nur in wenigen einfachen Fällen gegeben. Daher werden für komplexere Probleme numerische Methoden verwendet und die Modellbildung in ihrem Detaillierungsgrad den Fähigkeiten der Rechentechnik und den Anforderungen an die Genauigkeit der Ergebnisse angepaßt.

Basis der Modellbildung ist die allgemeine Leistungsbilanz für ein Gebäude (vgl. auch Abbildung 2.1):

$$\frac{dU}{dt} = \dot{Q}_{tr} + \dot{Q}_l + \dot{Q}_H + \dot{Q}_{int} + \dot{Q}_{sol} \quad (2.1)$$

Die ersten beiden Terme der rechten Seite der Bilanzgleichung enthalten die Wärmeverluste eines Gebäudes durch Transmission \dot{Q}_{tr} und Lüftung \dot{Q}_l , die durch die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenluft entstehen. Die Lüftungswärmeverluste enthalten sowohl Verluste durch freie als auch durch kontrollierte Lüftung. Letztere entstehen beim Betrieb von Lüftungsanlagen. Diese werden zur Aufrechterhaltung eines akzeptablen Raumluftzustandes bei Verringerung der freien, unkontrollierten Lüftung eingesetzt. Insbesondere bei gut gedämmten Gebäuden ist der Einsatz von Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung sinnvoll.

Die Verluste werden durch die Gewinnterme der Bilanz, die Solareinträge \dot{Q}_{sol} und die internen Quellen \dot{Q}_{int} teilweise kompensiert. Die zeitliche Änderung der inneren Energie der Speichermassen $\frac{dU}{dt}$ geht je nach Ladezustand als Quell- oder Verlustterm ein. Der verbleibende Wärmebedarf muß durch die Heizleistung \dot{Q}_H gedeckt werden.

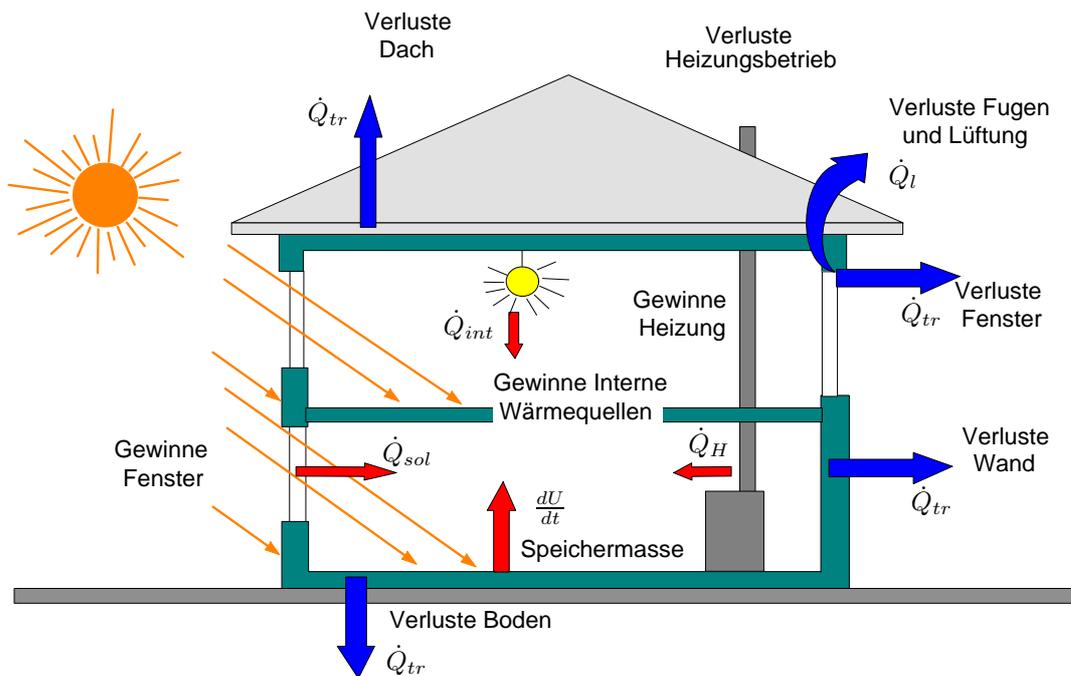


Abb. 2.1. Energetische Einflußgrößen auf den Heizwärmebedarf von Gebäuden [62]

Gleichung 2.1 macht deutlich, daß die im Gebäude gespeicherte Wärme bei dynamischer Betrachtung von Bedeutung ist. Bei statischen Bilanzen über längere Zeiträume ergibt sich der Anteil der gespeicherten Wärme durch die Summation der Auf- und Entladevorgänge der thermischen Kapazitäten zu null. Eine ideale Regelung ermittelt zu jedem Zeitpunkt den tatsächlichen Wärmebedarf \dot{Q}_B , der jeweils von den anderen Bilanzgrößen abhängt und führt die dem Bedarf entsprechende Heizleistung \dot{Q}_H zu. Unterschiede zwischen dem Bedarfs- und dem zugeführten Heizwärmestrom ergeben sich vor allem aus Unzulänglichkeiten der Regelung: zum einen aus einer ungenauen Bestimmung des Bedarfswärmestroms,

zum anderen aus einer ungenügenden Ausregelung auf einen Sollheizwärmestrom. Letztere entsteht durch Trägheiten und Totzeiten der Strecke, die die Regelbarkeit erschweren.

Auf welche Art die Heizleistung zugeführt wird, hängt vom jeweiligen Heizsystem ab. In kleineren Gebäuden ist die Pumpenwarmwasserheizung mit Heizkörpern das bei weitem häufigste Heizsystem. Wärmeträger ist das im Verteilsystem zirkulierende Heizwasser. Die Wärmeabgabe von den Heizflächen erfolgt durch Konvektion und Strahlung. Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte Heizungsregelung ist experimentell an einem solchen System erprobt worden. Die zugeführte Heizleistung bei einer Pumpenwarmwasserheizung ergibt sich zu:

$$\dot{Q}_H = \dot{m}_w c_{p,w} \cdot (\vartheta_{VL} - \vartheta_{RL}) \quad . \quad (2.2)$$

Die Raumtemperatur kann durch Veränderung der drei Größen Vorlauftemperatur ϑ_{VL} , Rücklauftemperatur ϑ_{RL} oder Massenstrom \dot{m}_w geregelt werden. Vom jeweiligen Heizsystem hängt ab, welche der Größen sinnvollerweise verwendet wird. Die Rücklauftemperatur läßt sich jedoch nur indirekt über Vorlauftemperatur und Massenstrom beeinflussen. Für die Regelung der an den Raum abgegebenen Heizleistung gibt es demnach prinzipiell zwei Grenzfälle: entweder durch Variation der Vorlauftemperatur ϑ_{VL} bei konstant gehaltenem Massenstrom \dot{m}_w oder durch Beeinflussung des Massenstroms bei konstanter Vorlauftemperatur. Auch die Variation beider Größen ist möglich. Die Rücklauftemperatur stellt sich jeweils entsprechend der abgegebenen Heizleistung ein. Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte Heizungsregelung nutzt die Variation der Vorlauftemperatur, während im Bereich der konventionellen Regelung meist der Massenstrom variiert wird. Der Primärenergiebedarf hängt sowohl von der Heizleistung \dot{Q}_H als auch von den Temperaturen im Heizkreis ab. Im folgenden Abschnitt wird der Zusammenhang zwischen Primärenergiebedarf und den Größen in Gleichung 2.2 dargelegt.

2.2 Das Heizsystem

Eine Heizanlage soll mit einem möglichst kleinen Primärenergiestrom \dot{E}_{pr} im Wärmeerzeuger einen dem Bedarfsverlauf angepaßten Nutzwärmestrom \dot{Q}_{Nu} bereitstellen, ihn bedarfsgerecht verteilen, um den einzelnen Räumen den Heizwärmestrom \dot{Q}_H zuzuführen. Aufgabe der Regelung ist es, den zugeführten Heizwärmestrom an den Bedarfswärmestrom \dot{Q}_B anzupassen (vgl. Abbildung 2.2). In analoger Weise lassen sich die Wärmeströme auch für andere Erzeugungs- und Verteilungssysteme definieren. Bei Wärmeerzeugung mit einer Wärmepumpe wird zusätzlich ein Wärmestrom aus der Umgebung benötigt. Bei einer Heizanlage mit Fernwärmeversorgung entsteht zwischen Erzeuger und Verbraucher noch ein zusätzlicher Transportverlust. Wirkungsgrade stellen die Beziehung zwischen den Wärmeleistungen (energetischer Nutzen bezogen auf den energetischen Aufwand) her. Sie werden in der Regel für einen stationären Betriebszustand, z.B. Vollast, angewandt. Nutzungsgrade setzen die Nutzenergie und den Energieaufwand über einen längeren Zeitraum zueinander in Beziehung.

Die entwickelte vorausschauende selbstadaptierende Heizungsregelung zielt auf eine verbesserte Anpassung der zugeführten Heizleistung \dot{Q}_H an den aktuellen und zukünftigen Wärmebedarf. Die Wärmeabgabe wird über die Beeinflussung der Vorlauftemperatur gesteuert. Die Regelung berechnet den optimalen Wert der Vorlauftemperatur und geht davon aus, daß der entsprechende Wert durch den Wärmeerzeuger bereitgestellt wird. Die Vorgänge im

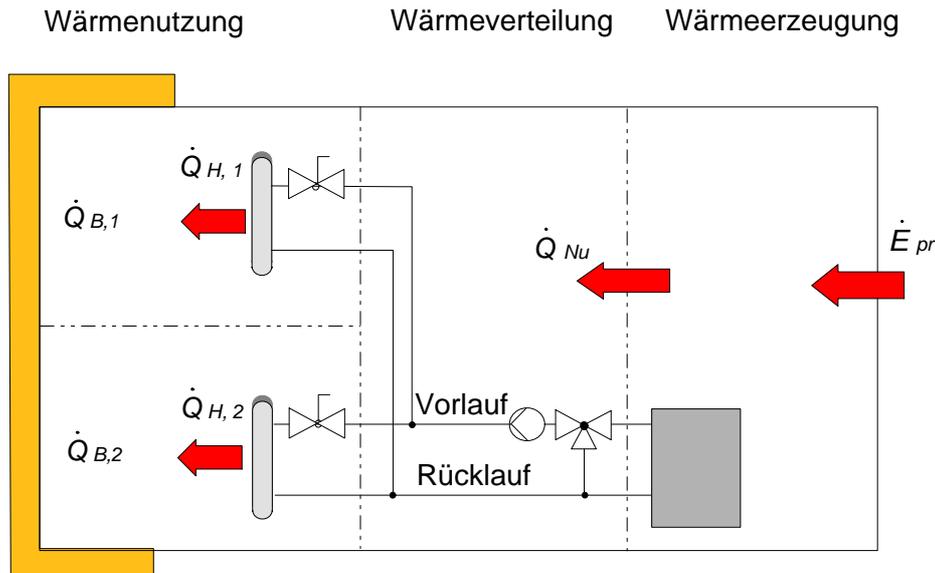


Abb. 2.2. Zur Definition energetischer Größen bei Wärmeerzeugung mit einem Heizkessel und Wärmeverteilung mit einer Pumpenwarmwasserheizung (aus [47])

Wärmeerzeuger sind in dieser Arbeit nicht Gegenstand der Optimierung. Die Nutzung der Vorlauftemperatur als Größe zur Einstellung der Heizleistung führt gegenüber einer konventionellen Regelung mit Massenstromvariation zu veränderten Temperaturen im Heizkreis. Der Wirkungs- bzw. Nutzungsgrad des Wärmeerzeugers und des Verteilsystems sind von den Temperaturen im Heizkreis abhängig. Um die Auswirkungen der in Kapitel 4 berechneten veränderten Heizkreistemperaturen qualitativ bewerten zu können, werden im folgenden die Zusammenhänge zwischen Wirkungs- bzw. Nutzungsgrad des Verteilsystems sowie einiger wichtiger Wärmeerzeugungssysteme und den Temperaturen im Heizkreis erläutert. Daraus lassen sich Empfehlungen für den Betrieb der entwickelten Regelung in einer bestimmten Heizungsanlage ableiten.

Die Differenz zwischen Nutz- und Heizwärmestrom resultiert aus den Verlusten bei der *Wärmeverteilung*. Die Wärmeverluste von Rohrleitungen $\dot{Q}_{V,R}$ hängen von der Heizwassertemperatur ϑ_F und dem Wärmeübergang an die Umgebung ab [68]:

$$\dot{Q}_{V,R} = \frac{2\pi l(\vartheta_F - \vartheta_a)}{\frac{1}{\alpha_i r_i} + \frac{1}{\lambda} \ln \frac{r_a}{r_i} + \frac{1}{\alpha_a r_a}}, \quad (2.3)$$

wobei die Fluidtemperatur ϑ_F eine Funktion des Ortes ist (hier wird nur die Ortsabhängigkeit in Strömungsrichtung betrachtet und senkrecht dazu vernachlässigt). Dementsprechend sind niedrige Temperaturen im Heizkreis zur Reduktion der Verteilverluste bzw. zur Erhöhung des Verteilungsnutzungsgrads anzustreben.

Für einen *Heizkessel* als Wärmeerzeuger gilt folgender Zusammenhang zwischen Primär- und Nutzenergiestrom:

$$\dot{Q}_{Nu,K} = \eta_K \cdot \dot{E}_{pr} = \eta_K \cdot \dot{m}_B H_u = \left(1 - \frac{\sum \dot{Q}_{V,K}}{\dot{m}_B H_u} \right) \cdot \dot{m}_B H_u \quad .$$

Der Kesselwirkungsgrad η_K ist definitionsgemäß „das Verhältnis der an den Wärmeträger abgegebenen Nutzwärmeleistung, zu der mit dem Brennstoff zugeführten, auf dessen Heizwert H_u bezogenen Wärmeleistung“ [24]. Die Verluste des Kessels $\dot{Q}_{V,K}$ setzen sich aus Bereitschafts-, Abstrahl- und Abgasverlusten zusammen. Die Abgasverluste ergeben sich zu

$$\dot{Q}_{ag} = \dot{m}_{ag} \cdot (h_{ag} - h_a) \quad .$$

Da die Abgastemperatur in der Regel größer als die Rücklaufftemperatur des Heizsystems ist, kann durch ein Absenken des Rücklaufftemperaturniveaus eine Verringerung der Abgasverluste und damit eine Verbesserung des Umwandlungswirkungsgrades erzielt werden.

Bei Nutzung eines Brennwertkessels sind niedrige Rücklaufftemperaturen Voraussetzung für die zumindest teilweise Nutzung des Brennwertes H_o . Bei dem sich einstellenden Partialdruck des Wasserdampfes bei einem mit Erdgas befeuerten Kessel setzt die Kondensation im Abgas unterhalb von etwa 57 °C ein. Die Rücklaufftemperaturen zur Abkühlung des Abgases auf entsprechende Temperaturen werden durch das Heizsystem bestimmt, welches speziell auf die Brennwertnutzung ausgelegt sein sollte.

Für eine *Kompressionswärmepumpe* als Wärmeerzeuger ist die Leistungszahl ε_{wp} das Verhältnis aus Nutzwärmeleistung und aufgenommener elektrischer Leistung. Sie läßt sich mit der Carnot-Leistungszahl $\varepsilon_{wp,c}$ berechnen [68]:

$$\varepsilon_{wp} = \eta_{wp,c} \cdot \varepsilon_{wp,c} = \eta_{wp,c} \cdot \frac{T_c}{T_c - T_0} \quad ,$$

mit T_c als Verflüssigungs- und T_0 als Verdampfungstemperatur in Kelvin. Abbildung 2.3 zeigt die Abhängigkeit der Leistungszahl von Verflüssigungs- und Verdampfungstemperatur für einen Carnot'schen Gütegrad $\eta_{wp,c}$ von 0.5. Die Verdampfungstemperatur ist durch

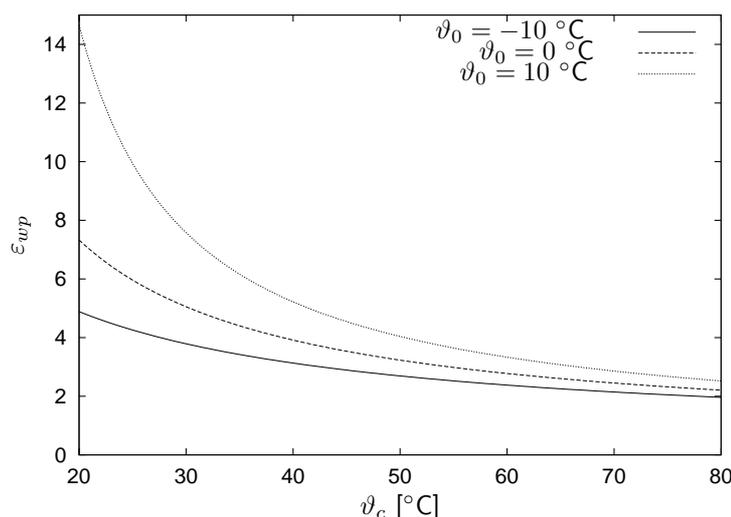


Abb. 2.3. Leistungszahl der Wärmepumpe ε_{wp} in Abhängigkeit von Verflüssigungstemperatur ϑ_c und Verdampfungstemperatur ϑ_0 (in °C) für einen Carnot'schen Gütegrad $\eta_{wp,c}$ von 0.5

die Wärmequelle festgelegt. Um eine hohe Leistungszahl zu erreichen, muß die Verflüssigungstemperatur abgesenkt werden, d.h. das Temperaturniveau, auf welchem Heizwärme

bereitgestellt wird. Um dennoch eine entsprechende Wärmeabgabe an die Räume zu erreichen, müssen die Heizflächen entsprechend vergrößert werden. Aus diesem Grund werden Wärmepumpen häufig mit Fußbodenheizsystemen kombiniert, welche geringe Vorlauftemperaturen erfordern.

Die Nutzleistung eines *thermischen Solarkollektors* ergibt sich bei quasistationären Betriebsbedingungen zu:

$$\dot{Q}_{Nu,koll} = A_{ap} [\eta_0 G_n - k_{eff} \cdot (\bar{\vartheta}_F - \vartheta_a)]$$

wobei k_{eff} dem effektiven Wärmedurchgangskoeffizienten zwischen Fluid und Umgebung, A_{ap} der Aperturfläche, G_n der Globalstrahlung auf die Kollektorfläche und η_0 dem Konversionsfaktor entspricht. Wie aus dieser Gleichung ersichtlich, sinkt die Nutzleistung und damit der Wirkungsgrad des Kollektors bei steigender mittlerer Fluidtemperatur im Kollektor. Diese wird durch die Temperaturen im Speicher beeinflusst, die ihrerseits wiederum von den Temperaturen auf der Bedarfsseite abhängen. Aus diesem Grund ist bei Einbindung einer Solaranlage in das Heizsystem eine niedrige Vor- und Rücklauftemperatur im Heizkreis anzustreben.

Die in diesem Abschnitt dargelegten Zusammenhänge zwischen Heizleistung, Temperaturen im Heizkreis und Primärenergiebedarf werden zur qualitativen Bewertung der Ergebnisse in Kapitel 4 benötigt. Eine quantitative Bewertung der Ergebnisse erfolgt mit Hilfe der im nächsten Abschnitt eingeführten Zielgrößen der Regelung.

2.3 Zielgrößen

Sowohl die Herstellung eines komfortablen Raumklimas als auch die Energieeinsparung sind Zielgrößen der entwickelten Heizungsregelung. Dieser Abschnitt erläutert die Zielgrößen und Möglichkeiten ihrer Beschreibung und Berechnung.

2.3.1 Energieeinsparung

Die Energieeinsparung äußert sich in einem verringertem Heizenergiebedarf. Heizenergie wird jedoch auch bei verringerten Raumtemperaturen eingespart. Zur Einschätzung, ob die eingesparte Heizenergie tatsächlich durch passiv solare Gewinne substituiert wurde, dient der solare Nutzungsgrad.

2.3.1.1 Heizenergiebedarf

Abbildung 2.4 zeigt einen typischen Jahresverlauf (Monatssummen) des Heizwärmeverbrauchs, der Einstrahlung und die Monatsmittelwerte der Außentemperatur für ein Gebäude in Niedrigenergiebauweise. Der Heizleistungsbedarf läßt sich durch eine Auftragung der Summenhäufigkeit des Auftretens bestimmter Leistungen (Jahresdauerlinie) (Abbildung 2.5) veranschaulichen. Die Auslegung des Wärmereizers erfolgt bei nur einem vorhandenen Gerät entsprechend der maximal notwendigen Heizleistung. Dies führt dazu, daß der Kessel

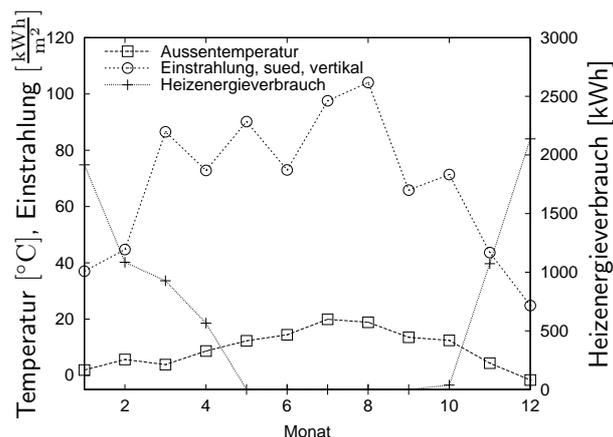


Abb. 2.4. Gemessener Verlauf des Heizwärmeverbrauchs eines Niedrigenergiehauses (Experimentierhaus des ISFH) sowie von Einstrahlung und Außentemperatur (Monatssummen bzw. Monatsmittelwerte 1995)

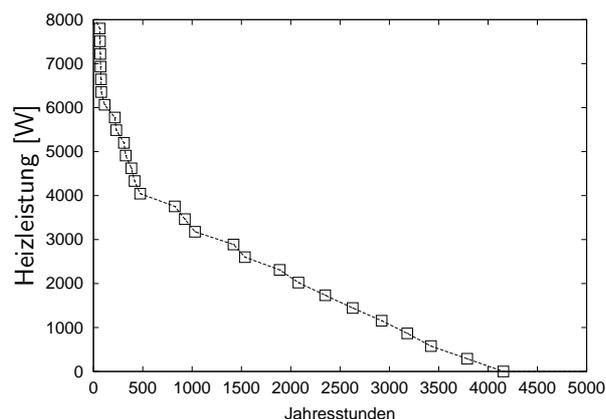


Abb. 2.5. Jahresdauerlinie der Heizleistung auf Basis von Meßwerten eines Niedrigenergiehauses (Experimentierhaus des ISFH 1995)

während der meisten Betriebsstunden in Teillast arbeitet. Eine gleichmäßige Heizleistungsabforderung im Bereich des maximalen Wirkungsgrades über viele Betriebsstunden ist jedoch wünschenswert. Bei Vorhandensein eines Speichers kann durch Takten des Kessels jeweils die Nennleistung abgenommen werden, jedoch entstehen Verluste durch die Zwischenabkühlung des Kreises zwischen Kessel und Speicher.

2.3.1.2 Solarer Anteil und Nutzungsgrad passiv solarer Gewinne

Wie bereits eingangs erläutert, nimmt der relative Anteil von solaren und internen Gewinnen an der Deckung der Verluste eines Gebäudes mit verbessertem Dämmstandard zu. Eine weitere Erhöhung der solaren Gewinne, gegenüber den bei einer konventionellen Bauweise üblichen, erreicht man durch eine entsprechende architektonische Gestaltung und zusätzliche Komponenten zur Solarenergienutzung (z.B. zusätzliche Fensterflächen, transparente Wärmedämmung u.a.). Gebäude mit einem erhöhten Anteil an solaren Gewinnen nennt man Solarhäuser. Zusätzliche passiv solare Komponenten kommen im wesentlichen ohne Hilfsenergien aus.

Maßnahmen zur Reduktion des Wärmebedarfs (z.B. hoher Dämmstandard, geringes Verhältnis von Gebäudeoberfläche zu -volumen, Wärmebrückenvermeidung) sind bis zu einem bestimmten Maß kostengünstiger als zusätzliche passiv solare Komponenten. Es ist daher ökonomisch sinnvoll, zunächst den Gebäudewärmebedarf auf mindestens das Niveau eines Niedrigenergiehauses zu reduzieren, bevor passiv solare Maßnahmen zu einer weiteren Reduktion des Bedarfs zum Einsatz kommen.

Der Einsatz von passiv solaren Komponenten zur Heizenergieeinsparung ist grundsätzlich mit dem Problem der Gegenläufigkeit der Bedarfs- und Angebotskurve konfrontiert. Deshalb stellt die Dimensionierung von passiv solaren Komponenten stets ein Optimierungsproblem dar. Sämtliche passiv solaren Gewinne müssen noch mit einem Nutzungsgrad bewertet werden. Dieser stellt das Verhältnis zwischen den zur Heizenergieeinsparung genutzten und den

eingetragenen solaren Gewinnen dar:

$$N_{sol} = \frac{Q_{sol,N}}{Q_{sol,ges}} \quad . \quad (2.4)$$

Soll ein hoher Solaranteil erreicht werden, so sinkt der Nutzungsgrad, da die Anzahl der Stunden, in denen die Strahlung nicht benötigt wird, zunimmt. Gleichzeitig sinkt die mittlere Temperatur der Umschließungsflächen während strahlungsarmer Perioden durch den im allgemeinen höheren Wärmedurchgangskoeffizienten der passiv solaren Empfangsflächen im Vergleich zu opak gedämmten Flächen. Dies muß durch eine erhöhte Lufttemperatur zur Erhaltung des thermischen Komforts kompensiert werden (vgl. Gleichung 2.6). Während der Sommermonate sind in der Regel wirksame Einrichtungen zur Reduktion des Solarenergieeintrags notwendig. Bei Unterdimensionierung entfallen die genannten Probleme, jedoch ist der Solaranteil dann entsprechend gering. Diese Gründe führen häufig dazu, daß andere Maßnahmen zur Reduktion des konventionellen Heizenergiebedarfs den passiv solaren Maßnahmen unter ökonomischen Aspekten überlegen sind.

Der solare Nutzungsgrad wird auch in Gesetzen und Regelwerken berücksichtigt. So sind in der Wärmeschutzverordnung von 1995 (WärmeschutzV) vom 16.4.94 [9] die nutzbaren solaren Gewinne durch Fenster gesondert zu ermitteln. Dabei wird ein konstanter mittlerer Nutzungsgrad für alle Gebäude verwendet. Weiterhin dürfen bei Fensteranteilen von mehr als 2/3 der Wandfläche nur solare Gewinne bis zu dieser Größe berücksichtigt werden. Die zukünftige Energieeinsparverordnung (EnEV) [11] verweist für die Berechnung des Jahresheizwärmebedarfs auf die DIN EN 832 [27] in Verbindung mit der DIN V 4108-6 [22]. Darin wird die Berechnung des Nutzungsgrades von Wärmegewinnen unabhängig von der Art der Gewinne vorgenommen. Der Nutzungsgrad der Wärmegewinne N_{wg} für ein monatliches oder Jahresbilanzverfahren hängt vom Gewinn-Verlust-Verhältnis γ ab:

$$N_{wg} = \frac{1 - \gamma^a}{1 - \gamma^{a+1}}$$

mit

$$\gamma = \frac{Q_{int} + Q_{sol}}{Q_{tr} + Q_l}$$

und a als numerischem Parameter, der aus der Gebäudezeitkonstante τ berechnet wird:

$$a = a_0 + \frac{\tau}{\tau_0} \quad ,$$

wobei a_0 und τ_0 gebäudespezifische Konstanten sind. Abbildung 2.6 zeigt beispielhaft den Verlauf des Gewinn-Verlust-Verhältnisses für verschiedene Dämmstandards von Gebäuden. Erwartungsgemäß steigt das Verhältnis bei verbessertem Dämmstandard an. Für ein Passivhaus liegen die Werte nur von November bis Februar unter eins.

Die Zeitkonstante des Gebäudes berechnet sich als Quotient der wirksamen Wärmespeicherfähigkeit C [$J K^{-1}$] und des spezifischen Wärmeverlusts H [$W K^{-1}$]. Die wirksame Wärmespeicherfähigkeit eines beheizten Raumvolumens wird unter Annahme der Variation der Innentemperatur mit einer Amplitude von 1 K berechnet [28]:

$$C = \sum_j \sum_i \rho_{ij} c_{ij} d_{ij} A_j \quad ,$$

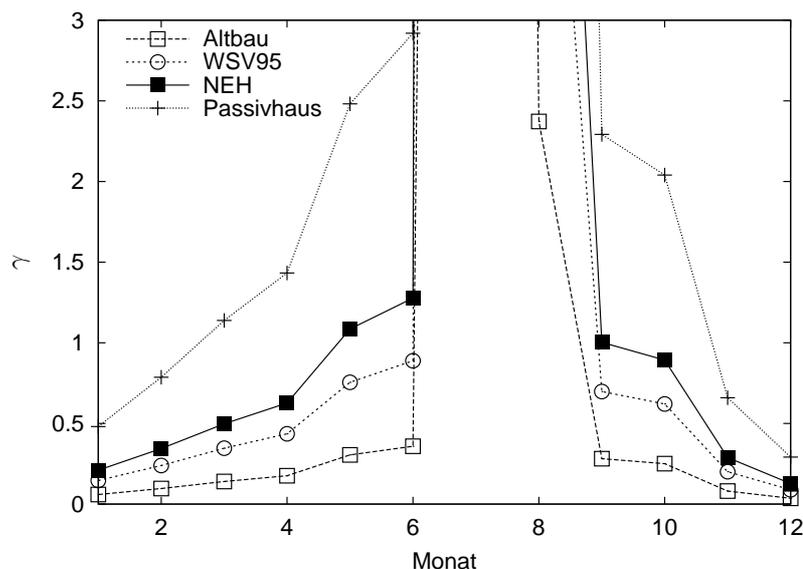


Abb. 2.6. Gewinn-Verlust-Verhältnis (Monatsmittelwerte) für verschiedene Dämmstandards bei gleichem geometrischem Gebäudeaufbau, berechnet auf Basis von Wetterdaten Emmerthal 1995, Niedrigenergiehaus entspricht Referenzhaus des ISFH Emmerthal, interne Gewinne: 75 kWh pro Monat

wobei der Index j das Bauteil und der Index i die Lage im Bauteil bezeichnet. Mit ρ wird die Dichte und mit c die spezifische Wärmekapazität des Werkstoffs, mit d die Dicke der Lage und mit A die Fläche des Bauteils bewertet. Die Summe der bewerteten Dicken der Lagen eines Bauteils darf 10 cm nicht überschreiten¹.

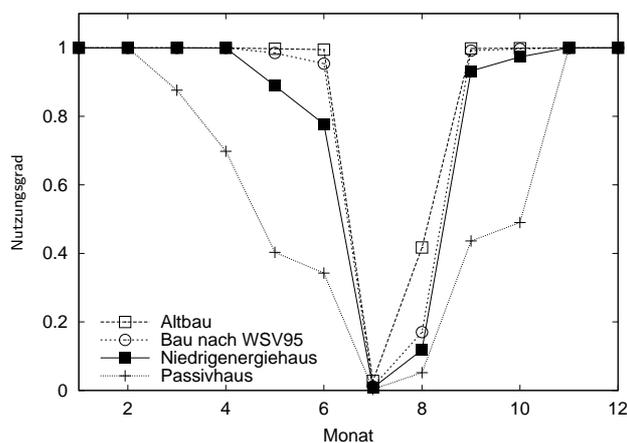


Abb. 2.7. Nutzungsgrade der Wärmegewinne für verschiedene Dämmstandards bei gleichem geometrischem Gebäudeaufbau, berechnet auf Basis von Wetterdaten Emmerthal 1995, Niedrigenergiehaus entspricht Referenzhaus des ISFH Emmerthal, interne Gewinne: 75 kWh pro Monat

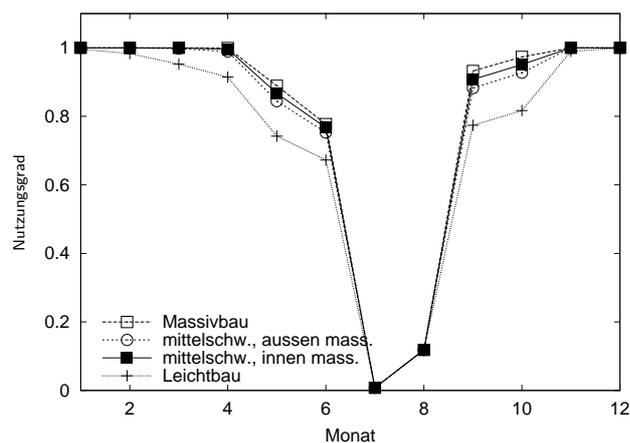


Abb. 2.8. Nutzungsgrade der Wärmegewinne für verschiedene Bauweisen von Niedrigenergiehäusern bei gleichem geometrischem Gebäudeaufbau, berechnet auf Basis von Wetterdaten Emmerthal 1995, Massivbau entspricht Referenzhaus des ISFH Emmerthal, interne Gewinne: 75 kWh pro Monat

¹Dieser Wert ergibt sich aus den Temperaturverläufen im Innern einer Massivwand bei mit einer Periode von 24 h schwankenden Oberflächentemperaturen für eine normale Raumnutzung. Durch Lösung der Wärmeleitungsgleichung läßt sich zeigen, daß im Abstand von 10 cm von der Wandoberfläche die Temperatur nahezu unbeeinflußt bleibt.

Die so berechneten Nutzungsgrade der Wärmegewinne für verschiedene Dämmstandards zeigt Abbildung 2.7. Den Einfluß der thermischen Kapazität des Gebäudes für ein Gebäude in Niedrigenergiebauweise (gleiches Gewinn-Verlust-Verhältnis für alle Bauweisen) verdeutlicht Abb. 2.8. Der Nutzungsgrad steigt geringfügig mit der thermischen Kapazität eines Gebäudes an. Bei großen Speichermassen kann viel Wärme bei kleiner Temperaturerhöhung abgespeichert werden, was sich günstig auf N_{wg} auswirkt.

Die hier zur Verdeutlichung der prinzipiellen Zusammenhänge verwendete statische Berechnungsmethode der Normen DIN EN 832 [27] bzw. DIN V 4108-6 [22] berücksichtigt keine Unterschiede in der Regelbarkeit der Heizung auf den Nutzungsgrad der Gewinne. Der solare Nutzungsgrad hängt jedoch wesentlich davon ab, inwieweit das Heizungssystem überhaupt auf solare Einträge reagieren kann. Hier sind träge Systeme im Nachteil, da die Reaktion der Regelung bei einem klassischen Regelungsprinzip zu spät erfolgt. Der hier verfolgte Ansatz zielt auf die Erhöhung des solaren Nutzungsgrades durch Maßnahmen auf der regelungstechnischen Seite.

Zur Ermittlung des Einflusses der Heizungsregelung auf den solaren Nutzungsgrad bei den dynamischen Simulationstests werden die nicht genutzten solaren Gewinne $Q_{sol,nN}$ verwendet:

$$N_{sol} = 1 - \frac{Q_{sol,nN}}{Q_{sol,ges}} \quad (2.5)$$

Dabei wird festgelegt, daß die solaren Gewinne nicht mehr nutzbar sind, sobald sie zu einer Überschreitung des Raumtemperatursollwertes von mehr als 2 K führen.

2.3.2 Thermischer Komfort

Die zweite Zielgröße der entwickelten Regelung ist der thermische Komfort. Zur Bewertung des Regelverhaltens wird in den Ergebniskapiteln die einfache Abweichung zwischen Sollwert und Istwert verwendet. Für die Bewertung der Ergebnisse werden zusätzliche in der Literatur gebräuchliche Größen eingeführt.

2.3.2.1 Bedeutung der Soll-Istwert-Abweichung für den thermischen Komfort

Das einfachste Kriterium zur Bewertung der Regelgüte ist die Soll-Istwert-Abweichung. In jeder Regelungstheorie gilt sie als eine zu minimierende Größe. Die Aufgabe einer herkömmlichen Regelung ist beispielsweise die Minimierung der aktuellen Soll-Istwert-Abweichung. Mit Hilfe der Reglerparameter, welche das Systemverhalten widerspiegeln, kann vorgegeben werden, mit welcher Dynamik der Regler auf Abweichungen der Meßgröße vom Sollwert reagiert.

Eine vorausschauende Regelung minimiert die Abweichung über einen zukünftigen Zeitraum, den Vorhersagehorizont. So kann einer zukünftigen Sollwertabweichung vorzeitig begegnet werden. Dies ist oft nur möglich, indem eine aktuelle Sollwertabweichung in der Gegenrichtung akzeptiert wird. Ein Beispiel ist die Reduktion von Überhitzungen eines Gebäudes am Nachmittag durch das Zulassen von Untertemperaturen am Vormittag. Dies liegt zum einen darin begründet, daß mit einem reinen Heizsystem die Raumtemperatur nur in Richtung einer Erhöhung beeinflussbar ist. Zum anderen sind keine beliebig großen Sprünge der Stellgröße möglich.

Der Vorkompensation von Sollwertabweichungen liegt die Annahme zugrunde, daß Unter- und Überschreitungen des Sollwertes gleich nachteilig zu werten sind. Weiterhin ist hier die „Nachteiligkeit“ eine lineare Funktion der Abweichung. Dies ist sicher nicht immer zutreffend. Nutzerbefragungen [56] zeigen, daß die Bewertung von Unter- oder Überschreitungen des Sollwertes von verschiedensten zum Teil individuellen Faktoren abhängt. Ferner ist die Tolerierbarkeit von Abweichungen tageszeitabhängig. Die in Kapitel 5 dargestellten Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen zeigen außerdem, daß die Art und Weise der Messung der Regelgröße einen großen Einfluß auf den sich einstellenden Komfort hat. Die Soll-Istwert-Abweichung ist daher zur Bewertung des thermischen Komforts nur eingeschränkt nutzbar. Im folgenden Abschnitt wird auf geeignetere Größen zur Bewertung des thermischen Komforts eingegangen.

Trotz dieser Einschränkungen ist die Soll-Istwert-Abweichung eine wichtige Größe, insbesondere zur Bewertung der Regeleigenschaften. An ihr läßt sich unmittelbar feststellen, ob die Regelung in gewünschter Weise reagiert. Deshalb werden bei der Auswertung der Simulations- und experimentellen Tests Verläufe der Raumlufttemperatur und der Einflußgrößen zur Bewertung des Regelverhaltens herangezogen (vgl. Kapitel 4 und 5).

2.3.2.2 Größen zur Bewertung des thermischen Komforts

Eine ganze Reihe von Größen hat einen Einfluß darauf, ob sich ein Mensch behaglich fühlt. Allein die Lufttemperatur reicht in der Regel für eine Bewertung nicht aus. Weitere wichtige Größen sind die Temperatur der Umschließungsflächen, Luftfeuchte und Luftbewegung. Ein einfacher Ansatz zur Bewertung des thermischen Komforts berücksichtigt lediglich die Lufttemperatur und die Temperatur der umschließenden Wände, welche sich aus den flächengewichteten einzelnen Wandtemperaturen ergibt. Die Wärmeübergangskoeffizienten zwischen dem menschlichen Körper und der Luft für konvektiven Wärmeübergang und den Umschließungsflächen für Strahlungsübergang sind bei Räumen mit normalen Innentemperaturen annähernd gleich. Daher wird häufig für die Empfindungstemperatur (operative Temperatur) der Mittelwert aus Luft- und flächengewichteter Wandtemperatur gesetzt (vgl. DIN 1946-2 [20]):

$$\vartheta_{op} = \frac{\vartheta_L + \bar{\vartheta}_{str}}{2} \quad . \quad (2.6)$$

Fanger [34] führte zwei Größen ein, die die wichtigsten Einflußgrößen auf den thermischen Komfort zusammenfassen. Der *PMV*-Index (**P**redicted **M**ean **V**ote) ist eine Vorhersage der Meinung einer großen Personengruppe über ihr thermisches Befinden als eine Funktion der Aktivität, Kleidung, Lufttemperatur, mittleren Strahlungstemperatur, relativen Luftgeschwindigkeit und der Luftfeuchte. Sein Wertebereich liegt zwischen -3 und +3 (siehe Tabelle).

Der *PMV*-Index läßt sich wie folgt berechnen [71]

$$\begin{aligned} PMV = & (0.303 \cdot e^{-0.036M} + 0.028)[(M - W) - 0.00305\{5733 - 6.99(M - W) \\ & - p_D\} - 0.42\{(M - W) - 58.15\} - 0.000017 \cdot M(5867 - p_D) \\ & - 0.0014M(34 - \vartheta_L) - 3.96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl}\{(\vartheta_{cl} + 273)^4 - (\bar{\vartheta}_{str} + 273)^4\} \\ & - f_{cl} \cdot \alpha_k(\vartheta_{cl} - \vartheta_L)] \end{aligned} \quad (2.7)$$

Tabelle 2.1. Bedeutung der Werte des *PMV*-Indexes

Wert	Bedeutung
-3	kalt
-2	kühl
-1	leicht kühl
0	neutral
+1	leicht warm
+2	warm
+3	heiß

Dabei sind:

M	... bezogener Gesamtenergieumsatz [met] (1 met = 58.15 W pro m ² Körperoberfläche)
W	... bezogene mechanische Leistung [met]
p_D	... Partialdruck des Wasserdampfes in der Luft [Pa]
ϑ_L	... Lufttemperatur [°C]
f_{cl}	... Oberflächenverhältnis zwischen bekleidetem und unbedecktem Körper
ϑ_{cl}	... Oberflächentemperatur der Kleidung [°C]
$\bar{\vartheta}_{str}$... mittlere Temperatur der Umschließungsflächen [°C]
α_k	... konvektiver Wärmeübergangskoeffizient $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$

Ein in Ruhe befindlicher erwachsener Mensch hat etwa einen Energieumsatz von 0.8 met. Der Energieumsatz steigt mit der Aktivität und kann etwa 10 met erreichen.

Die Oberflächentemperatur der Kleidung bestimmt sich aus der impliziten Gleichung

$$\vartheta_{cl} = 35.7 - 0.028(M - W) - I_{cl} \cdot [3.96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \{(\vartheta_{cl} + 273)^4 - (\bar{\vartheta}_{str} + 273)^4\} + f_{cl} \cdot \alpha_k (\vartheta_{cl} - \vartheta_L)] \quad . \quad (2.8)$$

I_{cl} ist der Wärmeleitwiderstand der Kleidung in $\frac{m^2K}{W}$. Häufig wird der Wärmewiderstand der Kleidung auch als Relativmaß in [clo] („clothing“) angegeben (1 clo = $0.155 \frac{m^2K}{W}$). Die Skala reicht von 0 (keine Bekleidung) bis 2 clo (sehr dicke Winterbekleidung).

α_k und f_{cl} werden wie folgt berechnet:

$$\alpha_k = \begin{cases} 2.38(\vartheta_{cl} - \vartheta_L)^{0.25} & \text{für } 2.38(\vartheta_{cl} - \vartheta_L)^{0.25} \geq 12.1\sqrt{v_{rel}} \\ 12.1\sqrt{v_{rel}} & \text{für } 2.38(\vartheta_{cl} - \vartheta_L)^{0.25} < 12.1\sqrt{v_{rel}} \end{cases} \quad , \quad (2.9)$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1.00 + 1.29I_{cl} & \text{für } I_{cl} \leq 0.078 \frac{m^2K}{W} \\ 1.05 + 0.645I_{cl} & \text{für } I_{cl} > 0.078 \frac{m^2K}{W} \end{cases} \quad . \quad (2.10)$$

Die relative Luftgeschwindigkeit v_{rel} beeinflusst den konvektiven Wärmeaustausch des Menschen mit seiner Umgebung. Sie hängt von der körperlichen Aktivität ab:

$$v_{rel} = v + 0.005 \left(M - 58.15 \frac{W}{m^2} \right) \cdot \frac{m^3}{Ws} \quad , \quad (2.11)$$

wobei v die Luftgeschwindigkeit in $\frac{m}{s}$ im Raum bezeichnet.

Der *PPD*-Index (**P**redicted **P**ercentage of **D**issatisfied) berechnet sich aus dem *PMV*-Index wie folgt:

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{-0.03353PMV^4 - 0.2179PMV^2} \quad (2.12)$$

Der meßtechnische Aufwand zur Bestimmung der Parameter *PMV* und *PPD* ist außerordentlich hoch. Für die Bewertung der Ergebnisse werden daher einige der Einflußgrößen als konstant angenommen. Tabelle 2.2 listet die Einflußgrößen und ihre Werte auf, die jeweils für den Wohnbereich festgelegt wurden.

Tabelle 2.2. Annahmen bei der Berechnung von *PMV* und *PPD*

Parameter	Annahme
ϑ_{str}	ϑ_L
W	0 met
M	1.2 met
v_{rel}	$0.1 \frac{m}{s}$
p_D	abhängig von ϑ_L für 50% Luftfeuchte
I_{cl}	1.25 clo

Er findet ebenfalls in der Bewertung der Ergebnisse in Kapitel 4 und 5 Verwendung. Abbildung 2.9 zeigt den Verlauf des *PPD* in Abhängigkeit vom *PMV*. Es wird deutlich, daß auch bei optimalen Bedingungen 5% der Personen unzufrieden sind.

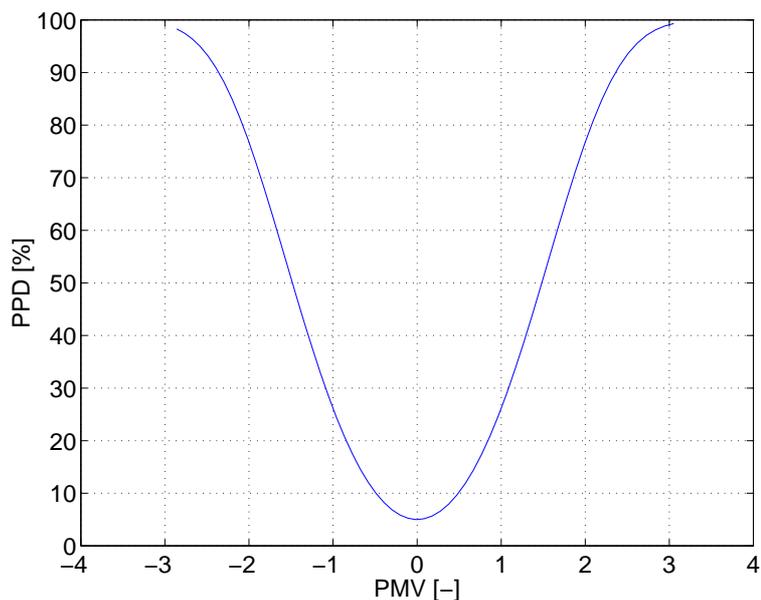


Abb. 2.9. *PPD* in Abhängigkeit vom *PMV* für die in Tabelle 2.2 angegebenen Parameter

Die Abhängigkeit des *PPD* von der Lufttemperatur und verschiedenen Wärmewiderständen der Kleidung sowie variablen Temperaturen der Umschließungsflächen zeigt Abbildung 2.10. Bei sehr hohen Lufttemperaturen wird jede Art von Kleidung als etwa gleich unangenehm empfunden, während bei sehr niedrigen Lufttemperaturen ein sehr unterschiedliches Empfinden in Abhängigkeit vom Wärmewiderstand der Kleidung vorliegt. Für jede Bekleidungsstufe verlagert sich das Minimum des *PPD*-Indexes um etwa 2 K. Bei von der Lufttemperatur abweichender Temperatur der Umschließungsflächen ändert sich die Form der

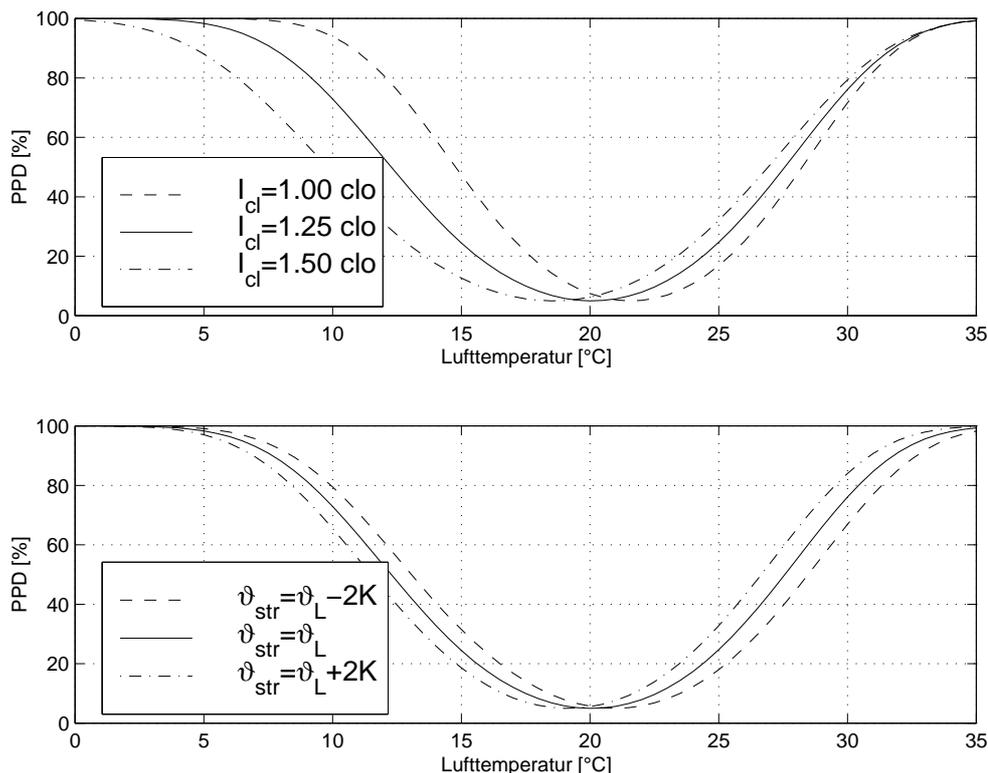


Abb. 2.10. PPD für die in Tabelle 2.2 angegebenen Parameter und variablen Wärmewiderstand der Kleidung sowie variable Temperatur der Umschließungsflächen

Kurven nicht, es tritt lediglich eine Verschiebung in Abszissenrichtung auf. Für eine um 2 K von der Lufttemperatur abweichende Temperatur der Umschließungsflächen verschiebt sich die Kurve um etwa 1 K. Dies bestätigt das Konzept der operativen Temperatur in Gleichung 2.6.

Es ist selbstverständlich auch möglich, die operative Temperatur oder die Parameter PMV und PPD direkt im Regelalgorithmus anstelle der Soll-Istwertabweichung als Maß für den thermischen Komfort zu verwenden. Dies setzt aber die meßtechnische Erfassung weiterer Größen voraus. Für den Einfamilienhausbereich wäre dieser Aufwand sicherlich zu hoch. Beim Einsatz in bestimmten Gebäuden, in denen die Einhaltung eines sehr engen Komfortbereichs erforderlich ist (z.B. Theater, Museen) lassen sich aber durchaus Vorteile erwarten.

Dieser Abschnitt diente der Definition der Zielgrößen der entwickelten Heizungsregelung. Für beide Hauptzielgrößen Energieeinsparung und hoher thermischer Komfort wurden Parameter zur Quantifizierung und vergleichenden Bewertung eingeführt. Die erfolgte Darstellung einiger Zusammenhänge mit anschaulichen Größen soll die bessere Einordnung der Ergebnisse in den Kapiteln 4 und 5 ermöglichen. Im folgenden Abschnitt wird auf die Gebäudeeinflußgrößen eingegangen, d.h. die Größen, die Einfluß auf die Zielgrößen haben.

2.4 Einflußgrößen und detaillierte Modellbildung

Die den inneren thermischen Zustand eines Gebäudes kennzeichnenden Größen werden von einer Reihe äußerer treibender Kräfte beeinflusst. Ziel dieses Abschnittes ist es, diese Größen zueinander in Beziehung zu setzen. Dazu wird die Energiebilanz einer thermischen Zone aufgestellt. Anschließend werden die auftretenden Wärmeströme mit Hilfe von Wärmetransportgleichungen durch direkt meßbare Größen ersetzt. Dazu dient eine Modellbildung, wie sie häufig für dynamische Gebäudesimulationen, so auch in der vorliegenden Arbeit für den Test des Regelalgorithmus eingesetzt wird.

2.4.1 Bilanz einer thermischen Zone

Detaillierte Berechnungsmethoden betrachten thermische Zonen innerhalb eines Gebäudes. Dabei werden Bereiche ähnlicher Temperaturen zu thermischen Zonen zusammengefaßt. Vereinfachend wird die Lufttemperatur durch einen sogenannten Luftknoten, die Temperatur von Umschließungsflächen durch Wandknoten repräsentiert. Konvektive und Strahlungswärmetransportvorgänge werden getrennt betrachtet. Der konvektive Wärmestrom \dot{Q}_L zum Luftknoten i ergibt sich als Summe des konvektiven Wärmestroms $\dot{Q}_{oi,L}$ von allen inneren Oberflächen, der Wärmeströme durch Infiltration \dot{Q}_{inf} (unkontrollierter Luftwechsel) und Ventilation \dot{Q}_v (kontrollierter Luftwechsel), der internen konvektiven Gewinne $\dot{Q}_{g,L}$ und Wärmeströmen aus anderen Zonen oder durch eine Randbedingung \dot{Q}_{ZRB} :

$$\dot{Q}_L = \dot{Q}_{oi,L} + \dot{Q}_{inf} + \dot{Q}_v + \dot{Q}_{g,L} + \dot{Q}_{ZRB} \quad . \quad (2.13)$$

Die Summe der zu- und abgeführten konvektiven Wärmeströme \dot{Q}_L ist gleich der zeitlichen Änderung der inneren Energie der Luft der Zone. Mit Ersetzen der Wärmeleistung zum Luftknoten durch

$$\dot{Q}_L = C_L \frac{d\vartheta_L}{dt}$$

erhält man eine Differentialgleichung zur Bestimmung der Luftinnentemperatur ϑ_L .

Die Bilanz für einen Wandtemperaturknoten lautet:

$$\dot{Q}_{oi} = \dot{Q}_{g,oi} + \dot{Q}_{sol} + \dot{Q}_{lw} + \dot{Q}_{tr} + \dot{Q}_{oi,L} \quad , \quad (2.14)$$

wobei $\dot{Q}_{g,oi}$ den wandspezifischen Strahlungsanteil der internen Gewinne, \dot{Q}_{sol} den wandspezifischen Anteil der solaren Gewinne durch alle Fenster, \dot{Q}_{lw} den Wärmestrom durch langwelligeren Strahlungsaustausch mit anderen Wänden und \dot{Q}_{tr} den Wärmestrom durch Leitung in der Wand angibt.

Der Wärmestrom zum Wandoberflächentemperaturknoten \dot{Q}_{oi} kann wiederum durch die zeitliche Änderung der inneren Energie des entsprechenden massiven Bauteils beschrieben werden:

$$\dot{Q}_{oi} = C_W \frac{d\vartheta_{oi}}{dt} \quad .$$

Die sich ergebende Differentialgleichung erlaubt die Berechnung der Oberflächentemperatur des Bauteils ϑ_{oi} .

Die einzelnen Wärmeleistungen in Gleichung 2.13 und 2.14 lassen sich zum großen Teil nur mit Schwierigkeiten meßtechnisch bestimmen. Für den Entwurf der Regelung sowie für

deren Test ist es vorteilhaft, die Terme auf einfach meßbare Größen zurückzuführen. In den folgenden Abschnitten werden die in den Bilanzgleichungen aufgeführten Wärmeströme durch meßbare Größen ersetzt. Die Wärmeströme lassen sich unterscheiden in Wärmeströme innerhalb einer thermischen Zone, Verlustwärmeströme zwischen der thermischen Zone und der Umgebung sowie solaren und internen Gewinnen. Die Modellbildung basiert zum Teil auf den im Anhang A erläuterten systemtheoretischen Grundlagen.

2.4.2 Wärmetransportvorgänge innerhalb einer thermischen Zone

Auf der Innenseite der Gebäudehülle findet ein konvektiver Wärmeübergang zwischen Luft und Bauteil statt. Dabei überlagern sich erzwungene und freie Strömung. Der konvektive Wärmestrom von allen inneren Oberflächen zum Luftknoten berechnet sich aus der Temperaturdifferenz und dem Wärmeübergangskoeffizienten $\alpha_{oi,i}$ $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}\right]$:

$$\dot{Q}_{oi,L} = \alpha_{oi,L} \cdot A_{oi} \cdot (\vartheta_{oi} - \vartheta_L) \quad (2.15)$$

mit der Fläche A_{oi} . Der Wärmeübergangskoeffizient kann aus der Nußeltzahl Nu :

$$Nu = \frac{\alpha_{oi,L} \cdot L}{\lambda_L}$$

mit der charakteristischen Länge L und der Wärmeleitfähigkeit λ_L der Luft ermittelt werden. Für eine Überlagerung von freier und erzwungener Strömung läßt sich folgender Ansatz verwenden² [6]:

$$Nu^n = |Nu_E^n \pm Nu_F^n| \quad ,$$

wobei Nu_E die Nußelt-Zahl der erzwungenen und Nu_F die Nußelt-Zahl der freien Strömung ist. Ansätze für die Berechnung der Nußelt-Zahl finden sich beispielsweise in [83]. Für erzwungene Strömung ist die mittlere Nußelt-Zahl eine Funktion der Reynolds- und Prandtl-Zahl: $Nu_E = f(Re, Pr)$. Dabei wird häufig als Ansatz ein Produkt von Potenzen von Re und Pr verwendet. Der konvektive Wärmeübergang hängt von der Anströmgeschwindigkeit w ab, die in die Reynolds-Zahl eingeht:

$$Re = \frac{wL}{\nu}$$

mit ν als kinematischer Viskosität und L als charakteristischer Länge. Bei turbulenter Strömung geht die Reynolds-Zahl bei Berechnung der Nußelt-Zahl im allgemeinen mit einem höheren Exponenten ein als bei laminarer Strömung.

Für die Raumumschließungsflächen müssen in der Regel unterschiedliche Oberflächentemperaturen angenommen werden. Vereinfachend wird jeder Wand jeweils ein Temperaturknoten zugeordnet. Die Oberfläche der Wand steht sowohl im konvektiven Wärmeaustausch mit der Raumluft als auch im Strahlungsaustausch mit den anderen Raumumschließungsflächen.

Der langwellige Strahlungsaustausch zwischen zwei Bauteiloberflächen der Temperaturen T_1 und T_2 kann mit:

$$\dot{Q}_{12} = \sigma A_1 \varepsilon_1 F_{12} (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.16)$$

²Die Addition ist anzuwenden, wenn der Vektor der Auftriebskraft und der Vektor der Anströmgeschwindigkeit in die gleiche Richtung zeigen; bei entgegengesetzter Richtung der Vektoren ist die Subtraktion anzuwenden.

berechnet werden. Dabei ist σ die Stefan-Boltzmann Konstante, ε der Emissionsgrad und F_{12} die Einstrahlzahl (Sichtfaktor). Nach Aufspaltung des Temperaturterms läßt sich schreiben:

$$\dot{Q}_{12} = L_{12}(T_1, T_2) \cdot (T_1 - T_2)$$

mit dem temperaturabhängigen Wärmeleitwert

$$L_{12}(T_1, T_2) = \sigma A_1 \varepsilon_1 F_{12} (T_1^2 + T_2^2) (T_1 + T_2) \quad .$$

Da jede Oberfläche mit allen übrigen im direkten Strahlungsaustausch steht, steigt der Rechenaufwand bei vielen Oberflächen schnell an. Es wird daher bei vielen Modellen eine weitere Vereinfachung vorgenommen, bei dem der Strahlungsaustausch im Raum nicht mehr direkt, sondern über Zwischenabsorption in einem fiktiven Strahlungsknoten erfolgt. Dabei kann man sich den Strahlungsknoten als einen den ganzen Raum ausfüllenden Körper ohne thermische Masse, mit unendlich hoher Wärmeleitfähigkeit und einem Emissionsgrad=1 vorstellen. Dieses Modell des langwelligen Strahlungswärmeaustausches im Raum wird Zweisternmodell („2*Modell“) genannt, da die Wandenergiebilanz durch einen Wandoberflächen-temperaturknoten und den fiktiven Strahlungsknoten beschrieben wird [37].

Bei der Approximation durch ein Zweisternmodell wird die Raumgeometrie vernachlässigt. Lediglich die Flächenanteile werden im Leitwert von der Oberfläche zum fiktiven Strahlungsknoten berücksichtigt:

$$L_{ij}^{2*} = \frac{A_i \varepsilon_i \cdot A_j \varepsilon_j}{\sum A_k \varepsilon_k} \sigma (T_1^2 + T_2^2) (T_1 + T_2) \quad .$$

Sie lassen sich mit Hilfe des Verteilfaktors:

$$F_{ij}^{2*} = \frac{A_j \varepsilon_j}{\sum A_k \varepsilon_k}$$

beschreiben. Feist [37] zeigte, daß mit diesem Verfahren für normale Wohngebäude eine sehr gute Annäherung an die Ergebnisse bei Berücksichtigung der Raumgeometrie erhalten wird.

2.4.3 Wärmetransport zwischen Gebäude und Umgebung

Die mit Luftströmen transportierte Wärmeleistung in der Luftknotenbilanz läßt sich über die jeweiligen Temperaturdifferenzen ausdrücken:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{inf} &= \dot{V} \cdot \rho_L \cdot c_{p,L} \cdot (\vartheta_a - \vartheta_L) \\ \dot{Q}_v &= \dot{V} \cdot \rho_L \cdot c_{p,L} \cdot (\vartheta_v - \vartheta_L) \\ \dot{Q}_{ZRB} &= \dot{V} \cdot \rho_L \cdot c_{p,L} \cdot (\vartheta_{z,L} - \vartheta_L) \quad . \end{aligned} \quad (2.17)$$

Die Temperatur der Ventilationsluft ϑ_v ist bei Lüftungsanlagen mit und ohne Wärmerückgewinnung eine Funktion der Außentemperatur ϑ_a . Der Volumenstrom \dot{V} wird häufig als Vielfaches des Zonen- oder Gebäudevolumens ausgedrückt:

$$\dot{V} = n \cdot V_z$$

mit der Luftwechselrate n [h^{-1}].

Die Transmissionswärmeverluste über die Gebäudehülle entstehen über verschiedene in der Regel instationäre Wärmetransportvorgänge. Die Wärmeströme zwischen der Wandinnenoberfläche und der Umgebung werden durch die Wärmeleitung im Innern der Wand sowie den Wärmeübergang an der Außenwandseite bestimmt.

Innerhalb der Festkörper, die die Gebäudehülle bilden, findet Wärmetransport in Form von Wärmeleitung statt. Da Wände in der Regel aus mehreren hintereinanderliegenden Schichten bestehen, werden zur Modellbildung ihre Wärmewiderstände und thermischen Kapazitäten in Analogie zur Elektrotechnik in Reihe geschaltet (vgl. Abb. 2.11). Da die

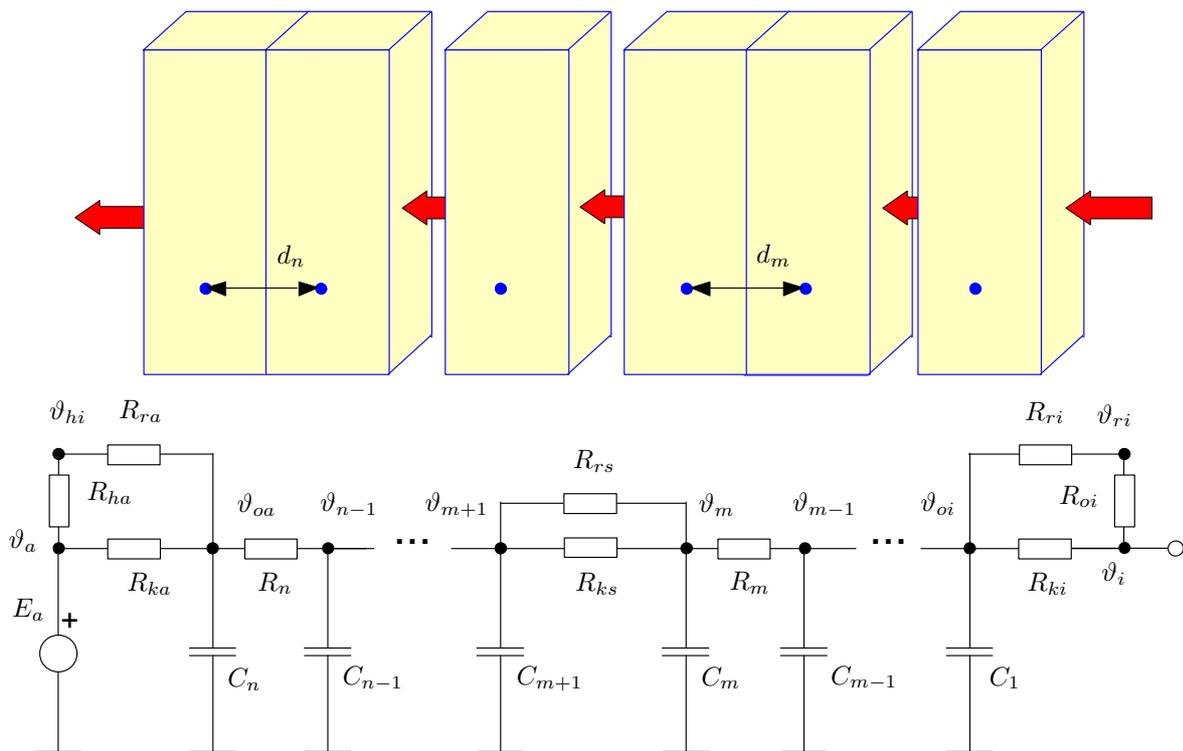


Abb. 2.11. Repräsentation der thermischen Eigenschaften einer Wand durch Reihenschaltung von Widerstands-Kapazitäts-Elementen

Ausdehnung der Außenbauteile senkrecht zur Flächennormalen in der Regel sehr viel größer ist als in Richtung der Normalen, wird der Wärmedurchgang meist als eindimensionales Problem behandelt. Wärmebrückeneffekte sind bei der Modellbildung Gegenstand getrennter Betrachtungen. Die Zustandsgleichung für das m -te Element bei eindimensionaler Betrachtung des Wärmeleitvorgangs lautet

$$C_m \frac{d\vartheta_m}{dt} = \frac{\vartheta_{m-1} - \vartheta_m}{R_m} - \frac{\vartheta_m - \vartheta_{m+1}}{R_{m+1}} \quad , \quad (2.18)$$

mit der Wärmekapazität C_m und dem Wärmewiderstand des m -ten Elements R_m als Quotient der Elementdicke und der Wärmeleitfähigkeit des Stoffes, aus dem das Element besteht:

$$R_m = \frac{d_m}{\lambda_m} \quad .$$

Der Wärmewiderstand $R_{w,ges}$ der gesamten Wand ergibt sich aus der Reihenschaltung der Einzelwiderstände:

$$R_{w,ges} = \frac{d_1}{\lambda_1} + \dots + \frac{d_m}{\lambda_m} + \dots + \frac{d_n}{\lambda_n} \quad .$$

Bei Vorhandensein einer Luftschicht zwischen zwei Festkörperschichtungen muß der konvektive und der Strahlungsübergang zwischen den beiden Oberflächen berücksichtigt werden (angedeutet durch zwei parallel geschaltete Widerstände R_{ks} und R_{rs} in Abbildung 2.11).

Bei dynamischen Simulationsrechnungen mit mehreren Zonen führt die räumliche Diskretisierung der Wände zu einem enormen Rechenaufwand. Daher verwendet man in vielen Simulationsprogrammen während der Berechnung (so auch in dem für die Simulationstests eingesetzten Programm TRNSYS) Black-Box-Modelle für die Wände. Das dynamische Verhalten der Wände wird dabei durch Transferfunktionen (siehe Abschnitt A.2.2) beschrieben. Diese werden vor der eigentlichen Simulation auf Basis eines physikalischen Wandmodells (Schichtenaufbau und physikalische Parameter) berechnet. Eingangsgrößen der Black-Box-Wandmodelle sind Oberflächentemperatur und -wärmestromdichte auf einer Wandseite, Ausgangsgrößen sind Oberflächentemperatur und -wärmestromdichte auf der anderen Wandseite. Eine umfassende Darstellung der Wandmodellierung mit Hilfe von Transferfunktionen findet sich in [40].

Der konvektive Wärmeübergang von der äußeren Wandoberfläche an die Außenluft ist wiederum durch eine Überlagerung von freier und erzwungener Strömung gekennzeichnet. Der erzwungene Anteil hängt von der Windgeschwindigkeit ab und ist meist dominierend. Der Strahlungsaustausch zwischen der äußeren Wandoberfläche und den umgebenden Flächen wird neben den optischen Eigenschaften der Oberfläche von deren Temperatur bestimmt. Die Strahlungstemperatur des Himmels kann je nach Bewölkungsgrad um bis zu 20 K unter der Umgebungslufttemperatur liegen, resultierend können sich auch geringere Bodentemperaturen einstellen. Die Umgebung läßt sich näherungsweise als schwarzer Strahler betrachten. In die Modellbildung gehen weiterhin die Sichtfaktoren zu den umgebenden Flächen entsprechend der Ausrichtung der Wandoberfläche ein. Zur Berechnung des übertragenen Wärmestromes können die Beziehungen 2.15 und 2.16 entsprechend modifiziert verwendet werden.

2.4.4 Solare Gewinne

Direkte passiv solare Gewinne in der Bilanzgleichung 2.14 entstehen durch Absorption der durch transparente Außenbauteile transmittierten Solarstrahlung in der thermischen Zone. Fenster sind die wichtigsten transparenten Außenbauteile. Die außen auf die Fenster treffende Einstrahlung wird zum Teil reflektiert, transmittiert und in den Scheiben absorbiert. Die Absorption in den Scheiben erhöht deren Temperatur, so daß die Transmissionswärmeverluste geringer sind als beim Wärmedurchgang ohne Einstrahlung. Dieser Effekt wird durch einen Aufschlag auf den Transmissionsfaktor berücksichtigt:

$$g = \tau + \frac{q_i}{G_n} \quad . \quad (2.19)$$

Der Gesamtenergiedurchlaßgrad g (g-Wert) ist abhängig vom Einfallswinkel der Solarstrahlung, dem Absorptions- und Emissionsgrad sowie der Temperatur der Scheiben. Die transmittierte Einstrahlung wird an den inneren Oberflächen des Raumes absorbiert oder diffus

reflektiert. Somit kann der Zusammenhang zwischen den direkten solaren Gewinnen der thermischen Zone und der meßbaren Größe Einstrahlung folgendermaßen angegeben werden:

$$\dot{Q}_{sol} = g\alpha_W A_F G_n \quad . \quad (2.20)$$

G_n ist die Globalstrahlung auf die Fensterfläche.

Ein Teil der in den Raum eindringenden Solarstrahlung geht durch Transmission durch transparente Bauteile verloren. Die absorbierte Strahlung erhöht die Temperatur der innenliegenden Bauteilschichten. Über Wärmetransportvorgänge erfolgt ein Temperatenausgleich mit den nicht bestrahlten inneren Oberflächen.

Fenster weisen mit den heute üblichen optischen und thermischen Kennwerten in der Südfassade eine Gewinnbilanz auf. Als ohnehin notwendige Gebäudeelemente und Massenprodukt sind sie aus ökonomischer Sicht am günstigsten. Allerdings ist eine Überdimensionierung der Südfensterflächen nicht sinnvoll, da aufgrund der resultierenden zeitweisen, lokalen Überhitzungen ein erheblicher Teil der Solargewinne nicht genutzt werden kann und zu Komforteinbußen führt.

Diesem Problem versucht man entgegenzuwirken, indem ein Teil der Südfassade mit **transparent gedämmten Wänden** versehen wird. Den schematischen Aufbau einer transparent gedämmten Wand zeigt Abbildung 2.12.

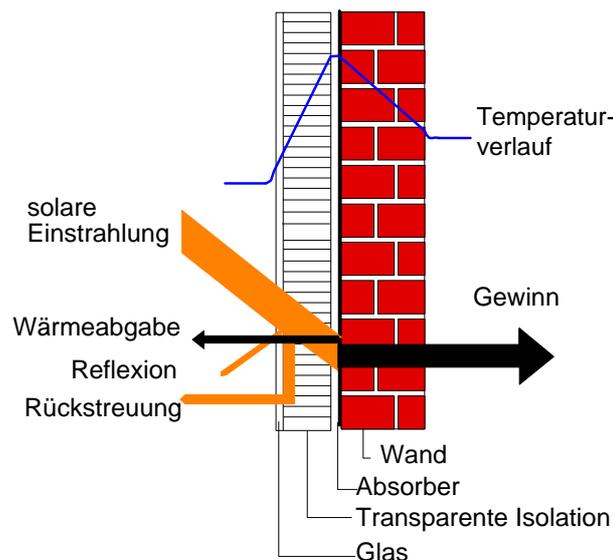


Abb. 2.12. Schematischer Aufbau einer transparent gedämmten Wand, eingezeichnet ist der Temperaturverlauf in der Wand sowie die Energieströme bei solarer Einstrahlung

Die Wände heizen sich im Tagesverlauf durch die Einstrahlung auf und geben die Wärme zeitverzögert und amplitudengedämpft an die Innenräume ab (vgl. Abbildung 2.13).

Das transparente Dämmelement vor der Massivwand läßt sich mathematisch wie ein Fenster behandeln. Für den Wärmetransport durch die dahinterliegende Wand kann die Vorgehensweise im vorangegangenen Abschnitt angewandt werden. Bei stationärer Betrachtungsweise läßt sich ein Nutzungsgrad einer transparent gedämmten Wand herleiten [45]:

$$\eta_{TWD} = \frac{Q_{TWD}}{A_{TWD} H_n} = \frac{g_{TWD} \cdot \alpha_W}{1 + \frac{k_{TWD}}{k_W}} \quad , \quad (2.21)$$

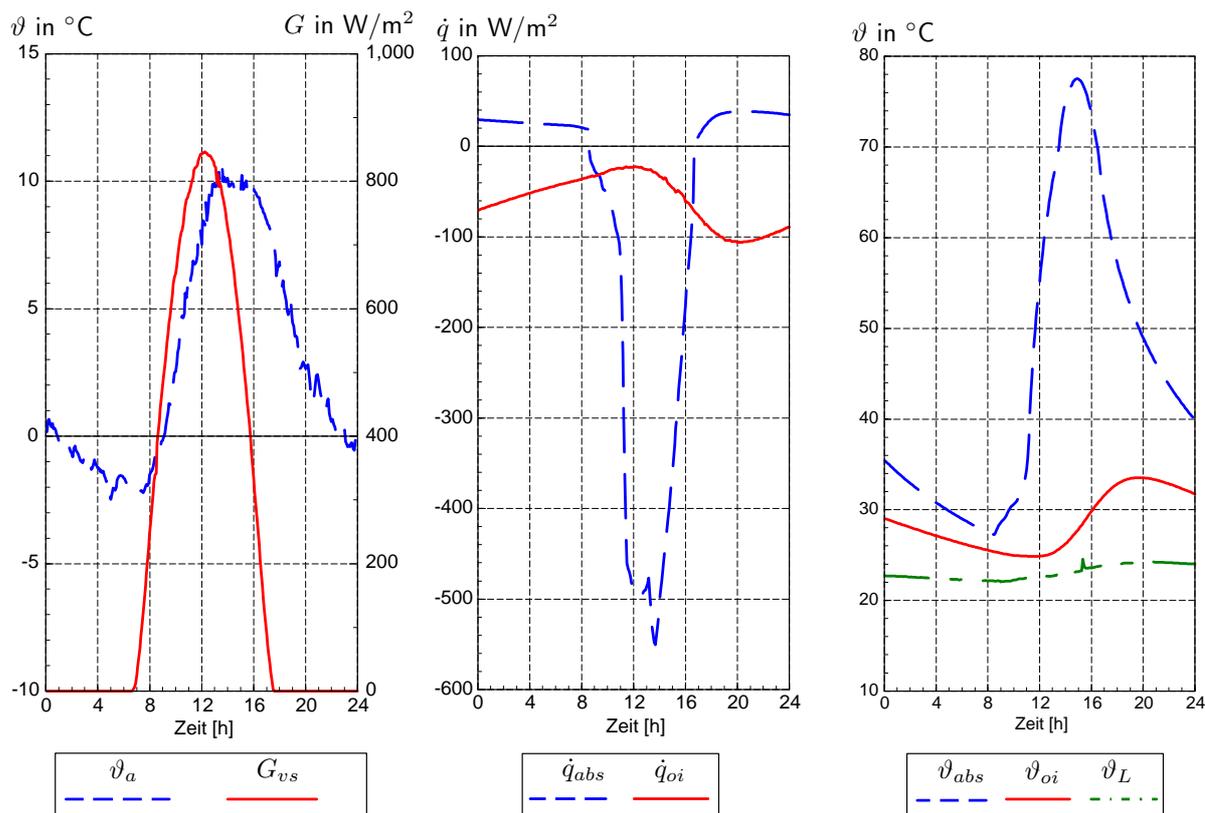


Abb. 2.13. Temperaturen und Wärmeflüsse, gemessen an einem transparenten Dämmsystem der Experimentierhäuser des ISFH in Emmerthal, Verlauf der globalen Einstrahlung auf die Südvertikale G_{vs} und der Außentemperatur ϑ_a (linke Grafik), Wärmestrom \dot{q}_{abs} am Absorber und an der Wandinnenoberfläche \dot{q}_{oi} (mittlere Grafik) Absorbortemperatur ϑ_{abs} und Temperatur der Wandinnenoberfläche ϑ_{oi} (rechte Grafik), Verlustwärmeströme werden positiv, Gewinnwärmeströme negativ gezählt. Deutlich erkennbar ist die Phasenverschiebung des Wärmestroms an der Wandinnenoberfläche gegenüber der Einstrahlung.

der nur von den Parametern des transparenten Dämmsystems abhängt. Der Nutzungsgrad des TWD-Systems wird umso größer, je höher die Dämmwirkung der TWD und je geringer die Dämmwirkung der Wand ist. Wird der Wärmewiderstand der hinter der TWD befindlichen Wand sehr klein, so nähert sich der Nutzungsgrad des TWD-Systems dem Energiedurchlaßgrad der transparenten Dämmung. Allerdings verschwindet dann auch die verzögernde Wirkung auf den Wärmeeintrag durch die thermische Kapazität der Wand.

Bei sinnvoller Dimensionierung stellen transparent gedämmte Wände durch die zeitverzögerte Wärmeabgabe eine ideale Ergänzung zu Direktgewinnsystemen dar. Durch die Erhöhung der Wandtemperatur ist gleichzeitig eine Verringerung der Lufttemperatur bei gleichbleibendem thermischem Komfort möglich (vgl. Gleichung 2.6).

Wintergärten und Glasvorbauten sind bei energetisch sinnvoller Nutzung Pufferzonen mit hohem Direktgewinnanteil. Indirekte Einflüsse der Einstrahlung auf die Lufttemperatur eines dahinterliegenden Raumes entstehen durch folgende Effekte:

- verringerte Transmissionswärmeverluste zur Pufferzone wegen der dort erhöhten Lufttemperatur $\vartheta_{L,P}$ gegenüber der Außenluft aufgrund der absorbierten Einstrahlung ($\vartheta_L \geq \vartheta_{L,P}$)
- verringerte Lüftungswärmeverluste wg. Vorwärmung der Frischluft in der Pufferzone ($\vartheta_L \geq \vartheta_{L,P}$)
- Heizenergiegewinne aus der Pufferzone für $\vartheta_L < \vartheta_{L,P}$.

Aufgrund von Absorption und Reflexion in der Verglasung der Pufferzone tritt eine Reduktion der direkten Gewinne der dahinter befindlichen beheizten Zone auf.

Eine detaillierte Modellbildung kann durch Betrachtung eines Wintergartens als eigene thermische Zone erfolgen, wobei die Bilanzgleichungen 2.13 und 2.14 entsprechend anzuwenden sind. Der konvektive Wärmestrom aus dem Wintergarten in eine betrachtete Zone $\dot{Q}_{ZRB,i}$ berechnet sich dann entsprechend Gleichung 2.17.

2.4.5 Interne Quellen

Die konvektiven Gewinne $\dot{Q}_{g,L}$ und die Strahlungsgewinne $\dot{Q}_{g,oi}$ in den Zonenbilanzgleichungen ergeben sich als Summe aus der zugeführten Heizleistung und den internen Gewinnen³. Diese entstehen aufgrund der Wärmeabgabe von elektrischen Geräten und Personen. Über letztere müssen abhängig von der körperlichen Aktivität, z.B. mit Hilfe der DIN 1946-2 [20], Annahmen getroffen werden. Die Wärmeleistung elektrischer Geräte ergibt sich direkt aus der umgesetzten elektrischen Leistung und läßt sich daher relativ einfach messen oder abschätzen.

Die Wärmezufuhr durch das Heizsystem kann grundsätzlich danach unterschieden werden, ob die Heizleistung aufgeprägt ist oder sich entsprechend der Temperatur von wärmeabgebenden Flächen einstellt. Der letztgenannte Fall gilt für das weit verbreitete Heizsystem der Pumpenwarmwasserheizung. Zur Wärmeabgabe dienen Heizkörper oder in Umschließungsflächen verlegte Heizrohre. Die Heizkörper übertragen die thermische Energie an die Raumluft und die Umschließungsflächen durch Konvektion und Strahlung, deren Anteile von der Bauart abhängig sind. Die experimentelle Umsetzung des Regelprinzips, das in dieser Arbeit vorgestellt wird (siehe Kapitel 5), erfolgte zunächst an einem Heizsystem mit Radiatoren.

Der Zusammenhang zwischen der Heizleistung und den Betriebsbedingungen wurde bereits in Abschnitt 2.1, Gleichung 2.2 angegeben. Für die vorausschauende selbstadaptierende Heizungsregelung wird die Heizleistung durch Vorgabe der Vorlauftemperatur für den gesamten Heizkreis bei konstantem Massenstrom eingestellt. Ziel der folgenden Betrachtungen ist es, einen Zusammenhang zwischen der Raumtemperatur und der Vorlauftemperatur herzustellen.

Zur Untersuchung der Wirkung der Vorlauftemperatur auf die Raumtemperatur ist es zweckmäßig, die Strecke in Teilstrecken zu unterteilen. Die nächsten Unterabschnitte dienen der Betrachtung der folgenden Teilstrecken:

³In der Gebäudeenergiebilanz Gl. 2.1 wird dagegen nicht nach konvektiven und Strahlungsgewinnen unterschieden, stattdessen sind interne und Heizenergiegewinne gesondert aufgeführt

- Wirkung der Vorlauftemperatur am Stellventil auf die Vorlauftemperatur am Heizkörpereintritt (dynamisches Verhalten der Rohrstrecke),
- Wirkung der Vorlauftemperatur am Heizkörpereintritt auf die mittlere Heizkörpertemperatur (dynamisches Verhalten des Heizkörpers)
- Wirkung der mittleren Heizkörpertemperatur auf die Raumlufttemperatur (Wärmeübergang zwischen Heizkörper und Raum).

Die im folgenden dargestellte mathematische Beschreibung der Teilstrecken wird z.T. in den Simulationsuntersuchungen (Kapitel 4) verwendet. Das im Regler eingesetzte Modell basiert auf einer Vereinfachung dieser detaillierten Beschreibung.

2.4.5.1 Dynamisches Verhalten der Rohrstrecke

Das thermisch-dynamische Verhalten der Rohrstrecke zwischen Stellventil und Heizkörpereintritt kann durch die in Abbildung 2.14 gezeigte Verschaltung von Totzeitgliedern und Widerstands-Kapazitäts-Elementen modelliert werden. Die Totzeitglieder repräsentieren den Zeitraum, den das Wärmeträgerfluid zwischen zwei Rohrelementen benötigt. Das dynamische Aufheizverhalten eines Rohrelements wird durch Verzögerungsglieder 1. Ordnung (RC-Glieder) abgebildet. Die Wärmewiderstände R_U zwischen der Rohrtemperatur und einer Umgebungstemperatur ϑ_U fassen hier den konvektiven und Strahlungswärmeübergang zusammen.

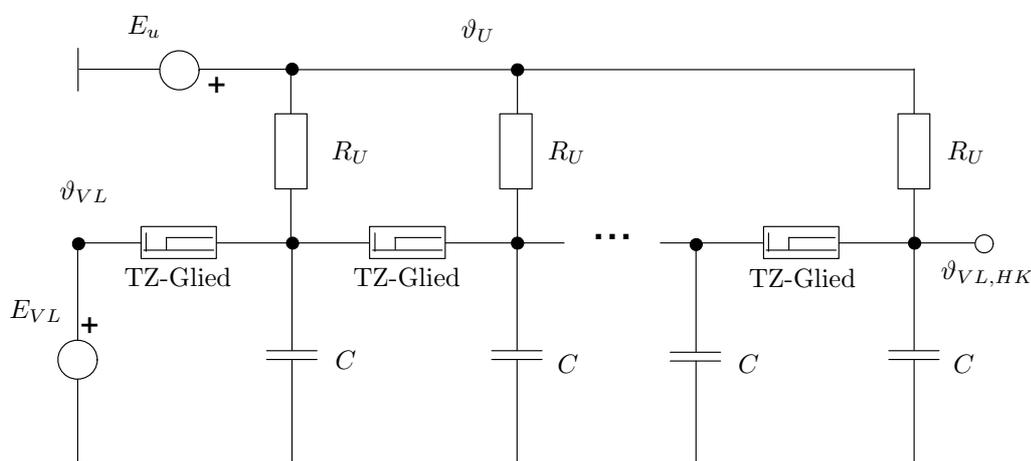


Abb. 2.14. Repräsentation der thermischen Eigenschaften einer Rohrleitung und ihrer Kopplung mit der Umgebung der Temperatur ϑ_U durch Reihenschaltung von Totzeitgliedern (TZ) und Widerstands-Kapazitäts-Elementen (RC).

Die Wärmeverluste einer Rohrleitung berechnen sich entsprechend Gleichung 2.3. Inwieweit der Einfluß der Totzeit vernachlässigbar ist, hängt vom Verhältnis der Zeit, die das Fluid vom Stellventil zum Heizkörpereintritt benötigt, zum gewählten Zeitschritt der numerischen Simulation oder Meßwerterfassung ab. Bei einem Verhältnis $\ll 1$, reicht die Beschreibung mit Hilfe der Verzögerungsglieder erster Ordnung aus.

2.4.5.2 Dynamisches Verhalten des Heizkörpers

Im Heizkörper wird die thermische Kapazität des Heizkörperwassers und des Heizkörpers aufgeladen. Gleichzeitig wird umso mehr Wärme an die Umgebung abgegeben, je höher die Differenz zwischen Heizkörper- und Umgebungstemperatur ist. Diese Teilstrecke läßt sich ebenfalls durch Kombination von Totzeitgliedern und Verzögerungsgliedern erster Ordnung beschreiben.

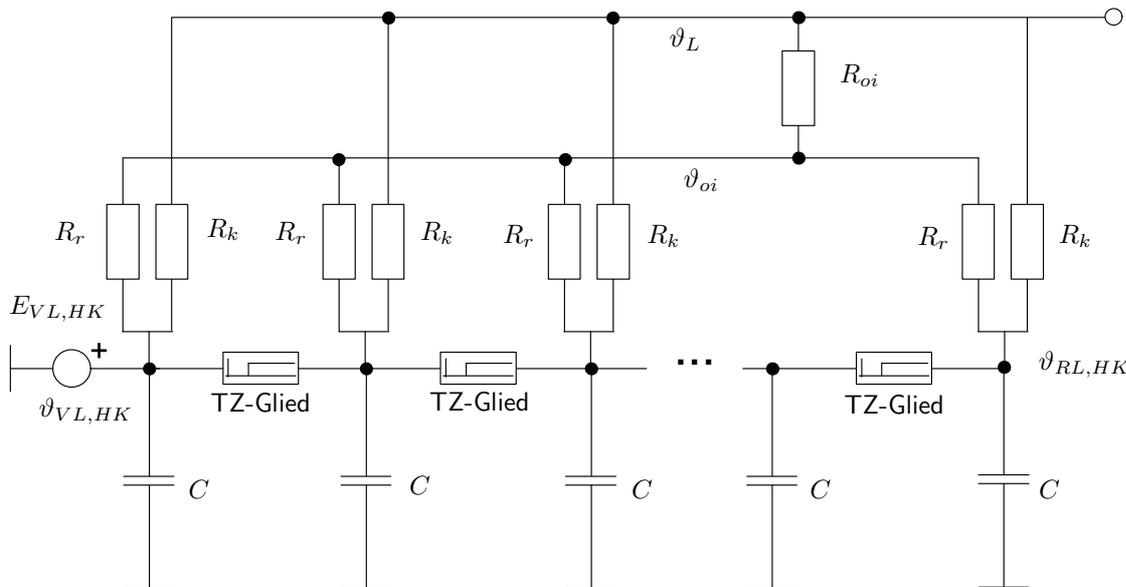


Abb. 2.15. Repräsentation der thermischen Eigenschaften eines Heizkörpers sowie der Kopplung mit der Temperatur von Luftknoten ϑ_L und Strahlungsknoten ϑ_{oi} der Zone

Für die Modellierung des Heizkörpers bei den Simulationstests (siehe Kapitel 4) wird auf die räumliche Diskretisierung verzichtet und statt dessen ein mittlerer Wert für die Heizkörpertemperatur (logarithmische Temperaturdifferenz) verwendet.

Die Leistungsbilanzgleichung für einen Heizkörper (Index HK) lautet:

$$\frac{dU_{HK}}{dt} = \dot{Q}_F - \dot{Q}_{HK} \quad . \quad (2.22)$$

Die Wärmeleistungen lassen sich wie folgt ausdrücken:

$$C_{HK} \frac{d\vartheta_{HK}}{dt} = \dot{m}_w c_{p,w} (\vartheta_{VL} - \vartheta_{RL}) - k_{HK} \cdot A_{HK} \cdot \Delta t \quad . \quad (2.23)$$

Δt ist die arithmetisch gemittelte Übertemperatur

$$\Delta t = \frac{\vartheta_{VL} + \vartheta_{RL}}{2} - \vartheta_L$$

oder die logarithmische Temperaturdifferenz⁴

$$\Delta t_{ln} = \frac{\vartheta_{VL} - \vartheta_{RL}}{\ln \frac{\vartheta_{VL} - \vartheta_L}{\vartheta_{RL} - \vartheta_L}} \quad .$$

⁴Die logarithmisch gemittelte Übertemperatur ist nach Recknagel [68] bei größeren Temperaturspreizungen einzusetzen, namentlich wenn $\frac{\vartheta_{RL} - \vartheta_L}{\vartheta_{VL} - \vartheta_L} < 0.7$ gilt.

Da der Wärmeübergangswiderstand zwischen Heizwasser und Heizkörperwandung sehr klein ist und die Heizkörperwandung eine hohe Wärmeleitfähigkeit aufweist, kann man näherungsweise gleiche Temperaturen für das Heizwasser und die Heizkörperwandung annehmen.

2.4.5.3 Wärmeübergang zwischen Heizkörper und Raum

Der Wärmeübergang zwischen mittlerer Heizkörpertemperatur und Raumluftknoten erfolgt durch freie Konvektion. Zwischen der Oberfläche der Radiatorwand und den Oberflächen der Raumumschließungsflächen findet eine Wärmeübertragung durch Strahlung statt. Die Übergangswiderstände wie auch die Anteile der Wärmeübertragungsformen hängen von der Bauform des Heizkörpers ab. Für Gliederheizkörper beträgt der Anteil der Wärmestrahlung an der gesamten Wärmeabgabe 0,2 - 0,5, für Plattenheizkörper 0,2 bis 0,7 [47]. Die unteren Grenzwerte gelten für große Bautiefen bzw. Plattenheizkörper mit zusätzlichen Konvektionsblechen. Bei Konvektoren ist der Anteil der Wärmestrahlung vernachlässigbar gering ($\approx 0,2$).

Für die Simulation eines Radiators (vgl. Kapitel 4) wurden Normwärmeleistungen $\dot{Q}_{HK,N}$, wie sie zur Auslegung von Heizkörpern Verwendung finden definiert [55].

Nach DIN 4704 [25] lauten die Prüfbedingungen: Vorlauftemperatur: $\vartheta_{VL} = 90$ °C, Rücklauftemperatur: $\vartheta_{RL} = 70$ °C, Bezugs-Lufttemperatur: $\vartheta_L = 20$ °C. Um die Wärmeleistungen bei vom Normversuch abweichenden Temperaturbedingungen zu bestimmen, werden die Wärmestromdichten ins Verhältnis gesetzt:

$$\frac{\dot{q}}{\dot{q}_{HK,N}} = \frac{k_{HK} \Delta t}{k_{HK,N} \Delta t_N} \quad (2.24)$$

Aus der Abhängigkeit des äußeren Wärmeübergangskoeffizienten von der Temperaturdifferenz zwischen Heizkörperwandung und Raumlufttemperatur läßt sich der Potenzansatz herleiten (vgl. [47]):

$$\dot{Q}_{HK} = \dot{Q}_{HK,N} \left(\frac{\Delta t}{\Delta t_N} \right)^n = C_s \Delta t^n \quad (2.25)$$

wobei wieder die arithmetisch oder logarithmisch gemittelte Übertemperatur verwendet wird und

$$C_s = \frac{\dot{Q}_{HK,N}}{\Delta t_N^n}$$

gilt. Der Exponent n hängt von der Bauart der Heizkörper ab und liegt zwischen $n = 1,1$ für Flächenheizungen (Fußboden- oder Wandheizungen) und $n = 1,45$ für Konvektoren. Für Radiatoren gilt: $n = 1,3$. C_s läßt sich mit Hilfe von Gleichung 2.25 für ein festgelegtes n und Normbedingungen für Heizkörpervor- und -rücklauftemperatur sowie Raumlufttemperatur berechnen.

In diesem Abschnitt wurde ausgehend von einer Energiebilanz einer thermischen Zone eine Beschreibung der einzelnen Bilanzterme mit Hilfe meßbarer Größen vorgenommen. Ziel dieser Modellbildung war es, die wichtigsten Einflußgrößen auf die Raumtemperatur zu ermitteln und die theoretische Basis für die numerischen Berechnungen darzulegen. Als Einflußgrößen durch die Verlustterme wirken Außentemperatur und Windgeschwindigkeit. Die

solaren Gewinne lassen sich als lineare Funktion der Einstrahlung auf die äußere Fassade darstellen. Interne Gewinne durch elektrische Geräte und Personen gehen direkt in die Bilanz ein. Die Heizwärmezufuhr läßt sich entweder über eine aufgeprägte Heizleistung ausdrücken oder bei Warmwasserheizungen mit Hilfe von Massenstrom und Temperaturen im Heizkreis formulieren. Die Regelung der Heizleistung bei diesen Heizsystemen kann durch Variation des Massenstroms oder der Vorlauftemperatur erfolgen, wobei die jeweils andere Größe konstant gehalten wird. Zahlreiche weitere Einflüsse auf die Bilanzterme wurden in der Modellbildung nicht berücksichtigt. Eine Diskussion ihrer Wirkung wird im Rahmen der Aufstellung eines vereinfachten Gebäudemodells im folgenden Abschnitt vorgenommen.

2.5 Vereinfachte Modellbildung

Die im vorangegangenen Abschnitt vorgenommene Modellbildung wird in einem detaillierten Gebäudemodell des Simulationsprogramms TRNSYS zum Test der Regelung eingesetzt. Für das reglerinterne zu adaptierende Modell ist dieser Detaillierungsgrad aufgrund der Vielzahl von Meßgrößen und der Anzahl von zu identifizierenden Parametern jedoch nicht zweckmäßig. Im folgenden Abschnitt wird ein Modell mit konzentrierten Parametern vorgestellt, welches in verallgemeinerter Form im Regelalgorithmus Verwendung findet (vgl. Abschnitt 3.2.1).

2.5.1 Reduktion der Eingangsgrößen

Für ein thermisches Modell des Gebäudes, dessen Parameter während des Betriebes der Regelung identifiziert werden sollen, müssen erhebliche Vereinfachungen der im vorangegangenen Abschnitt dargelegten Modellbildung hinsichtlich der betrachteten Modelleingangsgrößen und der Anzahl der Parameter vorgenommen werden. Zunächst wird die Zahl der Modelleingangsgrößen reduziert. Für das im Regler zu identifizierende Modell dienen die **Außenlufttemperatur**, die **Einstrahlung** auf die Hauptfensterflächen und eine **Heizgröße** (Vorlauftemperatur, Massenstrom oder Heizleistung) als Eingangsgrößen. Diese drei Größen gehören zu den wichtigsten Einflußgrößen auf die Raumtemperatur in den betrachteten Gebäudetypen. Ein weiterer Grund für die Auswahl liegt in der problemlosen meßtechnischen Erfassbarkeit und der einfachen Einflußnahme auf die Heizgröße. Alle weiteren Einflüsse werden nicht im Modell implementiert und wirken somit als ungemessene Störgrößen auf die Regelung. Diese ungemessenen Störgrößen lassen sich in innere Wärmequellen, Wetter- und Nutzereinflüsse sowie Meßabweichungen einteilen. Im folgenden wird diskutiert, inwieweit sich diese Störgrößen auf die Regelung auswirken können.

Zusätzliche **innere Wärmequellen** durch die Wärmeabgabe von Personen und elektrischen Geräten können die Größenordnung solarer Gewinne erreichen. Im Wohnbereich scheint die meßtechnische Erfassung in Einzelräumen jedoch problematisch. Für Bürogebäude mit häufig erheblichen elektrischen Lasten kann eine meßtechnische Erfassung derselben und eine Abschätzung der Wärmeabgabe von Personen sinnvoller sein. Ist der Einfluß durch interne Gewinne größer als der Einfluß solarer Gewinne, kann diese Eingangsgröße im Modell ersetzt, oder eine zusätzliche Modelleingangsgröße genutzt werden. Von Vorteil ist ebenfalls, daß sich die elektrischen Lasten und Anzahl sowie Tätigkeit von Personen in Bürogebäuden erheblich einfacher vorhersagen lassen, als die solare Einstrahlung. In Abschnitt 4.3.3 werden die Ergebnisse von Simulationstests bei Einwirken von ungemessenen internen Gewinnen vorgestellt.

Als weitere **Wettergrößen**, die sich ebenfalls auf die Raumtemperatur oder den thermischen Komfort und damit den Heizenergieverbrauch auswirken, sind Windgeschwindigkeit und Windrichtung, Luftfeuchte und Luftdruck zu nennen. Diese Größen wurden für die Regelung nicht meßtechnisch erfaßt, da der finanzielle und technische Aufwand mit üblicher Sensorik für den Anwendungsfall im Einfamilienhaus bei weitem über dem Nutzen liegt. Zudem ist der Einfluß insbesondere der beiden letztgenannten Größen als gering einzuschätzen. Eine Alternative zu üblicher Sensorik bietet ein durch Fruck [41] und Altenhoff [2] am Institut für Solarenergieforschung Hameln/ Emmerthal entwickelter kombinierter Sensor für die Messung von Einstrahlung, Außentemperatur und Windgeschwindigkeit.

Die notwendige luftdichte Ausführung der Gebäudehülle reduziert den Einfluß der Windgeschwindigkeit stark im Vergleich zu den betrachteten treibenden Kräften. Tests einer Modellidentifikation mit der Windgeschwindigkeit als zusätzlicher Eingangsgröße zeigten, daß sich der Fehler der berechneten gegenüber der gemessenen Raumlufftemperatur nur wenig verringert. Lediglich bei hohen Windgeschwindigkeiten waren bei Einbeziehung ihrer Meßgröße deutliche Verbesserungen zu erkennen. Zudem beinhaltet der identifizierte Einfluß der Außentemperatur stets noch den Einfluß zusätzlicher Wettergrößen im Identifikationszeitraum, da die Identifikationsroutine die Information, welche weiteren Größen zum Einfluß auf die Raumtemperatur beitragen, nicht erhält. Daher wirken sich Schwankungen der nicht gemessenen Wettergrößen wie zufällige Fehler der Eingangsgröße Außentemperatur aus. An langfristige Tendenzen paßt sich das Modell aufgrund der gewählten Identifikationsmethode an.

Nutzereinflüsse sind sehr vielfältig und nur unter hohem Aufwand meßtechnisch zu erfassen. Neben der zeitlich variierenden Wärmeabgabe von Personen ist sicherlich das Öffnen von Fenstern und Türen der wesentliche Einfluß. Es verändert den Lüftungswärmeübergangswiderstand R_L . Ein kurzes Lüften beeinflusst das identifizierte Modell kaum, da in die Identifikation Meßwerte sehr vieler Zeitschritte eingehen. Ein Dauerlüften würde allerdings zum Anpassen der Modellparameter führen.

Meßunsicherheiten treten in Form von zufälligen und systematischen Meßfehlern auf. Ihr Einfluß wird in Abschnitt 4.3.3 diskutiert.

Zeitliche Abhängigkeiten der Gebäudeparameter entstehen durch die genannten Nutzereinflüsse sowie durch saisonale Schwankungen (Sonnenstand, Abschattung) und langfristige Änderungen (z.B. Austrocknung des Baukörpers). Generell können längerfristige Variationen besser durch die Identifikationsmethode erfaßt werden. Für kurzfristige Variationen wird ein Mittelwert der auftretenden Zustände identifiziert.

2.5.2 Modell mit konzentrierten Parametern

Die Modellbildung dient hier dazu, einen Zusammenhang zwischen den genannten Einflußgrößen des Systems Gebäude und der Systemausgangsgröße Raumlufftemperatur für eine thermische Zone herzustellen. Ein Modell mit verteilten Parametern (d.h. in Abhängigkeit von Ortskoordinaten) ist für eine Identifikation auf Basis der Meßwerte der genannten Ein- und Ausgangsgrößen zu komplex. Aus diesem Grund kommt nur ein Modell mit konzentrierten Parametern in Frage.

Fall 1: Heizleistung bekannt

Abbildung 2.16 zeigt ein Modell mit konzentrierten Parametern für eine thermische Zone. Solche thermischen Netzwerkmodelle sind auch in der Literatur häufig zu finden. Sie unterscheiden sich durch die Anzahl der Widerstands-Kapazitäts-Elemente zur Beschreibung der Massivwände und in der Verwendung einer Kapazität für die Raumlufft und die Innenbauteile gleicher Temperatur. Schwab [74] verwendet ebenfalls ein Modell mit 2 Kapazitäten, wie in Abbildung 2.16 gezeigt. Van der Maas [81] vernachlässigt im Netzwerkmodell die Raumlufftkapazität. Thermische Netzwerkmodelle mit einer höheren Anzahl von Kapazitäten für die Massivwandbeschreibung finden sich beispielsweise in [60], [80] und [82].

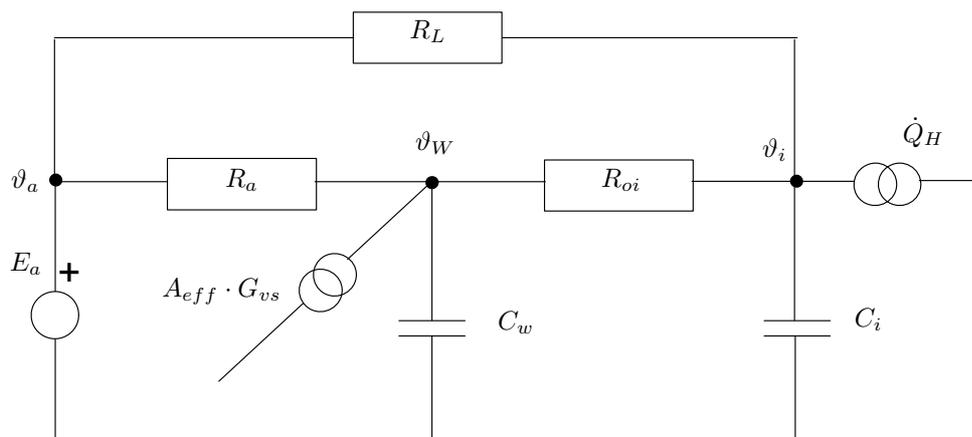


Abb. 2.16. Modell einer Zone mit konzentrierten Parametern und aufgeprägter Heizleistung \dot{Q}_H . ϑ_W beschreibt eine mittlere Wandtemperatur, ϑ_i die mittlere Temperatur massiver Innenbauteile sowie der Raumluft.

Bei diesem Modell sind folgende Vereinfachungen verglichen mit der in Abschnitt 2.4 vorgestellten detaillierten Modellbildung vorgenommen worden:

1. Die thermische Kapazität der Außenwände ist in C_w und ihr thermischer Widerstand in R_a zusammengefaßt. Das in Abschnitt 2.4 verwendete Wandmodell mit verteilten Parametern repräsentiert die thermischen Eigenschaften der Wand durch eine Serienschaltung von Widerstands-Kapazitätselementen. Entsprechend Abschnitt A.3 des Anhangs entspricht eine solche Serienschaltung von PT1-Gliedern dem Übertragungsverhalten eines PTn-Gliedes. Dieses wird durch das hier verwendete PT1-Glied bestehend aus C_w und R_a approximiert. Weiterhin wird nur ein PT1-Glied zur Beschreibung aller Außenwände, Fenster und des Übertragungsverhaltens am Boden verwendet. Die entsprechenden Parameter sind daher Mittelwerte der thermischen Parameter der einzelnen Komponenten.
2. Die thermische Kapazität von Raumluft und Innenbauteilen wird im Parameter C_i zusammengefaßt. Dabei wird angenommen, daß Raumluft und Innenbauteile die gleiche Temperatur ϑ_i (im weiteren Raum- oder Innentemperatur genannt) aufweisen. Wärme wird zwischen den wirksamen Kapazitäten der Außenbauteile mit der Temperatur ϑ_{oi} und den Innenbauteilen über den Wärmeübergangswiderstand R_{oi} übertragen.
3. Wärmeströme aus anderen Zonen des Gebäudes werden als klein im Vergleich zu den berücksichtigten Wärmeströmen zwischen Raum und Umgebung angesehen und daher vernachlässigt. Dies ist möglich, sofern die Raumtemperaturen in benachbarten Zonen sich nicht stark von der Raumtemperatur der betrachteten Zone unterscheiden. Unbeheizte Zonen ohne hohe Solareinträge (Dachboden, Abstellräume etc.) wirken sich im Modell durch eine Erhöhung des mittleren Wärmewiderstandes der Umschließungswände zur Umgebung aus. An das Erdreich grenzende Umschließungsflächen oder Nachbarräume (z.B. Keller) werden durch diese Darstellung nicht erfaßt. Der Verlustwärmestrom kann jedoch näherungsweise als konstant angesehen werden und wirkt daher lediglich als Offset. Solare Wärmegewinne aus Nachbarzonen (z.B. Wintergärten) können bei geringer Zeitverzögerung durch die die direkten Gewinne be-

schreibende Stromquelle beschrieben werden. Bei großer Zeitverzögerung wirken sie wie interne Gewinne als ungemessene Störgrößen.

4. Bei vielen Heizsystemen wird die Heizleistung durch Konvektion an die Raumluft und Strahlung an die Oberflächen übertragen. Die Oberflächen geben wiederum Wärme durch Konvektion an die Raumluft ab. Hier wird angenommen, daß Q_H nur unmittelbar auf die Innentemperatur wirkt, das heißt, die parallel geschalteten Widerstände für konvektiven und Strahlungsübergang werden zusammengefaßt.
5. Es wird angenommen, daß die effektive solare Empfangsfläche sowie der g-Wert der transparenten Bauteile (zusammengefaßt im Faktor A_{eff}) zeitlich konstant sind.

Für die mit Kapazitäten belegten Punkte lassen sich folgende Energiebilanzgleichungen aufstellen:

$$C_w \frac{d\vartheta_{oi}}{dt} = \frac{\vartheta_a - \vartheta_{oi}}{R_a} + \frac{\vartheta_i - \vartheta_{oi}}{R_{oi}} + A_{eff} \cdot G_{vs} \quad (2.26)$$

$$C_i \frac{d\vartheta_i}{dt} = \frac{\vartheta_{oi} - \vartheta_i}{R_{oi}} + \frac{\vartheta_a - \vartheta_i}{R_L} + \dot{Q}_H \quad (2.27)$$

Dabei entspricht ϑ_{oi} der mittleren Temperatur der Umschließungsflächen und ϑ_i der Raumlufttemperatur. Entsprechend den Regeln der Berechnung elektrischer Netzwerke stellen die Temperaturen Potentiale dar. Die Bilanzgleichungen ergeben sich jedoch aus der Betrachtung von Potentialdifferenzen. Daher sind die Temperaturen auf ein „Nullpotential“ zu beziehen, welches zunächst frei wählbar ist.

Durch Umstellen von Gleichung 2.27 erhält man einen Ausdruck für ϑ_{oi} . Ableiten dieser Gleichung nach der Zeit liefert:

$$\frac{d\vartheta_{oi}}{dt} = R_{oi} C_i \frac{d^2 \vartheta_i}{dt^2} + \left(1 + \frac{R_{oi}}{R_L}\right) \frac{d\vartheta_i}{dt} - \frac{R_{oi}}{R_L} \frac{d\vartheta_a}{dt} - R_{oi} \ddot{Q}_H \quad (2.28)$$

Setzt man diese beiden Ausdrücke in Gl. 2.26 ein, so erhält man nach Umstellen:

$$\begin{aligned} & \frac{C_w C_i R_{oi} R_a R_L}{R_{oi} + R_a + R_L} \cdot \frac{d^2 \vartheta_i}{dt^2} + \frac{C_w R_L R_a + C_w R_{oi} R_a + C_i R_{oi} R_L + C_i R_L R_a}{R_{oi} + R_a + R_L} \cdot \frac{d\vartheta_i}{dt} + \vartheta_i \\ &= \frac{C_w R_{oi} R_a}{R_{oi} + R_a + R_L} \cdot \frac{d\vartheta_a}{dt} + \vartheta_a + \frac{C_w R_{oi} R_a R_L}{R_{oi} + R_a + R_L} \cdot \ddot{Q}_H + \\ &+ \frac{R_{oi} R_L + R_a R_L}{R_{oi} + R_a + R_L} \cdot \dot{Q}_H + \frac{R_a R_L}{R_{oi} + R_a + R_L} \cdot A_{eff} \cdot G_{vs} \end{aligned} \quad (2.29)$$

Die Modellausgangsgröße ϑ_i tritt selbst, sowie in ihrer 1. und 2. Ableitung auf. Entsprechend der Ableitungen aus dem Anhang A.3 entspricht Gleichung 2.29 der Übertragungsgleichung eines Verzögerungsgliedes 2. Ordnung. Der Koeffizient vor der 2. Ableitung der Raumlufttemperatur hat die Dimension [s²]. Er kann als Produkt der beiden Zeitkonstanten des Systems interpretiert werden. Der Koeffizient vor der 1. Ableitung hat die Dimension [s]. Er kann durch den Koeffizienten $2DT$ ersetzt werden, welcher sich auch als Summe der beiden Zeitkonstanten des Systems interpretieren läßt. D ist der Dämpfungsgrad. Für eine übersichtlichere Schreibweise wird $y = \vartheta_i$, $u_1 = \vartheta_a$, $u_2 = \dot{Q}_H$ und $u_3 = G_{vs}$ sowie die

Koeffizienten auf der rechten Seite durch die Bezeichnung k_{xz} ersetzt. Damit ergibt sich die folgende Differentialgleichung zur Beschreibung des Übertragungsverhaltens:

$$T^2\ddot{y} + 2DT\dot{y} + y = k_{11}u_1 + k_{12}\dot{u}_1 + k_{21}u_2 + k_{22}\dot{u}_2 + k_{31}u_3 \quad . \quad (2.30)$$

Die Zeitkonstante T des Systems hängt von sämtlichen auftretenden Widerständen und Kapazitäten ab. Wird C_i klein und damit vernachlässigbar, ergibt sich eine Differentialgleichung 1. Ordnung, deren Zeitkonstante durch die Wandkapazitäten bestimmt wird. Ob C_i vernachlässigbar ist, hängt im wesentlichen vom Gebäudeaufbau ab. Ein Modell, das für möglichst viele Gebäude gültig ist, sollte daher auch den Einfluß 2. Ordnung berücksichtigen.

Werden zur Modellierung des thermischen Verhaltens einer Wand mehr Kapazitäten und Widerstände verwendet, ergibt sich entsprechend eine Differentialgleichung höherer Ordnung (mit höheren Ableitungen der Eingangsgrößen). Dies führt jedoch zu einer größeren Anzahl von Koeffizienten, was sich auf eine Modellidentifikation ungünstig auswirkt.

Durch Ersetzen der Differentialquotienten durch Differenzenquotienten entsprechend Gl. A.8 im Anhang und Rückwärtsverschieben der Indizes um 2 Zeitschritte erhält man eine Differenzengleichung 2. Ordnung zur Systembeschreibung:

$$\begin{aligned} & y(t) + 2 \left(\frac{D\Delta t}{T} - 1 \right) y(t-1) + 2 \left(1 - \frac{D\Delta t}{T} \right) y(t-2) \\ &= \frac{k_{12}\Delta t}{T^2} u_1(t-1) + \left(\frac{k_{11}\Delta t^2}{T^2} - \frac{k_{12}\Delta t}{T^2} \right) u_1(t-2) + \frac{k_{22}\Delta t}{T^2} u_2(t-1) + \\ &+ \left(\frac{k_{21}\Delta t^2}{T^2} - \frac{k_{22}\Delta t}{T^2} \right) u_2(t-2) + \frac{k_{31}\Delta t^2}{T^2} u_3(t-2) \quad . \end{aligned} \quad (2.31)$$

Die Ausgangsgröße zum aktuellen Zeitpunkt ergibt sich also als gewichtete Summe der Ausgangsgröße und der Eingangsgrößen zu den vergangenen beiden Zeitschritten. Damit ist das Modell des Gebäudes mit konzentrierten Parametern als Differenzengleichungsmodell formuliert.

Fall 2: Vorlauftemperatur bekannt

Ist die Heizleistung nicht aufgeprägt, sondern über die Vorlauftemperatur oder den Massenstrom beeinflusst, so stellt sie sich entsprechend der Temperaturdifferenz zwischen wärmeabgebenden Flächen und Raumluft bzw. Umgebungsflächen ein. Bei Nutzung der Vorlauftemperatur als Stellgröße kann das in Abb. 2.17 gezeigte Modell als Ausgangsbasis für die Aufstellung der Systemgleichungen genutzt werden. Dabei repräsentiert R_{Hi} den Wärmeübergangswiderstand zwischen wärmeabgebenden Flächen und Raumluft bzw. Umgebungsflächen. In R_{HR} und C_{HR} sind thermische Kapazität und Wärmewiderstand des Wärmeverteilsystems (Verrohrung und Heizkörper) konzentriert. Die im Realfall vorhandene Totzeit zwischen dem Zeitpunkt einer Veränderung der Vorlauftemperatur und der Reaktion des Heizsystems wird vernachlässigt, da sie für den vorliegenden Anwendungsfall klein gegenüber dem Zeitschritt der Modellidentifikation ist. Bei der hier vorgestellten Entwicklung wurde ein Zeitschritt von 15 min gewählt. Die Totzeit liegt bei kleinen Gebäuden im Bereich weniger Minuten. Die experimentellen Untersuchungen bestätigen die Richtigkeit dieser Annahme für Experimentiergebäude (vgl. Abbildung 5.16 auf Seite 154). Bei sehr trägen Systemen und langen Leitungswegen kann man das aus diesen Betrachtungen

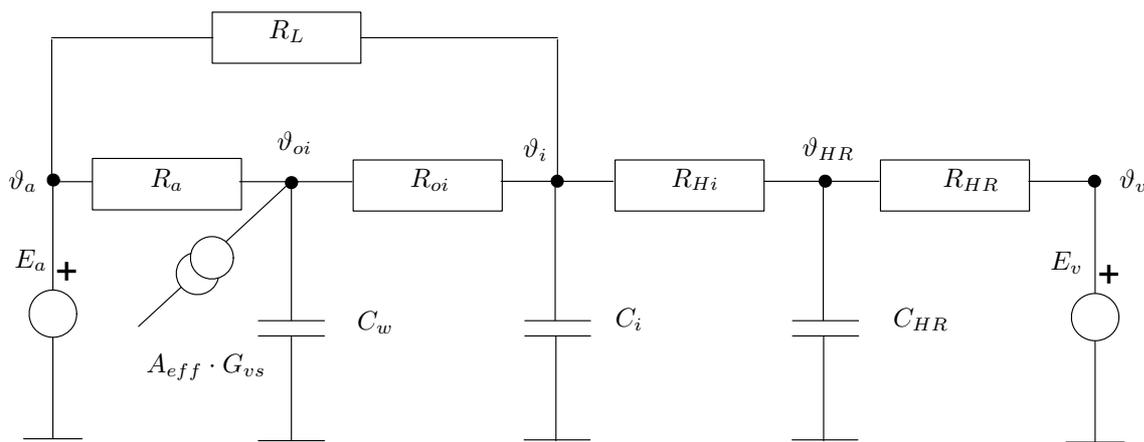


Abb. 2.17. Modell einer Zone mit konzentrierten Parametern und Vorlauftemperatur als Heizgröße

resultierende Differenzgleichungsmodell anpassen, indem man die Eingangsgrößen um die entsprechende Anzahl der Zeitschritte, die der Totzeit entsprechen, zurückverschiebt.

Bei Anwendung von Maschen- und Knotensatz nach Kirchhoff auf das in Abb. 2.17 dargestellte Netzwerk erhält man eine Differentialgleichung der Form:

$$T^2 \ddot{y} + 2DT \dot{y} + y = k_{11} u_1 + k_{12} \dot{u}_1 + k_{21} u_2 + k_{31} u_3 \quad (2.32)$$

wobei u_2 die Vorlauftemperatur und u_3 die Einstrahlung darstellt. Diese Gleichung läßt sich analog zu Gleichung 2.31 wieder in eine Differenzgleichung 2. Ordnung überführen.

Die vorstehenden Überlegungen zeigen, daß zur Beschreibung des dynamischen Verhaltens einer Vielzahl von Gebäuden mit Differenzgleichungsmodellen mindestens ein Modell 2. Ordnung angesetzt werden sollte. Zweifelsohne lassen sich aber auch die hier in einem thermischen Widerstand und Kapazität konzentrierten Verzögerungsglieder zur genaueren Beschreibung in mehrere Glieder aufspalten. Somit sind auch Differenzgleichungsmodelle höherer Ordnung zur Beschreibung geeignet. Wenn die thermische Kapazität der Raumluft und der Innenbauteile gegenüber der in den Außenbauteilen konzentrierten Kapazität vernachlässigbar ist, kann auch ein Modell erster Ordnung ausreichend genau sein. Die in diesem Abschnitt diskutierten Modelle werden für die selbstadaptierende Funktion der entwickelten Heizungsregelung in verallgemeinerter Form eingesetzt (siehe Abschnitt 3.2.1) und hinsichtlich ihrer Eignung zur Beschreibung des dynamischen Gebäudeverhaltens untersucht.

Dieses Kapitel diente der Darstellung der grundlegenden Zusammenhänge zwischen den Zielgrößen der Heizungsregelung und den auf sie wirkenden Einflußgrößen. Ausgehend von einer Energiebilanz und Wärmetransportgleichungen wurden Möglichkeiten zur Berechnung von Wärmeströmen abgeleitet. Diese finden in der für die theoretischen Untersuchungen eingesetzten Simulationsumgebung Verwendung. Für das im Regler eingesetzte Modell einer thermischen Zone des Gebäudes sind erhebliche Vereinfachungen in der Modellbildung und eine Reduktion der Einflußgrößen notwendig. Aus dem vereinfachten thermischen Netzwerkmodell konnte ein Differenzgleichungsmodell 2. Ordnung abgeleitet werden. Eine Untersuchung der notwendigen Modellordnung zur Beschreibung des dynamischen Verhaltens wird im folgenden Kapitel(Abschnitt 3.5.1) vorgenommen.

Kapitel 3

Der Regelalgorithmus

In diesem Kapitel wird, aufbauend auf der Theorie der vorausschauenden Regelung, ein Algorithmus zur Regelung einer Pumpenwarmwasserheizung entwickelt. Der verwendete Ansatz der *Dynamic Matrix Control* (DMC) ist, wie die *Generalized Predictive Control* (GPC) ein Spezialfall der allgemeinen Theorie der modellbasierten vorausschauenden Regelung *Model(based) Predictive Control* (MPC).

In Abschnitt 3.1 wird zunächst das Grundprinzip einer vorausschauenden Regelung vorgestellt. Die Abschnitte 3.2 bis 3.3 dienen der Erläuterung der mathematischen Basis der einzelnen Komponenten des Algorithmus. Zur Darlegung der Theorie wird zunächst eine allgemeine Schreibweise verwendet, da diese in der Regel übersichtlicher ist und dem Leser die Übertragung auf andere Anwendungen erleichtert. Im Anschluß wird die spezielle Formulierung für die Regelung einer Warmwasserheizung formuliert.

Im Abschnitt 3.4 wird die Einbindung des Regelalgorithmus in ein übergeordnetes Programm und die Meßtechnik vorgenommen. Untersuchungen zur Konfiguration (Abschnitt 3.5) dienen zur Begründung der ausgewählten Einstellungen.

3.1 Regelungsprinzipien

Die Besonderheiten des vorausschauenden Regelungsprinzips lassen sich vorteilhaft durch einen Vergleich mit einem herkömmlichen Regelungsprinzip verdeutlichen. Daher wird vorab eine kurze Einführung in letzteres Prinzip vorgenommen und eine Erläuterung einiger allgemeiner Begriffe in Bezug auf die Anwendung der Regelung einer Pumpenwarmwasserheizung gegeben.

3.1.1 Das klassische Regelungsprinzip

Eine Regelung ist eine Anordnung, die Informationen aus der Beobachtung einer Strecke (System) zur Veränderung einer Stellgröße derart verwendet, daß eine Regelgröße (Ausgangsgröße) trotz des Einwirkens von Störungen an einen Sollwert angeglichen wird [38]. Den prinzipiellen Aufbau einer Regelung zeigt Abbildung 3.1. Die Regelgröße wird laufend von einer Meßeinrichtung gemessen, bzw. ihr Wert wird auf die Rückführgröße abgebildet. In einem Vergleichsglied wird die Differenz zwischen einer Führungsgröße (Sollwert) und der Rückführgröße gebildet. Die Regeldifferenz wird in einem Regelglied zur Einstellung

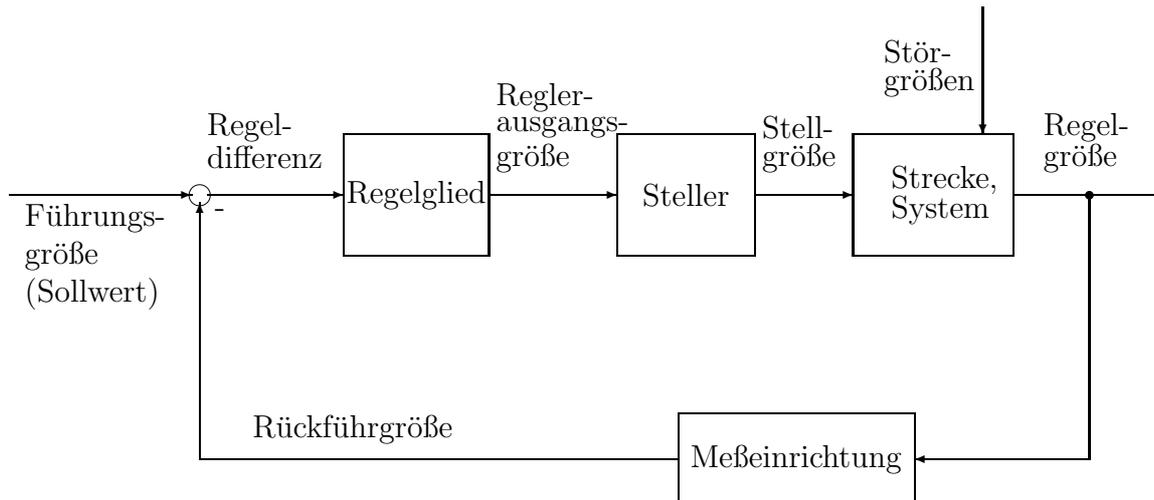


Abb. 3.1. Zur Erläuterung des klassischen Regelungsprinzips (nach [38])

einer Reglerausgangsgröße verwendet. Ein Steller kann dieses Signal noch in eine geeignete Größe (Stellgröße) zum Antrieb des Stellglieds wandeln. Die Stellgröße und Störgrößen wirken innerhalb der Strecke (System) auf die Regelgröße (Systemausgangsgröße).

Für den Anwendungsfall einer Heizungsregelung ist die Raumtemperatur die Regelgröße. Als Stellgröße dient die Heizleistung. Da die Heizleistung bei Warmwasserheizungen nicht direkt einstellbar ist, nutzt man den Massenstrom oder die Vorlauftemperatur als Stellgröße. Als Strecke wirkt der Übergang von der Stellgröße auf die Raumtemperatur. Eine Diskussion der auftretenden Effekte der Strecke bei Verwendung der Vorlauftemperatur als Stellgröße wurde in Abschnitt 2.4 vorgenommen.

Das dynamische Verhalten der Strecke (System) bewirkt eine Verzögerung zwischen der Änderung der Stellgröße und der Reaktion der Regelgröße. Durch den Entwurf des Regelgliedes versucht man, diese Dynamik zum Teil zu kompensieren. Daher realisiert man Regler mit Proportional-Verhalten (P-Regler), die die Höhe der Regelabweichung verstärken, Regler mit integralem Verhalten (I-Regler), die auf die Dauer der Regelabweichung reagieren, sowie Regler mit differenzierendem Verhalten (D-Regler), die durch die Geschwindigkeit der Änderung der Regelabweichung beeinflusst werden. Häufiger als Regler mit reinem P-, I-, oder D-Verhalten werden Regler mit Kombinationen dieser dynamischen Eigenschaften verwendet (PI-, PD-, PID-Regler, etc.). Für die korrekte Auslegung eines klassischen Reglers ist die Kenntnis des dynamischen Verhaltens der Strecke Voraussetzung¹. Eine wichtige Eigenschaft des klassischen Regelungsprinzips ist also, daß die Ermittlung der Stellgröße auf vergangenen Regelabweichungen beruht. Dies führt dazu, daß die Regelgröße bei trägen Strecken nur schwierig regelbar ist.

¹Die Reglerparameter können auch selbstlernend ermittelt werden.

3.1.2 Das vorausschauende Regelungsprinzip

Die vorausschauende Regelung unterscheidet sich von der herkömmlichen Regelung zunächst dadurch, daß die Regeldifferenz eine *diskrete Funktion* $e(k+j|k)$ ist, die sich aus der Funktion der *zukünftigen* Sollwerte $y_r(k+j|k)$ und der Funktion der *zukünftigen* Regelgröße $\hat{y}(k+j|k)$ berechnet (siehe Abbildung 3.2).

$$e(k+j|k) = y_r(k+j|k) - \hat{y}(k+j|k) \quad . \quad (3.1)$$

Dabei bedeutet $k+j|k$: „des zukünftigen Zeitschritts $k+j$, ermittelt zum aktuellen Zeitschritt k “. Die Regeldifferenz wird für einen Bereich von $j = N1$ bis $j = P$ berechnet. $N1$

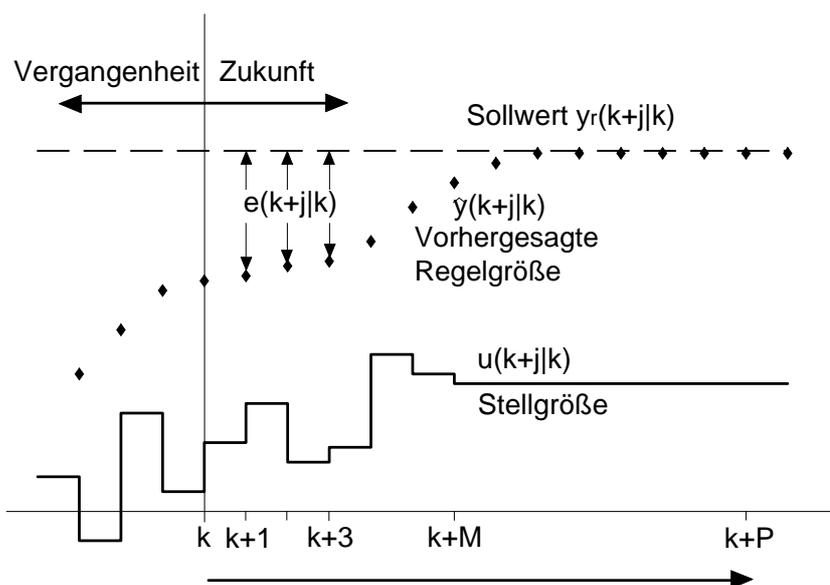


Abb. 3.2. Beispielhafter Verlauf von Stell- und Regelgröße für die vorausschauende Regelung [61]. Zum aktuellen Zeitpunkt k wird die Differenz zwischen vorhergesagter Regelgröße $\hat{y}(k+j|k)$ und zukünftigem Sollwert $y_r(k+j|k)$ bis zum Vorhersagehorizont P berechnet. Der zukünftige Stellgrößenverlauf $u(k+j|k)$ bis zum Regelhorizont M soll einen optimalen Angleich der Regelgröße an den Sollwert bewirken

ist die Anzahl der Zeitschritte, die der Totzeit der Strecke entspricht und P der sogenannte Vorhersagehorizont. Die Funktion der Regeldifferenz ist in Analogie zur klassischen Regelung Einganggröße für das Regelglied, welches aber hier einen *Stellgrößenverlauf* $u(k+j|k)$ für $j = 1 \dots M$ berechnet. M wird Regelhorizont genannt.

Werden die Werte des berechneten Stellgrößenverlaufs nacheinander angewendet, so würde dies einer Steuerung entsprechen. Bei einer Regelung wird jeweils nur der erste Wert tatsächlich angewendet und die Berechnung beim nächsten Zeitschritt wiederholt. Man benötigt demzufolge für die vorausschauende Regelung zum einen den zukünftigen Verlauf der Regelgröße, zum anderen ein Verfahren, welches aus der Funktion der Regeldifferenz einen optimalen Stellgrößenverlauf berechnet. Eine schematische Darstellung des Verfahrens zeigt Abbildung 3.3. Ein Modell M mit dem Parametervektor θ dient zur Vorhersage des zukünftigen Verhaltens der Regelstrecke. Die Vorhersage der Regelgröße (Modellausgangsgröße) besteht aus 2 Komponenten [15]. Die freie Systemantwort $\hat{y}_o(k+j|k)$ ist das erwartete Verhalten der Regelgröße $\hat{y}(k+j)$, wenn keine zukünftigen Regeleinriffe vorgenommen werden.

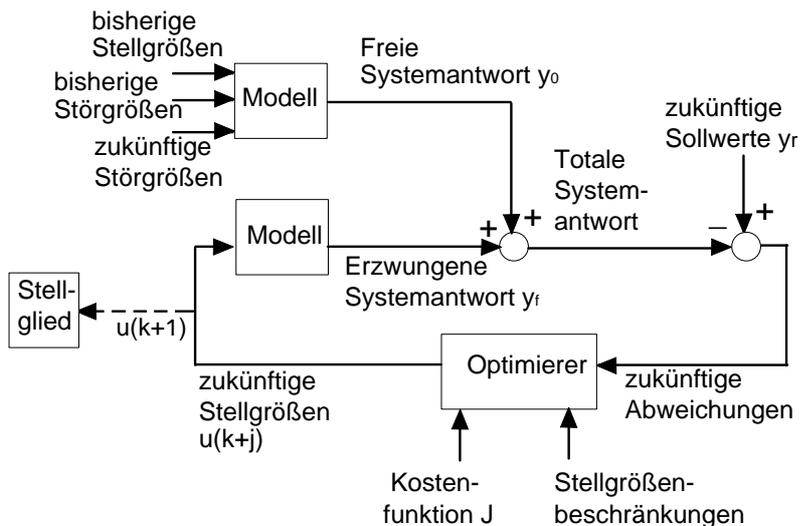


Abb. 3.3. Berechnungsverfahren für den Stellgrößenverlauf bei der vorausschauenden Regelung. Ein Modell der Strecke dient zur Vorhersage der freien und der erzwungenen Systemantwort (Regelgröße). Die Superposition wird mit den zukünftigen Sollwerten verglichen. Die Abweichungen werden im Optimierer zur Berechnung der zukünftigen Stellgröße (Regeleinriffe) genutzt. [15]

Die erzwungene Systemantwort $\hat{y}_f(k+j|k)$ ist die zusätzliche Komponente der Systemantwort aufgrund einer vorgegebenen Sequenz von zukünftigen Regeleinriffen. Die Vorhersagen werden jeweils zum Zeitpunkt k für einen Vorhersagehorizont $k+j=P$ getroffen.

Bei linearen Systemen kann mittels Superposition die totale Systemantwort bestimmt werden:

$$\hat{y}(k+j|k) = y_f(k+j|k) + y_o(k+j|k) \quad . \quad (3.2)$$

Die zukünftigen Regeleinriffe sind derart zu wählen, daß die Sollwerte $y_r(k+j|k)$ möglichst schnell, doch ohne zu großen Regelaufwand erreicht werden. Dies erreicht man durch die Minimierung einer Kostenfunktion der Form:

$$J = \sum_{j=N_1}^P Q_j (y_r(k+j) - \hat{y}(k+j|k))^2 + \sum_{j=1}^M R_j \Delta u(k+j-1)^2 \quad . \quad (3.3)$$

Der erste Term der Kostenfunktion enthält die zukünftigen Abweichungen zwischen vorhergesagter Regelgröße und Sollwert, der zweite die zukünftigen Änderungen der Stellgröße. Als Wichtungsfaktoren zwischen der Sollwertabweichung und der Stellgrößenänderung dienen die Parameter Q_j und R_j , die zeitabhängig sein können.

Es können auch Kostenfunktionen definiert werden, die die tatsächliche Höhe der Stellgröße berücksichtigen.² Allerdings führen solche Kostenfunktionen zu einer bleibenden Regelabweichung, die mit zunehmendem R schnell ansteigt [77]. Aus diesem Grund wird in vielen

²Dies ist insbesondere interessant im Hinblick auf die hier vorgestellte Anwendung: Die Stellgröße ist die Vorlauftemperatur oder auch die Heizleistung, der Optimierer würde also direkt zwischen Komfort und Energieeinsparung wichten. In Abschnitt 3.5.3 wird eine Untersuchung einer solchen Kostenfunktion für den Einsatz bei einer Heizungsregelung vorgestellt.

vorausschauenden Reglern statt der Stellgröße das Stellgrößeninkrement in der Kostenfunktion verwendet.

Eine Erhöhung von R gegenüber Q führt dann zu einer trägeren Reaktion der Stellgröße auf Soll-Istwert-Abweichungen. Für $R = 0$ spielen Stellgrößenänderungen keine Rolle mehr und der Regler strebt schnellstmöglich den Sollwert an.

In der Literatur wird gelegentlich zum Verständnis des vorausschauenden Regelungsprinzips eine Ähnlichkeitsbetrachtung zum Regelungsprinzip beim Autofahren vorgenommen: „Der Fahrer kennt die gewünschte Referenztrajektorie (Sollwertverlauf) für einen begrenzten Regelhorizont und entscheidet unter Berücksichtigung der Charakteristik des Fahrzeugs (mentales Modell des Autos), welche Regelaktionen (Beschleunigen, Bremsen, Lenken) notwendig sind, um der gewünschten Trajektorie zu folgen. Jeweils nur die erste der ermittelten Regelaktionen wird zu jedem Augenblick angewandt und die Prozedur wiederholt im Sinne eines gleitenden Horizonts. Bei Nutzung konventioneller Regelprinzipien (z.B. PID) basieren die Regelaktionen auf vergangenen Fehlern. Wird die Analogie des Autofahrens erweitert ... so ist das konventionelle Regelprinzip äquivalent zum Autofahren nur unter Nutzung des Rückspiegels.“ [12]

Es existiert eine Reihe von vorausschauenden Regelungsalgorithmen, die auf den in diesem Abschnitt erläuterten Prinzipien basieren. Unterschiede treten besonders beim Modell der Strecke und der Integration von Parameteridentifikationsmechanismen auf. Eine Übersicht über verschiedene Ansätze findet sich in [77] und [12]. Verbreitet ist eine Vorhersage der Systemausgangsgrößen mit Hilfe von Transferfunktionenmodellen [73], [50], [16]. Ebenso finden Sprungantwortmodelle [75], [61] und Zustandsraummodelle [61] Verwendung. Die Bestimmung der Modelle und ihrer Parameter kann vorab oder während des Prozesses erfolgen (adaptives Verfahren). Eine kombinierte Vorhersage und Parameteradaption wird in [35], [73] und [50] eingesetzt.

In der hier vorgestellten Entwicklung dienen Sprung- bzw. Impulsantwortmodelle zur Vorhersage der Systemausgangsgrößen. Diese Art der vorausschauenden Regelung wird auch *Dynamic Matrix Control (DMC)* genannt. Die Verwendung solcher Modelle ist auf stabile Prozesse beschränkt. Da die Raumtemperatur eines Gebäudes jedoch im allgemeinen stabil auf ihre Einflußgrößen reagiert, kann das vergleichsweise mit wenig rechnerischem Aufwand verbundene *DMC*-Verfahren hier eingesetzt werden.

In diesem Abschnitt wurde das allgemeine Prinzip der vorausschauenden Regelung erläutert und zu einem klassischen Regelungsprinzip in Beziehung gesetzt. Die vorausschauende Regelung ist besonders vorteilhaft bei trägen Strecken oder großen Totzeiten. Für die Anwendung auf eine Heizungsregelung muß entsprechend der vorangegangenen Ausführungen der zukünftige Verlauf der Regelgröße Raumtemperatur vorhergesagt werden. Dies wird im folgenden Abschnitt erläutert. Die Berechnung der Stellgröße Vorlauftemperatur aus der zukünftigen Abweichung zum Sollwert ist in Abschnitt 3.3 dargelegt.

3.2 Die Vorhersage der Regelgröße Raumtemperatur

Die Raumtemperatur wird beim Verfahren der *Dynamic Matrix Control (DMC)* mit Hilfe von Sprungantwortmodellen (vgl. auch Anhang A.2.1) vorhergesagt. Eine direkte Identifikation der Modellparameter aus Meßdaten ist jedoch nicht geeignet. Aus diesem Grund wird für die Systembeschreibung ein Differenzgleichungsmodell eingesetzt (Abschnitt 3.2.1).

Nach Identifikation der Parameter wird dieses Modell für die Vorhersage der Regelgröße Raumtemperatur nach dem *DMC*-Verfahren in ein Sprungantwortmodell umgewandelt. Die Berechnung der Vorhersage wird in Abschnitt 3.2.2 erläutert. Sie bezieht auch zukünftige Verläufe der Wettergrößen Außentemperatur und Einstrahlung mit ein. Eine Erläuterung des Algorithmus zur Wettervorhersage findet sich in Abschnitt 3.2.3.

3.2.1 Modell des Systems Gebäude

In Abschnitt 2.4 wurden die Modelleingangsgrößen, die für die Heizungsregelung betrachtet werden, in ihrer Wirkungsweise vorgestellt. Als die im vorliegenden Fall wichtigsten meßbaren treibende Kräfte für die Raumtemperatur werden einbezogen [14]:

- eine Heizgröße
- die Außentemperatur
- die solare Einstrahlung.

Für die realisierte Regelung einer Warmwasserheizung dient die Vorlauftemperatur als Heizgröße. Weitere auch prinzipiell meßbare Einflußgrößen werden aus folgenden Gründen nicht betrachtet: Zum einen erhöht jede weitere betrachtete Größe die Anzahl der zu identifizierenden Parameter entsprechend der Ordnung des Differenzgleichungsmodells. Zusätzlich erhöht sich mit der Anzahl der zu identifizierenden Parameter deren Fehler. Zum anderen sollten im Hinblick auf anzustrebende geringe Kosten des Regelgerätes die Anzahl der Sensoren und die Rechenzeit klein gehalten werden. Es ist daher sowohl aus theoretischen als auch aus praktischen Gesichtspunkten heraus sinnvoll, sich in der Modellbildung auf die wichtigsten Einflußgrößen zu konzentrieren. Wie der Regelalgorithmus auf ungemessene Störgrößen reagiert, wurde im Rahmen der Simulationstests untersucht (siehe Abschnitt 4.3.3).

Das Differenzgleichungsmodell aus Abschnitt 2.5 wird nunmehr verallgemeinert, um eine Vielzahl von Gebäuden und Heizsystemen dynamisch abzubilden. Die Betrachtungen eines physikalischen Modells mit konzentrierten Parametern zeigten, daß zur Beschreibung des dynamischen Gebäudeverhaltens mindestens ein Differenzgleichungsmodell 2. Ordnung verwendet werden sollte (Gleichungen 2.30, 2.31 und 2.32).

Daher wird ein verallgemeinertes Differenzgleichungsmodell 2. Ordnung mit 3 Eingangsgrößen (MISO: Multi-Input-Single-Output) folgendermaßen angesetzt (vgl. AnhangA.2.2):

$$\begin{aligned}
 y(k) + a_1y(k-1) + a_2y(k-2) &= b_{11}u_1(k-1) + b_{12}u_1(k-2) + \\
 &+ b_{21}u_2(k-1) + b_{22}u_2(k-2) + \\
 &+ b_{31}u_3(k-1) + b_{32}u_3(k-2) \quad , \quad (3.4)
 \end{aligned}$$

wobei y der Raumtemperatur (Modellausgangsgröße), u_1 der Außentemperatur, u_2 der solaren Einstrahlung und u_3 der Vorlauftemperatur (Modelleingangsgrößen) entspricht. In der englischen Literatur wird diese Art von Modell als ARX-Modell (**A**uto**R**egressive Model with **eX**ogeneous input) bezeichnet.

Wie in Abschnitt 2.5.2 erläutert, sind die Temperaturen des Modells mit konzentrierten Parametern noch auf ein „Nullpotential“ zu beziehen. Als Bezugspotential würde bei der

Verwendung der Celsius-Temperaturskala automatisch deren Nullpunkt auftreten. Untersuchungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit zeigten, daß die mittlere Sollraumtemperatur ein geeigneteres und für diesen Anwendungsfall auch physikalisch begründetes Bezugspotential darstellt, da die *Differenzen* zwischen Raumtemperatur und Außen- bzw. Vorlauf-temperatur als treibende Kräfte wirken. Durch Wahl dieses Bezugspotentials entfällt der anderenfalls vorhandene „Offset“ und der eigentliche Informationsgehalt der Daten bzgl. der Wechselwirkung zwischen den Größen wird erhalten. Dies ist vorteilhaft für die Identifizierbarkeit der Modellparameter. Alle Temperaturen im Modell sind daher auf die mittlere Sollraumtemperatur bezogen.

In Polynomschreibweise ergibt sich (vgl. AnhangA.2.2):

$$\begin{aligned} A(z)Y(z) &= \sum_{i=1}^3 B_i(z)U_i(z) & (3.5) \\ A(z) &= 1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} \\ B_i(z) &= b_{i0} + b_{i1}z^{-1} + b_{i2}z^{-2} \quad . \end{aligned}$$

Hier ist die Ordnung nm der Polynome A und B jeweils gleich 2. Die Anzahl der Verzögerungszeitschritte von Eingangs- zu Ausgangsgröße nk wird gleich 1 gewählt, da eine unmittelbare Reaktion der Raumtemperatur auf die betrachteten Eingangsgrößen physikalisch nicht möglich ist.

Damit ergeben sich die Koeffizienten b_{i0} zu null, wie hier in der programmiertechnisch praktikablen Matrixschreibweise dargestellt:

$$\mathbf{AY} = \mathbf{BU} \quad , \quad (3.6)$$

mit

$$\begin{bmatrix} 1 & a_1 & a_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y(k) \\ y(k-1) \\ y(k-2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & b_{11} & b_{12} \\ 0 & b_{21} & b_{22} \\ 0 & b_{31} & b_{32} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} u_1(k) & u_2(k) & u_3(k) \\ u_1(k-1) & u_2(k-1) & u_3(k-1) \\ u_1(k-2) & u_2(k-2) & u_3(k-2) \end{bmatrix} \quad .$$

Die Identifikation der Modellparameter erfolgt mit Hilfe der im Anhang A.4.2 beschriebenen rekursiven Methode der kleinsten Quadrate. Die rekursive Methode bietet sich bei wiederholter Identifikation aufgrund des erheblich reduzierten Speicher- und Rechenzeitbedarfs an. Zur Identifikation ordnet man die Meßwerte dem Regressionsvektor

$$\varphi^T(k) = [-y(k-1) \quad -y(k-2) \quad u_1(k-1) \quad u_1(k-2) \dots u_3(k-2)]$$

und die Parameter dem Parametervektor

$$\theta = [a_1 \quad a_2 \quad b_{11} \quad b_{12} \dots b_{32}]^T$$

zu. Durch Multiplikation von $\varphi^T(k)$ und θ erhält man ein lineares Regressionsmodell:

$$y(k) = \varphi^T(k)\theta + \varepsilon(k) \quad (3.7)$$

zur Ermittlung der Modellparameter in θ . Das Verfahren ist im Anhang A.4 beschrieben. Untersuchungen zur Identifikationsmethode werden in Abschnitt 3.5.2 vorgestellt.

3.2.2 Vorhersage der Regelgröße

Die Vorhersage der Regelgröße Raumtemperatur wird bei der *Dynamic Matrix Control (DMC)* mit Hilfe eines Sprungantwortmodells des Systems (Strecke) vorgenommen. Auf die Systemausgangsgrößen wirken die Stellgröße sowie gemessene und ungemessene Störungen (siehe Abbildung 3.4). Diese Einflüsse werden auch als treibende Kräfte bezeichnet. Stellgrößen und gemessene Störgrößen werden im folgenden auch Modelleingangsgößen genannt.

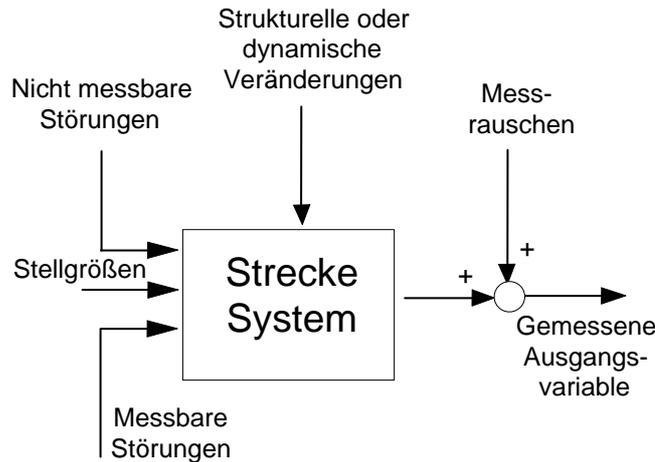


Abb. 3.4. Einflüsse auf die Regelgröße [61]: auf die Strecke wirkt neben der Stellgröße eine Anzahl von Störgrößen, die zum Teil meßbar sind. Weiterhin kann sich das dynamische Verhalten der Strecke während des Betriebes ändern. Zusätzlich sind dem Meßsignal der Regelgröße Einflüsse des Meßrauschens überlagert.

Um aus den ermittelten Koeffizienten des Differenzgleichungsmodells die Sprungantworten der einzelnen Eingangsgrößen zu erhalten, wird der Verlauf der Ausgangsgröße $y(k)$ bei Verwendung eines Einheitssprunges der jeweiligen Einheitsgröße berechnet. Dazu wird die betrachtete Eingangsgröße gleich dem Einheitsvektor, die anderen Eingangsgrößen gleich dem Nullvektor gesetzt. Durch Iteration der Gleichung 3.6 werden die Einheitssprungantworten erhalten.

Die Antwort eines Systems y_k auf eine Folge von Sprüngen der Eingangsgröße u_{k-i} läßt sich entsprechend Gleichung A.7 auf Seite 171 berechnen. In Matrixschreibweise ergibt sich der Vektor der Ausgangsgrößen für einen Vorhersagehorizont P:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ s_2 & s_1 & 0 & \dots & 0 \\ s_3 & s_2 & s_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_P & s_{P-1} & s_{P-2} & \dots & s_{P-(M-1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_0 \\ \Delta u_1 \\ \Delta u_2 \\ \vdots \\ \Delta u_{M-1} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

oder in zusammengefaßter Schreibweise

$$\mathbf{Y} = \mathbf{S}\mathbf{U} \quad (3.9)$$

\mathbf{S} wird dynamische Matrix genannt. Der Vektor der Eingangsgrößensprünge ist von der Dimension $M \times 1$.

Bei der vorausschauenden Regelung muß zu jedem Zeitschritt die freie Systemantwort aus den vorangegangenen Einwirkungen auf das System (Stellgrößensprünge und gemessene Störgrößensprünge) und die erzwungene Systemantwort aus zukünftigen Stellgrößensprüngen bestimmt werden. Die Trennung zwischen vergangenen und zukünftigen Eingangsgrößen, die auf zukünftige Ausgangsgrößen einwirken, kann folgendermaßen vorgenommen werden [73]:

$$\hat{y}(k+j|k) = \sum_{i=1}^j \hat{s}_i \Delta \hat{u}(k+j-i|k) + \sum_{i=j+1}^{k+j} \hat{s}_i \Delta u(k+j-i) \quad . \quad (3.10)$$

Der Index j läuft von 1 bis zum Vorhersagehorizont P . Mit \hat{s}_i werden die ermittelten Sprungantwortkoeffizienten bezeichnet. Der 1. Term auf der rechten Seite von Gleichung 3.10 enthält die Wirkung zukünftiger (unbekannter) Eingangsgrößenänderungen (erzwungene Antwort) $\Delta \hat{u}(k|k), \dots, \Delta \hat{u}(k+j-1|k)$, der 2. Term die Wirkung vergangener gemessener Eingangsgrößenänderungen (freie Antwort) y_{oj} auf die Ausgangsgröße.

Für stabile Systeme geht die Sprungantwort für große k gegen eine Konstante, also $\hat{s}_i = \text{const}$, für $i = N, \dots, k+j$. Dabei ist N so gewählt, daß der wesentliche Teil der Sprungantworten erhalten bleibt und $N \ll k+j$ gilt. Damit ergibt sich folgende Umformung:

$$\sum_{i=j+1}^{k+j} \hat{s}_i \Delta u(k+j-i) \simeq \sum_{i=j+1}^{N-1} \hat{s}_i \Delta u(k+j-i) + \hat{s}_N \sum_{i=N}^{k+j} \Delta u(k+j-i) \quad . \quad (3.11)$$

Die Summe aller Eingangsgrößensprünge bis zum Zeitpunkt N in der 2. Summation ist natürlich die Eingangsgröße zu diesem Zeitpunkt selbst. Die freie Systemantwort ergibt sich damit zu:

$$y_{oj} \simeq \sum_{i=j+1}^{N-1} \hat{s}_i \Delta u(k+j-i) + \hat{s}_N u(k+j-N) \quad . \quad (3.12)$$

Die Vorhersage der Systemausgangsgröße kann von den tatsächlich eintretenden Werten aufgrund von Modellfehlern und des Einwirkens ungemessener Störungen abweichen. Daher korrigiert man die Vorhersage mit folgender rekursiver Vorschrift:

$$y_c(k+j) = \hat{y}(k+j) + (y_c(k+j-1) - \hat{y}(k+j-1)) \quad (3.13)$$

wobei der erste Wert der korrigierten Ausgangsgröße y_c gleich dem aktuellen Meßwert ist:

$$y_c(k) = y(k) \quad .$$

Die Raumtemperaturvorhersage wird in Anwendung von Gl. 3.10 bis 3.12 durch Superposition der Faltungssummen der drei betrachteten Modelleingangsgrößen mit ihren Sprungantworten erhalten.

$$\begin{aligned} \hat{\vartheta}_R(k+j|k) &= \sum_{i=1}^j \hat{s}_i \Delta \hat{\vartheta}_{VL}(k+j-i|k) + \sum_{i=j+1}^{N-1} \hat{s}_i \Delta \vartheta_{VL}(k+j-i) + \hat{s}_N \vartheta_{VL}(k+j-N) + \\ &+ \sum_{i=j+1}^{N-1} \hat{d}_{ai} \Delta \vartheta_a(k+j-i) + \hat{d}_{aN} \vartheta_a(k+j-N) + \\ &+ \sum_{i=j+1}^{N-1} \hat{d}_{Gi} \Delta G_s(k+j-i) + \hat{d}_{GN} G_s(k+j-N) \quad . \end{aligned} \quad (3.14)$$

Hier sind d_{ai} und d_{Gi} die Sprungantwortkoeffizienten der Störgrößen Außentemperatur (Index a) und solare Einstrahlung (Index G).

Dieser Ansatz entspricht der Standardvorgehensweise bei der vorausschauenden Regelung: die Vorhersage berücksichtigt zukünftige und vergangene Stellgrößen, aber nur vergangene Störgrößen (Abbildung 3.5).

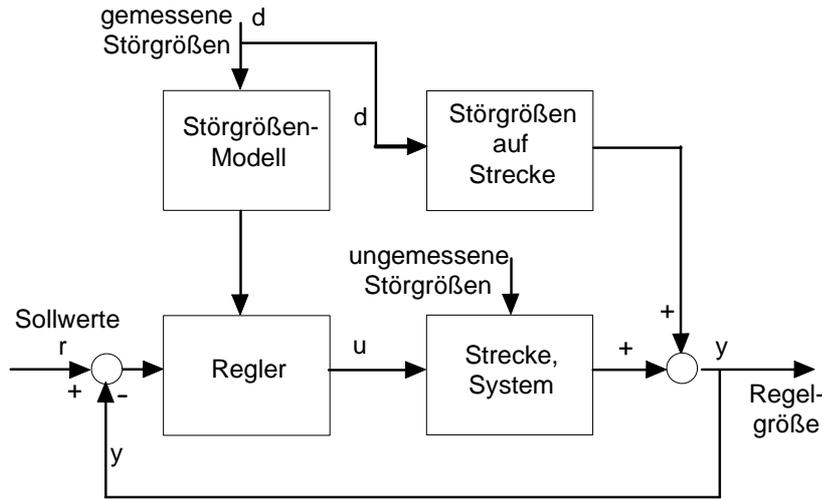


Abb. 3.5. Berücksichtigung von gemessenen Störgrößen durch die vorausschauende Regelung (nach [61])

In der hier vorgestellten Entwicklung wird dieses Prinzip dahingehend erweitert, daß auch zukünftige vorhergesagte Störgrößen sprünge mit einbezogen werden:

$$\begin{aligned}
 \hat{\vartheta}_R(k+j|k) &= \sum_{i=1}^j \hat{s}_i \Delta \hat{\vartheta}_{VL}(k+j-i|k) \\
 &+ \sum_{i=1}^j \hat{d}_{ai} \Delta \bar{\vartheta}_a(k+j-i|k) + \sum_{i=1}^j \hat{d}_{Gi} \Delta \bar{G}_s(k+j-i|k) \\
 &+ \sum_{i=j+1}^{N-1} \hat{s}_i \Delta \vartheta_{VL}(k+j-i) + \hat{s}_N \vartheta_{VL}(k+j-N) \\
 &+ \sum_{i=j+1}^{N-1} \hat{d}_{ai} \Delta \vartheta_a(k+j-i) + \hat{d}_{aN} \vartheta_a(k+j-N) \\
 &+ \sum_{i=j+1}^{N-1} \hat{d}_{Gi} \Delta G_s(k+j-i) + \hat{d}_{GN} G_s(k+j-N) \quad (3.15)
 \end{aligned}$$

Die zukünftigen Störgrößenänderungen berechnen sich aus dem vorhergesagten Verlauf der Außentemperatur und der solaren Einstrahlung. Die Art und Weise der Vorhersage dieser Wettergrößen wird im folgenden Abschnitt erläutert.

3.2.3 Wettervorhersage

Die Wettervorhersage dient der Bereitstellung der zukünftigen Störgrößenverläufe, die in Gleichung 3.15 benötigt werden. Abhängig von der Wahl des Vorhersagehorizonts muß der Verlauf von Außentemperatur und solarer Einstrahlung für verschiedene Horizonte prognostiziert werden. Möglich ist eine externe Bereitstellung (z.B. über einen Wetterdienst) oder eine interne Vorhersage auf Basis gemessener Daten. Aufgrund der derzeitigen Rahmenbedingungen³ wurde eine interne Vorhersage im Algorithmus implementiert.

Praktische Anforderungen an den Wetterprognosealgorithmus stellen sich hinsichtlich des Einsatzes im Microcontroller (Rechenzeit und Speicherbedarf) sowie der benötigten Sensorik. Um die Kosten des Reglers gering zu halten, wurde eine Prognose von Außentemperatur und Einstrahlung nur auf Basis der Meßwerte dieser Größen eingesetzt.

3.2.3.1 Vorhersage der Einstrahlung

Zur Berechnung der Verläufe der vorhergesagten Außentemperatur und Einstrahlung wurde ein Ansatz von Stadtmann [78] verwendet und weiterentwickelt. Dabei werden die Verläufe durch cos-Funktionen, die durch den Faktor $\Delta\hat{G}_0$ gestreckt sind, angenähert. Die Periode der Funktion wird durch eine Zeitfunktion $f(t)$ angepaßt. Der Verlauf der Einstrahlung berechnet sich dann zu:

$$\hat{G}_s(t) = \hat{G}_0 (\cos(\pi f(t)) + 1) \quad (3.16)$$

mit

$$f(t) = (m * t + b)^n$$

Dabei bedeuten:

$\hat{G}_s(t)$...	Globalstrahlung, süd $\frac{W}{m^2}$
\hat{G}_0	...	maximale Amplitude der Globalstrahlung $\frac{W}{m^2}$
t	...	wahre Ortszeit [h]
$f(t)$...	Zeitfunktion, $f(t) \in [0, 1]$

Für den Exponenten $n = 1$ ist $f(t)$ eine lineare Funktion mit dem Anstieg

$$m = \frac{1}{(t_{SA} - 0.35h) - 12h} \quad \text{für} \quad (t_{SA} - 0.35 h) \leq t < 12 h$$

$$m = \frac{1}{(t_{SA} + 0.35h) - 12h} \quad \text{für} \quad 12 h \leq t \leq (t_{SU} + 0.35 h) \quad .$$
(3.17)

Der Achsenabschnitt wird zu $b = -12m$ gesetzt. Mit dieser Zeitfunktion erreicht man einen Verlauf der Globalstrahlung, der 0.35 h vor dem Zeitpunkt des Sonnenaufgangs t_{SA} seinen

³Eine externe Vorhersage wird derzeit in Deutschland in einer entsprechenden Zeitauflösung und Genauigkeit noch von keinem Wetterdienst angeboten. Der Deutsche Wetterdienst bietet im 3 h Intervall Prognosen an, die sich jedoch für die Einstrahlung auf eine verbale Beschreibung des Bewölkungsgrades beschränken. Zudem sind die derzeit entstehenden Kosten für die Daten noch relativ hoch im Vergleich zu den möglichen Einsparungen an Heizkosten.

Nullpunkt hat, um 12 Uhr wahrer Ortszeit sein Maximum erreicht und 0.35 h nach dem Zeitpunkt des Sonnenuntergangs t_{SU} wiederum gleich null ist. [78] hat empirisch aus Meßdaten einen optimalen Exponenten $n = 1.1$ ermittelt. Der Zeitpunkt von Sonnenaufgang und -untergang wird mit Hilfe solar geometrischer Formeln aus [29] berechnet. Vorher wird die aktuelle Zeit in Solarzeit umgewandelt.

Für die Prognose wird zunächst Gleichung (3.16) nach $\Delta\dot{G}_0$ umgestellt. Damit läßt sich die maximale Amplitude aus Meßwerten der Einstrahlung berechnen. Dazu werden jeweils die Meßwerte der vergangenen 75 min benutzt und die jeweiligen Amplituden entsprechend der folgenden Gleichung gewichtet:

$$\hat{G}_0 = \sum_{i=0}^5 w(i) \tilde{G}_0(t - i \cdot \Delta t) \quad .$$

w sind die Gewichte:

$$w = [0.23 \ 0.21 \ 0.19 \ 0.16 \ 0.12 \ 0.09] \quad .$$

Mit der Wahl dieser Gewichte wird zum einen über bewölkungsbedingte Einstrahlungsschwankungen (die sich aufgrund des integrierenden Systemverhaltens ohnehin kaum in der Raumtemperatur bemerkbar machen) hinweggemittelt, andererseits kann die Vorhersage durch die abfallende Wichtung älterer Meßwerte auch Wittertendenzen folgen. Aus der maximalen Einstrahlung läßt sich dann der Verlauf der Einstrahlung vorhersagen. Zur Zeit des Sonnenaufgangs, wenn noch nicht alle berechneten maximalen Einstrahlungen größer Null sind, wird die Wichtung entsprechend korrigiert. Nachts wird durch Summenbildung der Einstrahlung der vergangenen 24 h das Maximum ermittelt und als vorläufiges Maximum des nächsten Tages angenommen. Das Verfahren hat den Vorteil der Einfachheit und der Beschränkung auf die ohnehin notwendige Sensorik. Außerdem besteht die Möglichkeit der horizontalen oder vertikalen (süd) Sensorplatzierung, da das Verfahren für beide Möglichkeiten anwendbar ist.

3.2.3.2 Vorhersage der Außentemperatur

Für die Vorhersage der Außentemperatur wird ein ähnliches Verfahren eingesetzt wie für die Prognose der Einstrahlung. Der Einstrahlungsverlauf wird durch \cos -Funktionen angenähert, die jeweils durch eine Zeitfunktion in der Periode angepaßt werden. Das Maximum der Außentemperatur wird konstant für 14:30 Uhr angenommen. Das Minimum wird zum Zeitpunkt des Sonnenaufgangs erreicht. Damit ergeben sich für die Parameter der Zeitfunktion:

$$\begin{aligned} m &= \frac{1}{t_{SA} - 14.5h} & \text{und } b &= -14.5m \quad \text{für } t_{SA} \leq t < 14.5h \\ m &= \frac{1}{24h - (14.5h - t_{SA})} & \text{und } b &= 1 - m \cdot t_{SA} \quad \text{für } 0h \leq t < t_{SA} \\ m &= \frac{1}{24h - (14.5h - t_{SA})} & \text{und } b &= -14.5m \quad \text{für } 14.5h \leq t < 24h \end{aligned} \quad (3.18)$$

Der Verlauf der Außentemperatur läßt sich dann folgendermaßen beschreiben:

$$\hat{\vartheta}_a(t) = \vartheta_{a,SA} + g_1 \cdot \Delta\hat{\vartheta}_a \cdot [\cos(\pi f(t)) + 1] + (1 - g_1) \cdot \Delta\tilde{\vartheta}_{a,VT} \cdot [\cos(\pi f(t)) + 1] \quad . \quad (3.19)$$

Die Cos-Funktion setzt auf dem Sockelwert der Außentemperatur zum Zeitpunkt des Sonnenaufgangs auf. Der Verlauf berücksichtigt nicht nur die Differenz zwischen Temperaturmaximum und -minimum (Hub) des laufenden Tages sondern auch den Hub am Vortag. Der aktuelle Temperaturhub berechnet sich zu:

$$\Delta \hat{\vartheta}_a = \sum_{i=0}^5 \left(w(i) \cdot \frac{\vartheta_a(t - i\Delta t) - \vartheta_a(t_{SA})}{\cos(\pi \cdot f(t - i\Delta t)) + 1} \right)$$

Die Wichtungsfaktoren $w(i)$ sind wie bei der Einstrahlungsvorhersage angenommen. Im Bereich des Funktionsminimums liefert diese Approximation jedoch keine sinnvollen Werte, da die Funktion sehr empfindlich auf Temperaturschwankungen in der Nähe der Bezugstemperatur $\vartheta_a(t_{SA})$ reagiert. Aus diesem Grund wurde die Wichtungsfunktion g_1 für den jeweils aktuellen Zeitpunkt t eingeführt:

$$g_1 = \frac{\cos(\pi \cdot f(t)) + 1}{2}$$

Die Ergebnisse der Vorhersage der Außentemperatur und der solaren Einstrahlung sind in Abschnitt 5.4 dargestellt.

3.3 Berechnung der Stellgröße Vorlauftemperatur

Aus der Differenz zwischen dem Sollwert und der vorhergesagten Regelgröße wird unter Anwendung der auf Seite 58 eingeführten Kostenfunktion der optimale Verlauf der Stellgröße berechnet (Abschnitt 3.3.1). Eine Formulierung des Ergebnisses für den Fall einer Regelung einer Pumpenwarmwasserheizung erfolgt in Abschnitt 3.3.2.

3.3.1 Allgemeine Ableitung des Regelgesetzes aus der Kostenfunktion

Das Regelgesetz verknüpft die Abweichungen zwischen Sollwert und vorhergesagter Systemausgangsgröße mit einem (optimierten) zukünftigen Verlauf der Stellgrößen. Für die Ableitung ist die Verwendung der Vektor-Matrix-Schreibweise besonders zweckmäßig. Dazu werden im folgenden einige Vektoren eingeführt.

$$\hat{\mathbf{Y}} = [\hat{y}(k+1|k), \hat{y}(k+2|k), \dots, \hat{y}(k+P|k)]^T$$

$$\Delta \hat{\mathbf{U}} = [\Delta \hat{u}(k|k), \Delta \hat{u}(k+1|k), \dots, \Delta \hat{u}(k+P-1|k)]^T$$

$$\mathbf{Y}_o = [y_{o1}, y_{o2}, \dots, y_{oP}]^T \quad .$$

Dabei ist $\hat{\mathbf{Y}}$ der Vektor der vorhergesagten Regelgröße, $\Delta \hat{\mathbf{U}}$ der Vektor der Stellgrößen-sprünge und \mathbf{Y}_o der Vektor der freien Systemantwort (siehe auch Gl. 3.12). Damit läßt sich die Vorhersage der Regelgröße aus Gleichung 3.10 in Vektor-Matrix Schreibweise angeben:

$$\hat{\mathbf{Y}} = \hat{\mathbf{S}} \Delta \hat{\mathbf{U}} + \mathbf{Y}_o \quad , \quad (3.20)$$

wobei $\hat{\mathbf{S}}$ die dynamische Matrix entsprechend Gleichung 3.8 ist. Die Kostenfunktion aus Gleichung 3.3 lautet in Vektor-Matrix Schreibweise:

$$\mathbf{J} = [\hat{\mathbf{S}}\Delta\hat{\mathbf{U}} + \mathbf{Y}_o - \mathbf{Y}_r]^T \mathbf{Q} [\hat{\mathbf{S}}\Delta\hat{\mathbf{U}} + \mathbf{Y}_o - \mathbf{Y}_r] + \Delta\hat{\mathbf{U}}^T \mathbf{R} \Delta\hat{\mathbf{U}} \quad . \quad (3.21)$$

Mit \mathbf{Y}_r wird die Referenztrajektorie (zukünftiger Sollwertverlauf) bezeichnet, \mathbf{Q} und \mathbf{R} sind zeitabhängige Wichtungsmatrizen:

$$\mathbf{Y}_r = [y_r(k+1|k), y_r(k+2|k), \dots, y_r(k+P|k)]^T$$

$$\mathbf{Q} = \text{diag}[Q_1, Q_2, \dots, Q_P]$$

$$\mathbf{R} = \text{diag}[R_0, R_1, \dots, R_{M-1}] \quad .$$

Durch Umstellen der Kostenfunktion erhält man:

$$\mathbf{J} = \Delta\hat{\mathbf{U}}^T \hat{\mathbf{S}}^T \mathbf{Q} \hat{\mathbf{S}} \Delta\hat{\mathbf{U}} + 2(\mathbf{Y}_o - \mathbf{Y}_r)^T \mathbf{Q} \hat{\mathbf{S}} \Delta\hat{\mathbf{U}} + (\mathbf{Y}_o - \mathbf{Y}_r)^T \mathbf{Q} (\mathbf{Y}_o - \mathbf{Y}_r) + \Delta\hat{\mathbf{U}}^T \mathbf{R} \Delta\hat{\mathbf{U}}$$

Zur Minimierung der Kostenfunktion wird ihre Ableitung nach dem Stellgrößenverlauf $\Delta\hat{\mathbf{U}}$ gleich null gesetzt:

$$\mathbf{J}' = 2\Delta\hat{\mathbf{U}}^T \hat{\mathbf{S}}^T \mathbf{Q} \hat{\mathbf{S}} + 2(\mathbf{Y}_o - \mathbf{Y}_r)^T \mathbf{Q} \hat{\mathbf{S}} + 2\Delta\hat{\mathbf{U}}^T \mathbf{R} \stackrel{!}{=} 0 \quad .$$

Daraus ergibt sich das Regelgesetz (optimaler Stellgrößenverlauf für zukünftige Zeitschritte):

$$\Delta\hat{\mathbf{U}} = (\hat{\mathbf{S}}^T \mathbf{Q} \hat{\mathbf{S}} + \mathbf{R})^{-1} \hat{\mathbf{S}}^T \mathbf{Q} (\mathbf{Y}_r - \mathbf{Y}_o) \quad . \quad (3.22)$$

Im Fall einer Steuerung werden die ermittelten Stellgrößen nacheinander angewendet. Bei einer Regelung wird jeweils nur der erste Wert des optimalen Stellgrößenverlaufs angewendet und beim nächsten Zeitschritt die gesamte Vorhersage und Optimierung wiederholt:

$$u(k) = \Delta\hat{u}(k|k) + u(k-1) = \hat{\mathbf{h}}_o (\mathbf{Y}_r - \mathbf{Y}_o) + u(k-1) \quad , \quad (3.23)$$

wobei $\hat{\mathbf{h}}_o$ die erste Zeile der Matrix $(\hat{\mathbf{S}}^T \mathbf{Q} \hat{\mathbf{S}} + \mathbf{R})^{-1} \hat{\mathbf{S}}^T \mathbf{Q}$ ist. Analog zur klassischen Regelung wird $\hat{\mathbf{h}}_o$ auch als Reglerverstärkung bezeichnet.⁴

Wenn die Kostenfunktion statt der Stellgrößenänderung die Stellgröße selbst berücksichtigt, dann muß die Vorhersage der Systemausgangsgröße mit der Impulsantwortfunktion bestimmt werden

$$\hat{\mathbf{Y}} = \hat{\mathbf{G}}\hat{\mathbf{U}} + \mathbf{Y}_o \quad , \quad (3.24)$$

wobei $\hat{\mathbf{G}}$ die dynamische (untere Dreiecks-) Matrix der Impulsantwortkoeffizienten ist. Die Minimierung der Kostenfunktion verläuft in gleicher Weise, jedoch liefert das Regelgesetz nun die Stellgröße selbst statt der Stellgrößenänderung.

⁴Die Matrix $(\hat{\mathbf{S}}^T \mathbf{Q} \hat{\mathbf{S}} + \mathbf{R})^{-1} \hat{\mathbf{S}}^T \mathbf{Q}$ hängt nur vom dynamischen Systemverhalten und den Wichtungsfaktoren ab. Wenn diese Größen konstant sind, braucht die rechenintensive Matrixinversion nur einmal durchgeführt werden. Im hier verwendeten Fall eines selbstadaptierenden Algorithmus ist dieser Rechenschritt jedoch nach jeder neuen Modellidentifikation notwendig.

3.3.2 Optimaler Verlauf der Stellgröße Vorlauftemperatur

Die in Abschnitt 3.1.2 aufgestellte Kostenfunktion (Gl. 3.3) wird nun für die vorausschauende Regelung einer Warmwasserheizung formuliert:

$$J = \sum_{j=N_1}^P Q_j (\vartheta_{RS}(k+j) - \hat{\vartheta}_R(k+j|k))^2 + \sum_{j=1}^M R_j \Delta \hat{\vartheta}_{VL}(k+j-1)^2 \quad . \quad (3.25)$$

Entsprechend der Ableitungen im vorangegangenen Abschnitt kann die Stellgröße Vorlauftemperatur zum Zeitschritt k folgendermaßen berechnet werden:

$$\vartheta_{VL}(k) = \Delta \hat{\vartheta}_{VL}(k|k) + \vartheta_{VL}(k-1) = \tilde{\mathbf{h}}_{\mathbf{o}}(\boldsymbol{\vartheta}_{\mathbf{R}\mathbf{o}} - \boldsymbol{\vartheta}_{\mathbf{R}\mathbf{S}}) + \vartheta_{VL}(k-1) \quad . \quad (3.26)$$

Die Gewichte in der Kostenfunktion sind noch festzulegen. Eine einfache Erhöhung von \mathbf{R} gegenüber \mathbf{Q} führt zunächst nicht zu einer Energieeinsparung, sondern lediglich zu einer trägeren Reaktion der Stellgröße Vorlauftemperatur auf Abweichungen der Raumtemperatur vom Sollwert. Die Wahl der Gewichte muß daher noch entsprechend dem Ziel der besseren Nutzung solarer Gewinne zur Heizenergieeinsparung angepaßt werden.

Um solare Gewinne möglichst gut zu nutzen, ist es vorteilhaft, bereits vor deren Eintreten ein Unterschreiten der Raumsolltemperatur zuzulassen. Ein Ziel der hier vorgestellten Entwicklung war es, dem Nutzer selbst die Entscheidung zu überlassen, inwieweit diese Unterschreitung zum Zweck der Energieeinsparung erlaubt ist. Deshalb wurde ein Komfortparameter cl mit dem Wertebereich $0 \dots 9$ (9: maximaler Komfort, 0: maximales Energiesparen) eingeführt, mit dem der Nutzer die Wichtigkeit in der Kostenfunktion Gl. 3.25 selbst verstellen kann. Dieser Komfortparameter fließt folgendermaßen in die Berechnung der Gewichte ein:

$$\begin{aligned} Q &= 1 \\ R &= \begin{cases} 0.001 & : (\vartheta_R \geq \vartheta_{RS}) \quad \& \quad (\vartheta_{VL}(k) < \vartheta_{VL}(k-1)) \\ 0.001 + \frac{\hat{H}_s}{K} \left(1 - \frac{cl}{9}\right) & : \text{sonst} \end{cases} \quad . \quad (3.27) \end{aligned}$$

\hat{H}_s ist die vorhergesagte Einstrahlungssumme über die kommenden 10 Stunden (40 Zeitschritte):

$$\hat{H}_s = \sum_{i=k}^{k+40} G_s \cdot \Delta t \quad .$$

R hat mindestens den Wert 0.001, damit stets eine geringfügige Dämpfung der Stellgröße vorhanden ist, um ein instabiles Verhalten der Regelung zu vermeiden. In Abhängigkeit der vorhergesagten Einstrahlungssumme und des Komfortparameters cl wird R erhöht. Wenn gilt: $cl = 9$, d.h. es sind keine Untertemperaturen erwünscht, oder wenn $\hat{H}_s = 0$, so wird R nicht erhöht. K ist eine Konstante zur Bewertung der zukünftigen Einstrahlungssumme. Sie wurde empirisch zu 350 Wh/m^2 bestimmt. Als Ausnahme wird der Fall behandelt, bei dem die Raumtemperatur über dem Sollwert liegt und die Vorlauftemperatur eine fallende Tendenz zeigt. Eine Dämpfung der Verstärkung der Vorlauftemperatur nach unten ist dann nicht erwünscht.

Der Komfortparameter cl wirkt sich auf die Verstärkung folgendermaßen aus: beim maximalen Wert werden nur Regelabweichungen in naher Zukunft, bei Verringerung werden in

Abhängigkeit von der vorhergesagten Einstrahlung in zunehmenden Maße auch Regelabweichungen in ferner Zukunft bewertet. Für den Nutzer ergibt sich folgende Wirkungsweise: beim maximalen Komfortparameter versucht der Algorithmus so schnell wie möglich den Sollwert zu erreichen, bei Verringerung wird in Abhängigkeit von der vorhergesagten Einstrahlung in zunehmendem Maße eine Untertemperatur zugelassen.

Die untere Komfortgrenze ist willkürlich festgesetzt. Eine maximale Heizenergieeinsparung und Nutzung solarer Gewinne läßt sich natürlich erreichen, wenn keine Heizenergie zugeführt wird, was aber nicht im Sinne der Entwicklung liegt. Bei der Festlegung der unteren Komfortgrenze wurde eingeschätzt, welche Komforteinbußen einem Nutzer beim Modus "maximales Energiesparen" noch zugemutet werden können. Gleichzeitig sollte für verschiedene Gebäudetypen durch den Komfortparameter eine entsprechende Variationsbreite zur Verfügung stehen.

Die Parameter R und Q wurden in Abschnitt 3.3.1 als Diagonalmatrizen eingeführt, wobei jedes Diagonalelement entsprechend seinem Index den Wert der Wichtungparameter zum jeweiligen zukünftigen Zeitschritt innerhalb des Vorhersagehorizonts angibt. Die hier verwendeten skalaren Werte müssen vor der Berechnung noch in die Diagonalmatrizen überführt werden, wobei alle Diagonalelemente gleich sind. Das bedeutet, daß die Wichtungparameter innerhalb des Vorhersagehorizonts als konstant angenommen werden. Die unterschiedliche zeitliche Wirkung ergibt sich automatisch bei Berechnung der Reglerverstärkung.

3.4 Aspekte der Implementierung

Dieser Abschnitt dient der Erläuterung der Struktur des Softwarealgorithmus, die sich aus der beschriebenen Regelungstheorie ableitet. Weiterhin werden einige meßtechnische Voraussetzungen für die Funktionsfähigkeit dargelegt.

3.4.1 Die Struktur des Algorithmus

Die Struktur des gesamten entwickelten Algorithmus sowie seine Einbindung in Hard- und Software zeigt Abbildung 3.6. Die Software läßt sich in zwei Ebenen unterteilen, die mit unterschiedlichem Zeitschritt aufgerufen werden. Die äußere Schleife umfaßt die Meßwert-erfassung (d.h. Abfrage der Sensoren, AD-Wandlung, Speicherung) sowie die Regelung der Vorlauf-temperatur auf den von der vorausschauenden selbstadaptierenden Heizungsregelung ermittelten Sollwert mit einem herkömmlichen PID-Algorithmus. Diese Schleife wird mit einem Zeitschritt von wenigen Sekunden aufgerufen. Die innere Schleife wird zu jeder vollen Viertelstunde aufgerufen. Sie enthält den eigentlichen vorausschauenden selbstadaptierenden Algorithmus, der eine Sollvorlauf-temperatur für die kommenden fünfzehn Minuten berechnet.

Bei jedem Aufruf der inneren Schleife werden zunächst die Mittelwerte der Meßwerte der vergangenen 15 min berechnet. Anschließend erfolgt die Übergabe der Daten an den Datenspeicher, der die 15-min-Mittelwerte der jeweils letzten 98 Zeitschritte aufbewahrt. Diese werden für die Wettervorhersage benötigt, während für die Modellidentifikation nur die aktuellen und die Meßwerte der vergangenen 2 Zeitschritte notwendig sind (siehe Gleichung 3.4).

Der Algorithmus startet zunächst mit der Berechnung der Sollvorlauf-temperatur entsprechend der herkömmlichen Heizkurve. Zu jeder vollen Viertelstunde nach Start des Prozesses

wird ein Zählindex n um eins erhöht. Sobald $n > 2$ gilt, wird die Modellidentifikation gestartet, da dann ausreichend Daten zur Verfügung stehen. Innerhalb des Unterprogramms zur Modellidentifikation findet eine Prüfung der Güte der ermittelten Modellparameter statt. Wenn die Abweichung zwischen der mit dem Modell berechneten Ausgangsgröße (Raumtemperatur) und der gemessenen Raumtemperatur der letzten 24 Stunden innerhalb vorgegebener Toleranzen liegt, kann das Modell für den vorausschauenden Algorithmus verwendet werden. Die derzeit vorgegebene Toleranz beträgt 5 K pro Zeitschritt, d.h. integriert über 96 Zeitschritte von je 0.25 h ergibt sich eine erlaubte Abweichung von 120 Kh. Die Modellprüfung wird erstmalig nach 24 Stunden durchgeführt. Bei ausreichender Modellgüte wird der vorausschauende Teil des Algorithmus gestartet. Sollte die Modellprüfung negativ ausfallen, so wird für die nächsten 24 Stunden wieder die klassische Vorlaufemperaturberechnung entsprechend der Heizkennlinie aktiviert, um dem Algorithmus Zeit zu geben, das Systemverhalten mit einer größeren Datenbasis zu erlernen. Nach dreimaligem Fehlschlagen der Modellprüfung (also frühestens nach 72 Stunden) werden die Parametermatrizen wieder auf ihre Startwerte gesetzt und der Identifikationsvorgang von vorn begonnen.

Für den Start des vorausschauenden Teils des Algorithmus müssen drei Bedingungen erfüllt sein. Der Zählindex n muß größer als 96 sein, damit für die Wettervorhersage ausreichend Daten zur Verfügung stehen, die Modellgüte muß ausreichend sein und die aktuelle gemessene Raumtemperatur darf nicht mehr als 4 K unter dem minimalen Sollwert liegen.⁵ Letztere Bedingung ist vor allem eine Absicherung gegen eine Fehlfunktion des Algorithmus jeglicher Art, um ein zu starkes Auskühlen des Gebäudes zu verhindern.

Innerhalb des vorausschauenden Algorithmus wird zunächst die Wettervorhersageprozedur aufgerufen, die die Matrix der vorhergesagten Einstrahlung und Außentemperatur aktualisiert. Die vorhergesagte Einstrahlung wird dann zur Berechnung der Gewichte der Kostenfunktion verwendet. Anschließend erfolgt der Aufruf der Prozedur zur Berechnung der Reglerverstärkung (siehe auch Gleichungen 3.22 und 3.26). Wettervorhersage und Reglerverstärkung werden an die folgende Prozedur übergeben. In dieser Prozedur wird zunächst die Raumtemperaturvorhersage auf Basis der neuen Meßwerte und der vorhergesagten Einstrahlung und Außentemperatur (gemessene Störgrößen) aktualisiert. Die Multiplikation der Differenz zwischen Sollwert und vorhergesagter Raumtemperatur mit der Reglerverstärkung ergibt die Stellgröße (Sollvorlaufemperatur für das Zeitintervall).

⁵Liegt die aktuelle gemessene Raumtemperatur 4 K unter dem minimalen Sollwert, so kann sicher von einer Fehlfunktion ausgegangen werden, da auch das Zulassen von Untertemperaturen insbesondere bei gut gedämmten Gebäuden nicht zu einer derartigen Auskühlung führen darf.

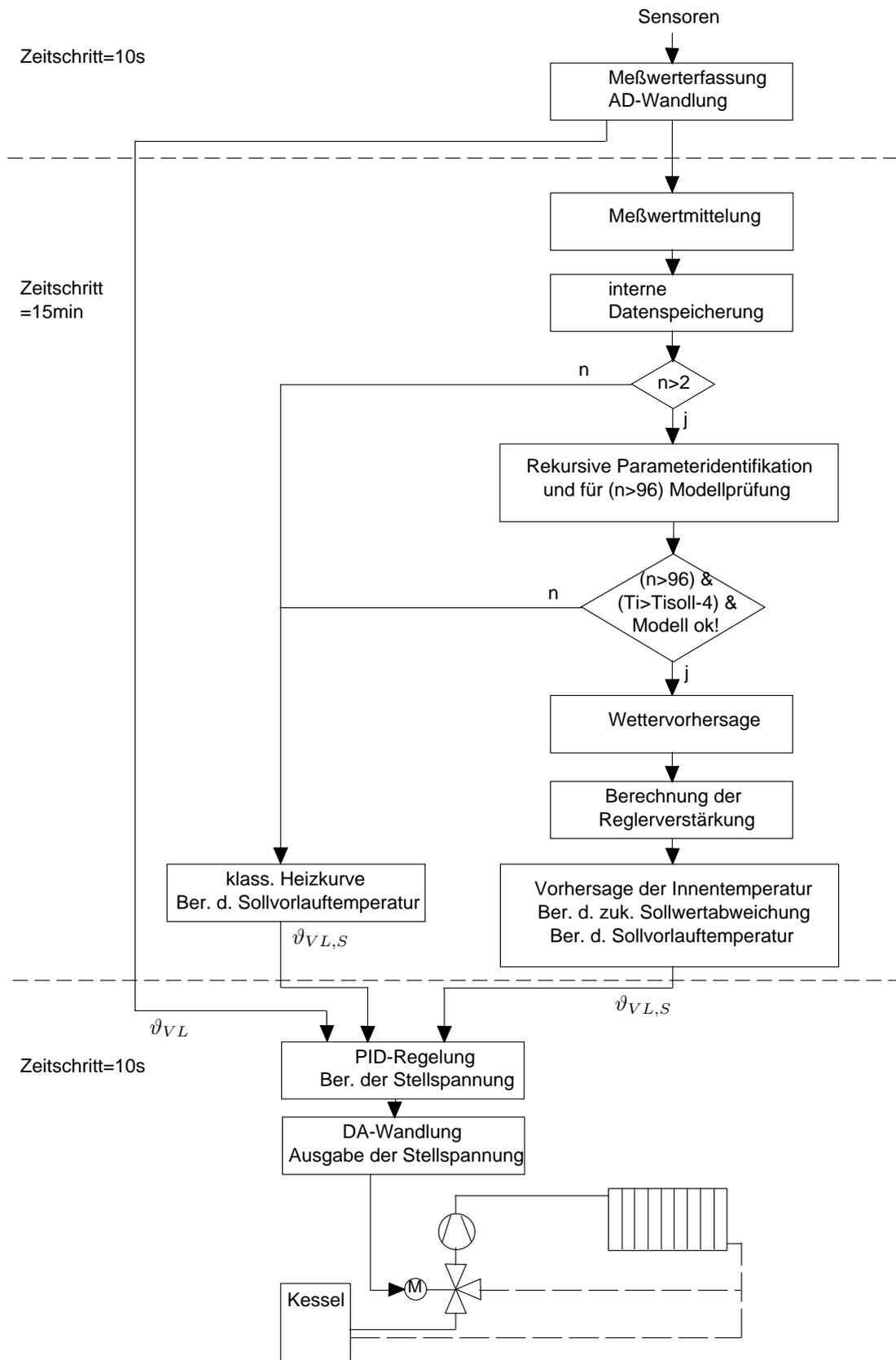


Abb. 3.6. Programmablaufplan des Algorithmus zur vorausschauenden selbstadaptierenden Heizungsregelung sowie Einbindung in Hard- und Software. An der linken Seite sind die Zykluszeiten für den Aufruf der Programmteile angegeben.

3.4.2 Das Meßprinzip

Im Fall der Anwendung der Regelung auf eine Warmwasserheizung, wie im Rahmen dieser Arbeit realisiert, wird die Raumtemperatur eines Referenzraums mit Hilfe der Vorlauftemperatur des Heizsystems des Gebäudes geregelt. Der entwickelte Algorithmus berechnet einen Sollwert der Vorlauftemperatur für den nächsten Zeitschritt. Die Dauer eines Zeitschrittes wurde zu 15 min festgelegt. Es wird dabei davon ausgegangen, daß die angeforderte Heizleistung durch das vorgeschaltete Wärmeversorgungsgerät zur Verfügung gestellt werden kann. Die Art der Wärmebereitstellung ist hier nicht Gegenstand der Betrachtungen. Ebenso ist eine Optimierung des Wirkungsgrades der Wärmebereitstellung nicht Teil der hier vorgestellten Entwicklung. Beachtet wurde jedoch, daß der Algorithmus keine größere Auslegung des Wärmeversorgungsgerätes als bei einer herkömmlichen Regelung erfordern sollte, da viele Geräte im Teillastbereich einen schlechten Wirkungsgrad aufweisen. Durch das gewählte Verfahren, dem Gebäude jeweils nur soviel Heizleistung zur Verfügung zu stellen, wie zur Einregelung des Raumtemperatursollwertes notwendig ist, ergibt sich diesbezüglich bereits ein Vorteil gegenüber einer herkömmlichen Regelung. Diese stellt meist einen Überschuß an Heizleistung im Gebäude zur Verfügung. Die notwendige Heizleistung für Aufheizvorgänge ergibt sich für beide Arten der Regelung aus den vom Anwender vorgegebenen Raumtemperatursollwerten. Im Algorithmus kann zur Begrenzung der Heizleistung der Maximalwert der Vorlauftemperaturänderung gegenüber dem vorigen Zeitschritt vorgegeben werden.

Die Raumtemperaturmessung wird in einem Referenzraum durchgeführt. Anforderungen bei der Auswahl des Raumes sind:

- es muß sich um einen Hauptaufenthaltsraum handeln,
- der Raum muß solare Empfangsflächen in Richtung der solaren Hauptempfangsfläche des Gebäudes haben,
- Störeinflüsse wie zum Beispiel durch hohe interne Gewinne oder häufiges Fenster- und Türöffnen sollten gering sein.

Am Heizkörper des Referenzraums wird das Thermostatventil entfernt. Damit wird verhindert, daß dieses die Wirkung der Vorlauftemperatur auf die Raumtemperatur in nicht definierter Weise verändert. In den anderen Räume werden keinerlei Veränderungen vorgenommen. Dieses Prinzip setzt voraus, daß mit der durch den Algorithmus berechneten Vorlauftemperatur alle Räume ausreichend Heizleistung zur Verfügung gestellt bekommen. Eine unterschiedliche Dimensionierung von Heizkörpern in einzelnen Räumen im Vergleich zum Referenzraum kann hier problematisch sein. Über ein Stellventil zur Massenstromregulierung in den einzelnen Heizkörpern können kleinere Differenzen jedoch ausgeglichen werden.

Die solare Einstrahlung wird in der Richtung der Hauptempfangsflächen der passiv solaren Komponenten des Gebäudes gemessen. Die Verwendung der außerhalb des Gebäudes gemessenen Einstrahlung setzt einen linearen zeitinvarianten Zusammenhang zwischen der auf das Gebäude treffenden und der in das Gebäude eindringenden Strahlung bzw. aus der Strahlung umgesetzten Wärmeleistung voraus. Der Proportionalitätsfaktor zwischen beiden Größen beinhaltet die Flächen der Solarkomponenten, den Energiedurchlaßgrad (oder Wirkungsgrad) sowie Abschattungsfaktoren. Damit ist der Proportionalitätsfaktor im allgemeinen sonnenstandsabhängig. Da jedoch diese Abhängigkeit gebäudespezifisch und bei einem

breiten Einsatz praktisch kaum im Einzelfall vorab bestimmbar ist, wird die kurzfristige Sonnenstandsabhängigkeit im Tagesverlauf vernachlässigt. Voraussetzung für diese Verfahrensweise ist jedoch, daß die Hauptempfangsflächen des Gebäudes mit der Ausrichtung des Sensors übereinstimmen. Saisonale Abhängigkeiten – wie z.B. ein im Winter abschattendes Nachbargebäude – können gut durch die Parameteridentifikation mit der Datenbasis mehrerer vergangener Tage mit der größten Wichtung auf aktuellen Meßdaten erfaßt werden.

3.5 Untersuchungen zur Reglerkonfiguration

In diesem Abschnitt werden Ergebnisse spezieller Untersuchungen vorgestellt, die zur Auswahl der Konfiguration im Algorithmus geführt haben. Mit Hilfe dieser Untersuchungen wird gezeigt, daß die Parameter der vorgestellten Differenzgleichungsmodelle prinzipiell anhand von Meßdaten identifizierbar sind. Differenzgleichungsmodelle verschiedener Ordnung werden hinsichtlich ihrer Eignung zur Beschreibung des dynamischen Verhaltens eines kleineren Gebäudes geprüft. Weitere Tests betrafen die Identifikationsmethode sowie die Einbeziehung der Stellgröße in die Kostenfunktion.

3.5.1 Untersuchungen zur Modelleignung

Die Untersuchungen dieses Abschnitts dienen dem Eignungsnachweis des in Abschnitt 3.2.1 vorgestellten Differenzgleichungsmodells zur Beschreibung des dynamischen Verhaltens eines kleineren Wohngebäudes bei Vorhandensein der 4 Meßgrößen Raumtemperatur, Einstrahlung, Vorlauf- und Außentemperatur. Die Ableitungen basieren zu einem großen Teil auf den im Anhang erläuterten systemtheoretischen Grundlagen.

Es wird untersucht, unter welchen Bedingungen die Identifizierbarkeit der Modellparameter gegeben sowie welche Modellordnung geeignet ist. Die Wahl der geeigneten Modellordnung ist ein Optimierungsproblem zwischen dem Rechenaufwand und der Genauigkeit der Übereinstimmung der simulierten mit der realen Ausgangsgröße. Außerdem erhöht sich bei einer großen Anzahl zu identifizierender Parameter deren Fehler, wenn die in den Daten enthaltene Information gleich bleibt. Zudem kann eine hohe Anzahl von Parametern dazu führen, daß in einem bestimmten Meßintervall das Systemverhalten sehr genau, in einem anderen aber sehr schlecht wiedergegeben wird (sogenanntes Overfitting [5]). Deshalb verbessert sich die Genauigkeit eines Modells nicht zwangsläufig mit der Anzahl der Parameter, sondern es existiert vielmehr ein Optimum in der Parameterzahl, welches durch die Anzahl der gemessenen Größen wesentlich bestimmt wird.

Eine Erhöhung der Modellordnung führt dazu, daß entsprechend mehr vergangene Zeitschritte im Modell berücksichtigt werden. Prinzipiell kann auch die Anzahl der betrachteten vergangenen Zeitschritte für die einzelnen Eingangsgrößen und die Ausgangsgröße unterschiedlich gewählt werden. Hier wird eine Variation der Modellordnung nur in der Weise vorgenommen, daß sie auf alle Eingangsgrößen und die Ausgangsgröße gleichermaßen wirkt. Für die Untersuchungen wurden verschiedene Datenbasen aus Meßdaten der Experimentierhäuser Emmerthal genutzt. Beispielfhaft werden hier die mit einer Datenbasis vom 16.11.-30.11.1999 (das entspricht 1440 Zeitschritten) gewonnenen Ergebnisse vorgestellt (siehe Abbildungen 3.7 und 3.8). Um unabhängig von der in Abschnitt 3.5.2 untersuchten Auswirkung des Vergessensfaktors bei der rekursiven Identifikation zu sein, wurde für die in

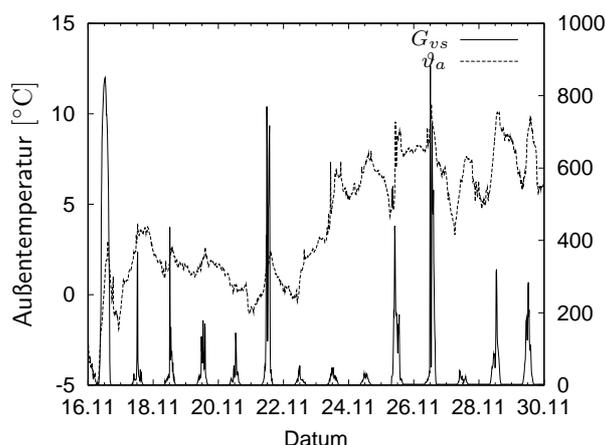


Abb. 3.7. Gemessene Einstrahlung G_{vs} und Außentemperatur ϑ_a vom 16.11.-30.11.99

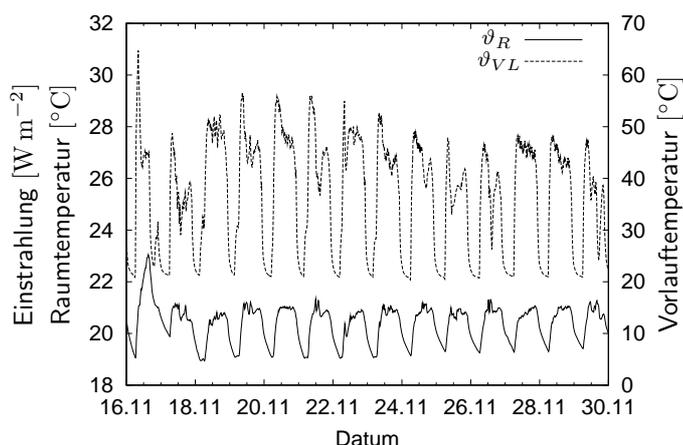


Abb. 3.8. Gemessene Raumtemperatur ϑ_R und Vorlauftemperatur ϑ_{VL} vom 16.11.-30.11.99

diesem Abschnitt vorgestellten Untersuchungen eine nicht rekursive Methode der kleinsten Quadrate verwendet.

3.5.1.1 Bewertungskriterien für die Modellgüte

Ein naheliegendes Kriterium für die Bewertung der Modellgüte, d.h. Güte der identifizierten Parameter sowie Eignung der Modellstruktur für das gegebene System, ist die Abweichung zwischen der gemessenen und der mit Hilfe des Modells berechneten (simulierten bzw. vorhergesagten) Ausgangsgröße. Dabei ist es wichtig, zwischen zwei Fällen zu unterscheiden. Im ersten Fall wird die Ausgangsgröße mit Eingangsgrößen aus dem Intervall der Identifikationsdaten berechnet. Im zweiten Fall dienen „frische“ Eingangsdaten aus einer Periode außerhalb des Identifikationsintervalls zur Verifikation (Kreuzkorrelation). Hier werden beide Methoden verwendet und dazu zunächst einige Größen zur Bewertung der Modellgüte eingeführt.

In Abschnitt 3.2.1, Gleichung 3.7 wurden bereits die Residuen ε als Differenz zwischen gemessener y_i und berechneter Ausgangsgröße $\hat{y}(i)$ definiert.

$$\varepsilon(i, \theta) = y(i) - \varphi^T(i)\theta \quad ,$$

wobei $\hat{y} = \varphi^T(i)\theta$ den mit Hilfe der identifizierten Koeffizienten berechneten Wert der Modellausgangsgröße darstellt. Für ein allgemeines SISO-ARX-Modell berechnet sich die Ausgangsgröße zu (vgl. auch die Erläuterungen in Abschnitt A.2.2):

$$\hat{y}(i) = -a_1y(i-1) - \dots - a_nay(i-na) + b_1u(i-1) + \dots + b_nbu(i-nb) \quad ,$$

das heißt nur vergangene Werte der Ausgangs- und Eingangsgröße gehen in die Berechnung der aktuellen Ausgangsgröße ein. Für Modelle, die zur Vorhersage dienen, führt man zur Parameteridentifikation häufig einen allgemeinen Vorhersagefehler

$$\varepsilon(i, \theta) = y(i) - \hat{y}(i|i-1, \theta)$$

ein [76]. $\hat{y}(i|i-1, \theta)$ ist die aus den Parametern und Meßwerten des vorangegangenen Zeitschritts berechnete Ausgangsgröße. Für die Bestimmung der Parameter θ ist dann eine

Verlustfunktion der Art:

$$V_N = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon^2(i, \theta)$$

zu minimieren. Diese Methode der Parameterbestimmung wird Prediction Error Method (PEM) genannt. Für ein ARX-Modell stimmt diese Methode mit der Methode der kleinsten Quadrate überein. $\varepsilon(i)$ repräsentiert den Teil der Ausgangsgröße, der nicht aus vergangenen Daten vorhergesagt werden kann und wird deshalb auch Innovation genannt [58].

Die mit einem guten Modell berechnete Ausgangsgröße soll der gemessenen Ausgangsgröße ähneln. Abweichungen entstehen sowohl durch Modellierungsfehler als auch durch ungemessene Störungen, die sich der gemessenen Ausgangsgröße überlagern. Die berechnete Ausgangsgröße soll bei verrauschten Daten daher nicht gleich der gemessenen sein. Sie soll lediglich den Teil der Ausgangsgröße wiedergeben, der aufgrund der Eingangssignale entsteht. Die Residuen/ Vorhersagefehler $\varepsilon(i)$ sind bei einer guten Übereinstimmung des Modells mit dem System klein und entsprechend einem weißen Rauschen verteilt. Für ein ARX-Modell lassen sie sich durch Umstellen von Gleichung A.11 folgendermaßen berechnen:

$$\varepsilon(k) = \sum_{n=nb}^{nk} b_n u(k-n) - \sum_{n=0}^{na} a_n y(k-n) \quad .$$

Bei einem Vergleich der mit Daten aus dem Identifikationsintervall berechneten Ausgangsgröße mit dem Meßwert wird die Verlustfunktion mit Erhöhung der Modellstruktur automatisch kleiner. Sollen verschiedene Modellordnungen mit Hilfe der Verlustfunktion verglichen werden, so ist eine Kompensation dieser automatischen Verringerung vorzunehmen [59]. Geeignete Größen dazu sind der *FPE* (Final Prediction Error):

$$FPE = \frac{1 + \frac{nm}{N}}{1 - \frac{nm}{N}} \cdot V_N$$

nm ist die Ordnung des Differenzgleichungs- (ARX-) Modells. Für eine große Datenbasis N geht der Quotient $\frac{nm}{N} \rightarrow 0$, also $FPE \rightarrow V_N$.

Die *Pol-Nullstellenverteilung* wird sowohl für die Bewertung der Stabilität als auch der Modellstruktur eingesetzt. Die Übertragungsfunktion eines SISO-ARX-Modells 2. Ordnung mit einem Verzögerungszeitschritt ergibt sich aus Gleichung 3.5 zu:

$$H(z) = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} = \frac{b_1 z + b_2}{z^2 + a_1 z + a_2}$$

Damit ergibt sich für dieses Modell eine Nullstelle bei $p_1 = -\frac{b_2}{b_1}$ und zwei Pole bei $q_{1,2} = -\frac{a_1}{2} \pm \sqrt{\frac{a_1^2}{4} - a_2}$. Die Pole sind reell, wenn gilt $\frac{a_1^2}{4} - a_2 \geq 0$.

Ein diskretes System ist stabil, wenn alle Pole der Übertragungsfunktion im Innern des Einheitskreises der komplexen z -Ebene liegen [43]. Überlagern sich Pole und Nullstellen in der z -Ebene, so kürzen sie sich in der Pol-Nullstellenform der Übertragungsfunktion heraus. Dies ist ein Indikator dafür, daß die Modellordnung zu hoch gewählt wurde.

Der für den Regelalgorithmus auftretende Anwendungsfall besteht in der Identifikation der Modellparameter anhand einer Datenbasis der Meßwerte von Modelleingangs- und Modellausgangsgrößen einiger vergangener Tage und der Vorhersage der Raumtemperatur für den sich anschließenden Zeitraum von einigen Stunden nur anhand von Modelleingangsgrößen. Als Maß für die Übereinstimmung bei Verwendung von Vergleichsdaten außerhalb des Identifikationszeitraums wird die *empirische Reststreuung (Kovarianz)*

$$s_y^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y(i) - \hat{y}(i))^2 \quad (3.28)$$

genutzt. Die Größe $\hat{y}(i)$ stellt eine Mehrschrittvorhersage (im Gegensatz zur Einschrittvorhersage $\hat{y}(i|i-1, \theta)$) dar, da nur Eingangsgrößen in das ARX-Modell eingehen. Die Größen $y(i-1) \dots y(i-na)$ sind nicht, wie bei der Einschrittvorhersage, gemessen, sondern aus Eingangsgrößen berechnet.

3.5.1.2 Modellbewertung anhand von Daten außerhalb des Identifikationszeitraums

Abbildung 3.9 zeigt die berechneten Kovarianzen des auf den Identifikationszeitraum folgenden Tages in Abhängigkeit der Länge der Datenbasis (jeweils beginnend am 16.11.1999) für verschiedene Modellordnungen. Obwohl jeweils ein anderer Tag vorhergesagt wird, zeigt sich

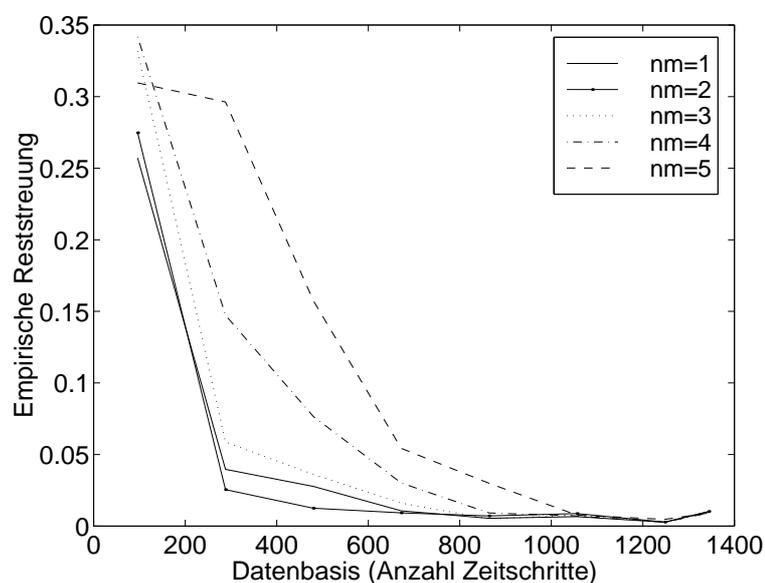


Abb. 3.9. Kovarianzen des auf den Identifikationszeitraum folgenden Tages in Abhängigkeit von der Länge der Datenbasis (jeweils beginnend am 16.11.1999) für verschiedene Modellordnungen

eine deutliche Tendenz. Bei kleiner Datenbasis ist der Vorhersagefehler erwartungsgemäß hoch, da in den verwendeten Daten noch zuwenig Information enthalten ist, um die Verhältnisse am Vorhersagetag wiederzugeben. Anders ausgedrückt, die Modelleingangsgrößen haben noch nicht eine auch den Vorhersagetag umfassende Variationsbreite durchlaufen. Mit größerer Datenbasis steigt die Wahrscheinlichkeit, daß die für den Vorhersagetag benötigte Information bereits im Identifikationsintervall enthalten war. Je höher die Modellordnung

gewählt ist, umso mehr Parameter müssen identifiziert werden. Diese "Feinjustierung" erfordert ebenfalls eine größere Datenbasis.

Abbildung 3.10 zeigt einen Vergleich zwischen gemessener und vorhergesagter Raumtemperatur (Mehrschrittvorhersage) am 25.11.1999, mit einer Datenbasis für die Identifikation von 864 Zeitschritten (16.11.-24.11.99). In Abbildung 3.11 sind die entsprechenden Abweichungen zwischen gemessener und vorhergesagter Raumtemperatur für die verschiedenen Modellordnungen dargestellt.

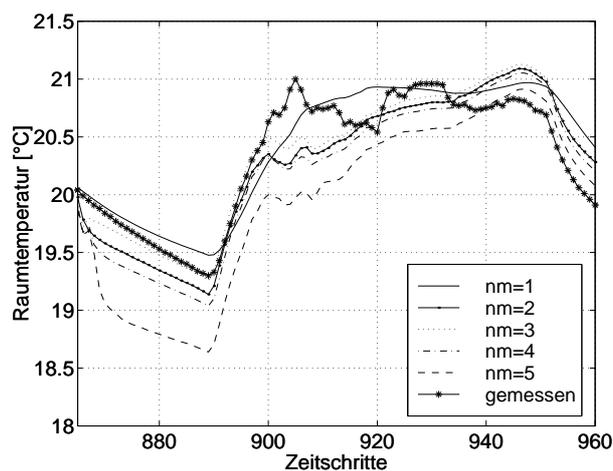


Abb. 3.10. Gemessene und simulierte Raumtemperatur für verschiedene Modellordnungen nm für den auf den Identifikationszeitraum folgenden Tag (25.11.1999)

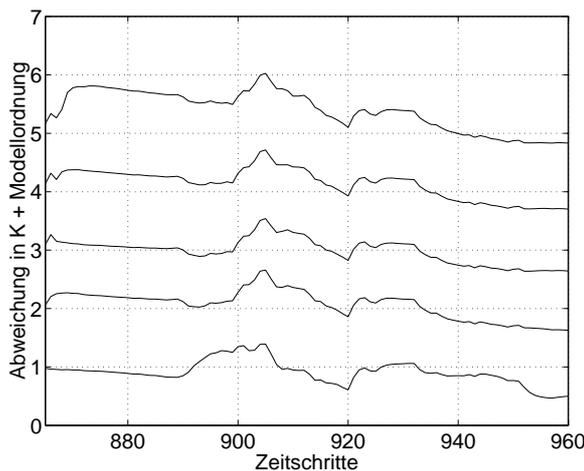


Abb. 3.11. Abweichungen der simulierten von der gemessenen Raumtemperatur für verschiedene Modellordnungen nm für den auf den Identifikationszeitraum folgenden Tag (25.11.1999)

Ab einer Datenbasis von etwa 1100 Zeitschritten unterscheiden sich die Kovarianzen für die verschiedenen Modellordnungen kaum noch. Es kann gefolgert werden, daß bei großer zur Verfügung stehender Datenbasis die Modellordnung für $nm \geq 2$ keinen merklichen Einfluß auf die Genauigkeit der Vorhersage der Modellausgangsgröße hat. Andererseits ist bei einer kleinen Datenbasis ein Modell geringer Ordnung besser geeignet, da es dort genauere Ergebnisse liefert. Dies bedeutet, daß ein Modell geringer Ordnung zum einen mit weniger Daten identifiziert, zum anderen gegenüber zeitlichen Änderungen des dynamischen Gebäudeverhaltens flexibler ist.

3.5.1.3 Modellbewertung anhand von Daten innerhalb des Identifikationszeitraums

Abbildung 3.12 zeigt einen Vergleich zwischen gemessener und berechneter Ausgangsgröße für den Identifikationszeitraum 16.11.-29.11.1999.

Einen Vergleich der Verlustfunktionen bzw. der abgeleiteten Größe FPE für verschiedene Modellordnungen (Abbildung 3.14) zeigt, daß beim Übergang vom Modell 1. zum Modell 2. Ordnung noch eine deutliche Verbesserung der Modellgüte erreicht wird. Eine weitere Erhöhung der Modellordnung führt kaum noch zu Verbesserungen.

Die Pol-Nullstellenverteilungen für die Modelle 1. bis 5. Ordnungen zeigen, daß alle Modelle stabil sind, da die Pole innerhalb des Einheitskreises der z -Ebene liegen. Für das gewählte Modell 2. Ordnung ergeben sich die in Tabelle 3.1 aufgelisteten Werte. Ab einem Modell

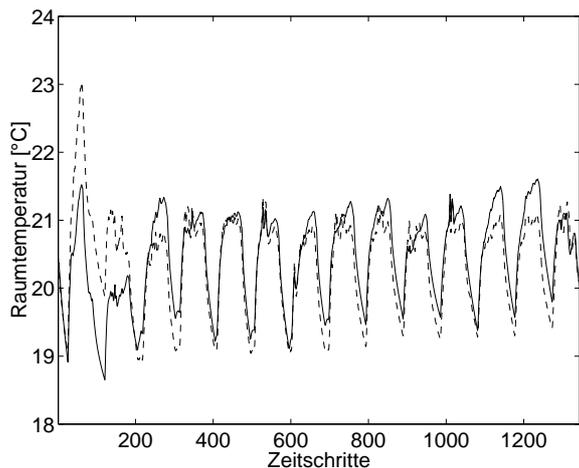


Abb. 3.12. Gemessene (- - -) und simulierte (—) Raumtemperatur mit Mehrschrittvorhersage für den Identifikationszeitraum (16.11.-29.11.1999)

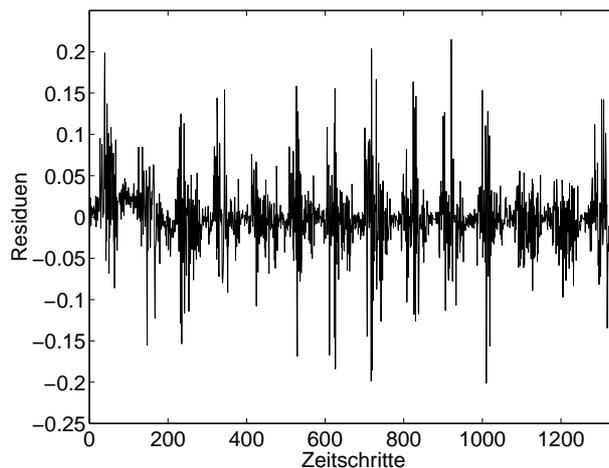


Abb. 3.13. Residuen berechnet durch Einschritt- vorhersage (rechts) für den Identifikationszeitraum (16.11.-29.11.1999)

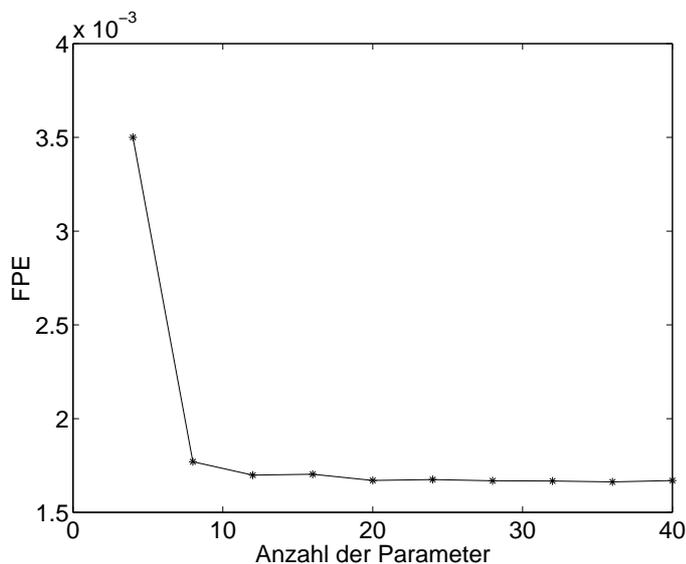


Abb. 3.14. Final Prediction Error als Funktion der Anzahl zu identifizierender Parameter. Die Anzahl der Parameter ist für das gewählte Differenzgleichungsmodell das Vierfache der Modellordnung.

Tabelle 3.1. Pol-Nullstellenverteilung für das ARX-Modell 2. Ordnung mit einem Verzögerungszeitschritt ermittelt für den Identifikationszeitraum (16.11.-29.11.1999)

Pol/ Nullstelle	Lage $z =$	Standardabweichung
Pol q_1	0.9731	0.0042
Pol q_2	0.3714	0.0212
Nullstelle p_{11} von u_1	-0.1397	2.9497
Nullstelle p_{12} von u_2	0.8582	0.0348
Nullstelle p_{13} von u_3	0.8973	0.0086

3. Ordnung treten nahe beieinanderliegende Pole und Nullstellen auf. Abbildung 3.15 zeigt beispielhaft die Lage von Polen und Nullstellen für ein Modell 3. Ordnung sowie deren

Standardabweichungen. Deutlich ist für die Eingangsgrößen u_2 (solare Einstrahlung) und u_3 (Vorlauftemperatur) eine Überlagerung zu erkennen. Dies zeigt an, daß für die genannten Eingangsgrößen die Modellordnung 3 zu hoch gewählt ist.

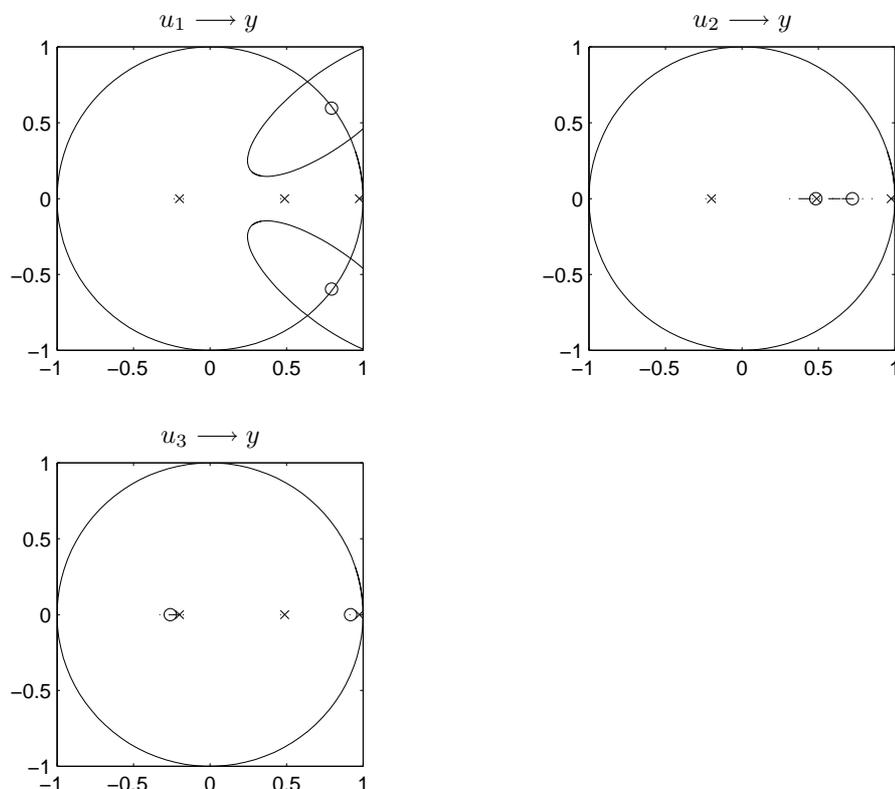


Abb. 3.15. Pol-Nullstellenverteilung für ein Modell 3. Ordnung, die Abszisse bildet die reale Achse, die Ordinate die imaginäre Achse der komplexen Ebene

Die Antworten für einen Einheitssprung jeweils einer der drei Modelleingangsgrößen berechnet aus den identifizierten Parametern der ARX-Modelle für verschiedene Modellordnungen nm sind in den Abbildungen 3.16, 3.18 sowie 3.20 gezeigt. Rechts davon sind die Startbereiche der Sprungantworten jeweils vergrößert dargestellt (Identifikationsperiode 16.11.-24.11.99).

Eine grafische Analyse der Sprungantworten nach [69] zeigt, daß eine Zeitkonstante im System dominierend ist. Dafür spricht, daß der Startbereich der Sprungantworten nicht das typische Verhalten für Verzögerungsglieder höherer Ordnung zeigt. Insbesondere bei Modellen höherer Ordnung zeigen die Sprungantworten im Startbereich sogar zum Teil physikalisch falsches Verhalten, welches durch die Identifikationsfehler der Parameter höherer Ordnung verursacht wird. Eine Auflistung der ermittelten dominierenden Zeitkonstante und des statischen Übertragungsfaktors findet sich in Tabelle 3.2.

Die dominierenden Zeitkonstanten unterscheiden sich bei allen drei Eingangsgrößen kaum. Für das gewählte Modell 2. Ordnung ergibt sich eine dominierende Zeitkonstante von 45 Zeitschritten, das entspricht 11 Stunden. Zu beachten ist, daß die hier ermittelte Zeitkonstante für den Referenzraum, in dem die Raumtemperatur gemessen wurde, gilt. Die statischen Übertragungsfaktoren für das Modell 2. Ordnung betragen 0.14 K für einen Sprung der

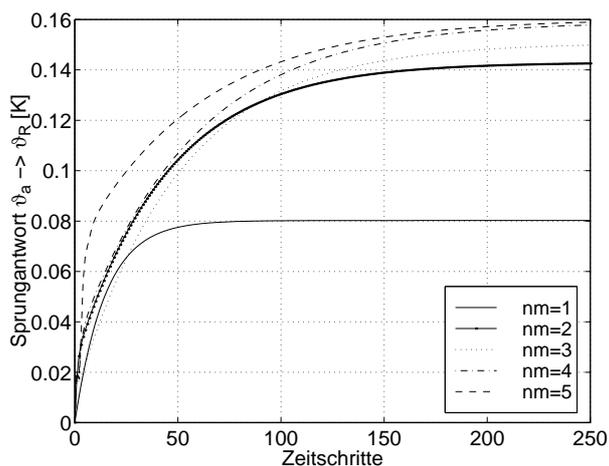


Abb. 3.16. Sprungantworten, Einheitssprung Außentemperatur

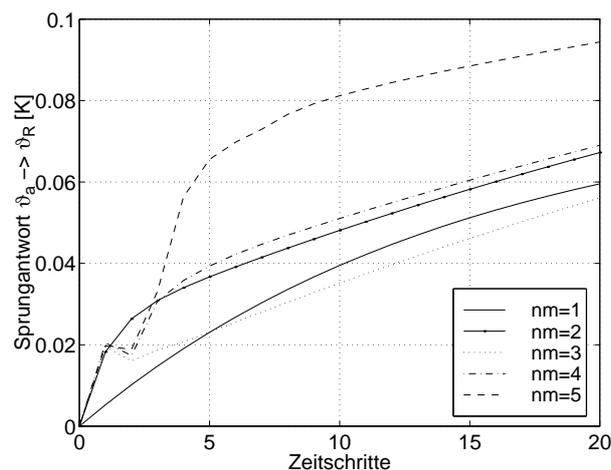


Abb. 3.17. Startbereich der Sprungantworten für die Außentemperatur

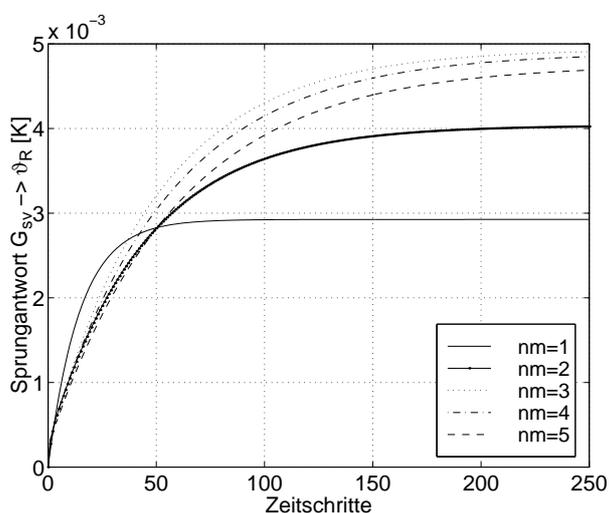


Abb. 3.18. Sprungantworten, Einheitssprung solare Einstrahlung

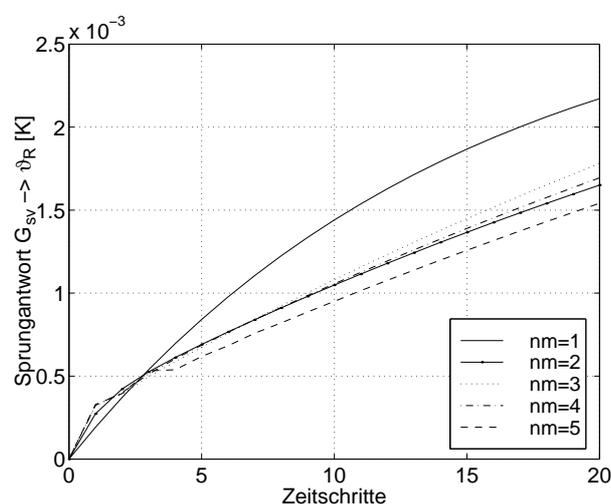


Abb. 3.19. Startbereich der Sprungantworten für die solare Einstrahlung

Tabelle 3.2. Dominierende Zeitkonstanten T (in Zeitschritten) und statischer Übertragungsfaktor k (in Kelvin) ermittelt aus Daten vom 16.11.-24.11.99 für verschiedene Modellordnungen nm , u_1 : Außentemperatur, u_2 : solare Einstrahlung, u_3 : Vorlauftemperatur

nm	$k(u_1)$	$T(u_1)$	$k(u_2)$	$T(u_2)$	$k(u_3)$	$T(u_3)$
1	0.0802	14.7	0.0029	14.7	0.0801	14.7
2	0.1429	44.7	0.0040	44.7	0.1449	44.7
3	0.1504	49.8	0.0049	49.8	0.1511	49.8
4	0.1586	54.7	0.0049	54.7	0.1595	54.7
5	0.1597	58.4	0.0047	58.8	0.1594	58.7

Außen- und Vorlauftemperatur um 1 K, sowie 0.004 K für einen Sprung der solaren Einstrahlung um $1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß die Verbesserungen, die durch ein Modell höherer Ordnung gegenüber einem Modell 2. Ordnung erhalten werden, bei dem betrachteten

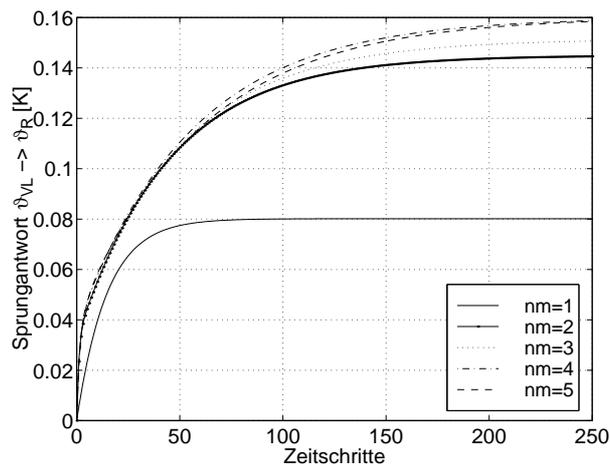


Abb. 3.20. Sprungantworten, Einheitssprung Vorlauftemperatur

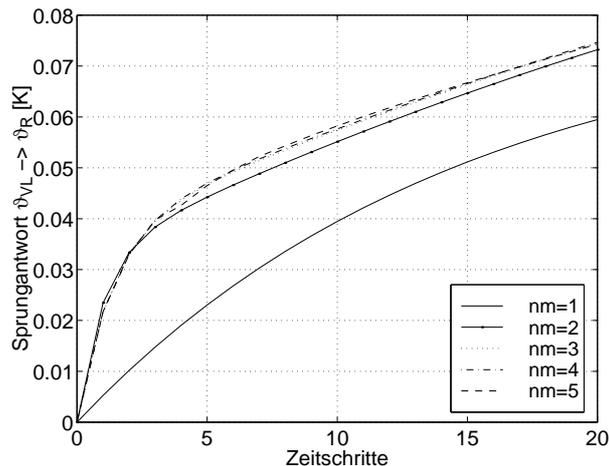


Abb. 3.21. Startbereich der Sprungantworten für die Vorlauftemperatur

System und den verwendeten Meßgrößen marginal sind. Aus Gründen des Speicher- und Rechenzeitbedarfs ist die Wahl eines Modells geringer Ordnung wünschenswert. Außerdem kann ein Modell geringer Ordnung bereits nach kürzerer Meßperiode für die vorausschauende Regelung verwendet werden. Für andere Gebäude und bei Vorhandensein weiterer Meßgrößen kann ein Modell höherer Ordnung jedoch durchaus vorteilhaft sein.

3.5.2 Test der Identifikationsmethode

Bei der Wahl der Identifikationsmethode wurde davon ausgegangen, daß sich die dynamischen Eigenschaften eines Gebäudes zeitlich ändern können, z.B. durch einen saisonal veränderlichen Feuchtegehalt in Bauteilen. Daraus ergibt sich die Forderung, daß der Identifikationsprozeß in Abständen wiederholt werden muß. Dafür bietet sich eine rekursive Identifikationsmethode an, die das Wissen der vorangegangenen Identifikation beibehält und nur um die neu hinzu gekommenen Informationen ergänzt. Die in Abschnitt A.4.2 erläuterte Methode der kleinsten Quadrate mit Vergessensfaktor ist für den hier beschriebenen Anwendungsfall besonders geeignet, da ältere Meßwerte exponentiell abfallend gewichtet werden. Abbildung 3.22 zeigt den Verlauf der Wichtungsfaktoren für verschiedene Vergessensfaktoren (siehe auch Gleichung A.24). Bei kleinen Vergessensfaktoren nimmt die Wichtung schnell ab, d.h. ein kürzeres Zeitintervall findet in der Identifikation maßgeblich Berücksichtigung. Je größer der Vergessensfaktor gewählt wird, um so länger ist das vergangene Zeitintervall, dessen Meßdaten berücksichtigt werden, d.h. um so größer ist die Datenbasis für die Identifikation.

Die empirische Reststreuung (Kovarianz) für den auf das Identifikationsintervall folgenden Tag in Abhängigkeit der Identifikationsperiode für verschiedene Vergessensfaktoren λ zeigt Abbildung 3.23. Zunächst nehmen die Kovarianzen mit zunehmendem Identifikationsintervall ab, wobei sich keine eindeutige Abhängigkeit vom Vergessensfaktor zeigt. Ein deutlicher Anstieg der Kovarianzen ist für ein Identifikationsintervall von 864 Zeitschritten zu beobachten. Der auf das Intervall folgende Tag (25.11.1999) war ein Tag mit hoher Einstrahlung nach einer Folge von trüben Tagen. In Abbildung 3.24 ist der Verlauf von gemessener und vorhergesagter Ausgangsgröße am 25.11.99 für die Identifikationsperiode 16.11.-24.11.99 und verschiedene Vergessensfaktoren dargestellt. Es wird deutlich, daß sich die Vorhersage der

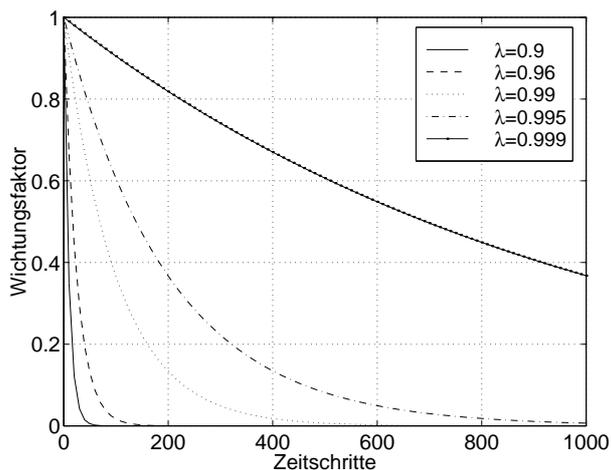


Abb. 3.22. Verlauf der Wichtungsfaktoren in Abhängigkeit der zurückliegenden Zeitschritte von je 15 min für verschiedene Vergessensfaktoren λ

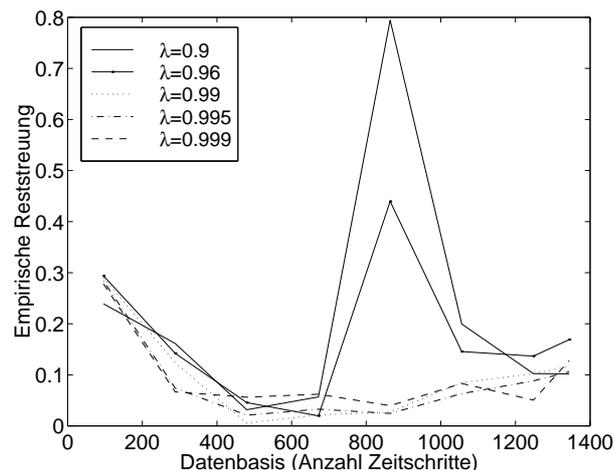


Abb. 3.23. Kovarianzen in Abhängigkeit der Länge des Identifikationsintervalls für den folgenden Tag für verschiedene Vergessensfaktoren λ

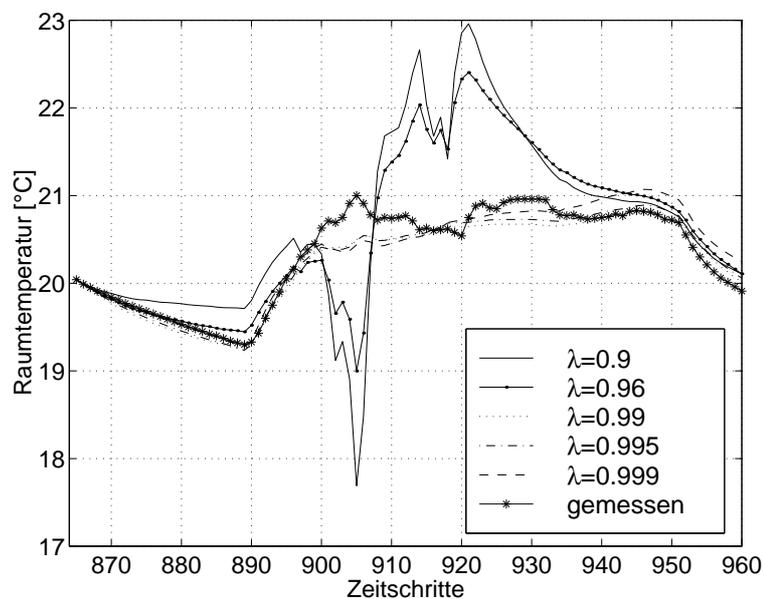


Abb. 3.24. Gemessene und vorhergesagte Ausgangsgröße für verschiedene Vergessensfaktoren λ am 25.11.99 (Identifikationszeitraum 16.11.-24.11.99)

Wirkung der Einstrahlung auf die Raumtemperatur mit sinkendem Vergessensfaktor verschlechtert. Je kleiner der Vergessensfaktor gewählt wurde, um so kürzer ist die zurückliegende Periode, die maßgeblich in die Identifikation eingeht. Da die Einstrahlung an den vorangegangenen Tagen gering war, also diese Eingangsgröße ein schlechtes Signal/ Rauschverhältnis aufwies, wird ihre Wirkung auf die Raumtemperatur allein aus diesen Tagen sehr ungenau bestimmt. Im dargestellten Fall werden bei kleinen Vergessensfaktoren sogar physikalisch falsche Parameter identifiziert, wodurch bei einer Erhöhung der Einstrahlung eine Verringerung der Raumtemperatur vorhergesagt wird.

Bei großem Vergessensfaktor ist die Information aus vergangenen einstrahlungsreichen Tagen noch in den Modellparametern enthalten. Entsprechend gut wird auch das dynamische

Systemverhalten abgebildet, was sich in der geringen Kovarianz am 25.11.99 zeigt. Abbildung 3.25 zeigt den zeitlichen Verlauf der identifizierten Parameter des ARX-Modells 2. Ordnung mit einem Verzögerungszeitschritt im Verlauf der Identifikationsperiode 16.11.-29.11.99.

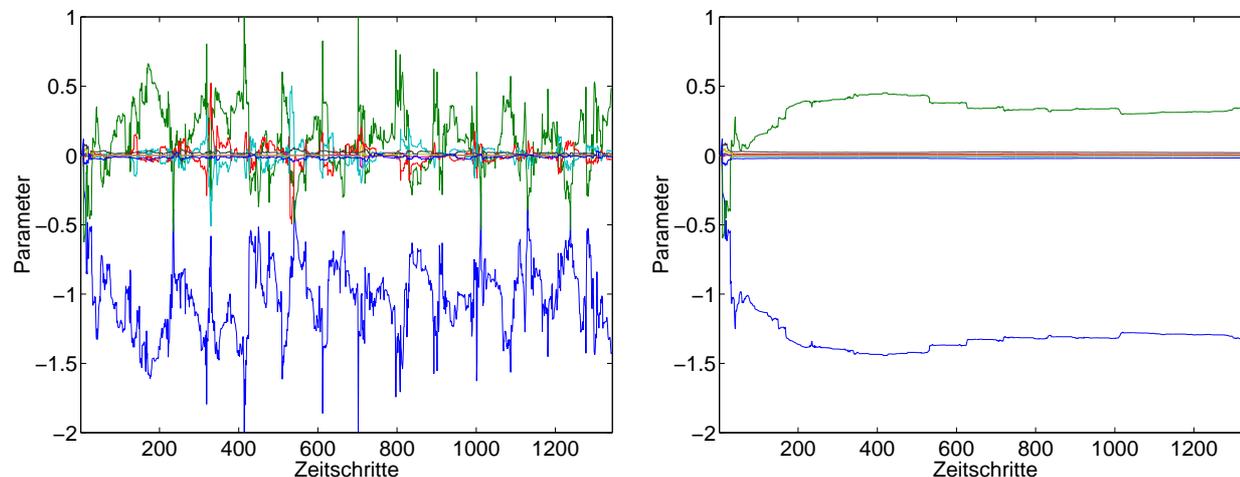


Abb. 3.25. Zeitlicher Verlauf der identifizierten Parameter des ARX-Modells 2. Ordnung mit einem Verzögerungszeitschritt im Verlauf der Identifikationsperiode 16.11.-29.11.99 für Vergessensfaktoren $\lambda = 0.9$ (linke Abbildung) und $\lambda = 0.999$ (rechte Abbildung)

Zu Beginn der Identifikationsperiode treten starke Schwankungen der Parameter auf. Bei großem Vergessensfaktor klingen diese Schwankungen bereits nach kurzer Zeit ab und die Parameter streben einem nahezu konstanten Wert zu. Bei kleinem Vergessensfaktor sind über die gesamte Dauer des Identifikationszeitraums starke Schwankungen zu verzeichnen, die eine gewisse Periodizität von einem Tag (96 Zeitschritten) aufweisen. Dies resultiert aus dem wechselnden Signal/ Rauschverhältnis der Eingangsgrößen im Tagesverlauf. Da bei einem Vergessensfaktor von $\lambda = 0.9$ nur die Daten sehr weniger vergangener Zeitschritte maßgeblich in die Parameterbestimmung eingehen, stehen abwechselnd Daten mit gutem und schlechtem Signal/ Rauschverhältnis zur Verfügung. Ist das mittlere Signal/ Rauschverhältnis zudem noch niedrig (beispielsweise für die Eingangsgrößen Außentemperatur und Vorlaufzeit in der Übergangszeit), so ist die Identifizierbarkeit der Parameter nicht mehr gegeben. Bei großem Vergessensfaktor spielen die täglichen Schwankungen des Signal/ Rauschverhältnisses keine Rolle, da die Daten mehrerer Tage berücksichtigt werden.

Die hier dargestellten Untersuchungen haben gezeigt, daß ein großer Vergessensfaktor für die rekursive Parameteridentifikation verwendet werden muß. Für den Algorithmus wurde daher ein Vergessensfaktor von $\lambda = 0.999$ gewählt.

3.5.3 Test verschiedener Kostenfunktionen

Wie in Abschnitt 3.3.1 ausgeführt, erhält man die neue Stellgröße aus der Abweichung zwischen vorhergesagter Raumtemperatur und Sollwert multipliziert mit der Reglerverstärkung. Die Reglerverstärkung wiederum wird durch Minimierung der Kostenfunktion erhalten. Zwei verschiedene Kostenfunktionen wurden hinsichtlich ihrer Eignung untersucht: die in Gleichung 3.3 angegebene Kostenfunktion mit Wichtung der Soll-Istwert-Abweichung und der

Stellgrößenänderung und eine Kostenfunktion, die statt letzterer die *Stellgröße selbst* einbezieht. Eine Kostenfunktion mit Wichtung der Stellgröße selbst ist insbesondere interessant

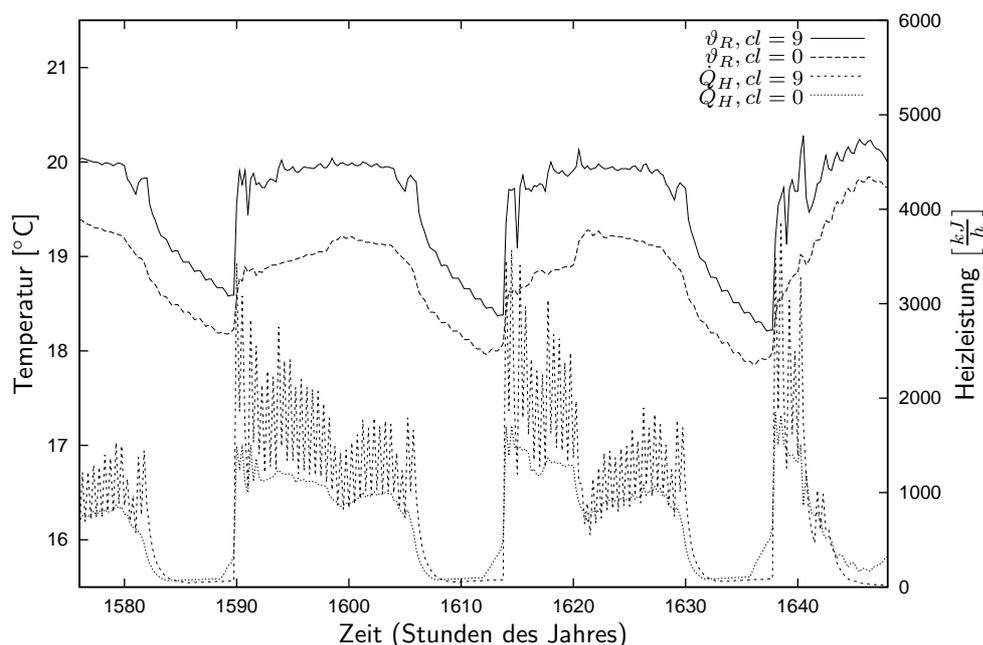


Abb. 3.26. Simulierte Heizleistung und Raumtemperatur für verschiedene Wichtungen zwischen Abweichung Soll-Istwert und der Höhe der Vorlauftemperatur in der Kostenfunktion. Der Raumtemperatursollwert beträgt $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ tagsüber und $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ nachts. Für den Komfortparameter $cl = 9$ gilt: $R = 0$ und $Q = 1$, d.h. nur die Soll-Istwertabweichung wird bewertet. Für $cl = 0$ gilt $R = 0.05$ und $Q = 1$.

für eine Heizungsregelung, deren Ziel eine gleichzeitige Komforterhöhung und Reduzierung des Energieverbrauchs ist. Wie jedoch bereits in Abschnitt 3.1.2 dargelegt, ist eine solche Kostenfunktion nicht immer praktikabel. Aus diesem Grund wurde untersucht, welche Kostenfunktion für die hier vorgestellte Anwendung geeignet ist. Dazu wurde für die beiden Kostenfunktionen je eine Version der Software erstellt. Mit Hilfe von Simulationstests wurde das Regelverhalten berechnet und anschließend bewertet. Die Testumgebung für die Simulationen ist im Abschnitt 4.1 beschrieben. Für den Vergleich der Kostenfunktionen wurden die Wichtungsparameter R und Q fest vorgegeben (siehe Bildunterschriften), um vergleichbare Komfortverhältnisse in Abhängigkeit des Komfortparameters cl zu schaffen.

Abbildung 3.26 zeigt das in der Simulation ermittelte Verhalten der Regelung mit einer Kostenfunktion, die die Abweichung zwischen Soll- und Istwert und die Stellgröße selbst (Vorlauftemperatur) wichtet. Deutlich ist eine bleibende Regelabweichung mit zunehmender Wichtung der Stellgröße erkennbar. Weiterhin führt eine geringe Wichtung der Stellgröße zu unerwünschten Schwingungen der Heizleistung. Aus diesem Grund wurde die Kostenfunktion mit Wichtung der Stellgrößenänderung für die weiteren Tests verwendet.

Die so erhaltenen simulierten Raumtemperaturen und Heizleistungen sind in Abbildung 3.27 für die gleiche Simulationsperiode wie in Abbildung 3.26 dargestellt. Hinsichtlich der Regelabweichung und der Stabilität der Heizleistung ist hier ein deutlich verbessertes Verhalten festzustellen. Sowohl die Maximalwerte der Heizleistung als auch die verbrauchte Heizenergie sind beim Modus „maximales Energiesparen“ gegenüber dem Komfortmodus deutlich reduziert. Dafür wird der Sollwert der Raumtemperatur wesentlich langsamer angefahren.

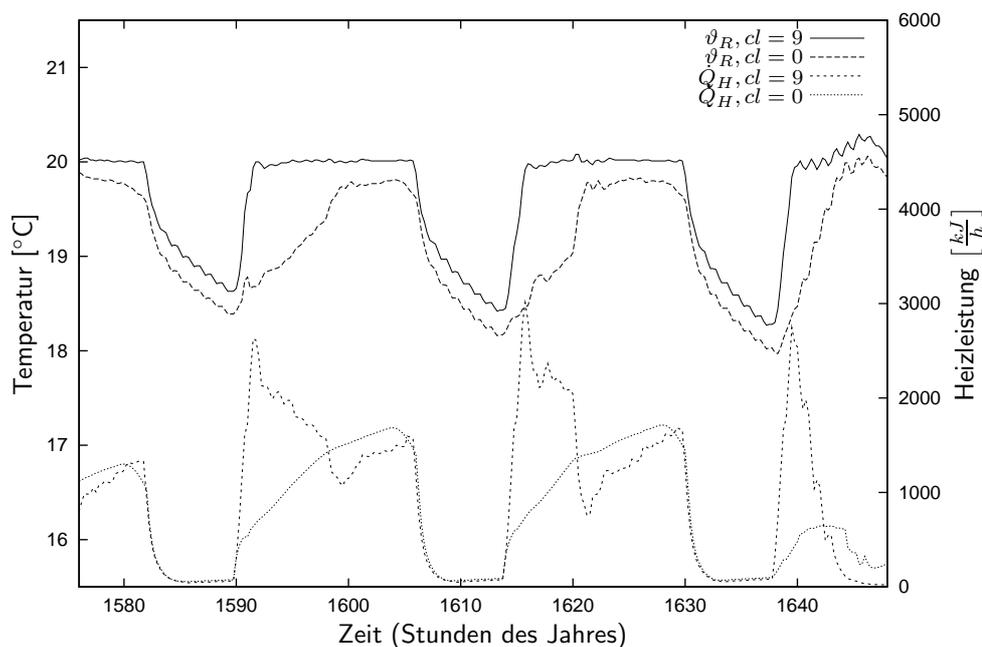


Abb. 3.27. Simulierte Heizleistung und Raumtemperatur für verschiedene Wichtungen zwischen Abweichung Soll-Istwert und der Änderung der Vorlauftemperatur in der Kostenfunktion. Der Raumtemperatursollwert beträgt 20 °C tagsüber und 18 °C nachts. Für den Komfortparameter $cl = 9$ gilt $R = 0$, $Q = 1$ und für $cl = 0$ gilt $R = 1$, $Q = 1$

Dies erlaubt auch einen Beitrag der passiv solaren Gewinne zur Raumtemperaturerhöhung mit reduzierter Überhitzungsgefahr.

Dieses Kapitel diente der Erläuterung der theoretischen Basis des Regelalgorithmus und seiner Einbindung in die Simulations- oder Meßtechnikumgebung. Untersuchungen zur Konfiguration wurden zur Optimierung und zur Auswahl von im weiteren konstanten Parametern der Regelung (Modellordnung, Vergessensfaktor, Kostenfunktion) genutzt. Die folgenden beiden Kapitel stellen Ergebnisse von theoretischen und experimentellen Untersuchungen der Funktion dieses optimierten Algorithmus dar.

Kapitel 4

Dynamische Simulationstests

Die entwickelte vorausschauende selbstadaptierende Heizungsregelung wurde ausführlich mit Hilfe von Simulationen untersucht. In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Simulationsexperimente vorgestellt. Die Untersuchungen sind in drei Abschnitte gegliedert:

- Wirkung von Einflußgrößen der Regelung
- Vergleich mit konventioneller Heizungsregelung
- Variation von Gebäudeparametern.

Ziel der Untersuchungen ist, die Auswirkung verschiedener Parameter des Algorithmus zur vorausschauenden selbstadaptierenden Heizungsregelung (im weiteren auch mit „vsHR“ abgekürzt) zu testen und den Einfluß einzelner Elemente der Regelung auf das Gesamtergebnis zu ermitteln. Der Vergleich mit einer simulierten außentemperaturgeführten Regelung und Heizkörperthermostatventilen (im weiteren auch als konventionelle Heizungsregelung „kHR“ bezeichnet) dient dazu, die Eigenschaften der neuen Regelung hinsichtlich Energieeinsparung und thermischem Komfort quantitativ zu bewerten. Eine Sensitivitätsanalyse dient zur Abschätzung des Einflusses ungemessener Störungen, die beim realen Betrieb auftreten können. Die Variation von Gebäudeparametern hat den Nachweis der Funktionsfähigkeit der Regelung ohne aufwendige Anpassungen auch in anderen Gebäuden zum Ziel. Vor der Darstellung der Ergebnisse werden daher die für die Simulationen maßgeblichen Randbedingungen erläutert.

4.1 Randbedingungen der Simulationstests

Die Simulationsumgebung dient dazu, dem Algorithmus ein „künstliches“ Gebäude mit Heizsystem zur Verfügung zu stellen. Als Simulationsprogramm dient TRNSYS, welches mit der Programmierumgebung MATLAB gekoppelt wird (siehe Abbildung 4.1). TRNSYS ist ein dynamisches Simulationsprogramm mit modularer Struktur. Es findet vor allem bei der Simulation solarthermischer und photovoltaischer Systeme Anwendung. Hier ist vor allem die Simulation von Wärmetransportvorgängen in einem Gebäude von Interesse.

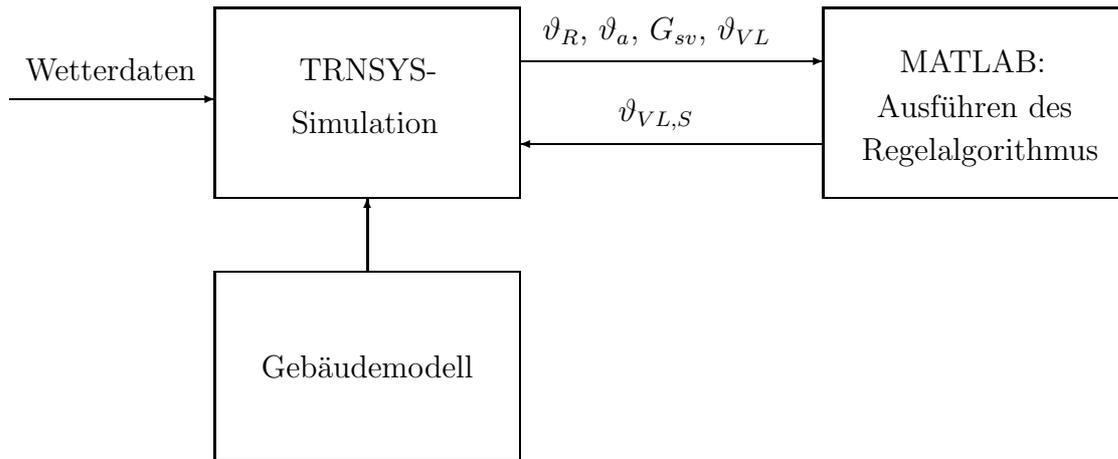


Abb. 4.1. Kopplung der Gebäudesimulation unter TRNSYS mit der Reglersoftware unter MATLAB

Die Simulationsumgebung besteht aus drei wesentlichen Teilen:

1. einem detaillierten Gebäudemodell,
2. einem Verknüpfungsmodule der Simulationskomponenten,
3. dem Regelalgorithmus zur Berechnung der Sollvorlauftemperatur bzw. Heizgröße in MATLAB.

Der Algorithmus zur Heizungsregelung wurde bereits in Kapitel 3 beschrieben.

4.1.1 Das Gebäudemodell

Für die Tests des Algorithmus wurde ein Modell des Referenzhauses des Instituts für Solarenergieforschung in Emmerthal erstellt. Eine Skizze des Aufbaus des Gebäudes findet sich in Abbildung B.1 und B.2 im Anhang B.1. In Abschnitt B.2.2 des Anhangs ist das Basisgebäudemodell detailliert beschrieben. Das detaillierte Gebäudemodell ist ein Modell mit verteilten Parametern. Es enthält Informationen über die thermische Zonierung, Wandflächen und -aufbau, Fensterflächen und -ausrichtung sowie über interne Gewinne und Luftwechselraten bei natürlicher Lüftung. Außerdem können regelbare Haustechniksysteme (Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlage) implementiert werden.

Für die Simulation wurde eine vertikale Unterteilung des Gebäudes in 3 thermische Zonen (vgl. Abbildung B.3 auf Seite 183) vorgenommen. Die im realen Fall vorhandene vertikale Zonierung zwischen Ober- und Untergeschoß wurde vernachlässigt. Ziel der Simulationen war nicht eine möglichst genaue theoretische Abbildung der Meßergebnisse im Gebäude, sondern ein relativer Vergleich verschiedener Regelalgorithmen (Parametervariation des vorausschauenden selbstadaptierenden Algorithmus und einer herkömmlichen Heizungsregelung) unter realitätsnahen Verhältnissen. Da das prinzipielle dynamische Verhalten des Gebäudes jedoch gut abgebildet wurde, sind Vergleiche zwischen verschiedenen Simulationen möglich und ihre Ergebnisse übertragbar. Damit bieten die Simulationstests einen großen Vorteil gegenüber experimentellen Untersuchungen, bei denen eine Vielzahl von nicht steuerbaren Einflüssen zusätzlich auf das Gebäude wirkt.

Als Referenzzone wurde die südliche Gebäudezone entsprechend den in Abschnitt 3.4.2 aufgestellten Forderungen gewählt. Nur für diese Zone wird die Heizung durch die in MATLAB berechnete Sollvorlauftemperatur geregelt. Die anderen beiden thermischen Zonen des Gebäudemodells werden entsprechend eines TRNSYS-internen Modus beheizt. Hierbei berechnet das Simulationsprogramm zu jedem Zeitschritt die notwendige Heizleistung, um die Sollraumtemperatur zu erhalten, und führt diese unmittelbar zu. Dies entspricht einer ideal flinken Heizungsregelung, bei der keine Trägheit des Heizsystems wirkt. Die Raumtemperatursollwerte werden hier jedoch extern aus der MATLAB-Umgebung vorgegeben, so daß eine Sollwertänderung in allen beheizten Zonen gleichzeitig wirkt. Da die TRNSYS-interne Regelung dann mit dem gleichen Sollwert wie die Heizungsregelung der südlichen Gebäudezone arbeitet, treten somit keine großen Temperaturdifferenzen und damit Wärmeströme zwischen den beheizten Zonen auf. Die Heizleistung für die Referenzzone wird mit Hilfe von Gleichung 2.2 in TRNSYS berechnet und als Gewinn an die Südzone übertragen. Dabei erfolgt eine Unterscheidung in konvektive und radiative Wärmeabgabe.

Tabelle 4.1 listet wichtige Größen auf, die für die Simulationen als konstant vorgegeben waren. Zum Test des Verhaltens der entwickelten vsHR auch in anderen Gebäuden wurde

Tabelle 4.1. Konstante Vorgaben bei der Gebäudesimulation mit dem Basismodell

Parameter	Wert	Einheit
Dichte der Luft	1.204	$[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}]$
Luftfeuchte	50	%
Luftwechsel durch Infiltration	0.24	$[\frac{1}{\text{h}}]$
solarer Absorptionsgrad der Wände	0.6	[-]
spezifische Wärmekapazität der Luft	1.012	$[\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}]$
Wärmeübergangskoeffizient außen	17.8	$[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}]$
Wärmeübergangskoeffizient innen	3.1	$[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}]$

das Basismodell hinsichtlich Dämmstandard und Bauweise modifiziert. Eine Beschreibung der Modifikationen befindet sich in Anhang B.2.3.

4.1.2 Die TRNSYS Beschreibungsdatei

Die TRNSYS-Beschreibungsdatei dient zur Kopplung aller Simulationskomponenten und zur Steuerung des Simulationsprozesses. Abbildung 4.2 zeigt die verwendeten Komponenten und ihre Verschaltung. Als Zeitschritt der Simulation wurden 15 Minuten gewählt, da dies dem festgelegten Zeitschritt für den Aufruf des Regelalgorithmus entspricht. Das sogenannte TRNSYS-Deck besteht aus mindestens 7 Komponenten (Types) sowie einigen Gleichungen. Während der Berechnung wird jede Komponente zu jedem Zeitschritt aufgerufen. Beim Aufruf der Komponente werden ihr Eingangsgrößen übergeben, die Komponente führt Berechnungen durch und übergibt Ausgangswerte, die wiederum als Eingangsgrößen für andere Komponenten dienen. Im TRNSYS-Deck ist die Verknüpfung aller Komponenten, Konstanten und allgemeiner Parameter definiert.

Der Datenleser liest Wetter- und andere Daten aus Dateien und stellt sie den anderen Komponenten zur Verfügung. Für die Simulationen werden in Hannover gemessene Wetterdaten aus dem Jahr 1995 verwendet. Die vom Datenleser bereitgestellten Meßwerte der horizontalen solaren Einstrahlung (global und diffus) werden an die beiden Strahlungsprozessoren

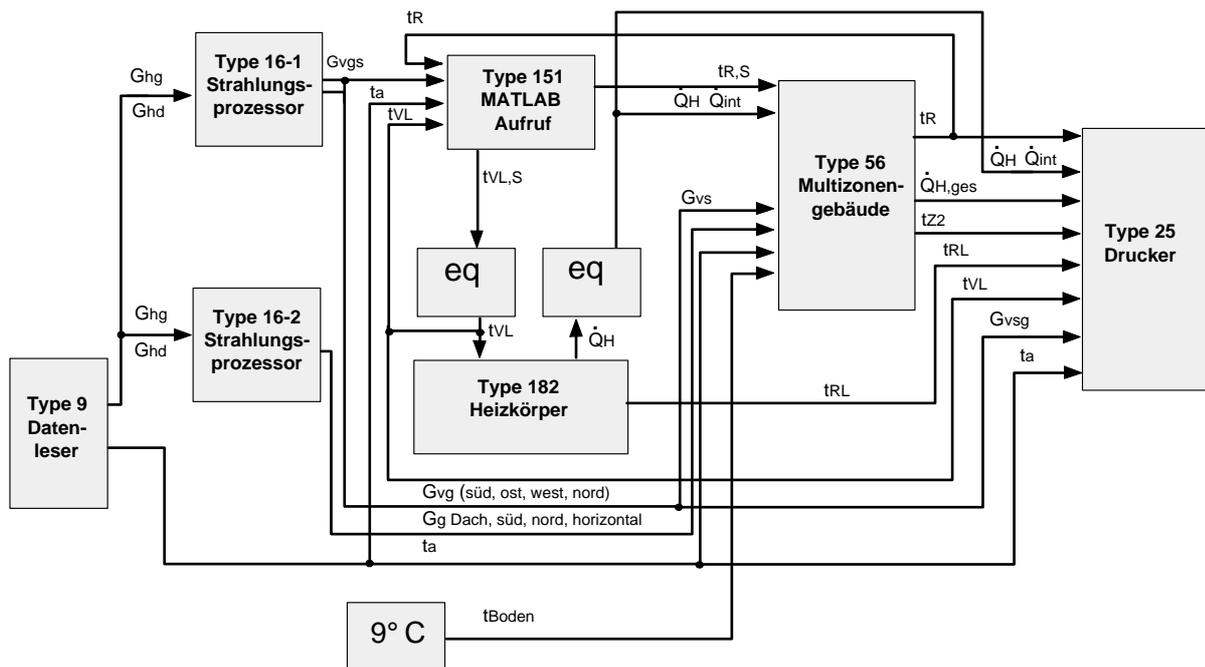


Abb. 4.2. Blockdiagramm der TRNSYS-Beschreibungsdatei (Deck) zur Simulation eines Gebäudes mit verschiedenen Heizungsregelstrategien. Dargestellt sind die simulierten Komponenten (Types) sowie ihre Verknüpfungen. Mit „eq“ werden Verknüpfungen von Größen mittels algebraischer Gleichungen bezeichnet.

übergeben. Mit den Strahlungsprozessoren wird die horizontale Einstrahlung auf die Empfangsflächen des Gebäudes umgerechnet. Als Diffusstrahlungsmodell dient das Hay-Davies-Modell, wobei die Albedo konstant zu 0.2 angesetzt ist. Die berechneten Einstrahlungen auf die Flächen dienen als Eingangsgröße für die Simulation des Gebäudes. Zusätzlich wird die Einstrahlung auf die Südfassade bei der Berechnung der Heizungsvorlauf-temperatur durch den Algorithmus zur vsHR (in MATLAB) benötigt.

Der Algorithmus verwendet weiterhin die simulierte Raumtemperatur, die Außentemperatur sowie die Vorlauf-temperatur als Eingangsgrößen. Die MATLAB-Schnittstelle ruft zu jedem Zeitschritt den in der MATLAB-Umgebung laufenden Regelalgorithmus auf und übergibt die 4 Eingangsgrößen¹. Die softwaretechnische Umsetzung der Wertübergabe ist in [55] beschrieben. Der Regelalgorithmus berechnet eine neue Sollvorlauf-temperatur. Vernachlässigt wurde der Fehler, der beim praktischen Einsatz durch eine ungenaue Einstellung der Sollvorlauf-temperatur am Mischerventil entsteht. Die Vorlauf-temperatur ist gleich der Sollvorlauf-temperatur, sofern die Kesselleistung dies zuläßt.

Die Vorlauf-temperatur wird von der Heizkörperkomponente verwendet, um die Heizleistung für die Zone und die Rücklauf-temperatur zu berechnen. Vereinfachend wurde angenommen, daß durch die Rohrleitungen vom Mischerventil zum Heizkörper im Referenzraum keine Wärmeverluste und Zeitverzögerungen entstehen. Die Heizleistung ist Eingangsgröße für die Referenzzone im Gebäudemodell. Als weiteren Ausgangswert liefert die MATLAB-Schnittstelle die Sollraumtemperatur, die Eingangsgröße für die Gebäudesimulation mit der TRNSYS-internen Heizung für alle Zonen außer der Referenzzone ist.

¹Im experimentellen Fall werden die 4 Größen von der Sensorik gemessen.

4.1.3 Simulation des Heizkörpers

Die von der MATLAB-Schnittstelle als Ausgangsgröße gelieferte Sollvorlauftemperatur wird in einer Gleichung hinsichtlich der maximalen Kesselleistung korrigiert.

$$\dot{Q}_K = \min(\dot{Q}_{K,max}, \max(0, \dot{m}_w c_{p,w} \cdot (\vartheta_{VL} - \vartheta_{RL})))$$

$$\vartheta_{VL} = \vartheta_{RL} + \frac{\dot{Q}_K}{\dot{m}_w c_{p,w}}$$

Dabei beträgt der Massenstrom durch den Heizkörper im Standardfall 250 kg h^{-1} . Die so erhaltene Vorlauftemperatur dient unter Vernachlässigung der Rohrleitungsverluste als Eingangsgröße für die Heizkörperkomponente. Darin wird die Heizleistung und die Rücklauftemperatur berechnet. Die Rücklauftemperatur ergibt sich durch Umstellen der Bilanzgleichung 2.23. Die Wärmeleistung des Heizkörpers \dot{Q}_{HK} berechnet sich entsprechend Gleichung 2.25, wobei die logarithmische Übertemperatur verwendet wird. Die Normheizleistung wurde aus einer Wärmebedarfsrechnung gemäß DIN 4701 [23] ermittelt.

Die von der Heizkörperkomponente berechnete Heizleistung wird in einem weiteren Gleichungsblock in den konvektiven und Strahlungsanteil aufgespalten (abhängig von der Art des Heizkörpers). Für den im Referenzraum installierten Plattenheizkörper mit 2 Platten und einem Konvektionsblech wurde aus [68] ein Strahlungsanteil von 0.28 entnommen.

4.2 Der Referenzfall

4.2.1 Simulation der konventionellen Heizungsregelung

Als konventionelle Heizungsregelung wird hier die in sehr vielen Gebäuden realisierte außen-temperaturgeführte Vorlauftemperatursteuerung in Zusammenwirken mit Heizkörperthermostatventilen zur Raumtemperaturregelung bezeichnet. Dabei ist die Vorlauftemperatur eine lineare Funktion der Außentemperatur, deren Parameter zeitabhängig variieren. Für die Simulationen wurde die auch im experimentellen Fall im Gebäude verwendete Heizkennlinie eingesetzt:

$$\vartheta_{VL} = st \cdot \vartheta_a + bw \quad . \quad (4.1)$$

Dabei bezeichnet bw den sogenannten Basiswert und st den Anstieg der Heizkennlinie. Für die verschiedenen simulierten Gebäudetypen muß die Heizkurve an den Heizleistungsbedarf angepaßt werden. Zum einen muß ausreichend Heizleistung zur Bereitstellung der entsprechenden Raumtemperaturen zur Verfügung gestellt werden. Die bereitgestellte Heizleistung soll jedoch den Bedarf auch nicht zu sehr überschreiten, da sich anderenfalls die Regelbarkeit der Heizleistung durch das Thermostatventil verschlechtert (Schwingungserscheinungen). Tabelle 4.2 listet die Parameter der Heizkurve für die verschiedenen simulierten Gebäudetypen (Altbau, Gebäude nach Wärmeschutzverordnung von 1995, Niedrigenergiehaus, Passivhaus) auf². Bei der Simulation wird die Heizkörpereintrittstemperatur gleich

²Von Feist stammt die Definition eines Passivhauses: „Ein Passivhaus ist ein Gebäude, in welchem der Heizwärmebedarf so gering ist, daß ohne Komfortverlust auf ein separates Heizsystem verzichtet werden kann; dies ist in Deutschland bei einem Jahresheizwärmebedarf unter $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ bezogen auf die Wohnfläche der Fall.“ [36] Somit ist die Verwendung eines Pumpenwarmwasserheizsystems im Gebäudemodell

Tabelle 4.2. Angenommene Parameter der Heizkurve der konventionellen Heizungsregelung für die Simulation mit verschiedenen Gebäudetypen, Auslegungstemperatur $\vartheta_a = -14^\circ\text{C}$

Gebäudetyp	bw tagsüber [$^\circ\text{C}$]	st	$\vartheta_{VL,N} / \vartheta_{RL,N}$
Passivhaus	36	-0.6	45 / 30
Niedrigenergiehaus	55	-1	70 / 50
Gebäude nach WSV '95	55	-1	70 / 50
Altbau	60	-1.33	80 / 60

der Vorlauftemperatur angenommen. Als untere Grenze für die Vorlauftemperatur wurde jeweils 20°C angesetzt.

Die Funktion des Ventils wird über eine Korrektur des Massenstroms berechnet (siehe Abbildung 4.3). Dabei wird angenommen, daß bei vollständig geschlossenem Ventil für den betreffenden Heizkörper der Massenstrom gleich null und bei vollständig geöffnetem Ventil der Massenstrom nicht beeinflußt wird. Zwischen Öffnungs- und Schließpunkt wird ein linearer Verlauf des Massenstroms in Abhängigkeit von der Raumtemperatur angenommen. Der Schließpunkt der Schließkennlinie liegt 1.0 K über der Sollraumtemperatur, der Öffnungspunkt 1.0 K darunter. Öffnungskennlinie und Schließkennlinie sind zur Realisierung einer Schalthysterese um 1 K versetzt (vgl. DIN 3841 [21]). Der Schließpunkt verschiebt sich in Abhängigkeit vom Raumtemperatursollwert. Bei höheren Sollwerten muß ein höherer Schließpunkt zur Kompensation der größeren Verluste gewählt werden, um eine entsprechende Heizleistung zur Verfügung zu stellen. Weiterhin wurde eine Unterscheidung in rein

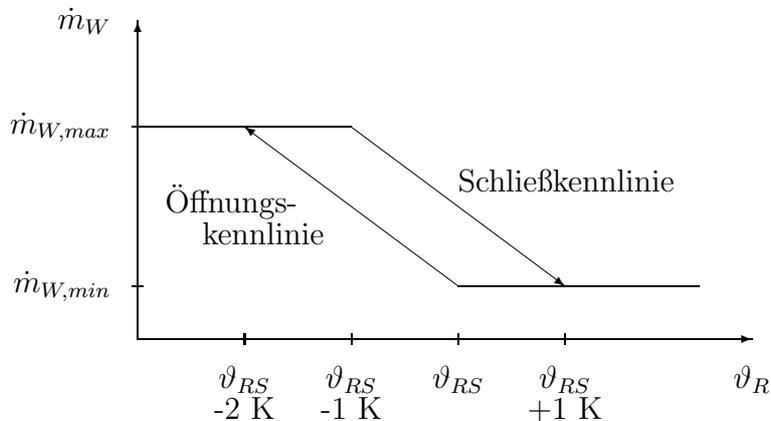


Abb. 4.3. Korrektur des Massenstroms zur Simulation eines Heizkörperthermostatventils

mechanische und in elektronische Thermostatventile vorgenommen. Elektronische Thermostatventile bieten direkt am Bedienfeld die Möglichkeit, eine Tag-Nacht-Unterscheidung des Raumtemperatursollwertes vorzunehmen. Dadurch verschieben sich die Ventilkennlinien und es wird auch während der Nacht die Raumtemperatur geregelt. Ein rein mechanisches Thermostatventil, welches nicht von Hand verstellt wird, öffnet nachts bei Absinken der Raum-

dell hier nur als theoretischer Grenzfall zum Test des Algorithmus zu betrachten. Ein Lüftungssystem mit Wärmerückgewinnung wurde für das Modell ebenfalls nicht vorgesehen, wodurch sich der Wärmebedarf entsprechend erhöht. Aus Gründen der Einfachheit wird dennoch hier der Begriff des Passivhauses verwendet, da der Baustandard ansonsten diesen Anforderungen entspricht.

temperatur (aufgrund der durch die Heizkurve reduzierten Vorlauftemperatur). Dadurch wird vergleichsweise mehr Wärme in den Raum abgegeben. Die Unterscheidung zwischen den Ventilarten wurde in der Simulation mit Hilfe des Raumtemperatursollwertes, der zur Berechnung der Ventilkennlinien dient, vorgenommen.

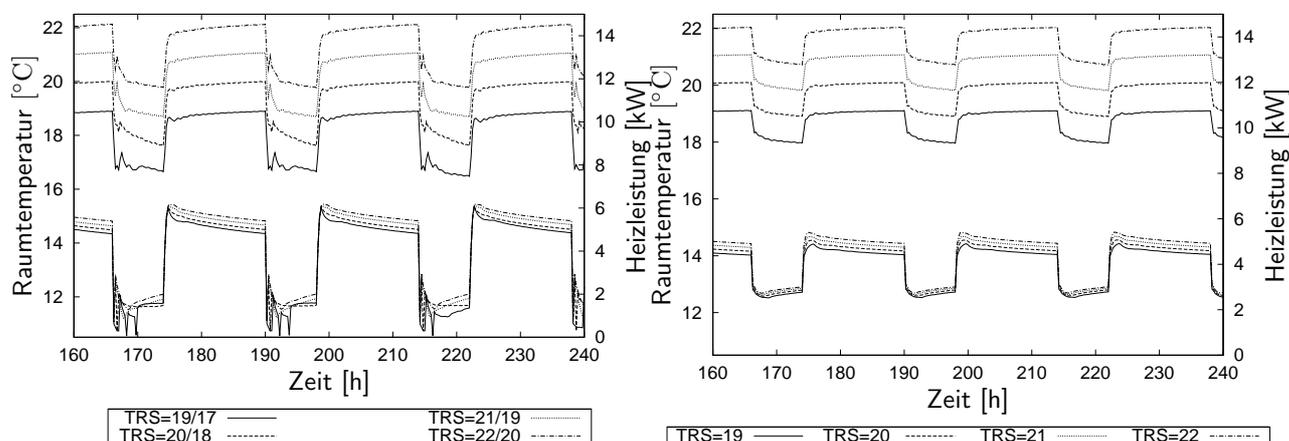


Abb. 4.4. Simuliertes Regelverhalten der konventionellen Heizungsregelung für verschiedene Sollraumtemperaturen TRS (elektronisches Thermostatventil) und jeweils einer Differenz zwischen Tag- und Nachtsollwert von 2 K, $\vartheta_a = konst = -12 \text{ }^\circ\text{C}$, $G_{sv} = 0$

Abb. 4.5. Simuliertes Regelverhalten der konventionellen Heizungsregelung für verschiedene Sollraumtemperaturen bei Verwendung eines Thermostatventils mit konstanter Sollwertvorgabe TRS (mechanisches Thermostatventil), $\vartheta_a = konst = -12 \text{ }^\circ\text{C}$, $G_{sv} = 0$

Abbildung 4.4 zeigt das Regelverhalten der konventionellen Heizungsregelung für verschiedene Sollraumtemperaturen (elektronisches Thermostatventil) und jeweils einer Differenz zwischen Tag- und Nachtsollwert von 2 K. Abbildung 4.5 zeigt das Regelverhalten der konventionellen Heizungsregelung für verschiedene Sollraumtemperaturen bei Verwendung eines Thermostatventils mit konstanter Sollwertvorgabe. Ein Vergleich der Temperaturverläufe bei verschiedener Tag-Nacht-Spreizung zeigt, daß das Führungsverhalten tagsüber auch vom Nachtsollwert abhängt, da die verfügbare Heizleistung zum Wiederaufheizen der thermischen Gebäudemasse am Morgen begrenzt ist. Die Änderung der Heizleistung bei verschiedenen Raumtemperaturen ergibt sich aus dem Dämmstandard des Gebäudes.

Die Abbildungen 4.6 und 4.7 zeigen das Regelverhalten mit einem elektronischen Thermostatventil bei variablen Störgrößen Außentemperatur und Einstrahlung für einen ausgewählten Zeitraum im Januar. Die entsprechenden Darstellungen für ein mechanisches Thermostatventil finden sich in Abbildung 4.8 und 4.9. Bei geringer Einstrahlung wird mit beiden Arten von Thermostatventilen gut auf den Sollwert ausgeglichen. Hohe Einstrahlungen führen zu Überhitzungen, da die Heizleistung nicht rechtzeitig und ausreichend reduziert werden kann. Vereinzelt treten Schwingungen in der Heizleistung auf. Diese sind auf den Wechsel zwischen Öffnungs- und Schließkurve im Thermostatventil zurückzuführen.

Ein weiterer Vergleich wurde zwischen einer Raumtemperaturregelung mittels Thermostatventil und einem PID-Algorithmus vorgenommen (Abbildungen 4.10 und 4.11). Der PID-Algorithmus erweist sich hinsichtlich der Vermeidung von Überhitzungen als etwas günstiger, da die Heizleistung besser reduziert werden kann als bei reinem P-Verhalten. Bei einem variablen Sollwert wird vom PID-Algorithmus für den morgendlichen Aufheizvorgang eine höhere Leistungsspitze verlangt.

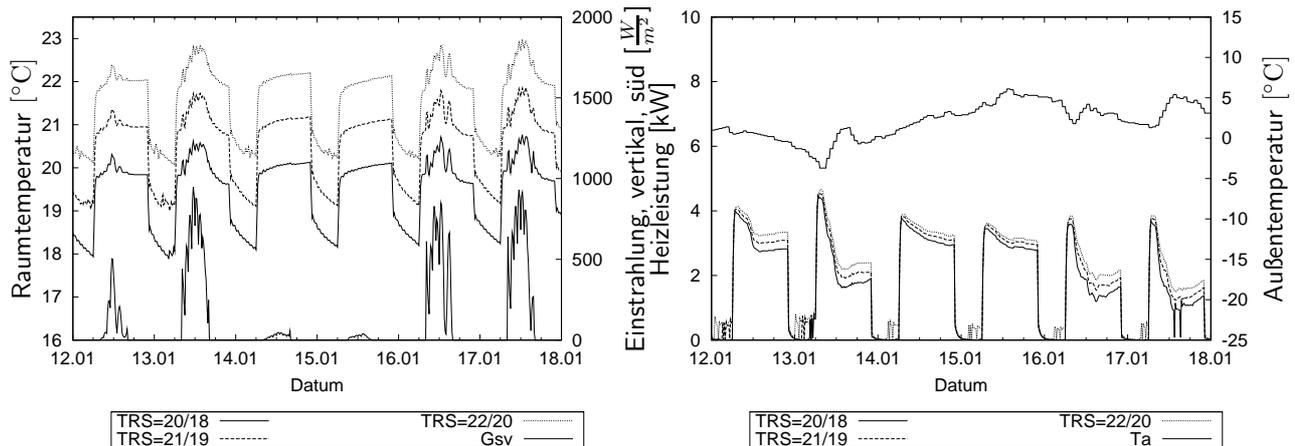


Abb. 4.6. Simuliertes Regelverhalten der konventionellen Heizungsregelung für verschiedene Sollraumtemperaturen TR_S bei Verwendung eines Thermostatventils mit variabler Sollwertvorgabe, Wetterdaten Hannover 1995

Abb. 4.7. Simulierte Heizleistung der konventionellen Heizungsregelung für verschiedene Sollraumtemperaturen TR_S bei Verwendung eines Thermostatventils mit variabler Sollwertvorgabe, Wetterdaten Hannover 1995

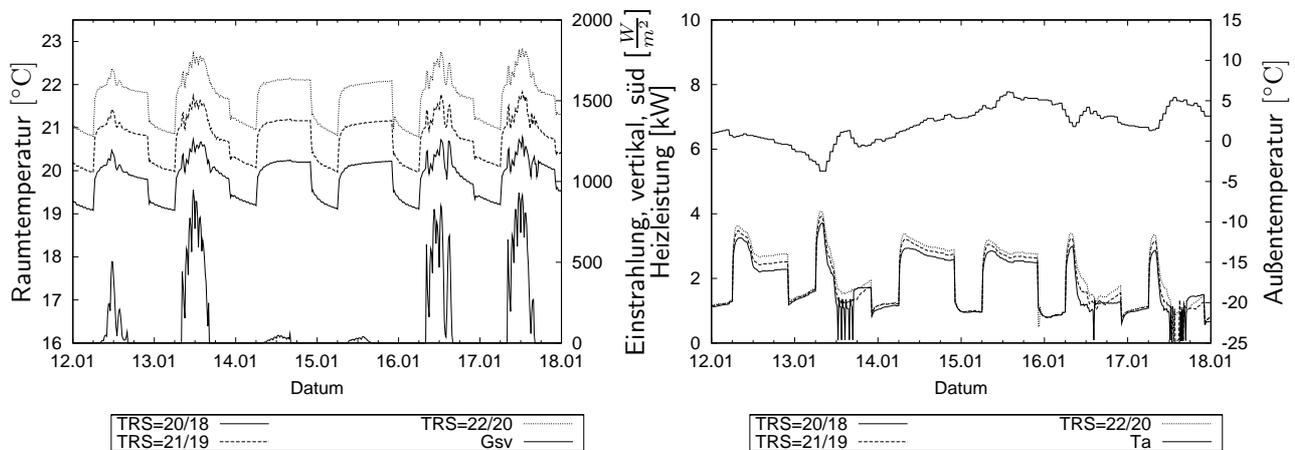


Abb. 4.8. Simuliertes Regelverhalten der konventionellen Heizungsregelung für verschiedene Sollraumtemperaturen TR_S bei Verwendung eines Thermostatventils mit konstanter Sollwertvorgabe, Wetterdaten Hannover 1995

Abb. 4.9. Simulierte Heizleistung der konventionellen Heizungsregelung für verschiedene Sollraumtemperaturen TR_S bei Verwendung eines Thermostatventils mit konstanter Sollwertvorgabe, Wetterdaten Hannover 1995

Die in diesem Abschnitt erläuterte Simulationsumgebung wurde für die im weiteren erläuterten Tests verwendet. Die beschriebene Referenzregelung dient zum Vergleich mit einem herkömmlichen Verfahren. Im folgenden wird das Regelverhalten der vorausschauenden selbstadaptierenden Heizungsregelung (vsHR) untersucht.

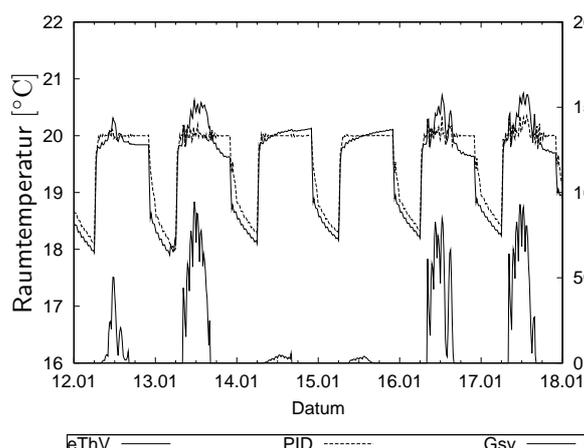


Abb. 4.10. Simuliertes Regelverhalten der konventionellen Heizungsregelung für Sollraumtemperaturen $\vartheta_{RS} = 20\text{ °C}$, tagsüber und $\vartheta_{RS} = 18\text{ °C}$ nachts bei Verwendung eines Thermostatventils mit variabler Sollwertvorgabe (eThV) und einem PID-Algorithmus, Wetterdaten Hannover 1995

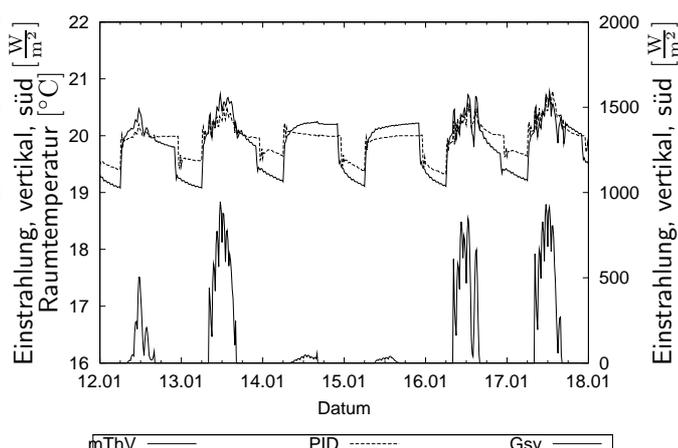


Abb. 4.11. Simuliertes Regelverhalten der konventionellen Heizungsregelung für Sollraumtemperaturen $\vartheta_{RS} = konst = 20\text{ °C}$ bei Verwendung eines Thermostatventils mit konstanter Sollwertvorgabe (mThV) und einem PID-Algorithmus, Wetterdaten Hannover 1995

4.3 Wirkung der Einflußgrößen auf das Regelverhalten

Die Untersuchungen dieses Abschnitts dienen dazu, die Wirkung verschiedener Einflußgrößen auf das Regelverhalten zu testen. Die Variation von verschiedenen Reglerparametern in Abschnitt 4.3.1 hatte die Vorauswahl eines geeigneten Parametersatzes für alle weiteren Tests zum Ziel. Die Parameter sollten dabei derart ausgewählt werden, daß eine genügende Robustheit aber auch Flexibilität der Regelung gegenüber äußeren Störungen gegeben ist. Sie sollten weiterhin eine Übertragbarkeit der Regelung auf andere Gebäude und Heizsysteme ohne nennenswerte Anpassungen bei gleicher Regelgüte ermöglichen. Der Einfluß gemessener Störgrößen wird in Abschnitt 4.3.2 und der Einfluß ungemessener Störgrößen in Abschnitt 4.3.3 untersucht.

4.3.1 Einfluß von Parametern der Regelung

Die Untersuchung der Regeleigenschaften, ohne das Einwirken von gemessenen und ungemessenen Störgrößen dient zunächst dem Nachweis, daß der Regelalgorithmus in der Lage ist, einem gewünschten Sollwert zu folgen. Ferner läßt sich die Auswirkung verschiedener Parameter, die während des Regelvorgangs unveränderlich sind, untersuchen und eine Voreinstellung vornehmen. Dabei muß in Betracht gezogen werden, daß ohne Störgrößen keine oder nur geringe Abhängigkeiten von einem bestimmten Parameter auftreten können, mit Störgrößen aber die Abhängigkeiten erheblich sein können.

Die im weiteren untersuchten Parameter sind der Komfortparameter cl , die Anzahl der Sprungantwortkoeffizienten SAK , der Vorhersagehorizont P und der Regelhorizont M . Der Komfortparameter cl ist vom Nutzer einstellbar und besagt, inwieweit er morgens Untertemperaturen (Komforteinbußen) zur besseren Nutzung erwarteter solarer Gewinne zulassen

möchte. cl kann Werte von 0..9 annehmen, wobei 9 bedeutet, daß keine Untertemperaturen zugelassen werden. SAK ist die Anzahl der Zeitschritte, nach der die Sprungantworten, die das dynamische Gebäudeverhalten charakterisieren, abgeschnitten werden. Der Vorhersagehorizont P und der Regelhorizont M in der Kostenfunktion bestimmt, für welche zukünftigen Zeiträume eine Regelabweichung betrachtet wird bzw. welcher zukünftige Zeitraum für die Behebung dieser Regelabweichung zur Verfügung steht. SAK , P und M können nur während eines Inbetriebnahmeingriffs eingestellt werden und sind während des Betriebs unveränderlich. Die mathematische Funktion der Parameter ist genauer in den Abschnitten 3.1.2 bis 3.3 erläutert.

Abbildung 4.12 zeigt das Regelverhalten ohne Störgrößen für verschiedene Kombinationen von Regel- und Vorhersagehorizont. Zunächst ist ein sehr gutes Ausregeln der vsHR auf den

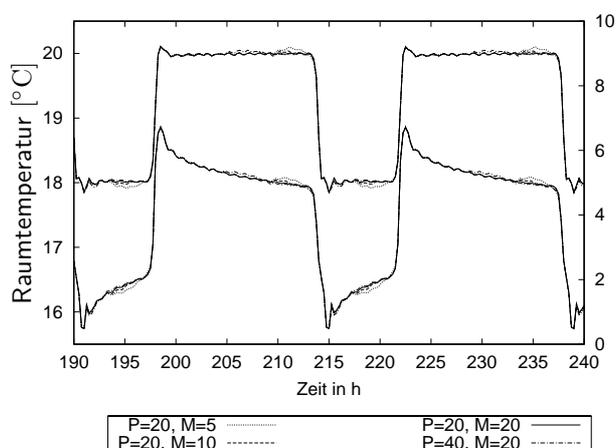


Abb. 4.12. Simuliertes Regelverhalten ohne Störgrößen, Variation von Vorhersagehorizont P und Regelhorizont M , Komfortparameter $cl = 0$, Anzahl der Sprungantwortkoeffizienten $SAK = 100$, Sollwert 18/20

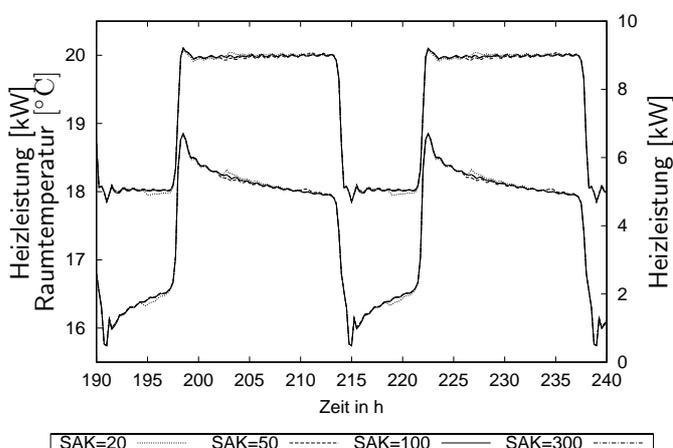


Abb. 4.13. Simuliertes Regelverhalten ohne Störgrößen, Variation der Anzahl der Sprungantwortkoeffizienten SAK , $P = M = 20$, Komfortparameter $cl = 0$, Sollwert 18/20

Sollwert festzustellen. Insgesamt ist die Abhängigkeit ohne das Einwirken von Störgrößen jedoch gering. Für unterschiedliche P und M ergeben sich Abweichungen jeweils vor einem Sollwertsprung. Diese resultieren aus der Berechnung der Reglerverstärkung: Sollwertabweichungen in naher Zukunft werden bei kleinem M sehr hoch, in ferner Zukunft sehr niedrig oder sogar negativ gewichtet. Durch das große P wird trotzdem der künftige Sollwertsprung vorhergesehen. Die Multiplikation der Sollwertabweichung mit der Reglerverstärkung führt zu einer Verstellung der Vorlauftemperatur in der falschen Richtung. Dies läßt sich vermeiden, wenn $M=P$ gewählt wird.

Die Simulation für verschiedene Werte $M=P$ im Bereich von 5..20 ohne Störgrößen ergab keine merklichen Unterschiede. Im Abschnitt 4.3.2 wird auf die Abhängigkeit des Regelverhaltens von $M=P$ unter dem Einfluß von Störgrößen eingegangen.

Abbildung 4.13 zeigt das Regelverhalten ohne Störgrößen für eine Variation der Anzahl der Sprungantwortkoeffizienten SAK , die in die Vorhersage der Regelgröße Raumtemperatur einbezogen werden. Die Abweichungen im Rahmen der hier gezeigten Variationen sind wiederum klein. Aus einer Analyse der zugrundeliegenden Daten lassen sich jedoch Unterschiede interpretieren. Für $SAK = 20$ resultiert ein Anheben bzw. Absenken der Heizleistung jeweils 20 Zeitschritte (5 Stunden) nach einem Anheben bzw. Absenken der Heizleistung aufgrund

eines Sollwertsprunges. Durch das vorzeitige Abschneiden der Sprungantwort wird nicht richtig vorhergesagt, daß sich die Raumtemperatur noch weiter erhöht bzw. verringert hätte. Der Algorithmus sagt folglich eine Unter- bzw. Überschreitung des Raumtemperatursollwertes voraus und reagiert mit einer Erhöhung bzw. Verringerung der Heizleistung. Das gleiche Verhalten ist auch für $SAK = 50$ zu beobachten, entsprechend 50 Zeitschritte nach einem Heizleistungssprung. Ab $SAK = 100$ ist die Sprungantwort weitestgehend erhalten und die genannten Effekte treten nicht mehr auf. Da sich der Rechenaufwand mit der Anzahl der Sprungantwortkoeffizienten stark erhöht, wurde ein SAK von 100 für den Regelalgorithmus ausgewählt. Für sehr träge Systeme kann jedoch ein höherer Wert sinnvoller sein.

Entsprechend Gleichung 3.27 werden die Wichtungsmatrizen in der Kostenfunktion mit Hilfe der vorhergesagten Einstrahlung und des Komfortparameters berechnet. Wenn keine Einstrahlung vorhergesagt wird, ergeben sich demzufolge keine Unterschiede bei Variation des Komfortparameters. Im folgenden Abschnitt wird auf die Unterschiede im Regelverhalten für verschiedene Komfortparameter sowie P und M bei Vorhandensein von Störgrößen eingegangen.

4.3.2 Regelverhalten unter Einfluß gemessener Störgrößen

Die Abhängigkeit des Regelverhaltens vom Komfortparameter soll hier anhand einer Periode in der Übergangszeit erläutert werden (Abbildungen 4.14 und 4.15). Für einen Komfortpara-

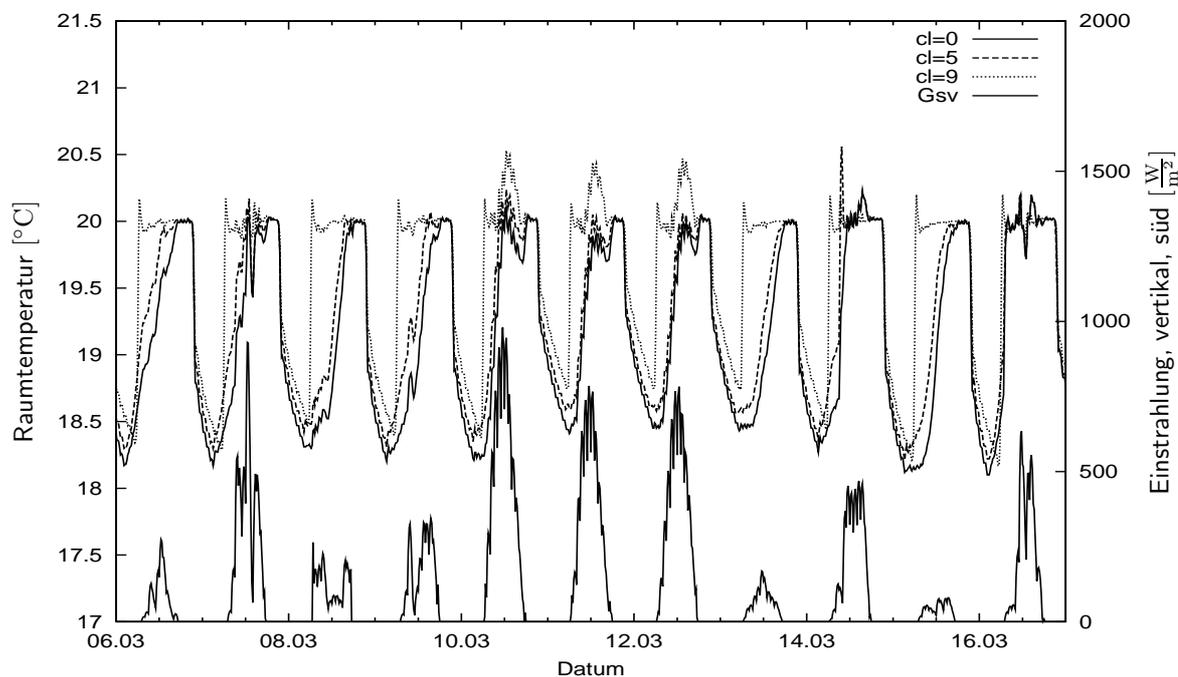


Abb. 4.14. Simuliertes Regelverhalten mit gemessenen Störgrößen, Variation des Komfortparameters cl , $SAK = 100$, $P = M = 20$, Raumtemperatursollwert=18/20 °C

meter von $cl = 9$ ist ein sehr exaktes Abfahren der Sollwertvorgabe festzustellen, sofern nicht zu hohe Einstrahlungen vorliegen. Wenn morgens Einstrahlungsgewinne vorhergesagt werden, so bleibt für $cl < 9$ die Heizleistung reduziert, um die Raumtemperaturerhöhung durch

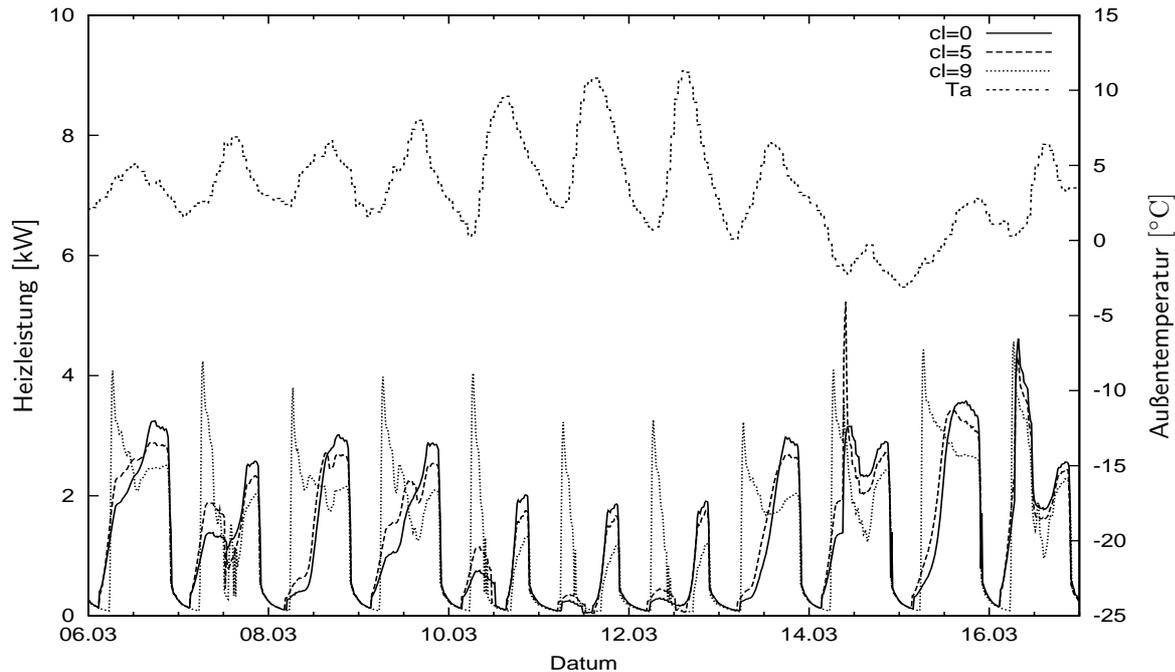


Abb. 4.15. Verlauf der Heizleistung bei Simulation mit gemessenen Störgrößen, Variation des Komfortparameters cl , $SAK = 100$, $P = M = 20$, Raumtemperatursollwert=18/20 °C

die solaren Gewinne zu ermöglichen. An den gezeigten drei aufeinanderfolgenden strahlungsreichen Tagen (10.3.-12.3.) wird so eine Überhitzung vermieden. Wird keine Reduktion der Heizleistung zugelassen ($cl = 9$), so tritt in den Mittagstunden eine Überschreitung des Raumtemperatursollwertes auf. Es zeigt sich aber auch die Problematik einer fehlerhaften Wettervorhersage. Das relativ hohe Gewicht der Einstrahlungssumme des vergangenen Tages führt bei aufeinanderfolgenden Tagen mit stark unterschiedlichen solaren Gewinnen zu einer Fehlvorhersage. Diese wiederum führt dazu, daß entweder der Raumtemperatursollwert unnötig lange unterschritten oder die solaren Gewinne nicht in der möglichen Höhe genutzt werden. Der Einfluß der Wettervorhersage wird genauer in Abschnitt 4.4.5 untersucht. Die Heizenergieeinsparungen bei Wahl eines kleineren Komfortparameters finden vor allem in den Vormittagstunden statt. Nachmittags muß z.T. mehr Heizenergie zugeführt werden, um die Sollraumtemperatur zu erreichen bzw. zu halten. Eine Analyse von Heizenergieverbrauch und Komfort für verschiedene Komfortparameter findet sich in Abschnitt 4.4.2.

In Abschnitt 4.3.1 wurde bereits erläutert, daß die Verwendung unterschiedlicher Werte für den Vorhersagehorizont P und den Regelhorizont M ungünstig für das Regelverhalten ist. Für gleiche Werte von P und M zeigten sich unabhängig von deren Höhe keine Unterschiede bei der Simulation ohne Störgrößen. Abbildung 4.16 zeigt das Regelverhalten in Abhängigkeit von $P = M$ bei Vorhandensein von Störgrößen. Bei Vorhandensein von Störgrößen zeigt sich eine starke Abhängigkeit von $P = M$. Die resultierenden Verläufe sind das Ergebnis des Zusammenspiels von Wichtungsmatrizen und Länge des Vektors, der die Regelverstärkung für P zukünftige Zeitschritte enthält. Bei kleinem cl und vorhergesagten Einstrahlungsgewinnen ist die Regelverstärkung insgesamt relativ klein. Durch Multiplikation mit der zukünftigen Sollwertabweichung erhält man eine ebenfalls kleine Änderung der Stellgröße. Diese wiederum ist umso größer, je länger der betrachtete zukünftige Zeitraum, also P ist. Dies führt zu einem späteren Anheben der Raumtemperatur für kleine P bzw. M . Werden

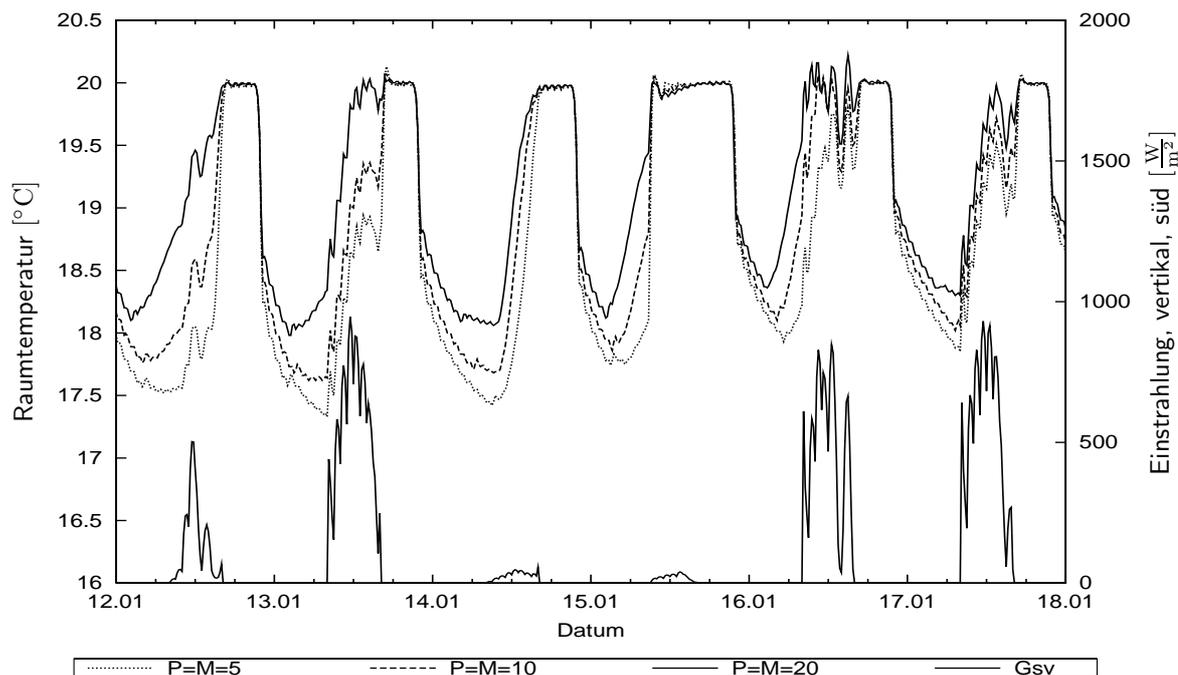


Abb. 4.16. Simuliertes Regelverhalten mit gemessenen Störgrößen, Variation von $P = M$, $cl = 5$, $SAK = 100$, Raumtemperatursollwert = $18/20$ °C

nur geringe Einstrahlungsgewinne vorhergesagt, so ist die sich ergebende Regelverstärkung und die Reaktion auf Sollwertabweichungen insgesamt größer. Die Wirkung des Vorhersagehorizonts für diesen Fall ist deutlich an den simulierten Temperaturverläufen in der Nacht vom 14. zum 15.1. zu erkennen. Bei großem P wird der zukünftige Sollwertsprung bereits viel früher in die Stellgröße einbezogen und die Raumtemperatur erhöht.

Bei großem cl reduzieren sich die Unterschiede zwischen dem Regelverhalten bei verschiedenen Vorhersage- und Regelhorizonten. Sowohl cl als auch P und M spielen offensichtlich eine erhebliche Rolle für das Regelverhalten. Kleinere P bzw. M führen zu einer Reduktion des Heizenergieverbrauchs, aber auch zu einer Verschlechterung des thermischen Komforts. Der Vorhersage- und Regelhorizont muß so gewählt werden, daß Heizenergieverbrauch und Komfort in einem sinnvollen Verhältnis stehen. Weiterhin soll eine entsprechende Variationsbreite im Zulassen von Untertemperaturen zur besseren Nutzung solarer Gewinne durch den Parameter cl gegeben ein. Die Wahl von P und M orientierte sich ferner an der Zielstellung, die dynamische Wirkung der treibenden Kräfte auf die Regelgröße möglichst frühzeitig zu erfassen. Dies ist insbesondere bei sehr trägen Heizsystemen für die Regelbarkeit von großer Bedeutung. Daher wurde hier $P = M = 20$ für den Regelalgorithmus ausgewählt.

4.3.3 Regelverhalten unter Einfluß ungemessener Störgrößen

Im realen Anwendungsfall wirken zusätzlich zu den gemessenen auch nicht gemessene Störgrößen auf das System. Die wichtigsten möglichen Einflüsse werden in diesem Abschnitt mit Hilfe der Simulation untersucht und bewertet, inwieweit der entwickelte Algorithmus auch unter diesen nicht idealen Bedingungen funktionsfähig bleibt. Die Störungen wurden bewußt extrem gewählt, um die Grenzen des Algorithmus abzustecken. Außerdem treten

im Realfall die hier jeweils getrennt untersuchten Störgrößen gemeinsam auf, wodurch eine Kompensation oder eine Verstärkung ihrer Wirkungen entstehen kann. Die Simulationen wurden jeweils mit einem mittleren Komfortparameter $cl = 5$, einem Regel- und Vorhersagehorizont $M = P = 20$ sowie einer Anzahl von Sprungantwortkoeffizienten $SAK = 100$ durchgeführt. Die Sollwerte der Raumtemperatur betragen $\vartheta_{RS} = 20\text{ °C}$, tagsüber und $\vartheta_{RS} = 18\text{ °C}$ nachts.

4.3.3.1 Auswirkung von zusätzlichen internen Gewinnen

In jedem realen Gebäude entstehen durch die Wärmeabgabe von Personen sowie den Betrieb elektrischer Geräte sogenannte interne Gewinne. Diese wirken als ungemessene Störgröße auf die Regelgröße Raumtemperatur. Es war zu überprüfen, wie die vsHR auf zusätzliche interne Gewinne reagiert bzw. ihr Verhalten anpaßt. Die Abbildungen 4.17 und 4.18 zeigen das Regelverhalten bei Einwirken konstanter bzw. zeitvariabler interner Gewinne. Zum Vergleich ist das Regelverhalten ohne interne Gewinne mit eingezeichnet. Der Eintrag interner Gewin-

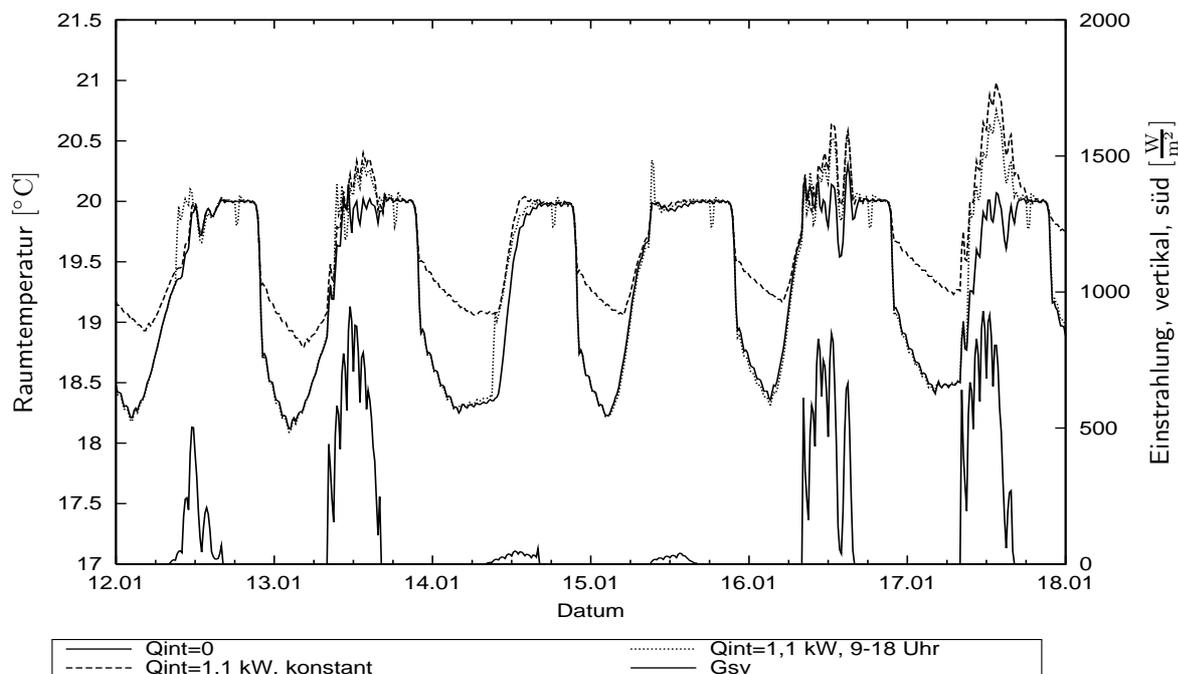


Abb. 4.17. Simuliertes Regelverhalten bei Einwirken verschiedener interner Gewinne Q_{int} sowie solare Einstrahlung

ne beeinflusst das Regelverhalten der vsHR kaum, reduziert jedoch die Nutzbarkeit solarer Gewinne. Bei konstanten internen Gewinnen ist nachts ein geringerer Abfall der Raumtemperatur zu verzeichnen. Dadurch können die zur Vermeidung der Überhitzungen durch die solaren Gewinne notwendigen Untertemperaturen am Morgen vor einem einstrahlungsreichen Tag nicht erreicht werden. Die Heizleistung ist gegenüber der Heizleistung im Fall ohne interne Gewinne stark reduziert. Die internen Gewinne werden mit in das Regelverhalten einbezogen- z.B. wird morgens später mit dem Aufheizen begonnen.

Bei Einwirken interner Gewinne von 9-18 Uhr, wie es beispielsweise in einem Bürogebäude vorkommen könnte, bewirkt die vsHR eine Reduktion der Heizleistung für diesen Zeitraum.

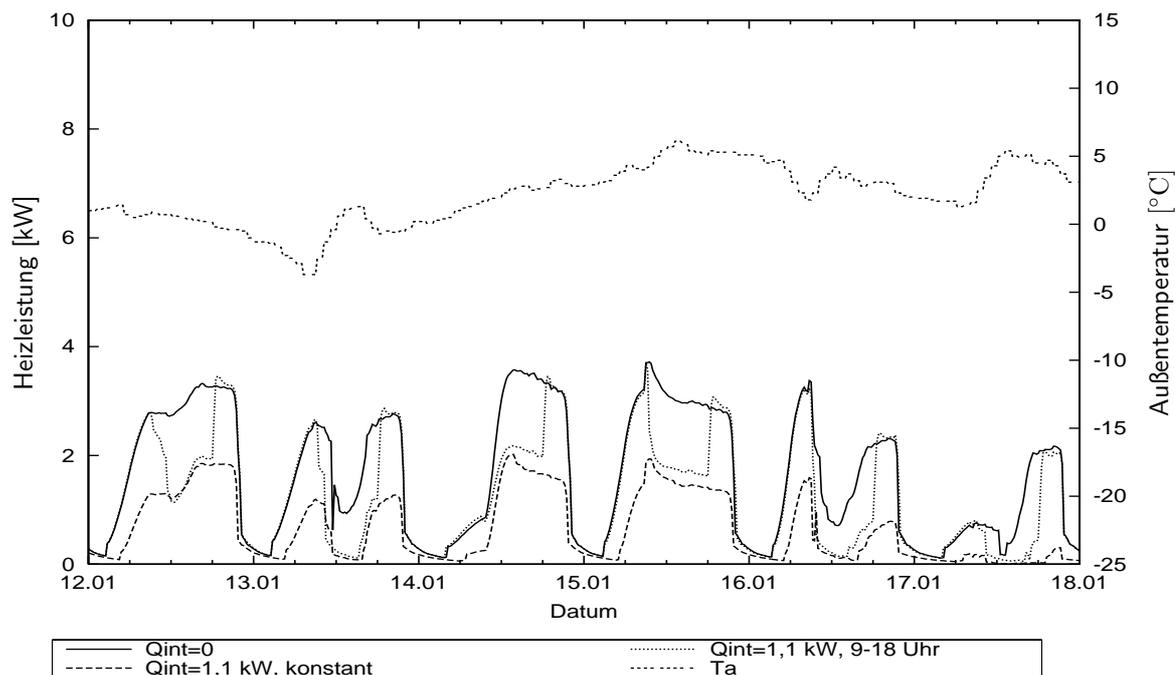


Abb. 4.18. Simulierte Heizleistung bei Einwirken verschiedener interner Gewinne Q_{int} sowie Außentemperatur T_a

Lediglich bei Ein- und Ausschalten der internen Gewinne ist ein leichtes kurzzeitiges Über- bzw. Unterschreiten der Raumtemperatur festzustellen. Überhitzungen sind gegenüber dem Fall konstanter interner Gewinne leicht reduziert, da niedrige Nachttemperaturen erreicht werden und damit eine größere Heizleistung zur Erwärmung der thermischen Kapazitäten erforderlich ist.

4.3.3.2 Auswirkung von zusätzlichen Lüftungswärmeverlusten

Neben den ungemessenen Gewinnen treten beim realen Gebäude ungemessene Verluste vor allem durch unkontrolliertes Lüften auf. Dabei läßt sich zwischen dem sogenannten Querlüften mit kurzzeitiger sehr hoher Luftwechselrate und einem Dauerlüften mit kleiner Luftwechselrate (Fenster auf Kippstellung) unterscheiden. Die Abbildungen 4.19 und 4.20 zeigen das simulierte Regelverhalten für einen Zeitraum im Januar bei dreimaligem fünfzehnminütigen Querlüften mit einer Luftwechselrate von $n = 10 \text{ h}^{-1}$ und einem Dauerlüften von 9-18 Uhr mit einer Luftwechselrate von $n = 2 \text{ h}^{-1}$. Zum Vergleich ist das Regelverhalten ohne zusätzliches Lüften mit eingezeichnet. Bei dem hier gezeigten Fall von Dauerlüften versucht die Heizungsregelung unmittelbar nach Absenken der Raumtemperatur den Sollwert wiederherzustellen. Dies wird aber im hier dargestellten Intervall nicht erreicht, da die Heizleistung auch bei ihrem Maximalwert die auftretenden zusätzlichen Verluste nicht kompensieren kann. Beim Schließen der Fenster tritt eine unmittelbare Reduktion der Heizleistung ein. Die resultierende Heizleistung ist aber immer noch erheblich höher als die Heizleistung ohne zusätzliche Lüftungswärmeverluste zum selben Zeitpunkt, da die Massivbauteile des Gebäudes noch aufgeheizt werden müssen. Nachts sinkt die Raumlufttemperatur für die beiden Lüftungsvarianten stärker ab im Vergleich zum Fall ohne zusätzliche Lüftung, da die Massivbauteile eine geringere Temperatur haben.

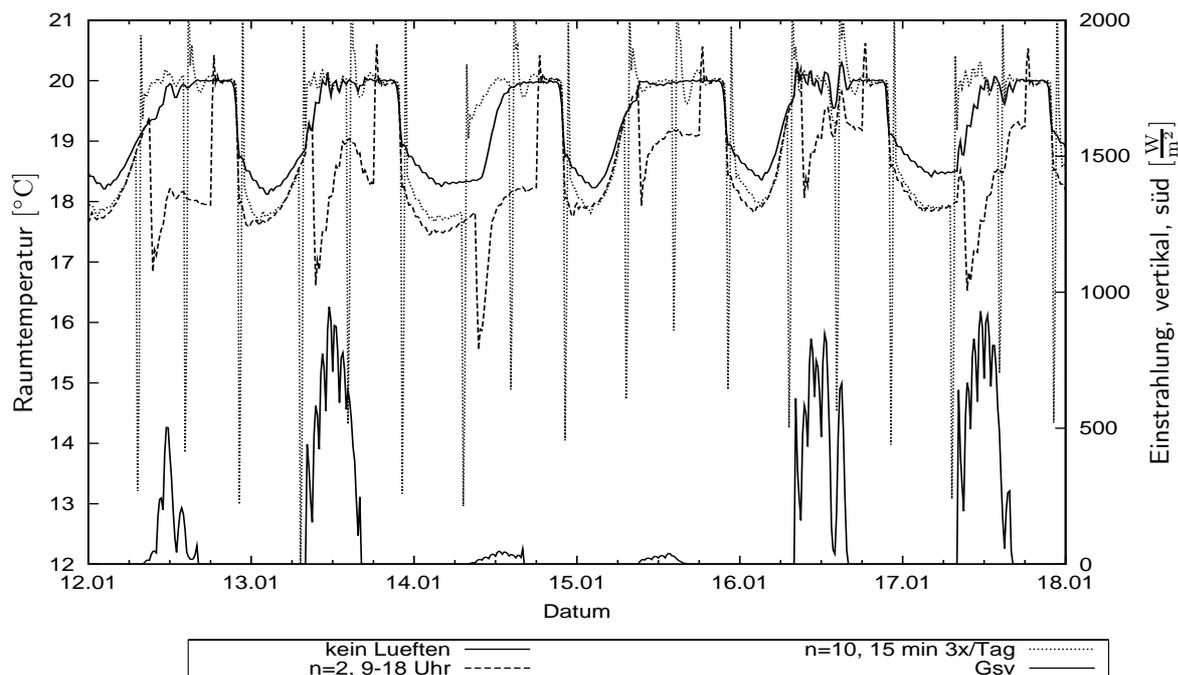


Abb. 4.19. Simuliertes Regelverhalten bei verschiedenen Lüftungsvarianten sowie solare Einstrahlung

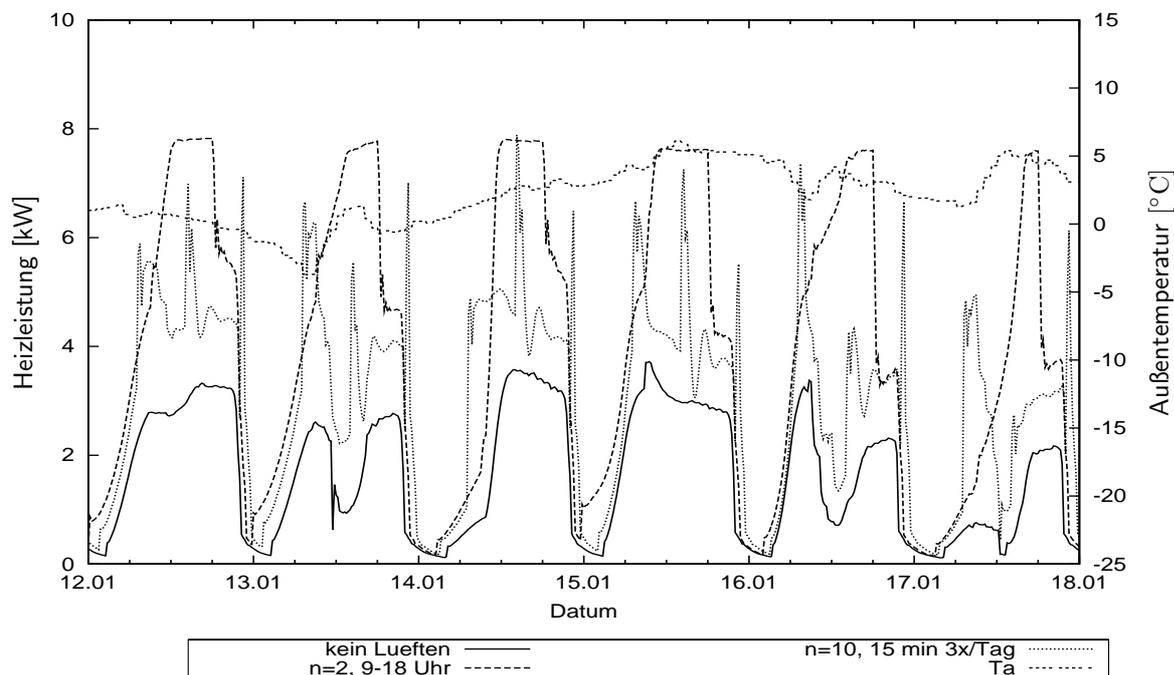


Abb. 4.20. Simulierte Heizleistung bei verschiedenen Lüftungsvarianten sowie Außentemperatur T_a

Bei kurzzeitigem Querlüften sinkt die Raumlufttemperatur stark ab, worauf die vsHR mit Heizleistungsspitzen reagiert. Da die Raumtemperaturvorhersage jeweils mit dem aktuellen Meßwert korrigiert wird, führt das lüftungsbedingte Absinken zu einer Vorhersage einer starken dauerhaften Sollwertunterschreitung. Das Schließen der Fenster und die darauf folgende Lufttemperaturanhebung durch Wärmeabgabe der Massivbauteile wird nicht vorhergesehen,

wodurch es zu einem kurzzeitigen Überschwingen kommt. Diese Erscheinung beeinträchtigt die Funktion der vsHR in Bezug auf die vorausschauende Einbeziehung der solaren Gewinne durch vorzeitiges Absenken der Raumtemperatur.

Der Heizenergieverbrauch steigt bei den gewählten Lüftungsvarianten gegenüber dem Fall ohne zusätzliche Lüftung erheblich an. Insgesamt arbeitet die vsHR trotz dieser starken Störeinflüsse korrekt. Die Regelung versucht, ein optimales Führungsverhalten herzustellen, was lediglich aufgrund der Begrenzungen der Heizleistung und der thermischen Kapazität von Gebäude und Heizsystem beeinträchtigt wird. Der Einfluß kontrollierter Lüftung, könnte, wenn sie zu einem zeitlich relativ konstanten Wärmeverlust führt, durch die vsHR erlernt werden.

4.3.3.3 Auswirkung von Meßabweichungen

Im Hinblick auf eine preiswerte Hardware war es notwendig zu überprüfen, inwieweit eine ungenauere (preiswertere) Sensorik einsetzbar ist. Ferner treten auch bei sehr genauer Sensorik Meßabweichungen, zum Teil durch den Sensor selbst, zum Teil durch die Datenerfassung (z.B. Schwankungen der Versorgungsspannung, digitale Auflösung) auf. Das Regelverhalten wird daher in Bezug auf systematische und zufällige Meßabweichungen untersucht.

In Abbildung 4.21 sind die Raumtemperaturverläufe für verschiedene systematische Abweichungen der Meßgrößen dargestellt. Die Abweichung der solaren Einstrahlung G_{sv} betrug 10 % des Meßwerts, die Abweichung von Außen- und Vorlauftemperatur jeweils 2 K absolut und die Abweichung der Raumtemperatur 1 K absolut.

Abbildung 4.22 zeigt das Regelverhalten für die mit einer zufälligen Abweichung behaftete Meßgröße. Die zufällige Meßabweichung wurde mit einem Zufallsgenerator simuliert. Die erzeugten, zum Meßwert addierten Zufallszahlen schwanken um Null mit einer Varianz von 2 K für die Temperaturen und 10% des Meßwertes für die Einstrahlung. Die Untersuchungen zeigen, daß sowohl systematische als auch zufällige Abweichungen bei der Messung der Regelgröße Raumtemperatur möglichst reduziert werden müssen, um einen sinnvollen Betrieb der Regelung durchführen zu können. Im hier gezeigten Intervall führt die systematische Abweichung bei der Raumtemperaturmessung dazu, daß das Gebäudemodell nicht mit einer ausreichenden Genauigkeit identifiziert wird. Der interne Modellprüfalgorithmus schaltet daraufhin die herkömmliche Heizkurve ein. Da im Referenzraum kein Thermostatventil angebracht ist, kommt es zu einer starken Überhitzung.

Eine zufällige Meßabweichung der Raumtemperatur führt zwar nicht zum Abbruch der vsHR, aber zu starken Schwingungen in der Heizleistung und resultierend in der Raumtemperatur. Aufgrund der notwendigen Korrektur der vorhergesagten Ausgangsgröße mit dem jeweils aktuellen Meßwert (siehe Gl. 3.13) wird der zukünftige Verlauf der Raumtemperatur in häufigem Wechsel entweder über- oder unterschätzt. Die Stellgröße Vorlauftemperatur wird dementsprechend herunter- bzw. heraufgesetzt.

Zufällige Abweichungen bei der Messung der Modelleingangsgrößen Vorlauftemperatur, Außentemperatur und solare Einstrahlung wirken sich nicht merklich auf das Regelverhalten aus. Das System wirkt wie ein Tiefpaßfilter auf die Eingangsgrößen, so daß hochfrequente Schwankungen um den Mittelwert auf die Ausgangsgröße kaum Einfluß haben.

Bei Addition eines Offsets (systematische Abweichung) von 2 K bzw. 10% des Meßwerts auf die Eingangsgrößen zeigt sich keinerlei Abweichung gegenüber dem Fall ohne Abweichungen. Der Offset wird mitgelernt. Beispielsweise lernt der Algorithmus bei Addition eines

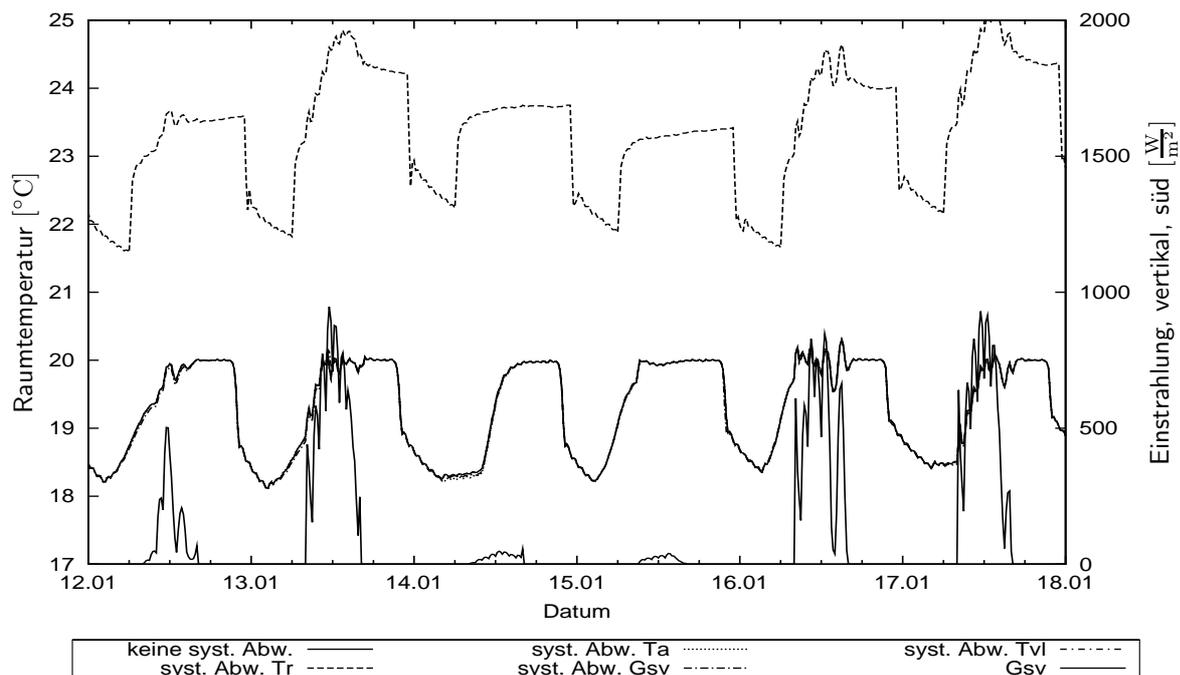


Abb. 4.21. Simuliertes Regelverhalten bei systematischen Abweichungen jeweils einer Meßgröße sowie solare Einstrahlung

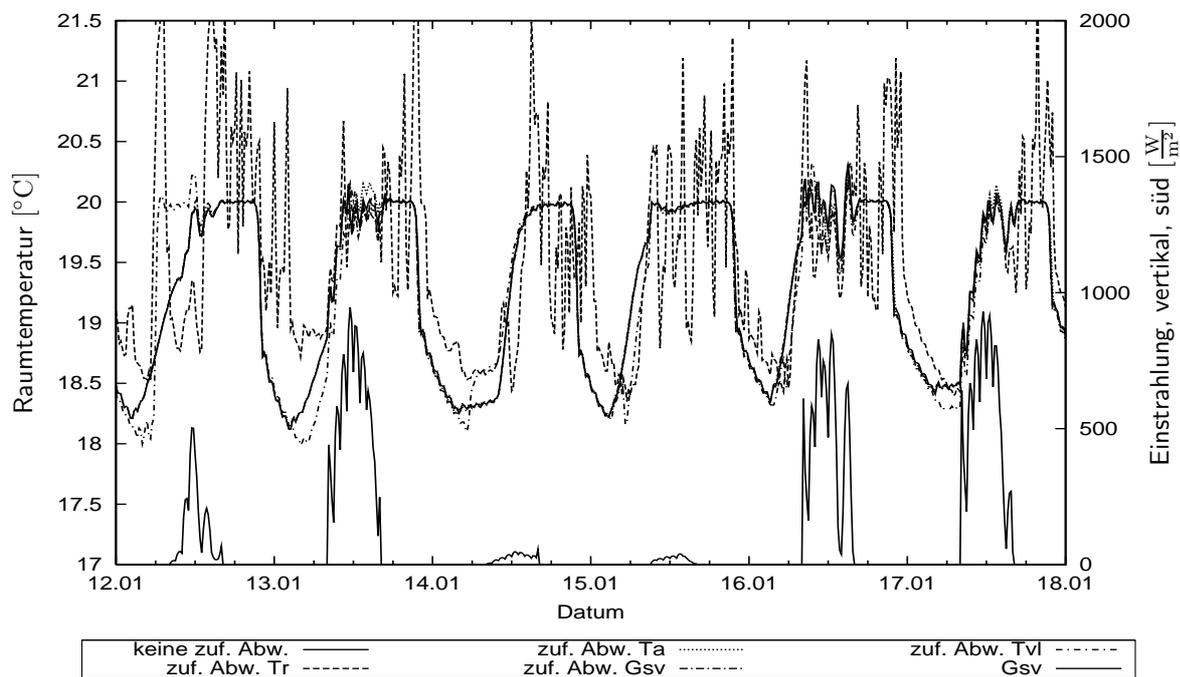


Abb. 4.22. Simuliertes Regelverhalten bei zufälligen Abweichungen jeweils einer Meßgröße sowie solare Einstrahlung

Offsets zur Vorlauftemperatur und gleichbleibender Raumtemperatur, daß die Wirkung der Vorlauftemperatur schwächer ist, d.h. der Sättigungswert der Sprungantwort wird kleiner. Bei Anwendung der (zu kleinen) Sprungantwort auf die (zu hohen) Vorlauftemperaturen

erhält man jedoch die exakte Raumtemperaturvorhersage. Analog verhält es sich mit den gemessenen Störgrößen Einstrahlung und Außentemperatur.

Aus den Untersuchungen läßt sich ableiten, daß die Regelung sehr robust gegenüber Abweichungen bei der Messung der Modelleingangsgrößen (Vorlauftemperatur, Einstrahlung, Außentemperatur) ist. Dagegen wirken sich Abweichungen in der Modellausgangsgröße (Raumtemperatur) sehr negativ auf das Regelverhalten aus. Die Sensorik des Reglers beim praktischen Einsatz muß diesem Verhalten gerecht werden.

4.4 Vergleich mit konventioneller Heizungsregelung

Die Ausführungen dieses Abschnitts dienen dem Vergleich der entwickelten vorausschauenden selbstadaptierenden Heizungsregelung (vsHR) mit der in Abschnitt 4.2.1 erläuterten konventionellen Regelung (kHR). Dazu werden die in Abschnitt 2.3 eingeführten Bewertungsgrößen verwendet. Die folgenden Unterabschnitte befassen sich mit einer vergleichenden Darstellung des Regelverhaltens, des thermischen Komforts und des Heizenergieverbrauchs sowie von Betriebszuständen des Heizsystems für beide Arten der Regelung.

4.4.1 Regelverhalten

Abbildung 4.23 zeigt einen Vergleich der simulierten Raumtemperaturen für die zwei Referenzfälle Heizkurve mit konstanter (mThV) und variabler (eThV) Sollwertvorgabe sowie die beiden Grenzfälle der vsHR für einen Komfortparameter $cl = 0$ bzw. $cl = 9$. Die entsprechenden Verläufe der Heizleistung für diesen Zeitraum (12.1.-17.1.1995) zeigt Abbildung 4.24. Der Zeitraum wurde ausgewählt, da in ihm Tage mit hoher und mit wenig Einstrahlung auftreten und sich so das Verhalten der vsHR besonders gut verdeutlichen läßt.

Für einen Zeitraum in der Übergangsperiode (10.3.-15.3.1995) finden sich die entsprechenden Verläufe von Raumtemperatur und Einstrahlung bzw. Heizleistung und Außentemperatur in Abbildung 4.25 sowie 4.26. Das Verhalten der vorausschauenden selbstadaptierenden

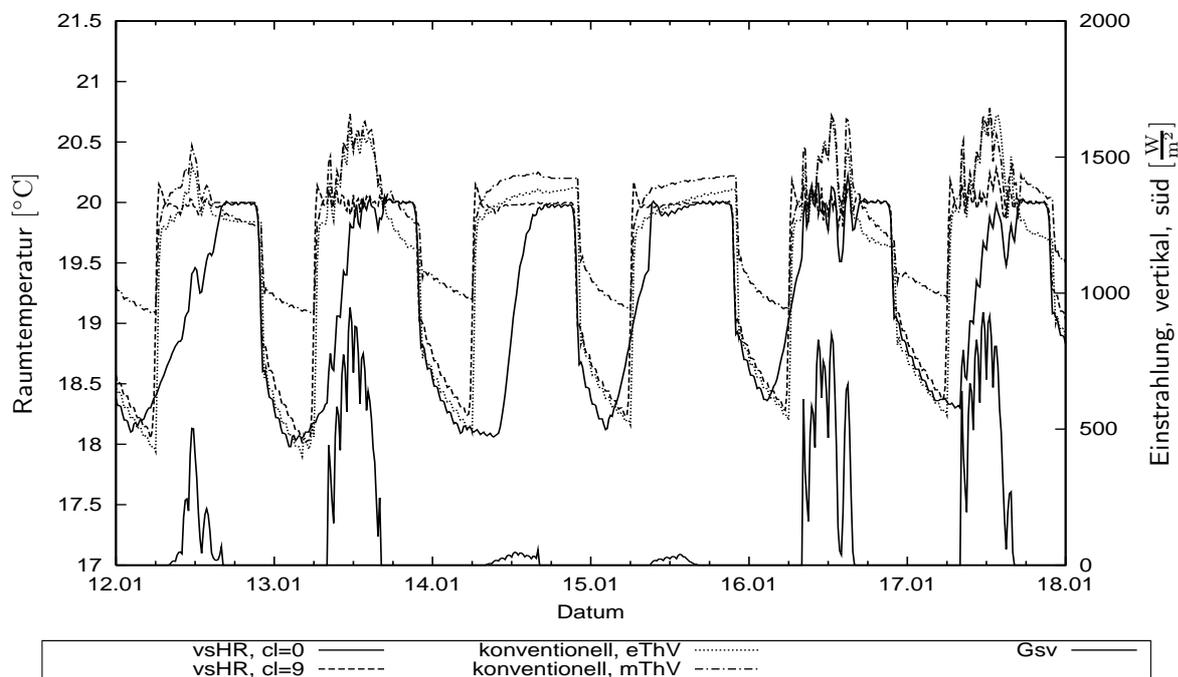


Abb. 4.23. Simuliertes Regelverhalten für die vsHR bei Komfortparameter $cl = 0$ und $cl = 9$ und für die kHR mit Thermostatventil bei konstanter (mThV) und variabler (eThV) Sollwertvorgabe sowie solare Einstrahlung vom 12.1.-17.1.1995

Heizungsregelung (vsHR) in Abhängigkeit vom Komfortparameter wurde bereits in Abschnitt 4.3.2 erläutert. Zunächst sollen die beiden im gezeigten Intervall liegenden Tage mit

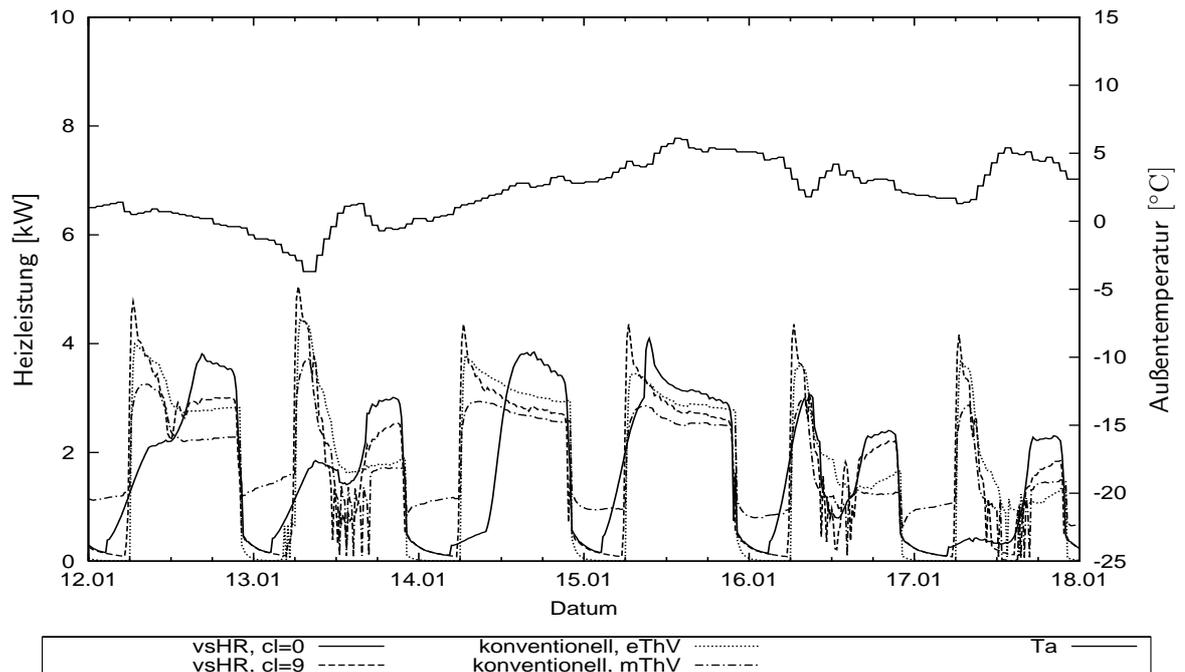


Abb. 4.24. Simulierte Heizleistung für die vsHR bei Komfortparameter $cl = 0$ und $cl = 9$ und für die kHR mit Thermostatventil bei konstanter (mThV) und variabler (eThV) Sollwertvorgabe sowie Außentemperatur T_a vom 12.1.-17.1.1995

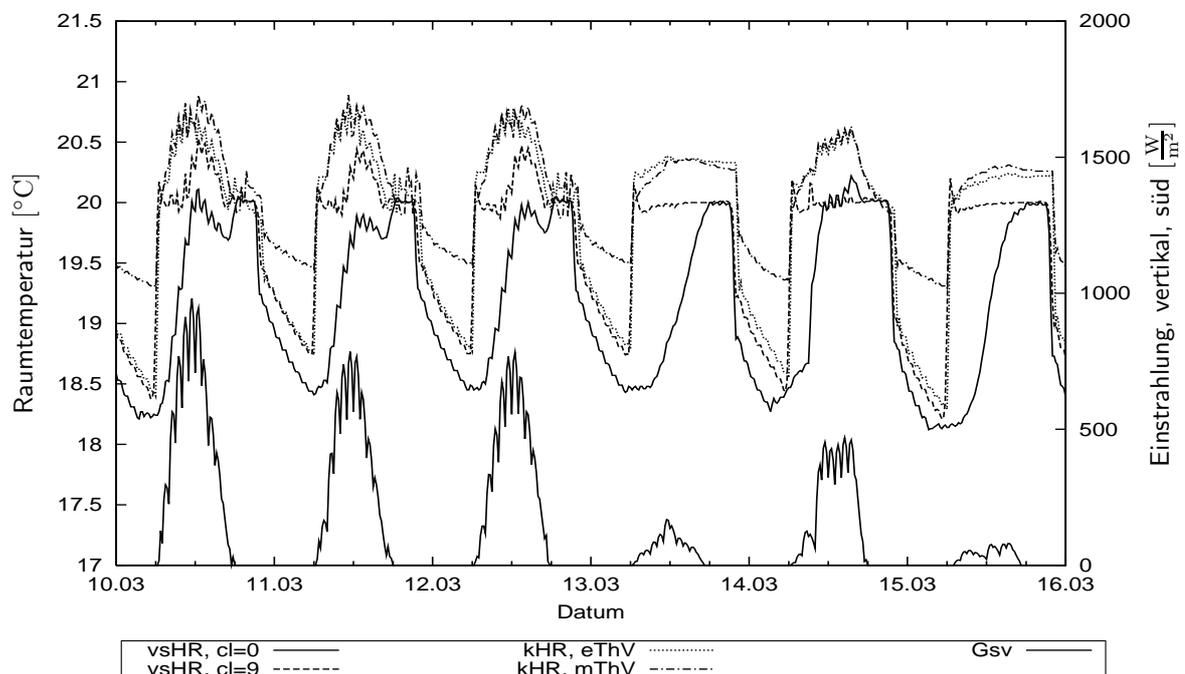


Abb. 4.25. Simuliertes Regelverhalten für die vsHR bei Komfortparameter $cl = 0$ und $cl = 9$ und für die kHR mit Thermostatventil bei konstanter (mThV) und variabler (eThV) Sollwertvorgabe sowie solare Einstrahlung vom 10.3.-15.3.1995

wenig Einstrahlung (14.1. und 15.1.) diskutiert werden. Die für den Auslegungsfall dimensionierten Thermostatventile beginnen bereits vor Erreichen des Sollwertes der Raumtem-

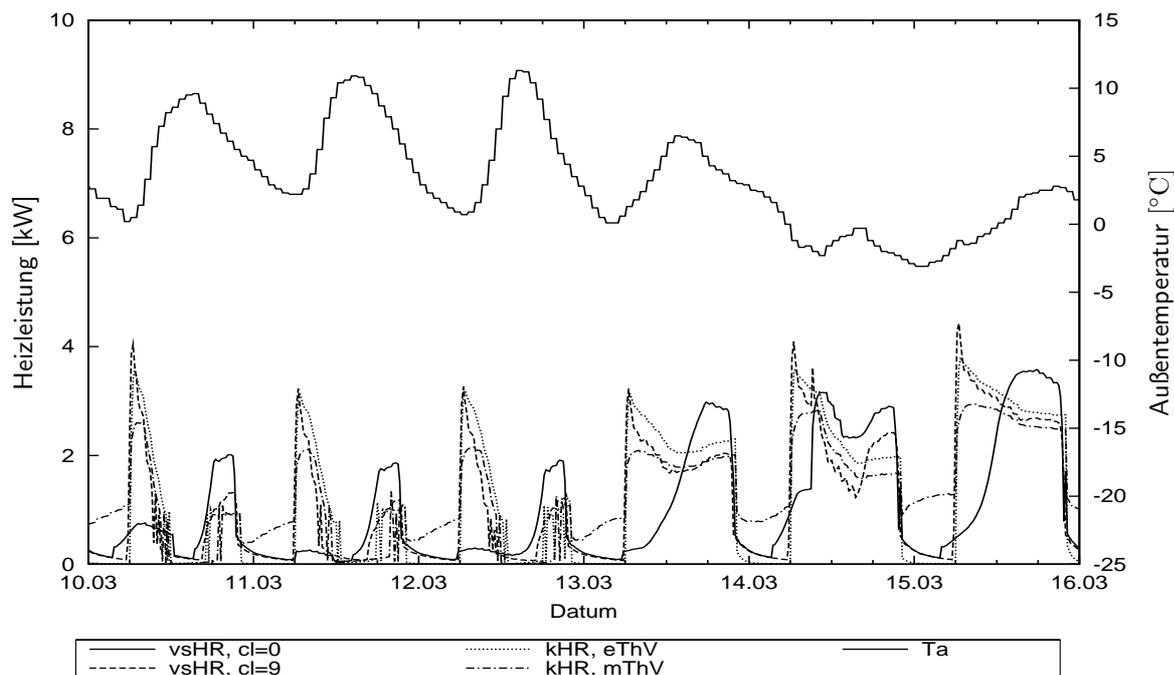


Abb. 4.26. Simulierte Heizleistung für die vsHR bei Komfortparameter $cl = 0$ und $cl = 9$ und für die kHR mit Thermostatventil bei konstanter (mThV) und variabler (eThV) Sollwertvorgabe sowie Außentemperatur T_a vom 10.3.-15.3.1995

peratur mit einer Reduktion der Heizleistung, dennoch kommt es im Tagesverlauf zu einer Sollwertüberschreitung. Dies liegt an der verringerten notwendigen Heizleistung zum Aufrechterhalten des Sollwertes verglichen mit dem Auslegungsfall, da hier die Außentemperatur weit höher liegt und zudem im Verlauf des Tages ansteigt. Bei mechanischen Thermostatventilen wirkt sich dieses Verhalten noch nachteiliger hinsichtlich der Sollwertehaltung aus. Hier zeigt sich ein genereller Nachteil solcher Zweipunktregler.

An Tagen mit hoher Einstrahlung wird durch die Thermostatventile die Heizleistung nicht ausreichend reduziert, um Überhitzungen zu vermeiden. Das Verhalten der vsHR bei $cl = 9$, also ohne Berücksichtigung zukünftiger Strahlungsgewinne zeigt, daß an den dargestellten strahlungsreichen Tagen im Januar eine Sollwertüberschreitung auch ohne vorherige Untertemperaturen durch entsprechende Reduktion der Heizleistung vermeidbar ist. Ein Schließbereich der Thermostatventile über ein kleineres Temperaturintervall als das in DIN 3841 vorgegebene von 2 K würde im gegebenen Fall zu einem besseren Ergebnis führen, allerdings unter anderen Bedingungen möglicherweise die Funktion beeinträchtigen. Zudem erhöht ein kleinerer Schließbereich die Wahrscheinlichkeit von Schwingungserscheinungen³.

Für die vsHR zeigt sich ein sehr gutes Ausregeln auf den Sollwert bei $cl = 9$, bis auf ein leichtes Überschwingen beim Ansteuern des Tagessollwertes. Bei hohen Außentemperaturen in der gezeigten Übergangsperiode verhindert auch eine Reduktion der Heizleistung auf Null

³Der Vorteil der vsHR bei $cl = 9$ rührt auch z.T. daher, daß bei der Simulation ein ideales Ausregeln der durch den Algorithmus berechneten Sollvorlauftemperatur durch das Dreiwegeventil zur Rücklaufbeimischung angenommen wird. Die im folgenden Kapitel dargestellten experimentellen Untersuchungen haben gezeigt, daß bei großen Stellgrößeninkrementen ein erheblicher Unterschied zwischen Soll- und Istwert der Vorlauftemperatur auftreten kann. Bei einem positiven Stellgrößensprung ist die Kesselleistung der begrenzende Faktor, bei einem negativen Stellgrößensprung die Rücklauftemperatur.

die Überhitzungen nicht. In diesem Fall können die Überhitzungen nur durch das vorherige Zulassen von Untertemperaturen vermieden werden.

4.4.2 Heizenergieverbrauch und thermischer Komfort

Abbildung 4.27 zeigt die Monatssummen der Heizenergieverbräuche für die herkömmliche Regelung mit Thermostatventil und für die vsHR bei verschiedenen Komfortparametern. Die auf die Regelung mit Thermostatventil bezogenen prozentualen Monatsverbräuche sind in Abb. 4.27 dargestellt. Für die Berechnung wurden nur Werte aus Zeitschritten einbezogen, in denen tatsächlich ein Heizenergiebedarf vorhanden war. Dazu mußte der Tagesmittelwert der Außentemperatur unter $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ liegen. Einsparungen durch die vsHR werden insbesondere in den Übergangszeiten erzielt. Einen Vergleich der Monatsmittelwerte des *PMV*-Indexes

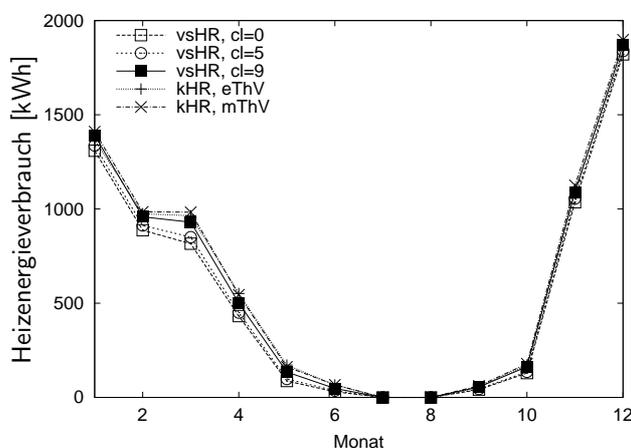


Abb. 4.27. Monatlicher Heizenergieverbrauch für die vsHR bei verschiedenen Komfortparametern cl und für die kHR mit mechanischem (mThV) und elektronischem (eThV) Thermostatventil

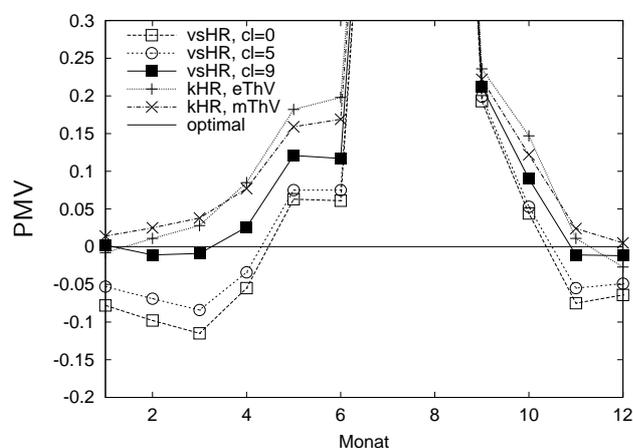


Abb. 4.28. Monatsmittelwerte des *PMV*-Indexes für die vsHR bei verschiedenen Komfortparametern cl und für die kHR mit mechanischem (mThV) und elektronischem (eThV) Thermostatventil

(*PMV*: Predicted Mean Vote, vgl. Abschnitt 2.3.2.2) zeigt Abb. 4.28. Bei der Berechnung wurden nur Zeiten, für die der Tagessollwert der Raumtemperatur galt, berücksichtigt. Ferner wurde die Bekleidung der fiktiven Testpersonengruppe in der Weise angepaßt, daß beim Tagessollwert gerade $PMV = 0$ gilt, also die maximal mögliche Anzahl der Personen (95%) Zufriedenheit äußern würde. Für die bei der Berechnung von *PMV* und *PPD* (*PPD*: Predicted Percentage of Dissatisfied, vgl. Abschnitt 2.3.2.2) nicht bekannten Umgebungsbedingungen wurden die in Tabelle 2.2 angegebenen Werte als konstant angenommen. Im Intervall des *PMV*-Indexes von -0,5 bis 0,5 würden immer noch 90% der Testpersonen Zufriedenheit äußern. Ein negativer *PMV*-Index bedeutet "zu kalt", ein positiver "zu warm". Die Grafik in Abbildung 4.28 zeigt die Mittelwerte des *PMV*-Indexes für die jeweiligen Monate.

In den Wintermonaten liegen die herkömmlichen Regelungen sowie die vsHR mit $cl = 9$ nahe $PMV = 0$, während die vsHR mit kleinerem Komfortparameter zunehmend unter Null liegt. Vorteile von geringeren cl hinsichtlich des thermischen Komforts zeigen sich erst in den Übergangsmonaten, wenn zugelassene Untertemperaturen auch tatsächlich zur Vermeidung von Überhitzungen beitragen. Es sei angemerkt, daß bei dem simulierten Gebäude aufgrund der massiven Bauweise und der wohldimensionierten Südfensterflächen die Überhitzungsgefahr ohnehin nicht sehr groß ist. Die Auswirkungen bei anderen Gebäuden werden näher

im Abschnitt 4.5 erläutert. Für das hier simulierte Gebäude wäre es sinnvoll, den Komfortparameter in den Monaten November bis Februar auf einen hohen Wert zu setzen und in den Übergangmonaten zu reduzieren. Denkbar wäre auch, den optimalen Wert von cl zeitabhängig zu ermitteln, als zusätzliche Maßnahme der Selbstadaptation der vsHR an das gegebene Gebäude. In der hier vorgestellten Entwicklung war jedoch eine Zielstellung, den Komfortparameter durch den Nutzer einstellen zu lassen.

Im Januar ergibt sich bei der vsHR ein hoher maximaler PMV -Index. Er resultiert aus den Raumtemperaturen am Starttag, bevor die vsHR eingeschaltet wird. Während dieses Tages dient die Heizkurve zur Berechnung der Vorlauftemperatur und es kommt aufgrund des Fehlens eines Thermostatventils im Referenzraum zu einer Überhitzung. Die Ergebnisse wurden bewußt nicht um diesen Effekt bereinigt, da auch im realen Betriebsfall ein Neustart des Algorithmus einmal im Jahr erwartet wird.

Die hohen PMV -Indizes im Sommer resultieren aus den konstant gesetzten Infiltrationsraten für die Simulation. Im realen Fall würden bei derartigen Überhitzungen in der Regel durch den Nutzer die Lüftungswärmeverluste erhöht.

Tabelle 4.3 listet die Jahressummen der Heizenergieverbräuche sowie den mittleren PPD -Index für den simulierten Zeitraum 1995 auf. Die Mittelung wurde nur für die Monate Oktober bis April vorgenommen. Die Berechnung des PPD -Indexes ist wiederum an die Bedingung des Tagessollwertes der Raumtemperatur geknüpft.

Tabelle 4.3. Simulierte Heizenergieverbräuche für die Referenzzone mit dem Testhaus-Gebäudemodell in einer Heizperiode (Wetterdaten Hannover 1995)

Regelung	Heizenergieverbrauch [kWh]	Heizenergieverbrauch bez. auf Verbrauch mit eThV [%]	Einsparungen [%]	PPD	$\max(PPD)$
mThV	7417	102.05	-2.05	5.18	15.39
eThV	7268	100.00	0.00	5.22	15.68
PID	7179	99.30	1.22	5.16	15.44
vsHR $cl = 0$	6588	90.64	9.36	5.45	14.30
vsHR $cl = 1$	6611	90.97	9.03	5.43	14.30
vsHR $cl = 2$	6644	91.41	8.59	5.40	14.35
vsHR $cl = 3$	6677	91.88	8.12	5.38	14.35
vsHR $cl = 4$	6715	92.39	7.61	5.35	14.41
vsHR $cl = 5$	6757	92.98	7.02	5.32	14.41
vsHR $cl = 6$	6807	93.66	6.34	5.29	14.41
vsHR $cl = 7$	6868	94.50	5.50	5.25	14.46
vsHR $cl = 8$	6946	95.58	4.42	5.20	14.52
vsHR $cl = 9$	7142	98.27	1.73	5.14	14.86

Kummert [56] untersuchte verschiedene intelligente Heizungsregelungen im direkten Vergleich mit Hilfe der Simulation eines Modells einer thermischen Zone innerhalb eines größeren Bürogebäudes (Niedrigenergiehausstandard) mit trägem Radiatorenheizsystem. Er erreichte mit einer selbst entwickelten optimalen vorausschauenden Regelung (nicht adaptiv) 16,7% Heizenergieeinsparung gegenüber einer konventionellen Regelung. Ein auf künstlichen neuronalen Netzwerken basierender vorausschauender Algorithmus von Argiriou et. al. [1] erreichte mit dem gleichen Gebäudemodell 11,3% Heizenergieersparnis. Die Heizenergieein-

sparung der hier vorgestellten vsHR wurde in diesem Vergleichstest von Kummert zu 14,2% ermittelt. Alle Angaben gelten jeweils für einen mittleren Komfortparameter.

Eine Auftragung des Heizenergieverbrauchs im Simulationszeitraum über dem mittleren *PPD*-Index zeigt Abbildung 4.29. Die Einsparungen an Heizenergie in Abhängigkeit vom *PPD* sind in Abb. 4.30 für die verschiedenen Regelungsstrategien dargestellt. Für die vsHR

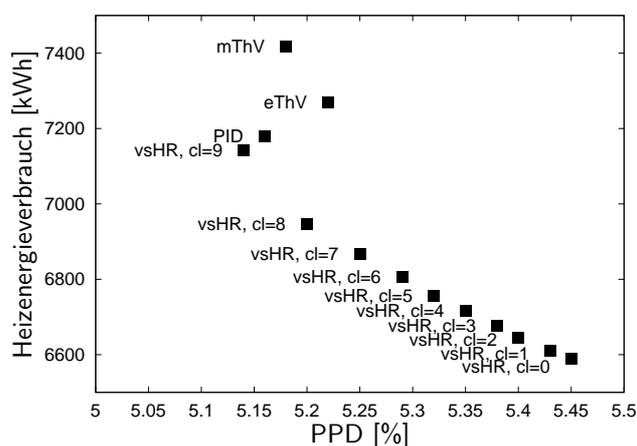


Abb. 4.29. Heizenergieverbrauch in Abhängigkeit vom *PPD*-Index für verschiedene Regelungsstrategien

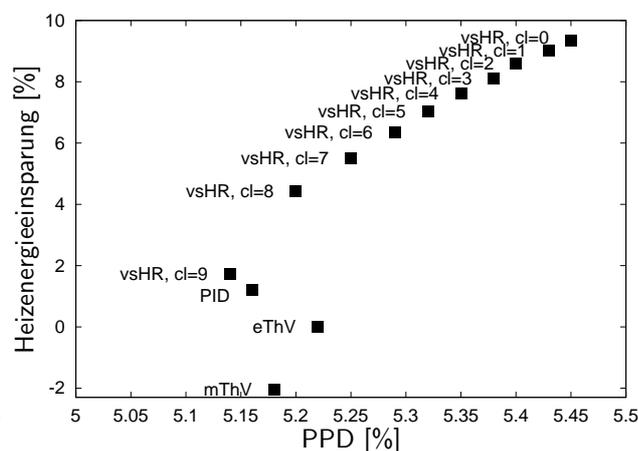


Abb. 4.30. Heizenergieeinsparung in Abhängigkeit vom *PPD*-Index für verschiedene Regelungsstrategien

werden für jeden Komfortparameter Heizenergieeinsparungen gegenüber einer herkömmlichen Heizungsregelung erreicht. Je mehr Komforteinbußen zugelassen werden, um so größer sind die möglichen Einsparungen. Auch bei niedrigstem Komfortparameter liegt der mittlere *PPD*-Index noch in einem Bereich, in dem 90% der Personen einer Testgruppe Zufriedenheit mit dem Raumklima äußern würden. Die Einsparungen nehmen nicht linear mit dem Komfortparameter ab, was durch die Berechnung der Regelverstärkung aus den Wichtungsmatrizen, in die *cl* eingeht, bewirkt wird.

Mit den herkömmlichen Regelungsstrategien mit elektronischem Thermostatventil bzw. PID-Regelung wird ein *PPD*-Index erreicht, der etwa zwischen dem der vsHR mit Komfortparameter *cl* = 7 und *cl* = 8 liegt. Der Heizenergieverbrauch liegt bei gleichem mittleren Komfort bei der vsHR jedoch etwa 5% niedriger. Mit einem mechanischen Thermostatventil werden bessere mittlere Komfortbedingungen erreicht, allerdings liegt der Heizenergieverbrauch unter allen berechneten Varianten am höchsten. Verglichen mit einer konventionellen Heizungsregelung mit mechanischem Thermostatventil kann durch die vsHR bei *cl* = 9 eine Einsparung von 3,8% und bei *cl* = 9 eine Einsparung von 12,6% bei dem simulierten Gebäude im betrachteten Zeitraum erzielt werden.

Einen Eindruck von der Häufigkeit des Auftretens bestimmter Komfortzustände gibt eine geordnete Jahresdauerlinie für den *PPD*-Index (siehe Abbildung 4.31). In die Berechnung wurden nur Tage einbezogen, an denen ein Heizenergiebedarf vorhanden war ($\bar{\vartheta}_a \leq 12^\circ\text{C}$). Außerdem wurden nur die Stunden berücksichtigt, zu denen der Tagessollwert der Raumtemperatur gesetzt war. Dieses Kriterium traf auf insgesamt 3376 Stunden in der Simulationsperiode zu. Für die vsHR treten für alle Komfortparameter an sehr wenigen Stunden maximale Werte des *PPD*-Indexes auf. Diese entstehen am Starttag bei Nutzung der konventionellen Heizkurve ohne Thermostatventil im Referenzraum. Die Grafik zeigt, daß mit der konventionellen Regelung mit mechanischem oder elektronischem Thermostatventil sehr niedrige

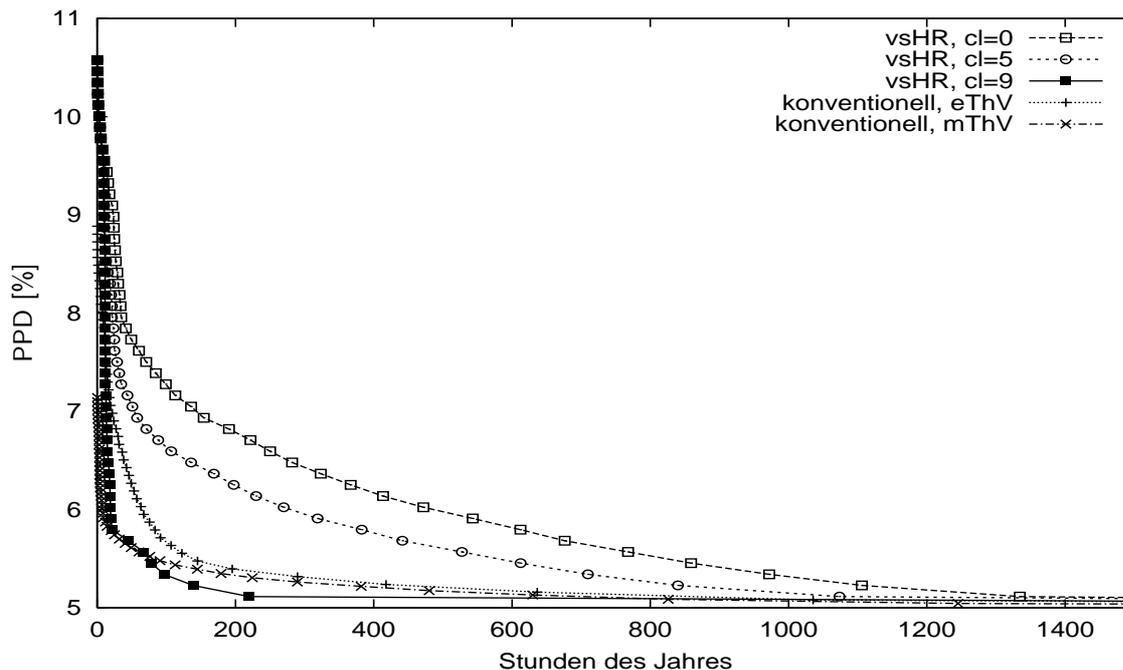


Abb. 4.31. Geordnete Jahresdauerlinie für den PPD -Index für verschiedene Regelungsstrategien. In die Berechnung wurden nur Tage einbezogen, an denen ein Heizenergiebedarf vorhanden war ($\bar{\vartheta}_a \leq 12^\circ\text{C}$). Außerdem wurden nur die Stunden berücksichtigt, zu denen der Tagessollwert der Raumtemperatur gesetzt war (insgesamt 3376 Stunden). Aus Gründen der grafischen Auflösung ist nur der Bereich bis 1500 Stunden dargestellt. Darüberhinaus sind die PPD -Indizes annähernd gleich und liegen nur geringfügig über 5%.

PPD -Indizes an den meisten der betrachteten Stunden erreicht werden. Nur die vsHR mit hohem Komfortparameter (hier abgebildet: $cl = 9$) erreicht bessere Komfortindizes für einen Großteil der Stunden. Für etwa 80 Stunden muß ein leicht schlechterer Komfort in Kauf genommen werden. Bei der vsHR mit kleinerem Komfortparameter wirkt sich das Zulassen von Untertemperaturen negativ auf den Komfort aus, was in einem höheren PPD -Index für den Großteil der dargestellten Stunden resultiert. Klammert man den Starttag aus, so sind im ungünstigsten Fall bei $cl = 0$ an 22 Stunden aus dem betrachteten Zeitraum nur 9% der Personen einer Testgruppe unzufrieden mit dem thermischen Komfort.

Der größere Teil (56%) der betrachteten Stunden ist in Abbildung 4.31 nicht eingezeichnet. Für ihn erreichen alle betrachteten Regelungen sehr gute Komfortindizes $5 \leq PPD \leq 5.1$, d.h. für den größeren Teil des betrachteten Zeitraum wird nahezu das mögliche Maximum der Testpersonengruppe zufriedengestellt.

Die vorangegangenen Untersuchungen haben gezeigt, daß Betrachtungen zum Heizenergieverbrauch und Komfort bei verschiedenen Regelungen nicht getrennt durchgeführt werden können. Heizenergieeinsparungen von mehr als 9% sind mit der vsHR im Vergleich zur kHR bei dem verwendeten Gebäudemodell erreichbar, wenn geringe Komforteinbußen erlaubt werden.

4.4.3 Passiv solare Gewinne

Die vsHR führt zu geringeren mittleren Raumtemperaturen, wie aus den vorangegangenen Komfortbetrachtungen ersichtlich wurde. Ein Teil der Heizenergieeinsparung wird durch

die resultierenden reduzierten Verluste bewirkt, ein Teil durch die verbesserte Nutzung der solaren Einstrahlung (vgl. Abschnitt 2.3.1.2). Abbildung 4.32 zeigt die monatlichen Nutzungsgrade der passiv solaren Gewinne, Abbildung 4.33 die daraus berechneten Anteile der passiv solaren Gewinne an der Deckung der Verluste. Der solare Nutzungsgrad (Wer-

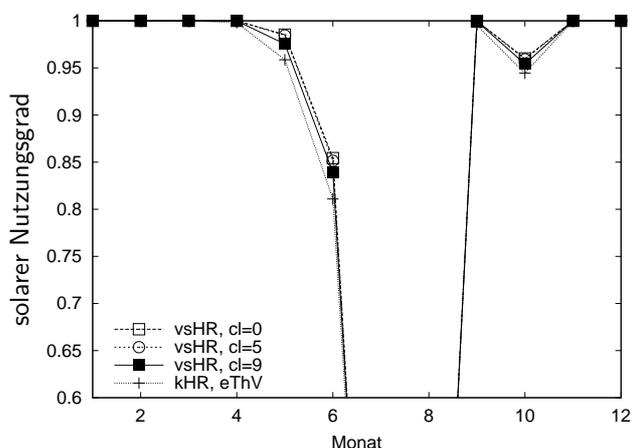


Abb. 4.32. Berechneter monatlicher solarer Nutzungsgrad für verschiedene Regelungsstrategien

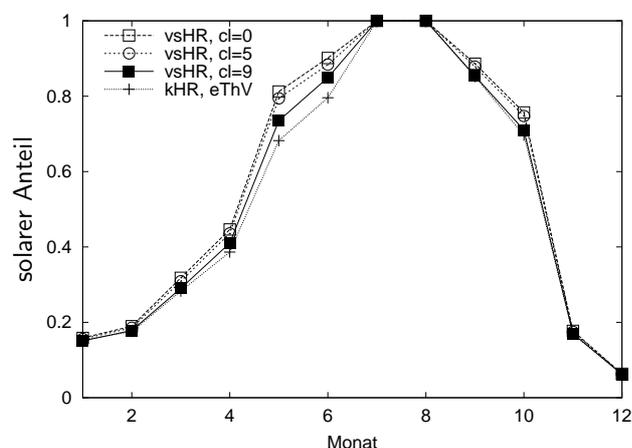


Abb. 4.33. Berechneter monatlicher solarer Anteil für verschiedene Regelungsstrategien

tebereich 0..1) liegt nur in einstrahlungsreichen Übergangsmonaten unter eins. Dies wird durch die relativ konservative Annahme, die nur Überschreitungen der Sollraumtemperatur um mehr als 2 K für unzulässig erklärt und den Aufbau des Gebäudes (massiv, moderate Südfensterflächen) bewirkt. Der solare Anteil unterscheidet sich für die verschiedenen Regelungsstrategien geringfügig während der Wintermonate. In der Übergangszeit sind dagegen erhebliche Erhöhungen durch die vsHR gegenüber der kHR festzustellen. Der solare Anteil steigt mit sinkendem Komfortparameter cl .

4.4.4 Aspekte des Heizsystems

Für einen Einsatz der vsHR in verschiedenen Heizsystemen ist ihre Wirkung auf Größen, die für die Effizienz der wärmeversorgenden Anlage wichtig sind zu prüfen. Dies sind die benötigte Heizleistung sowie Vorlauf- und Rücklauf-temperatur. Anzustreben ist eine geringe maximal benötigte Heizleistung generell, da die Effizienz vieler wärmeversorgender Anlagen bei Teillast absinkt und die Kosten der Anlage mit der maximal notwendigen Leistung ansteigen. Bei Nutzung einer Wärmepumpe ist eine Absenkung der Vorlauf-temperatur zur Erhöhung der Effizienz anzustreben. Für Brennwertkessel ist eine niedrige Rücklauf-temperatur wichtig, damit eine möglichst vollständige Nutzung des Brennwertes erreichbar ist. Thermische Solaranlagen erreichen ebenfalls einen höheren Wirkungsgrad bei niedrigeren Temperaturen im Heizkreis. Diese führen gleichzeitig zur Reduktion von Wärmeverlusten bei der Verteilung.

Es sei angemerkt, daß die tatsächliche Höhe von Heizleistung, Massenstrom sowie Vor- und Rücklauf-temperatur von der Auslegung des Heizsystems abhängt und daher gegenüber den hier gezeigten Ergebnissen abweichen kann. Aus diesem Grund soll das Augenmerk hier auf relative Betrachtungen gelegt sein.

Die Jahresdauerlinien für die Heizleistung in Abbildung 4.34 zeigen die Häufigkeit des Auftretens bestimmter Lasten, hervorgerufen durch die verschiedenen Regelungsvarianten. Für die Berechnung wurden alle Stunden des simulierten Jahres einbezogen. Nur die Heizleistung in die Referenzzone wird betrachtet. Maximale Heizleistungen treten bei einem positiven Stellgrößensprung (Anhebung der Vorlauftemperatur) auf. Für den Test der vsHR wurde absichtlich keine Begrenzung der Stellgrößenänderung vorgenommen. Im praktischen Anwendungsfall ist diese Vorgabe jedoch sinnvoll und ermöglicht so intern im Algorithmus eine Begrenzung der Heizleistung.

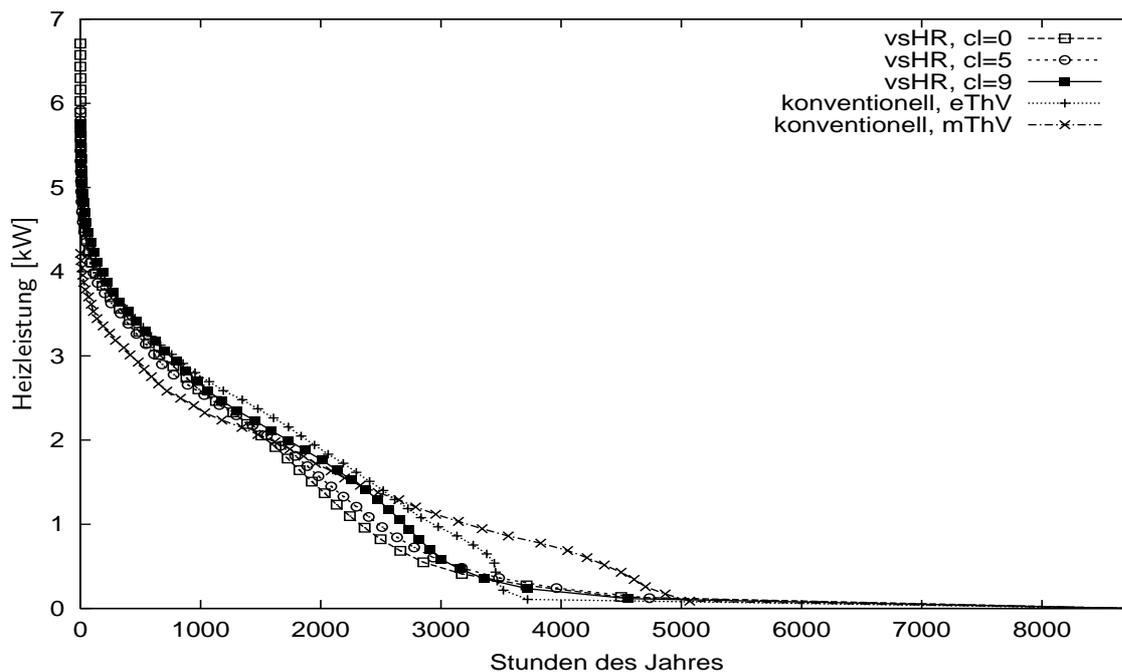


Abb. 4.34. Geordnete Jahresdauerlinien der Heizleistung für verschiedene Regelungsstrategien

Die Abbildung zeigt, daß bei Regelung mit der vsHR und konventionell mit elektronischem Thermostatventil (eThV) nennenswerte Heizleistungen nur während der 3376 Stunden, für die ein Heizenergiebedarf ($\vartheta_a \leq 12^\circ\text{C}$) vorhanden, und der Tagessollwert der Raumtemperatur gesetzt war, auftreten. Hingegen führt eine Regelung mit mechanischem Thermostatventil (mThV) zu nennenswerten Heizleistungen an mehr Stunden des Jahres, was auf Einträge während der Nachtstunden zurückzuführen ist. Die aus diesem Grund geringere nächtliche Temperaturabsenkung im Gebäude führt zu geringeren Heizlasten am Tag, verglichen mit anderen Regelungsvarianten. Dies zeigt sich in Abbildung 4.34 anhand der geringeren Häufigkeit hoher Heizleistungen.

Die Verläufe für die vsHR und die Regelung mit elektronischem Thermostatventil ähneln sich bei hohen Heizleistungen, bei mittleren Heizleistungen weist die vsHR geringere Anforderungen auf. Maximale Heizleistungen für die verschiedenen Regelungsvarianten und die Anzahl der Stunden, in der eine Regelungsvariante eine höhere Heizleistung als die maximale Heizleistung bei Regelung mit einem elektronischen Thermostatventil erfordert, sind in Tabelle 4.4 aufgelistet. Die maximalen Heizleistungen steigen bei der vsHR mit abnehmenden Komfortparameter. Diese Erscheinung ist auf Fehler in der Wettervorhersage zurückzuführen. An Tagen wo fälschlicherweise hohe Einstrahlungen vorhergesagt werden,

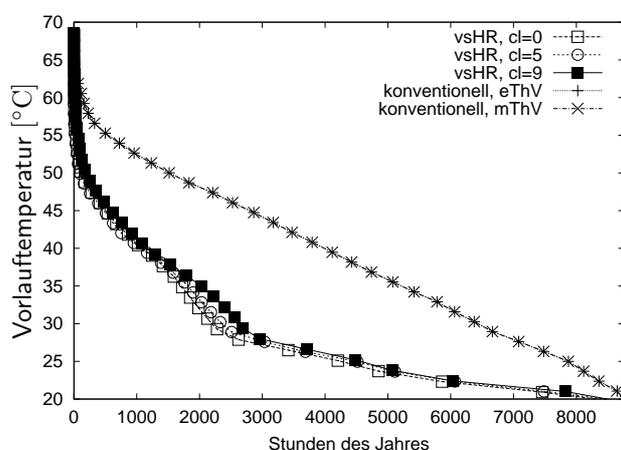
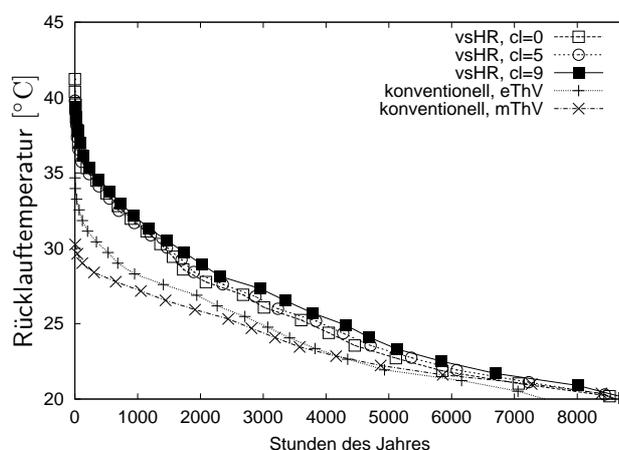
Tabelle 4.4. Simulierte maximale Heizleistungen und Regelaufwand für die Referenzzone mit dem Testhaus-Gebäudemodell in einer Heizperiode für verschiedene Regelungsvarianten (Wetterdaten Hannover 1995)

Regelungsvariante	maximale Heizleistung [kW]	Anzahl Stunden für $\dot{Q}_H > 5.28 \text{ kW}$	Regelaufwand [K]
mThV	4.23	0	10444
eThV	5.28	0	10444
vsHR $cl = 0$	6.71	8.75	9643
vsHR $cl = 5$	5.92	3.5	9711
vsHR $cl = 9$	5.75	8.5	17328

läßt die Regelung Untertemperaturen zu. Diese müssen nach Korrektur der Einstrahlungsvorhersage durch eine erhöhte Heizleistung reduziert werden. Die Untersuchungen zeigen, daß durch die vsHR auch bei minimalem Komfortparameter maximale Heizleistungen, die größer sind als die maximale Heizleistung bei Regelung mit elektronischem Thermostatventil, an weniger als 9 Stunden im simulierten Jahr auftreten. Eine größere Dimensionierung der wärmeversorgenden Anlage bei Einsatz der vsHR ist daher sicherlich nicht erforderlich. Eine Begrenzung der Heizleistung auf den maximalen Wert bei konventioneller Regelung führt dann nur an wenigen Stunden des Jahres zu einem geringfügig langsameren Anfahren des Raumtemperatursollwertes.

Als Regelaufwand werden die kumulierten Absolutwerte der Stellgrößenänderungen bezeichnet. Der Regelaufwand soll möglichst gering sein, denn jede Änderung der Stellgröße belastet Teile der heiztechnischen Anlage (im Fall der Vorlauftemperatur als Stellgröße vor allem das Ventil zur Rücklaufbeimischung). Für die konventionelle HR ergibt sich der Regelaufwand direkt aus der Heizkurve und enthält damit die kumulierten Absolutwerte der Änderung der Außentemperatur sowie der Änderung der Vorlauftemperatur aufgrund der Nachtabsenkung. Für die vsHR zeigt sich eine starke Abhängigkeit vom Komfortparameter, da dieser unmittelbar die Wichtung des Regelaufwands in der Kostenfunktion beeinflusst.

In Abbildung 4.35 und 4.36 sind die Jahresdauerlinien für Vor- und Rücklauftemperatur bei den verschiedenen Regelvarianten dargestellt. Die Vorlauftemperatur für die Regelun-

**Abb. 4.35.** Jahresdauerlinie der Vorlauftemperatur für verschiedene Regelungsstrategien**Abb. 4.36.** Jahresdauerlinie der Rücklauftemperatur für verschiedene Regelungsstrategien

gen mit Thermostatventil ergibt sich direkt aus der Heizkurve und hängt linear von der

Außentemperatur ab. Die Vorlauftemperaturen für die vsHR liegen beträchtlich niedriger als die der konventionellen HR. Damit ergeben sich Vorteile auch für die Effizienz bestimmter wärmeerzeugender Anlagen, wie beispielsweise Wärmepumpen (siehe Abschnitt 2.2). Nur für sehr wenige Stunden werden von der vsHR aus bereits erläuterten Gründen höhere Vorlauftemperaturen verlangt. Etwa wiederum ab 3376 Stunden reduziert sich die Differenz zwischen Vor- und Rücklauf­temperatur für die vsHR auf nahezu null, da der Massenstrom konstant ist und keine Heizleistung in den Raum eingetragen wird. Vor- und Rücklauf­temperatur haben dann etwa den Wert der Raumtemperatur. Unterhalb von 3376 Stunden zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit vom Komfortparameter. Im Bereich mittlerer Vor- und Rücklauf­temperaturen nehmen diese mit sinkendem Komfortparameter ab. Im Bereich hoher Temperaturen kehrt sich diese Abhängigkeit jedoch um.

Für die Thermostatventilregelung erfolgt die Regulierung der Heizleistung mit Hilfe des Massenstromes. Da dieser im Mittel geringer ist als bei der vsHR, ergeben sich größere Differenzen zwischen Vor- und Rücklauf­temperatur. Die sich ergebenden Rücklauf­temperaturen für die konventionelle HR liegen deutlich unter denen der vsHR. Damit ist bei den gegebenen Betriebsbedingungen ein Nachteil der vsHR für die Effizienz wärmeerzeugender Anlagen, die eine niedrige Rücklauf­temperatur benötigen gegeben. Dieser Nachteil läßt sich jedoch durch veränderte Betriebsparameter kompensieren. Wie Abbildung 4.37 zeigt, kann durch

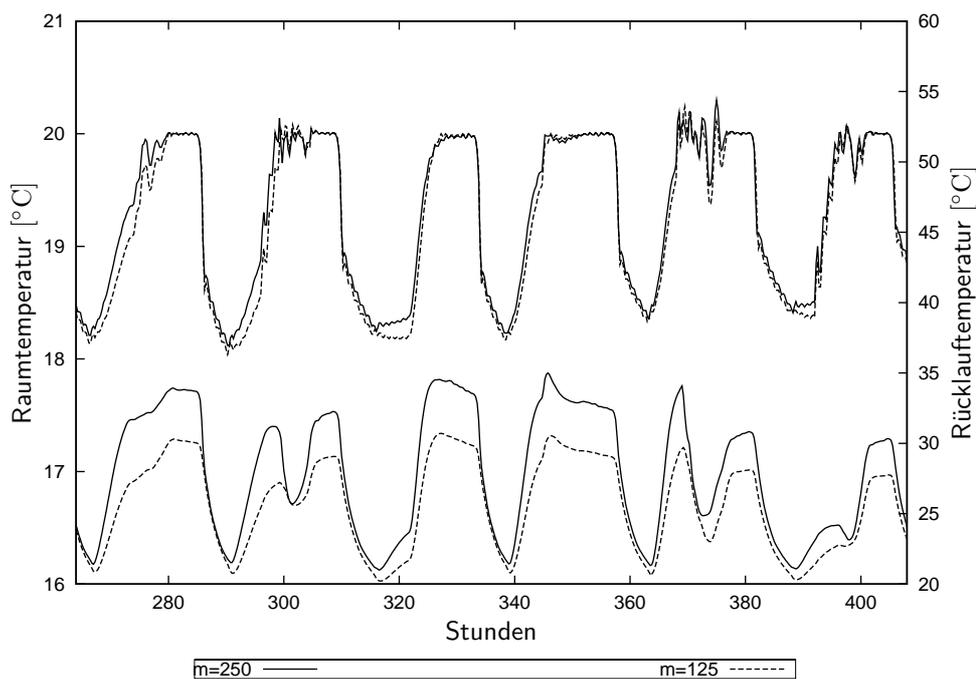


Abb. 4.37. Simulierte Raumtemperatur und Rücklauf­temperatur für eine Variation des Massenstromes vom 12.1.-17.1.1995

eine Variation des Massenstromes die Temperaturdifferenz und damit die sich einstellende Rücklauf­temperatur beeinflußt werden. Das Führungsverhalten wird durch die Reduktion des Massenstromes von konstant 250 kg h^{-1} (Standardfall) auf konstant 125 kg h^{-1} aufgrund des selbstadaptierenden Verhaltens nicht nennenswert beeinflußt. Durch eine geschickte Anpassung des Massenstromes innerhalb der zulässigen Grenzen und unter der Voraussetzung, daß der Heizleistungsbedarf gedeckt wird, läßt sich also auch die Höhe der Rücklauf­tempe-

ratur begrenzen. Somit kann durch Wahl geeigneter Betriebsparameter der Heizung mit der vsHR auch die Effizienz des Wärmeversorgers in vorteilhafter Weise beeinflusst werden.

4.4.5 Einfluß der Wettervorhersagequalität

Die Untersuchungen in den vorangegangenen Abschnitten haben bereits gezeigt, daß die Wettervorhersage bei niedrigem Komfortparameter einen großen Einfluß auf das Regelverhalten hat. Im folgenden soll der Einfluß der internen Wettervorhersage der vsHR auf den thermischen Komfort und den Heizenergieverbrauch im Vergleich zu den beiden Grenzfällen einer idealen Wettervorhersage und fehlender Wettervorhersage untersucht werden. Eine ideale Wettervorhersage weist keine Abweichungen zu den tatsächlich auftretenden Wetterbedingungen auf. Solche Vorhersage wurde in der Simulation durch Einlesen der Wetterdaten in den Vorhersagealgorithmus realisiert. Im anderen Extremfall hat der Algorithmus keine Information über die zukünftigen Außentemperaturschwankungen oder Energieeinträge durch Einstrahlung. Dieser Fall wurde simuliert, indem der zukünftige Verlauf der Außentemperatur konstant auf den zuletzt gemessenen Wert und die zukünftige Einstrahlung gleich null gesetzt wurde. Abbildung 4.38 zeigt die simulierten Raumtemperaturen für beide Extremfälle und die im vsHR verwendete Vorhersage (siehe Abschnitt 3.2.3) für den Beispielzeitraum vom 12.1.-17.1.1995. Die Heizleistungen für die entsprechenden Tage sind in Diagramm 4.39 aufgetragen. Eine Regelung ohne Wettervorhersage liefert an Tagen mit

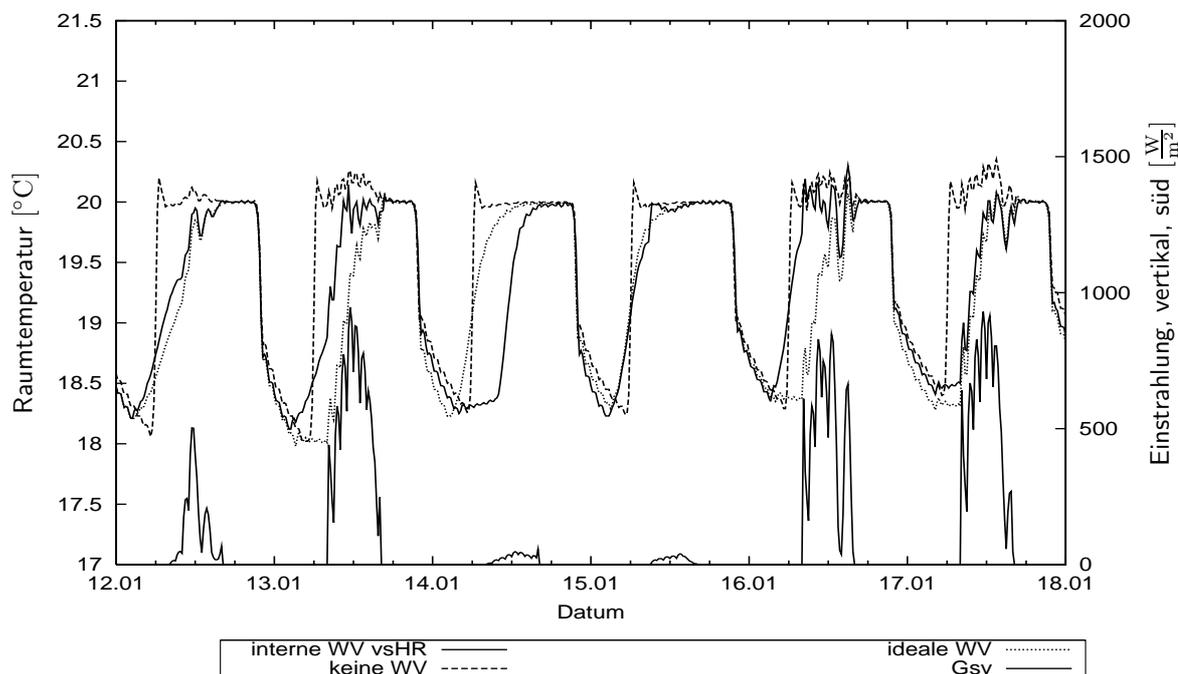


Abb. 4.38. Simulierte Raumtemperaturverläufe für verschiedene Wettervorhersagen (WV), $cl = 5$, sowie solare Einstrahlung auf die Südfassade Gsv

wenig Einstrahlung ein ähnliches Ergebnis wie eine Regelung mit interner Wettervorhersage und Komfortparameter $cl = 9$. Ein Vergleich mit Abbildung 4.23 zeigt jedoch, daß die interne Vorhersage an strahlungsreichen Tagen für $cl = 9$ bessere Ergebnisse liefert. Der hohe Komfortparameter erlaubt zwar nur die Einbeziehung der Wettervorhersageergebnisse

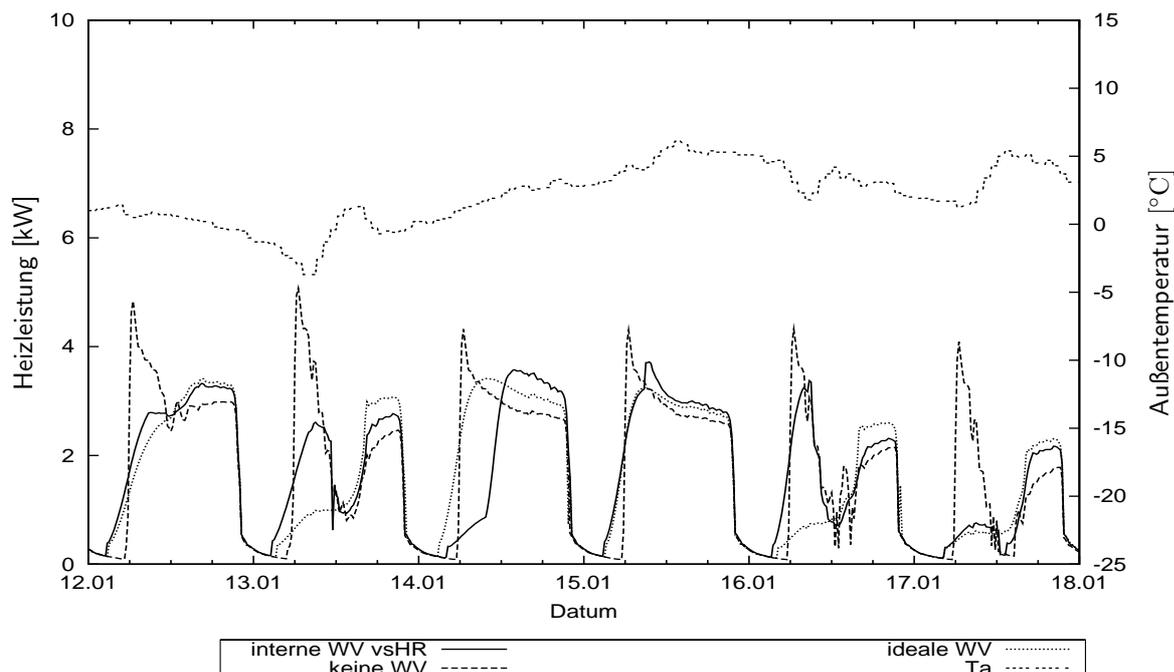


Abb. 4.39. Simulierte Verläufe der Heizleistung in die Referenzzone für verschiedene Wettervorhersagen (WV), $cl = 5$, sowie Außentemperatur T_a

weniger zukünftiger Zeitschritte, dies reicht jedoch bei den herrschenden Außentemperaturen und dem Gebäudemodell zur Vermeidung von Überhitzungen an den gezeigten Tagen bereits aus.

Der Vorteil der idealen Wettervorhersage gegenüber der internen des vsHR zeigt sich insbesondere an aufeinanderfolgenden Tagen mit wechselnder Einstrahlung (13.1., 14.1., 16.1.). An aufeinanderfolgenden Tagen mit ähnlichen Einstrahlungsverläufen (15.1. und 17.1.) ähneln sich auch die Ergebnisse für die ideale und die interne Wettervorhersage. An Tagen mit hoher Einstrahlung wird im Mittel bei einer idealen Vorhersage für einen längeren Zeitraum eine Untertemperatur zugelassen. An Tagen mit wenig Einstrahlung wird die Raumtemperatur sofort morgens angehoben, allerdings mit einer leichten Dämpfung, die aus dem Komfortparameter resultiert.

Tabelle 4.5. Simulierte Heizenergieverbräuche für die Referenzzone mit dem Testhaus-Gebäudemodell in einer Heizperiode für verschiedene Wettervorhersagevarianten (Wetterdaten Hannover 1995), Komfortparameter $cl = 5$

Wettervorhersage	Heizenergieverbrauch [kWh]	Heizenergieverbrauch bez. auf Verbrauch mit eThV [%]	Einsparungen [%]	\overline{PPD}	$\max(PPD)$
interne WV	6757	92.98	7.02	5.32	14.41
keine WV	7108	97.80	2.20	5.17	15.18
ideale WV	6678	91.88	8.12	5.36	14.41

Tabelle 4.5 zeigt, daß bei einer idealen Wettervorhersage gegenüber der internen der vsHR bei Komfortparameter $cl = 5$ noch weitere 1.1% Heizenergie für die simulierte Heizperiode und das Gebäudemodell eingespart werden können. Erhebliche Unterschiede zeigen sich bei

der maximalen Heizleistung und im Regelaufwand (siehe Tabelle 4.6). Mit einer idealen Wet-

Tabelle 4.6. Simulierte maximale Heizleistungen und Regelaufwand für die Referenzzone mit dem Testhaus-Gebäudemodell in einer Heizperiode für verschiedene Wettervorhersagevarianten (Wetterdaten Hannover 1995), Komfortparameter $cl = 5$

Regelungsvariante	maximale Heizleistung [kW]	Regelaufwand [K]
interne WV	5.92	9711
keine WV	5.74	16920
ideale WV	4.60	8004

tervorhersage werden erhebliche Verbesserungen gegenüber der vsHR mit interner und ohne Vorhersage hinsichtlich der notwendigen maximalen Heizleistung sowie des Regelaufwands erzielt.

Der eigentliche Vorteil einer verbesserten Vorhersage zeigt sich jedoch anhand der gezeigten Temperatur- und Heizleistungsverläufe im Bereich des thermischen Komforts. Untertemperaturen werden nur zugelassen, wenn tatsächlich merkliche solare Gewinne eintreten. Dies stellt für den Nutzer eine erhebliche Verbesserung dar. Möglichkeiten zur Verbesserung der Wettervorhersage werden in Abschnitt 5.4 diskutiert.

Für die Heizenergieeinsparmöglichkeiten durch eine ideale Wettervorhersage bei einem trägeren Heizsystem sei auf zwei Literaturstellen verwiesen. Nygård Ferguson [63] ermittelte für eine Fußbodenheizung gegenüber einer internen Vorhersage auf Basis eines stochastischen Modells ein Einsparpotential von 6%. Rohlfis [72] konnte ein Einsparpotential von 3 bis 13% zwischen einer konstanten und einer idealen Vorhersage abhängig von anderen Gebäudeparametern (Fensterfläche, Dämmstandard) nachweisen.

4.5 Variation von Gebäudeparametern

In den bisherigen Abschnitten wurde nachgewiesen, daß die vsHR die gewünschten Eigenschaften hinsichtlich des Regelverhaltens, der Abhängigkeit von ihren Parametern, der Heizenergieeinsparung und Komfortoptimierung für ein ausgewähltes Gebäudemodell, welches sich am Aufbau des Referenzhauses des ISFH in Emmertal orientiert, aufweist. Im folgenden werden ausgewählte Eigenschaften der Regelung für eine Variation von Parametern dieses Gebäudemodells untersucht. Die im folgenden variierten Größen sind die solare Empfangsfläche, der Dämmstandard, die wirksame thermische Kapazität des Gebäudes sowie Parameter des Heizsystems. Der geometrische Aufbau des Gebäudes blieb dabei unverändert. Genaue Informationen über den Wandaufbau bei den einzelnen Varianten sind dem Anhang B.2.3 zu entnehmen.

4.5.1 Der Einfluß der solaren Empfangsfläche

Das bisher verwendete Gebäudemodell zeichnet sich durch eine moderat ausgelegte Südfensterfläche (etwa ein Drittel der Südfassadenfläche) bei gleichzeitigem Vorhandensein großer thermischer Kapazitäten durch den Massivbau aus. Aus diesem Grund sind Überhitzungserscheinungen in den Wintermonaten selten zu beobachten und in der Übergangszeit nicht

sehr ausgeprägt. Häufig weisen sogenannte Solarhäuser aber größere Fensterflächen auf, Extreme finden sich zudem in der Glasarchitektur. Die Südfensterfläche wird zur Simulation verdoppelt und verdreifacht. Dies ergibt die Variationen $A_f=20.4 \text{ m}^2$ (Standardfall), 40.8 m^2 und 61.2 m^2 . Die letzte Variante entspricht nahezu einer Vollverglasung der Südfassade.

Abbildung 4.40 zeigt die simulierten Raumtemperaturen für die verschiedenen Südfensterflächen für den Beispielzeitraum vom 12.1.-17.1.1995. Die Heizleistungen für die entsprechenden Tage sind in Diagramm 4.41 aufgetragen. Zunächst ist festzustellen, daß die vsHR

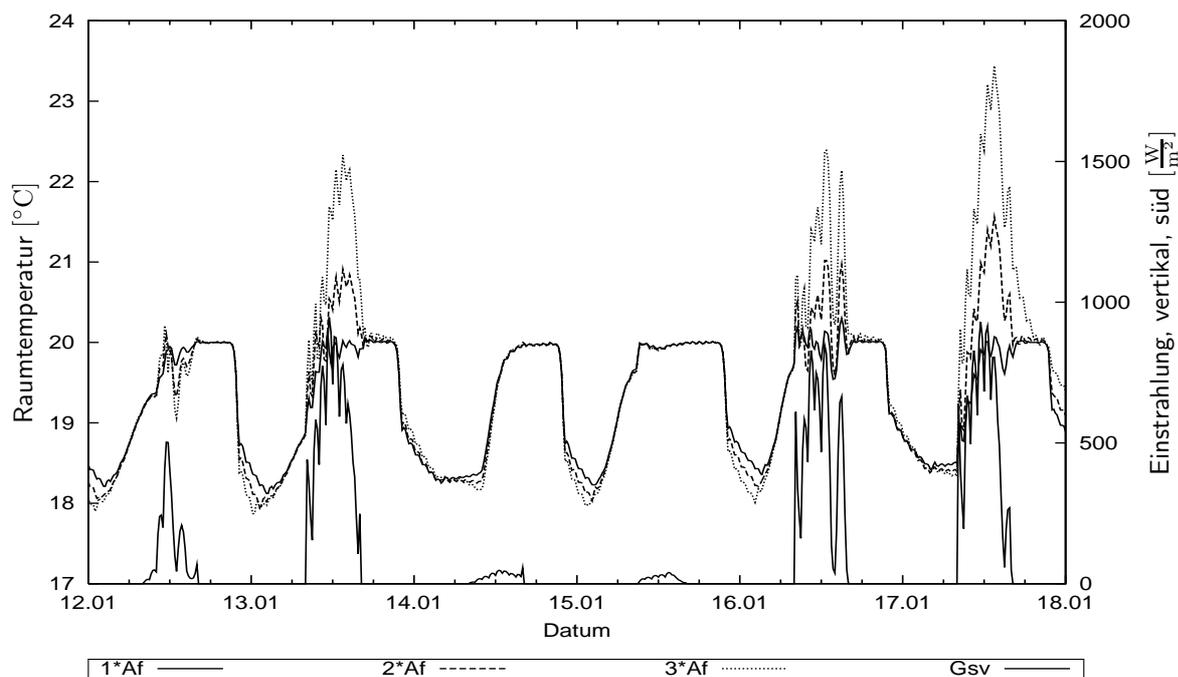


Abb. 4.40. Simulierte Raumtemperaturverläufe für verschiedene Südfensterflächen A_f , $cl = 5$, sowie solare Einstrahlung auf die Südfassade G_{sv}

auch bei veränderter Südfensterfläche hervorragendes Führungsverhalten aufweist. Allerdings reicht bei vergrößerter Südfensterfläche auch die Reduktion der Heizleistung auf sehr kleine Werte zur Vermeidung von Überhitzungen nicht aus. Nachts treten aufgrund des höheren Wärmedurchgangskoeffizienten der Fenster im Vergleich zu Wänden im Gebäudemodell größere Verluste auf, die durch ein früheres Anheben der Heizleistung kompensiert werden. Aufgrund der stärkeren Auskühlung des Gebäudes bei größeren Fensterflächen kommt es morgens zu Heizleistungsspitzen. Bei Vorhersage von Einstrahlungsgewinnen wird bei steigender Fensterfläche die Heizleistung schneller reduziert. An Tagen mit wenig Einstrahlung wird auch tagsüber eine höhere Heizleistung zur Kompensation der Wärmeverluste benötigt.

Die in Abbildung 4.42 dargestellten Monatssummen des Heizenergieverbrauchs zeigen, daß Heizenergieeinsparungen durch größere solare Empfangsflächen in den Übergangszeiten auftreten. Dies liegt an den verringerten Wärmeverlusten aufgrund einer höheren Außentemperatur und am größeren Strahlungsenergieangebot. Während der Wintermonate kommt es dagegen zu einem Mehrverbrauch an Heizenergie. Entsprechend werden höhere Spitzenleistungen benötigt. Eine kleinere Fensterfläche führt auch zu einer zeitlichen Vergleichmäßigung des Heizleistungsbedarfs. Der in Abbildung 4.44 dargestellte Verlauf der Minimal-

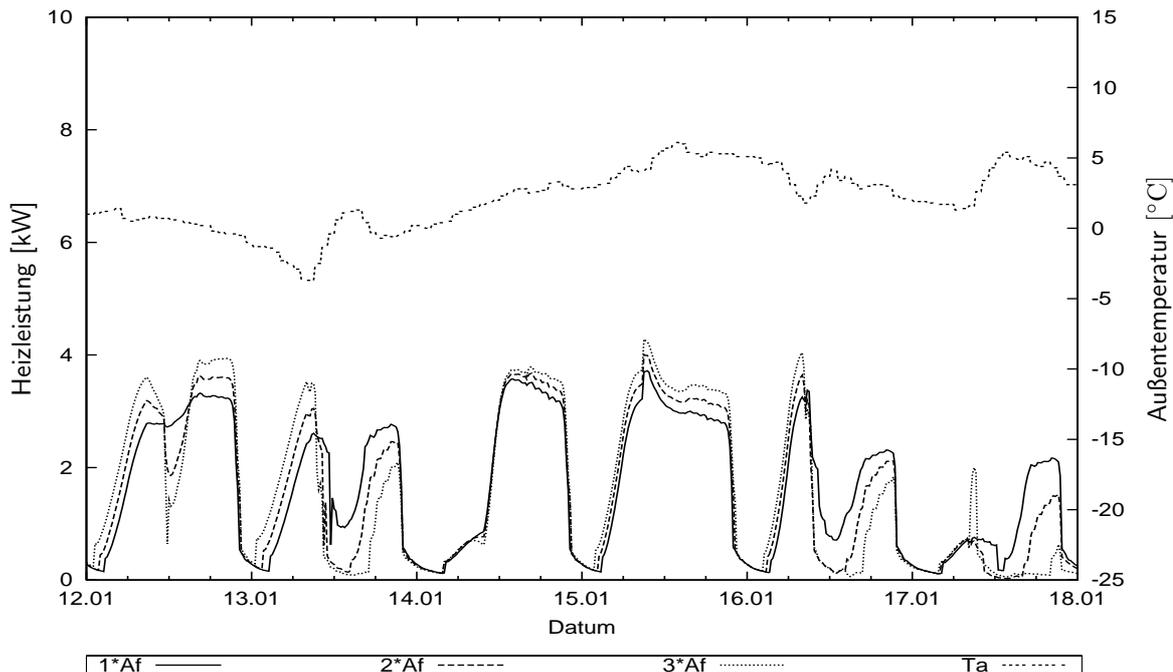


Abb. 4.41. Simulierte Verläufe der Heizleistung in die Referenzzone für verschiedene Südfensterflächen A_f , $cl = 5$, sowie Außentemperatur T_a

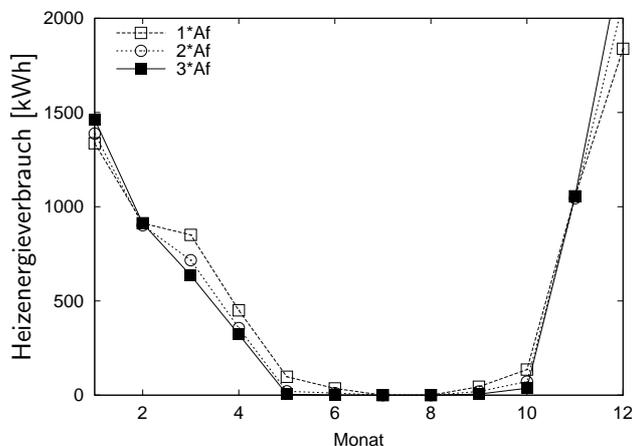


Abb. 4.42. Monatssummen des Heizenergieverbrauchs für verschiedene Südfensterflächen A_f

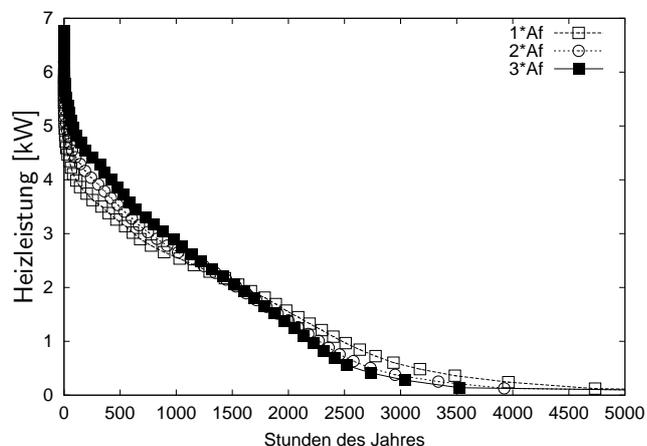


Abb. 4.43. Jahresdauerlinie der Heizleistung für verschiedene Südfensterflächen A_f

und Maximalwerte des PMV -Indexes zeigt die Problematik des Überhitzens aufgrund der größeren Fensterfläche insbesondere in den Übergangsmo-
 naten. Der minimale PMV -Index ist dagegen nahezu unabhängig von der Fensterfläche. Bei der Berechnung wurde die Ober-
 flächentemperatur der umgebenden Wände gleich der Lufttemperatur angenommen. Bei
 größeren Fensterflächen sinkt jedoch aufgrund des in der Regel im Vergleich zu Wänden
 schlechteren k -Wertes die mittlere Oberflächentemperatur. D.h. bei größeren Fensterflächen
 ist auch eine Erhöhung der Anzahl der Raumzustände, die von einer Testgruppe als „zu
 kalt“ empfunden würde, zu erwarten.

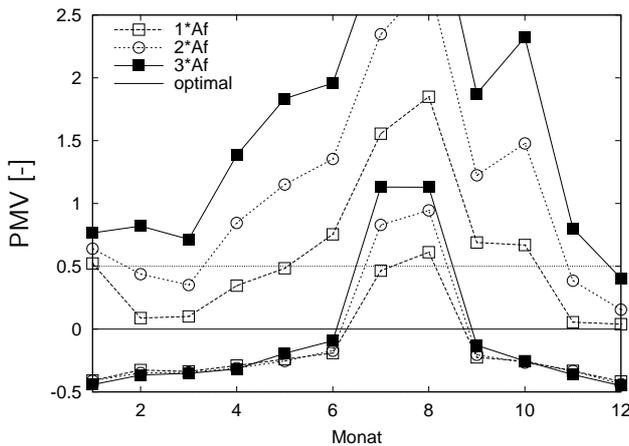


Abb. 4.44. Minimal- und Maximalwert des PMV -Indexes für die Monate des simulierten Jahres bei verschiedenen Südfensterflächen A_f , Komfortparameter $cl = 5$

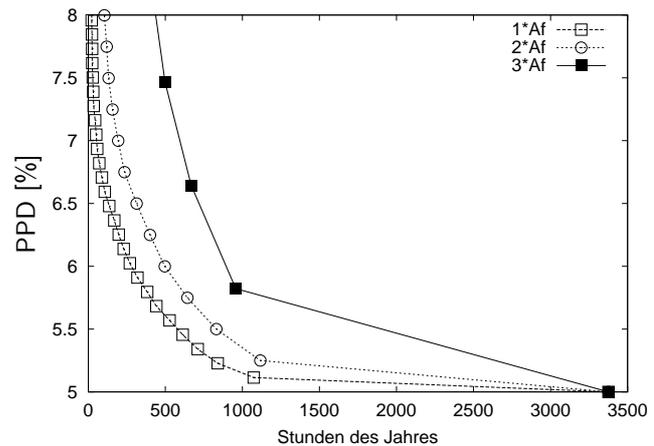


Abb. 4.45. Ausschnitt der Jahresdauerlinie des PPD -Indexes für verschiedene Südfensterflächen A_f , Komfortparameter $cl = 5$

Von der Jahresdauerlinie des PPD -Indexes in Abbildung 4.45 ist der besseren grafischen Auflösung wegen nur ein Ausschnitt dargestellt. Für größere Fensterflächen ergeben sich insgesamt ungünstigere Komfortverhältnisse. Das Maximum des PPD -Indexes liegt für die dreifache Fensterfläche bei 45%.

Im Vergleich mit einer konventionellen Regelung wirkt sich die Vergrößerung der Fensterfläche negativ auf die Einsparmöglichkeiten durch die vsHR aus. Die Abbildungen 4.46 und 4.47 zeigen Monatssummen des Heizenergieverbrauchs bei kHR und vsHR und die entsprechenden Einsparungen für verschiedene Fensterflächen. Die Einsparungen während der

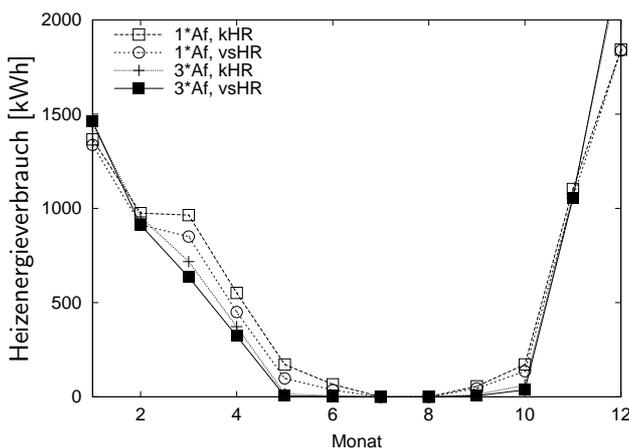


Abb. 4.46. Monatssummen des Heizenergieverbrauchs für die vsHR und die kHR für verschiedene Südfensterflächen A_f

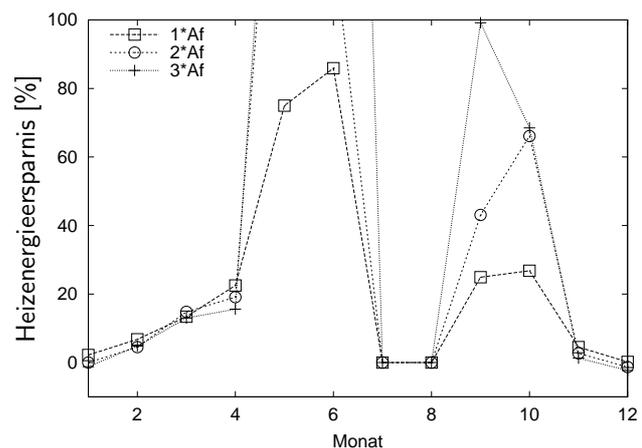


Abb. 4.47. Relative monatliche Heizenergieeinsparung durch die vsHR verglichen mit der kHR für verschiedene Südfensterflächen A_f

Heizperiode nehmen mit größerer Fensterfläche ab. Dies resultiert aus zwei Effekten, die jeweils an strahlungsreichen Tagen auftreten. Bei hoher aktueller Einstrahlung im Winter und kleinen Fensterflächen wird die Heizleistung durch die vsHR mehr reduziert als durch ein Thermostatventil. Bei größeren Fensterflächen reduzieren beide Regelungen die Heiz-

leistung auf nahezu null. Das bedeutet, daß bei den genannten Bedingungen die Differenz zwischen Heizleistung der vsHR und der kHR bei kleinen Fensterflächen höher ausfällt als bei großen. Der zweite Effekt ergibt sich aus der Hysterese des Thermostatventils. Sie führt dazu, daß nach hohen Sollwertüberschreitungen die Schließkennlinie für einen entsprechenden Zeitraum aktiviert bleibt und vergleichsweise weniger Heizleistung zugeführt wird als bei Verwendung der Öffnungskennlinie. Diese beiden Effekte überlagern die Einspareffekte durch die vsHR in den Wintermonaten so stark, daß diese bei größerer Fensterfläche sogar geringfügig mehr Energie verbraucht als die kHR. Erst in den Übergangsmonaten überwiegen die Einspareffekte durch die vsHR. Für das simulierte Gebäude wurde bei einfacher Fensterfläche eine Einsparung während der Heizperiode von 7% und bei zweifacher Fensterfläche von 4,7% der vsHR ($cl = 5$) gegenüber der kHR erzielt. Für die dreifache Fensterfläche beträgt die Einsparung über die Heizperiode nur noch 2,3%.

4.5.2 Der Einfluß des Dämmstandards

Die Untersuchungen in diesem Abschnitt befassen sich mit der Fragestellung, inwieweit die vsHR auch in Gebäuden mit anderem Dämmstandard einsetzbar ist, d.h. sich an die resultierenden veränderten dynamischen Eigenschaften selbst anpassen kann. Von Interesse ist vor allem auch, welche Einsparungen an Heizenergie und Veränderungen hinsichtlich des thermischen Komforts sich im Vergleich mit einer konventionellen Heizungsregelung ergeben. Das bisher verwendete Modell eines Niedrigenergiehauses in Massivbauweise wurde modifiziert, so daß je eine Variante mit dem typischen Dämmstandard eines Altbaus, eines Gebäudes nach Wärmeschutzverordnung '95 (WSV 95) sowie eines Passivhauses entstand. Die wirksame thermische Kapazität sowie der geometrische Gebäudeaufbau blieben bei den Varianten unverändert. Genaue Informationen über den Wandaufbau können dem Anhang entnommen werden. Alle Simulationen wurden bei einem Komfortparameter von $cl = 5$ mit Wetterdaten vom Standort Hannover aus dem Jahr 1995 vorgenommen.

Zunächst soll das Regelverhalten untersucht werden. Abbildung 4.48 zeigt Raumtemperaturverläufe für die vsHR. An Tagen mit geringer Einstrahlung zeigen sich tagsüber kaum Unterschiede im Temperaturverlauf. Daraus kann gefolgert werden, daß die vsHR sich optimal an das jeweilige dynamische Gebäudeverhalten anpassen kann. Für das Passivhaus lassen sich auch an den gezeigten Tagen trotz sehr geringer morgendlicher Heizleistungen Überhitzungen nicht vermeiden, da die Temperatur der thermischen Kapazitäten nachts nicht ausreichend absinkt. Eine Reduktion der Überhitzungen gegenüber der konventionellen Regelung wird jedoch erreicht. Die Verläufe der Heizleistungen für die vsHR zeigt Abbildung 4.49. Einen Überblick über die Heizenergieverbräuche bei den verschiedenen Dämmstandards und Heizungsregelungen gibt Tabelle 4.7 sowie Abbildung 4.50. Die Parameter der Heizkurve der konventionellen Regelung wurden an den jeweiligen Heizleistungsbedarf des Gebäudes angepaßt (Tabelle 4.2). Für alle Gebäude werden mit der vsHR bei Komfortparameter $cl = 5$ Einsparungen gegenüber einer konventionellen Heizungsregelung mit elektronischem Thermostatventil erreicht. Die relativen Einsparungen nehmen mit verbessertem Dämmstandard zu, gleichzeitig nimmt der Unterschied in den mittleren *PPD*-Indizes zwischen vsHR und kHR ab. Die Abnahme der relativen Einsparungen durch eine verbesserte Regelstrategie bei schlechterem Dämmstandard erklärt sich aus der Nutzbarkeit der solaren Gewinne. Bei einem schlecht gedämmten Gebäude führen solare Gewinne kaum zu Überhitzungen, die durch vorherige Untertemperaturen vermieden werden könnten.

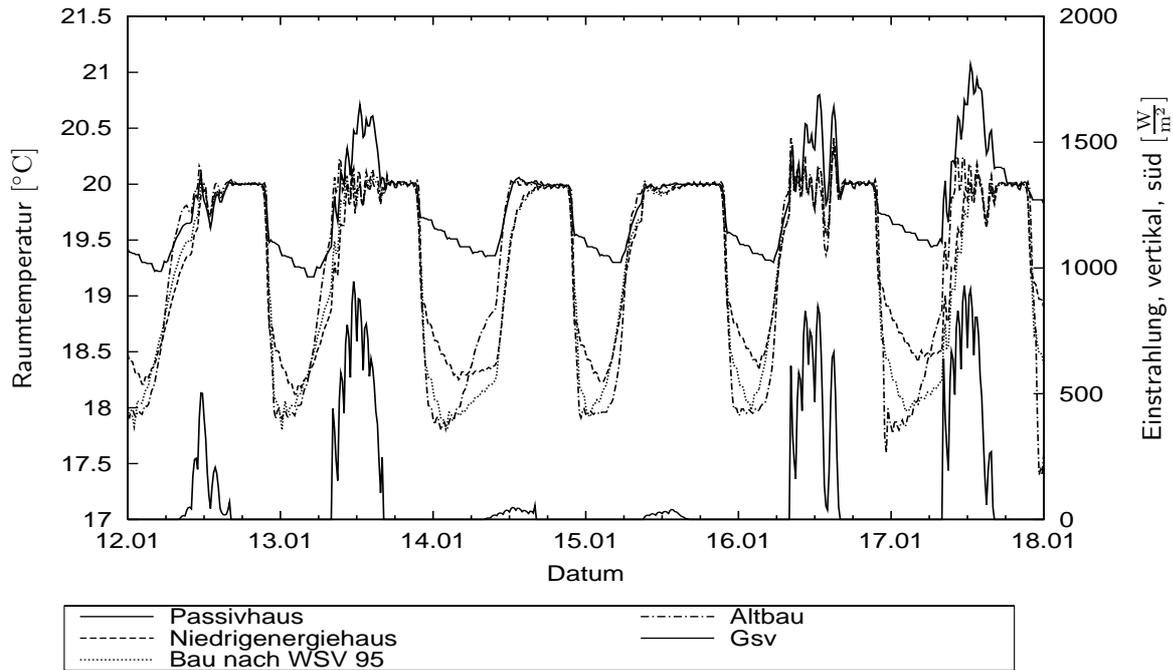


Abb. 4.48. Simulierte Raumtemperaturverläufe für verschiedene Dämmstandards bei Regelung mit der vsHR, $cl = 5$, sowie Außentemperatur T_a

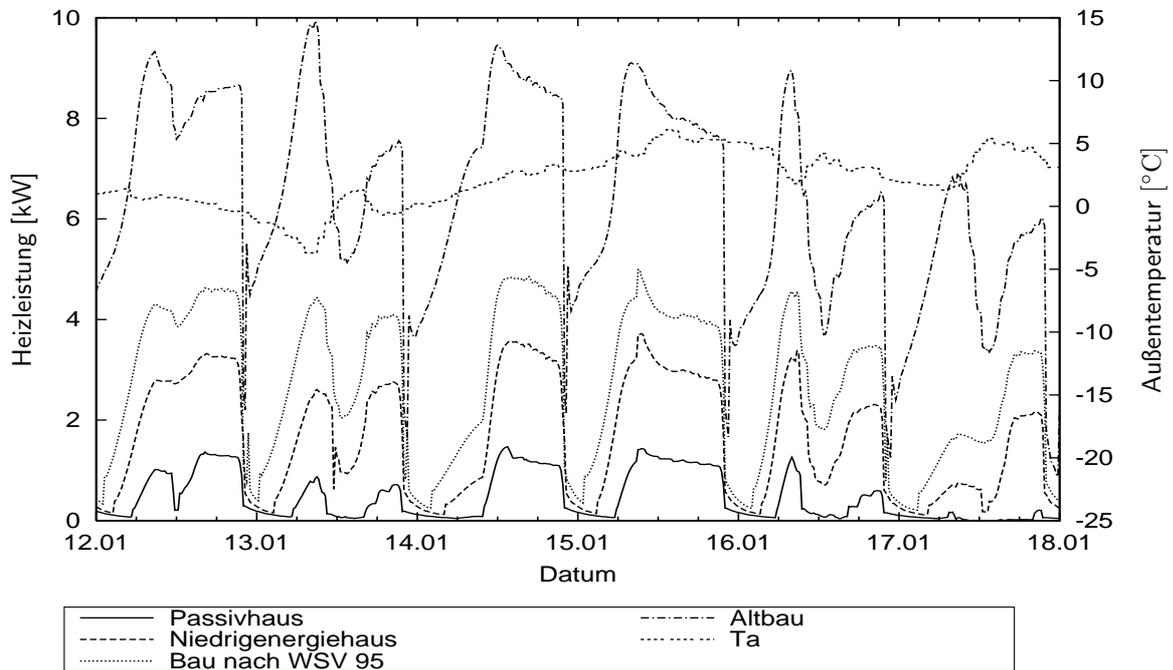


Abb. 4.49. Simulierte Verläufe der Heizleistung für verschiedene Dämmstandards bei Regelung mit der vsHR, $cl = 5$, sowie Außentemperatur T_a

Die monatlichen Heizenergieverbräuche bei der vsHR bezogen auf die Verbräuche bei konventioneller Regelung zeigt Abbildung 4.51. Eine logarithmische Auftragung der Jahressummen des Heizenergieverbrauchs über dem Mittelwert des PPD -Indexes während der Heizmonate ist in Abbildung 4.52 dargestellt. Bei der Berechnung wurden nur Zeiten, zu

Tabelle 4.7. Simulierte Heizenergieverbräuche für die Referenzzone bei Variation des Dämmstandards mit dem Testhaus-Gebäudemodell in einer Heizperiode (Wetterdaten Hannover 1995)

Dämmstandard und Regelung	Heizenergieverbrauch [kWh]	PPD [%]	$\max(PPD)$ [%]
Passivhaus kHR	2116	5.25	10.18
Passivhaus vsHR	1858	5.27	10.18
Niedrigenergiehaus kHR	7268	5.22	15.68
Niedrigenergiehaus vsHR	6757	5.32	14.41
Bau nach WSV95 kHR	11781	5.21	14.92
Bau nach WSV95 vsHR	11121	5.34	13.48
Altbau kHR	27382	5.28	17.36
Altbau vsHR	27311	5.29	22.22

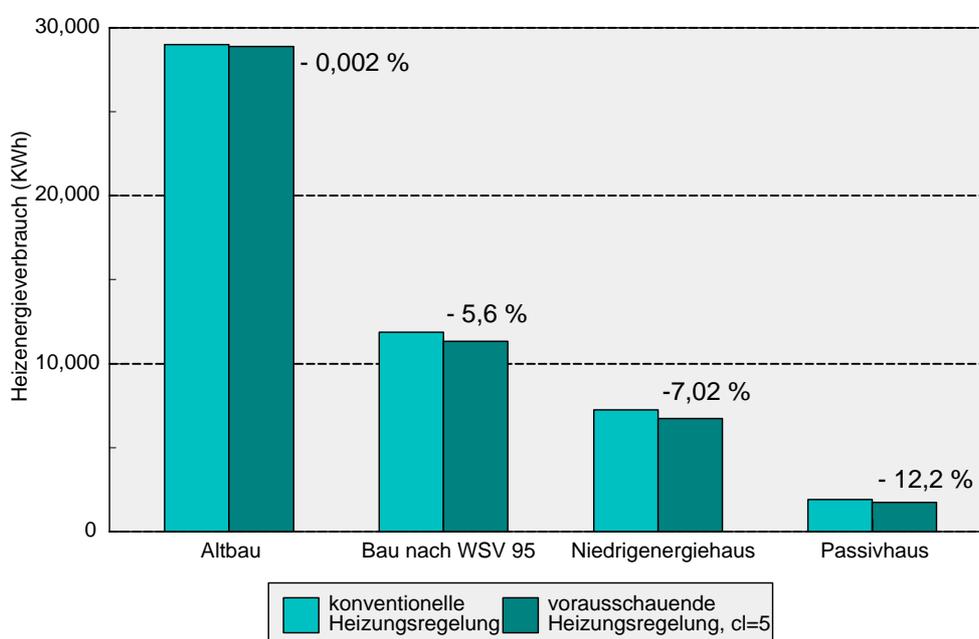


Abb. 4.50. Heizenergieverbrauch in der simulierten Periode für verschiedene Dämmstandards bei Regelung mit der vsHR mit Komfortparameter $cl = 5$ und der konventionellen HR

denen der Tagessollwert der Raumtemperatur galt, berücksichtigt. Während der Übergangsmontate werden durch die vsHR bei allen Dämmstandards Heizenergieeinsparungen erreicht. Bei geringerem Dämmstandard wird durch die vsHR in den Wintermonaten mehr Heizenergie verbraucht als durch eine konventionelle Regelung. Dies liegt an den Regeleigenschaften der Thermostatventile und der Auslegung des Heizsystems. Beim Altbau werden z.T. die Sollraumtemperaturen an kalten Wintertagen nicht erreicht, weshalb die Gesamtheizenergie etwas geringer ausfällt. Zu erkennen ist dies an den Monatsmittelwerten des PMV -Indexes in Abbildung 4.56. So erklärt sich auch der relativ hohe Mittelwert des PPD -Indexes über die Heizmonate bei der konventionellen HR in Abbildung 4.52. Der mittlere PPD -Index über die Heizmonate nimmt für die vsHR mit sinkendem Dämmstandard ab. Dies resultiert aus den zugelassenen Untertemperaturen. Wie aus Abbildung 4.48 ersichtlich, sinkt die Raumtemperatur bei einem schlechter gedämmten Gebäude nachts stärker ab. Werden

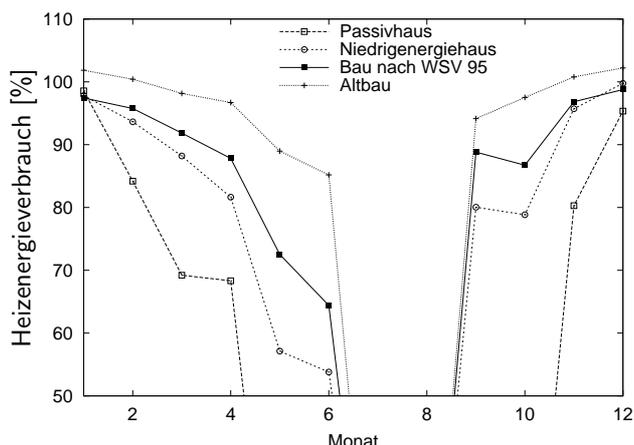


Abb. 4.51. Relativer monatlicher Heizenergieverbrauch bei Regelung mit der vsHR und Komfortparameter $cl = 5$ bezogen auf den entsprechenden Verbrauch mit konventioneller Regelung mit elektronischem Thermostatventil

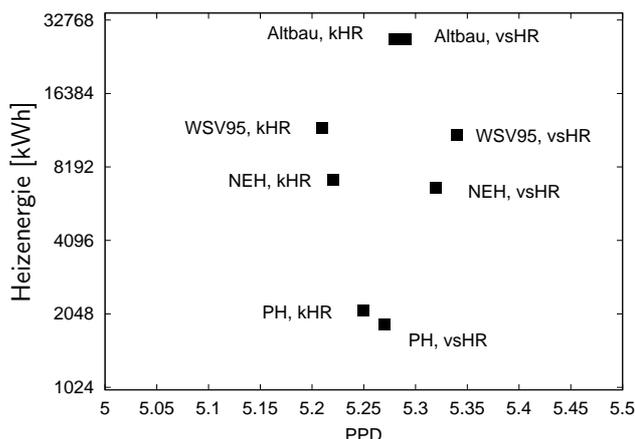


Abb. 4.52. Jahressumme des Heizenergieverbrauchs über dem mittleren PPD -Index während der Heizmonate für verschiedene Dämmstandards, vsHR mit Komfortparameter $cl = 5$

durch die vsHR morgens Untertemperaturen zugelassen, so liegen diese etwa im Bereich der während der Nacht erreichten Raumtemperatur. Entsprechend erhöht sich der PPD -Index. Die Abbildungen 4.53 bis 4.56 zeigen die monatlichen Mittelwerte, Maxima und Minima des PMV -Indexes im Vergleich für die vsHR und die konventionelle HR (kHR) für die verschiedenen untersuchten Dämmstandards.

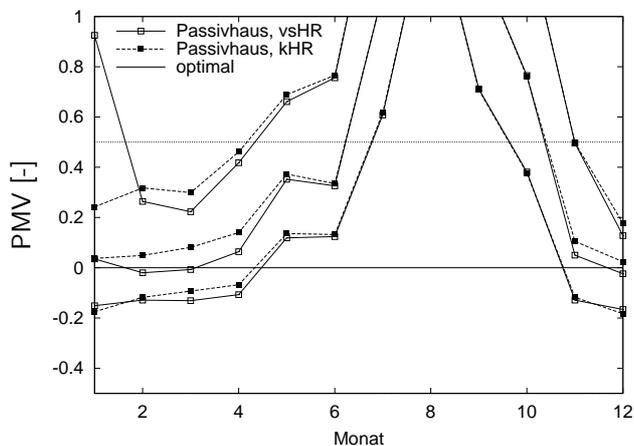


Abb. 4.53. Monatliche Mittelwerte, Maxima und Minima des PMV -Indexes im Vergleich für die vsHR ($cl = 5$) und die konventionelle HR (kHR) mit elektronischem Thermostatventil für ein Passivhaus

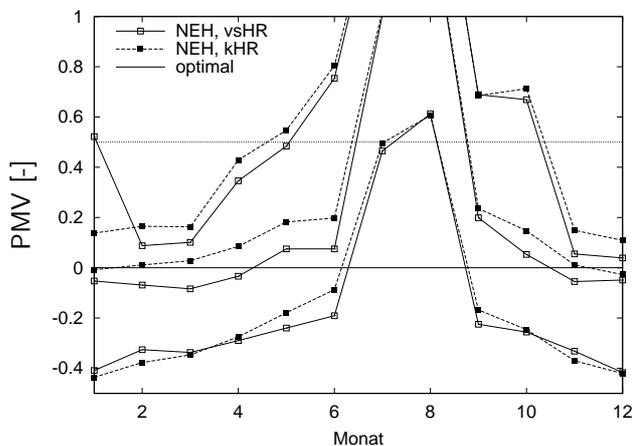


Abb. 4.54. Monatliche Mittelwerte, Maxima und Minima des PMV -Indexes im Vergleich für die vsHR ($cl = 5$) und die konventionelle HR (kHR) mit elektronischem Thermostatventil für ein Niedrigenergiehaus

Für die vsHR ergibt sich ein vergleichsweise hohes Maximum im Januar durch den Starttag, an dem mit Heizkurve ohne Thermostatventil geregelt wird. Während der anderen Monate liegt der maximale PMV -Index unter dem der kHR, d.h. die einstrahlungsbedingten Überhitzungen werden durch die vsHR reduziert. Eine Ausnahme bildet der Altbau: durch die im Mittel höheren Raumtemperaturen bei der vsHR und Fehler in der Wettervorhersage

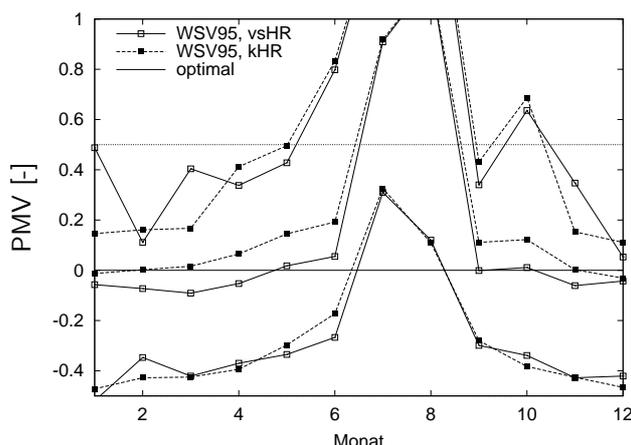


Abb. 4.55. Monatliche Mittelwerte, Maxima und Minima des *PMV*-Indexes im Vergleich für die vsHR ($cl = 5$) und die konventionelle HR (kHR) mit elektronischem Thermostatventil für ein Gebäude nach Wärmeschutzverordnung '95

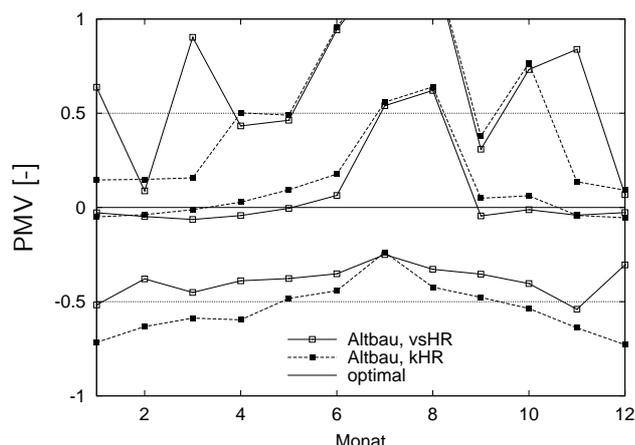


Abb. 4.56. Monatliche Mittelwerte, Maxima und Minima des *PMV*-Indexes im Vergleich für die vsHR ($cl = 5$) und die konventionelle HR (kHR) mit elektronischem Thermostatventil für einen Altbau

kommt es während einiger Heizmonate zu höheren maximalen *PMV*-Indizes im Vergleich zur kHR. Die monatlichen Minima des *PMV*-Indexes liegen bei der vsHR in den Wintermonaten in der Regel höher als bei der kHR. Während der Übergangsmonate kehrt sich dies jedoch um. Der Mittelwert des *PMV*-Indexes für die vsHR liegt zwar niedriger als bei der kHR, jedoch ist die Variationsbreite der Komfortzustände geringer.

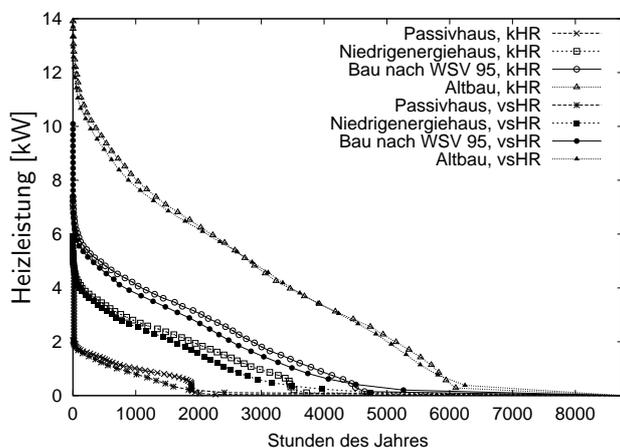


Abb. 4.57. Jahresdauerlinie der Heizleistung im Vergleich für die vsHR ($cl = 5$) und die konventionelle HR (kHR) mit elektronischem Thermostatventil für Gebäude verschiedener Dämmstandards

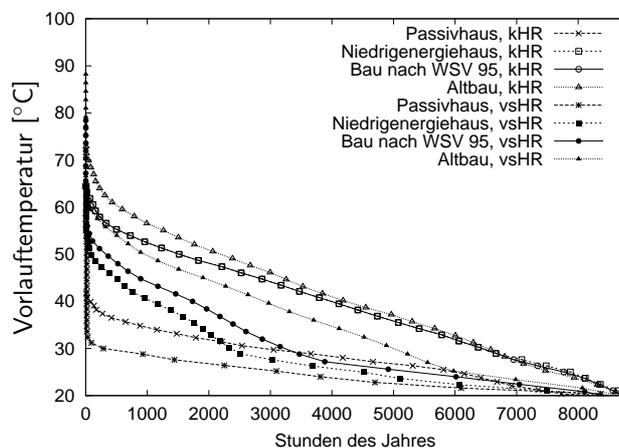


Abb. 4.58. Jahresdauerlinie der Vorlauftemperatur im Vergleich für die vsHR ($cl = 5$) und die konventionelle HR (kHR) mit elektronischem Thermostatventil für Gebäude verschiedener Dämmstandards

Die Jahresdauerlinie der Heizleistung (Abb. 4.57) für die verschiedenen Regelungen zeigt, daß bei Nutzung der vsHR bei allen untersuchten Dämmstandards für die meiste Zeit des Jahres geringere Heizleistungen benötigt werden, als bei einer konventionellen Regelung. Lediglich die maximale erforderliche Heizleistung ist an sehr wenigen Stunden des Jahres erhöht. Gerade bei hohen Dämmstandards wird dieser Wert dominiert durch die erforderliche Heizleistung am Starttag. Eine größere Auslegung der wärmeversorgenden Anlage ist

somit bei Nutzung der vsHR nicht erforderlich. Aus dem Diagramm läßt sich ebenfalls die relevante Heizzeit für die einzelnen Dämmstandards ablesen. Der geringe Wärmebedarf eines Passivhauses führt dazu, daß die Heizperiode nur von November bis März andauert. Für ein Niedrigenergiehaus ergeben sich nennenswerte Heizenergieeinträge nur von Oktober bis April, während für ein Gebäude nach WSV '95 auch im Mai noch Heizenergie zugeführt werden muß. Ein Altbau weist für die hier genutzten Wetterdaten auch im Juni und September einen – wenn auch geringen – Heizenergiebedarf auf. Ein Vergleich der Vorlauftemperaturen (Abbildung 4.58) zeigt, daß bei allen untersuchten Dämmstandards die von der vsHR geforderten Vorlauftemperaturen deutlich unter denen der kHR liegen. Die Rücklauftemperaturen sind dagegen bei den Standardbetriebsparametern etwas höher als bei der kHR.

4.5.3 Der Einfluß der thermischen Gebäudekapazität

Ziel der Untersuchungen mit Gebäudemodellen verschiedener Bauweise war es, die Eigenschaften der vsHR im Hinblick auf eine veränderte wirksame thermische Kapazität des Gebäudes zu ermitteln. Insbesondere war von Interesse, inwieweit die vsHR zu Energieeinsparungen und Komfortverbesserungen in Gebäuden führen kann, die aufgrund ihrer Bauweise mehr zu Überhitzungen neigen, als das Referenzgebäude. Die Bauteile der untersuchten Gebäudemodelle wurden so entworfen, daß der Wärmedurchgangskoeffizient gegenüber dem des Referenzgebäudes erhalten blieb. Der genaue Wandaufbau kann dem Anhang entnommen werden. Unterschieden wird zwischen Massivbauweise, was dem bisher betrachteten Referenzgebäude entspricht, mittelschwerer und leichter Bauweise. Bei mittelschwerer Bauweise wird eine Unterscheidung hinsichtlich der Lokalisierung der thermischen Kapazitäten vorgenommen. Befinden sich die wesentlichen wärmespeichernden Bauteile in der Außenhülle, so geht ein Teil der dort gespeicherten Wärme durch Wärmeleitung nach außen verloren.

Tabelle 4.8 listet die nach DIN EN 832 [27] ermittelte thermische Kapazität der Referenzzone für die verschiedenen Bauweisen auf. Zunächst soll das Regelverhalten der vsHR

Tabelle 4.8. Wirksame thermische Kapazität der Referenzzone bei den verschiedenen Bauweisen

Bauweise	Wirksame thermische Kapazität [$\frac{Wh}{K}$]	Spezifische wirksame thermische Kapazität [$\frac{Wh}{m^3K}$]
Massivbauweise	20723	50.3
mittel, außen massiv	10465	25.4
mittel, innen massiv	14191	34.4
Leichtbauweise	3934	9.5

für die verschiedenen Bauweisen betrachtet werden. Die Raumtemperaturverläufe für einen Beispielzeitraum im Januar zeigt Abbildung 4.59. Die entsprechenden Verläufe der Heizleistungen sind in Abbildung 4.60 dargestellt.

Aus den Raumtemperaturverläufen ist die Wirkung der thermischen Kapazität zu erkennen: nachts sinkt die Lufttemperatur um so stärker, je kleiner die Kapazität ist, da entsprechend weniger Wärme an den Luftknoten zurückgespeist wird. Dies führt an kalten Nächten dazu, daß die Heizungsregelung auch nachts einen Energieeintrag veranlaßt, um den Sollwert einzuhalten. Die geringere Raumtemperatur bei kleiner Kapazität führt morgens zu höheren Heizleistungen. Diese werden im Laufe des Tages jedoch schneller reduziert als bei hoher

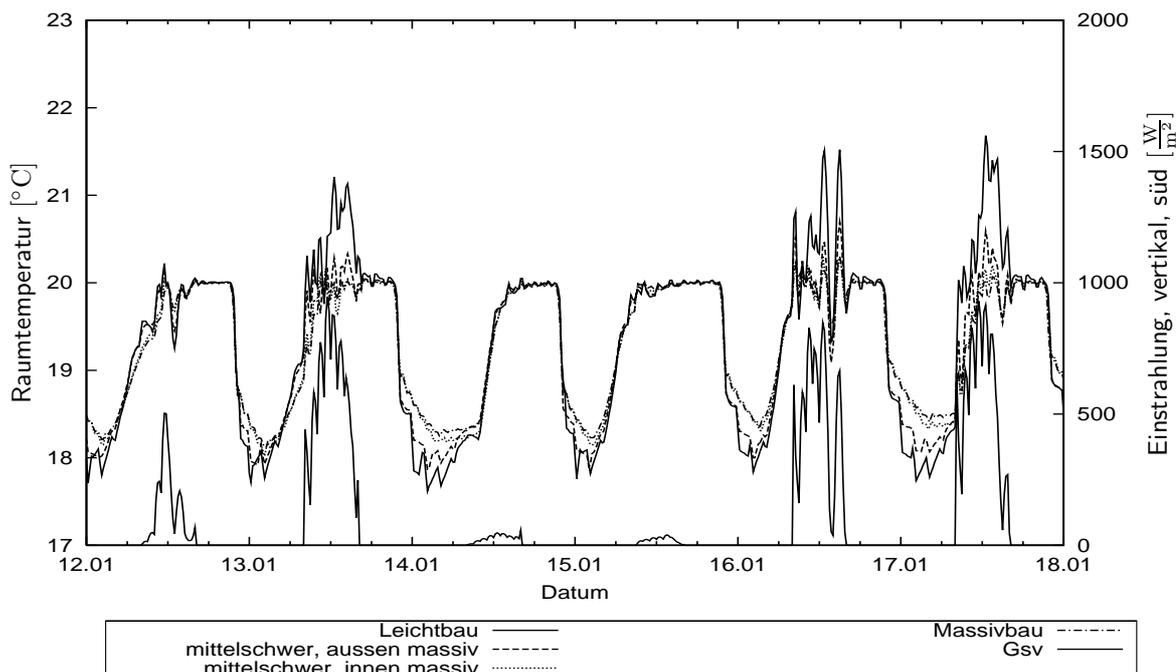


Abb. 4.59. Simulierte Raumtemperaturverläufe für verschiedene Bauweisen bei Regelung mit der vsHR, $cl = 5$, sowie solare Einstrahlung auf die Südfassade Gsv

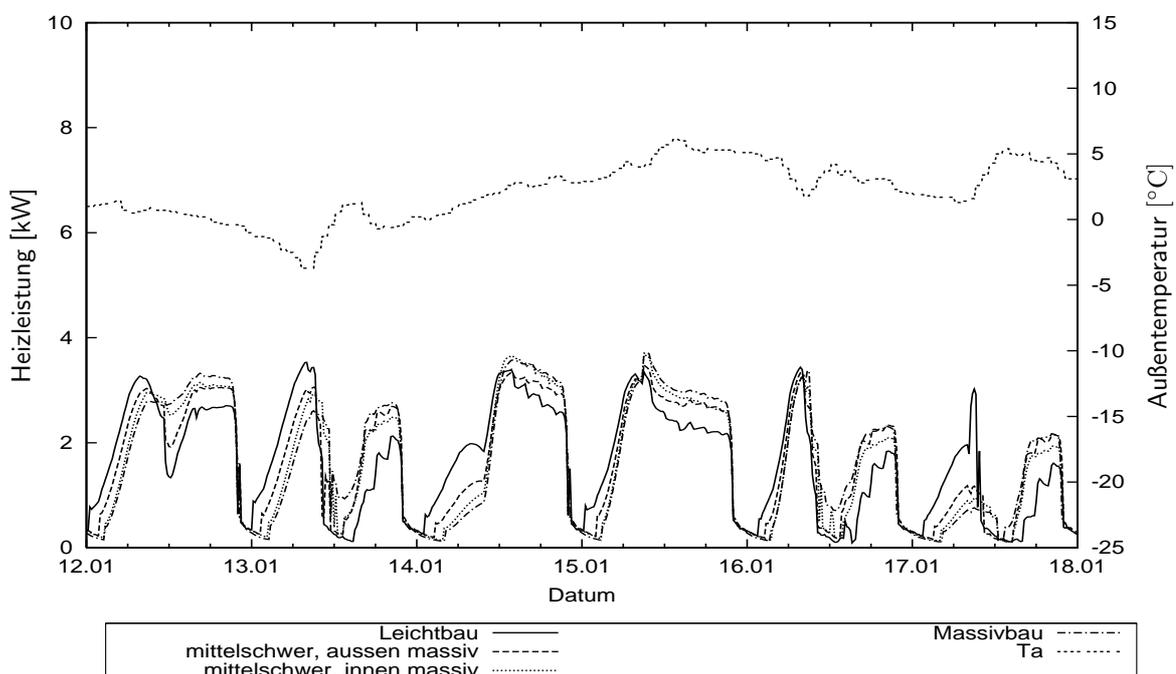


Abb. 4.60. Simulierte Verläufe der Heizleistung für verschiedene Bauweisen bei Regelung mit der vsHR, $cl = 5$, sowie Außentemperatur T_a

Kapazität, da das Aufheizen der Massivbauteile weniger Energie erfordert. An Tagen mit hoher Einstrahlung treten bei leichter Bauweise auch im Januar Überhitzungen auf. Diese sind umso geringer, je größer die wirksame thermische Kapazität des Gebäudes ist.

Insgesamt zeigt die vsHR ein hervorragendes Führungsverhalten. Die Problematik einer fehlerhaften Wettervorhersage, die an einzelnen Tagen zu unnötigen Untertemperaturen bzw. zu vermeidbaren Überhitzungen führt, ist jedoch bei allen Bauweisen zu beobachten. Für eine leichte Bauweise wird trotz vorzeitiger Reduktion der Heizleistung und entsprechenden Untertemperaturen am Morgen kaum eine Reduktion der Überhitzungen erreicht, da kaum aufheizbare Speichermassen zur Verfügung stehen. Eine Reduktion der Überhitzungen durch morgendliche Untertemperaturen ist umso effizienter, je massiver die Bauweise des Gebäudes ist. Weiterhin wirkt sich die schnellere nächtliche Auskühlung bei leichterer Bauweise in Richtung eines erhöhten morgendlichen Heizenergieeintrags aus. Dies könnte durch die Wahl eines geringeren Komfortparameters jedoch vermieden werden. Bei leichterer Bauweise können kleinere Komfortparameter als der hier gewählte $cl = 5$ daher zu einem ähnlichen Heizleistungsverlauf führen wie bei massiver Bauweise und daher auch entsprechende Energieeinsparungen ermöglichen.

Einen Überblick über die Heizenergieverbräuche bei den verschiedenen Bauweisen und Heizungsregelungen gibt Tabelle 4.9. Der Heizenergiebedarf steigt mit sinkender wirksamer

Tabelle 4.9. Simulierte Heizenergieverbräuche für die Referenzzone bei Variation der Bauweise mit dem Testhaus-Gebäudemodell in einer Heizperiode (Wetterdaten Hannover 1995), $cl = 5$

Bauweise und Regelung	Heizenergieverbrauch [kWh]	PPD [%]	$\max(PPD)$ [%]
Massivbauweise, kHR	7268	5.22	15.68
Massivbauweise, vsHR	6757	5.32	14.41
mittel, außen massiv, kHR	7257	5.32	24.18
mittel, außen massiv, vsHR	6923	5.38	22.53
mittel, innen massiv, kHR	7333	5.31	21.39
mittel, innen massiv, vsHR	6837	5.40	20.08
Leichtbauweise, kHR	7381	5.89	58.98
Leichtbauweise, vsHR	7144	5.91	57.31

Wärmekapazität an, gleichzeitig verschlechtert sich der thermische Komfort. Für alle Bauweisen werden mit der vsHR bei Komfortparameter $cl = 5$ Einsparungen gegenüber einer konventionellen Heizungsregelung mit elektronischem Thermostatventil erreicht. Die relativen Einsparungen nehmen mit der Speicherkapazität zu, gleichzeitig nimmt der Unterschied in den mittleren PPD -Indizes zwischen vsHR und kHR zu. Die mittleren PPD -Indizes sind bei der vsHR gegenüber der kHR aufgrund der zugelassenen Untertemperaturen verringert. Die vsHR bewirkt jedoch jeweils eine Reduktion der maximalen PPD -Indizes gegenüber der kHR aufgrund der vermiedenen Überhitzungen.

Die monatlichen Heizenergieverbräuche bei der vsHR bezogen auf die Verbräuche bei konventioneller Regelung zeigt Abbildung 4.62. Eine Auftragung der Jahressummen des Heizenergieverbrauchs über dem Mittelwert des PPD -Indexes während der Heizmonate ist in Abbildung 4.63 dargestellt. Bei der Berechnung wurden nur Zeiten, zu denen der Tagessollwert der Raumtemperatur gültig war, berücksichtigt. Außer für die Leichtbauweise erreicht die vsHR in allen Monaten Energieeinsparungen gegenüber der kHR. Für die Leichtbauweise werden in den Wintermonaten leicht höhere Energieeinträge verlangt, was auf die erhöhten Heizleistungen während der Nachtstunden zur Einhaltung des Raumtemperatursollwertes zurückzuführen ist. Mit der Bauweise "mittelschwer, innen massiv" werden aufgrund der

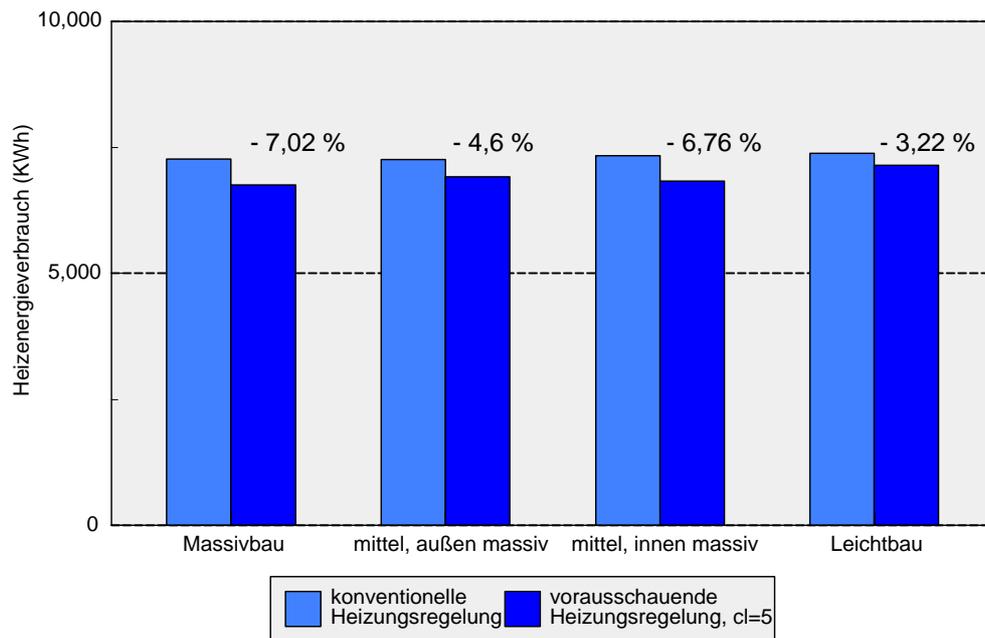


Abb. 4.61. Heizenergieverbrauch in der simulierten Periode für verschiedene Bauweisen bei Regelung mit der vsHR mit Komfortparameter $cl = 5$ und der konventionellen HR

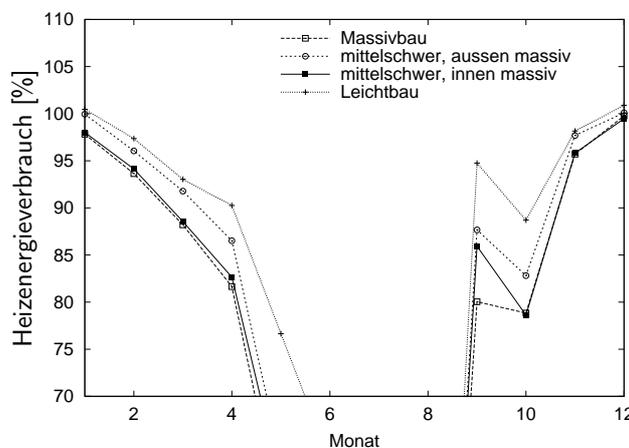


Abb. 4.62. Relativer monatlicher Heizenergieverbrauch bei Regelung mit der vsHR und Komfortparameter $cl = 5$ bezogen auf den entsprechenden Verbrauch mit konventioneller Regelung mit elektronischem Thermostatventil

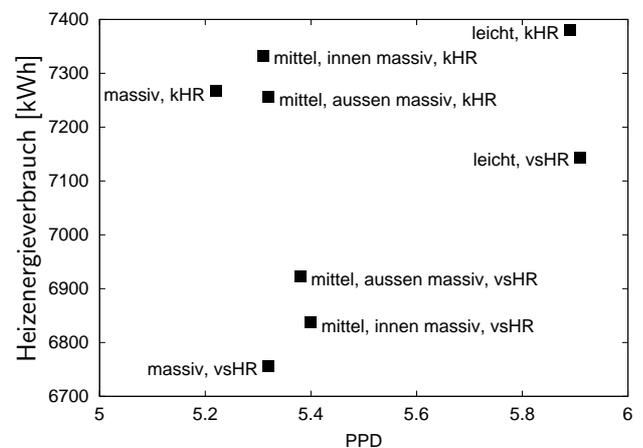


Abb. 4.63. Jahressumme des Heizenergieverbrauchs über dem mittleren PPD -Index während der Heizmonate für verschiedene Bauweisen, vsHR mit Komfortparameter $cl = 5$

höheren wirksamen thermischen Kapazität erheblich bessere Ergebnisse gegenüber der Bauweise "mittelschwer, außen massiv" erreicht.

Die Abbildungen 4.64 bis 4.65 zeigen die monatlichen Mittelwerte, Maxima und Minima des PMV -Indexes im Vergleich für die vsHR und die konventionelle HR (kHR) für die verschiedenen untersuchten Bauweisen. Die waagerechten gestrichelten Linien markieren den Bereich, in dem 90% der Personen einer Testgruppe Zufriedenheit mit dem Raumklima äußern würden. Deutlich ist die zunehmende Variationsbreite des thermischen Komforts

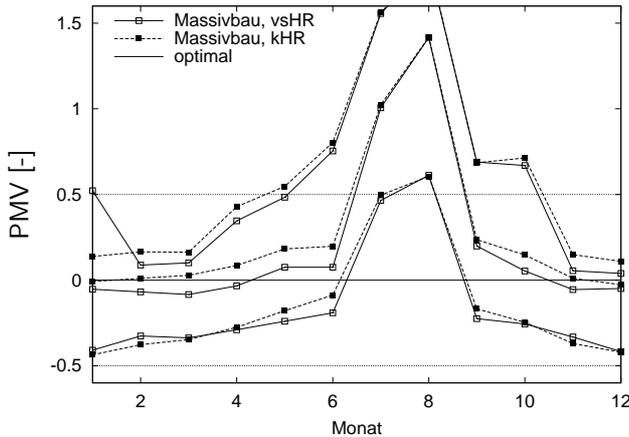


Abb. 4.64. Monatliche Mittelwerte, Maxima und Minima des PMV -Indexes im Vergleich für die vsHR ($cl = 5$) und die konventionelle HR (kHR) mit elektronischem Thermostatventil für einen Massivbau

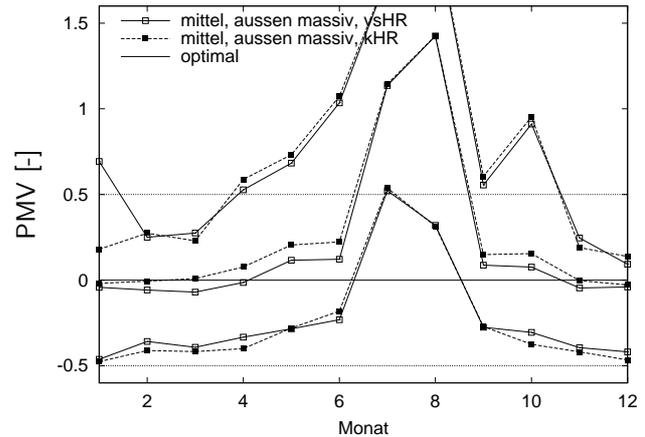


Abb. 4.65. Monatliche Mittelwerte, Maxima und Minima des PMV -Indexes im Vergleich für die vsHR ($cl = 5$) und die konventionelle HR (kHR) mit elektronischem Thermostatventil für ein mittelschweres Gebäude, Massivbauteile außen

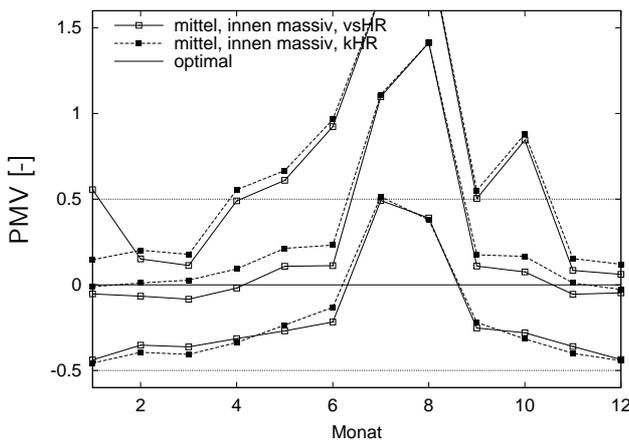


Abb. 4.66. Monatliche Mittelwerte, Maxima und Minima des PMV -Indexes im Vergleich für die vsHR ($cl = 5$) und die konventionelle HR (kHR) mit elektronischem Thermostatventil für ein mittelschweres Gebäude, Massivbauteile innen

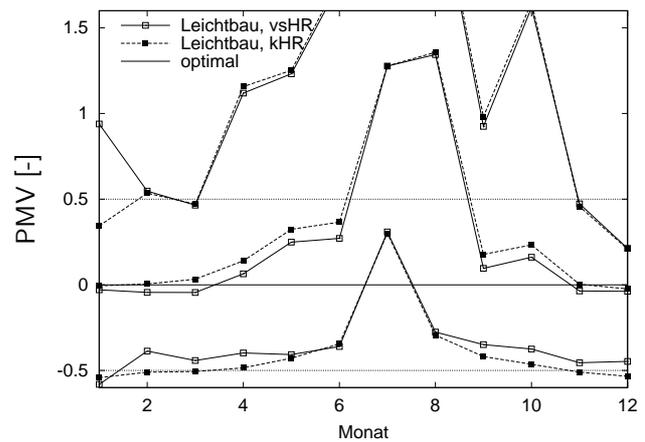


Abb. 4.67. Monatliche Mittelwerte, Maxima und Minima des PMV -Indexes im Vergleich für die vsHR ($cl = 5$) und die konventionelle HR (kHR) mit elektronischem Thermostatventil für die Leichtbauweise

beim Übergang zu leichteren Bauweisen für beide Arten der Regelung zu erkennen. Das Maximum des PMV -Indexes im Januar aufgrund des Starttags ist umso ausgeprägter, je weniger Speicherkapazität verfügbar ist. Die vsHR bewirkt für die meisten Monate und Bauweisen ein verringertes Minimum des PMV -Indexes. Der Maximalwert ist gegenüber der kHR um so mehr reduziert, je mehr thermische Kapazität vorhanden ist. Der Mittelwert des PMV -Indexes liegt in den Wintermonaten für die vsHR im negativen Bereich. In den Übergangsmonaten geht er umso stärker in den positiven Bereich über, je leichter das Gebäude gebaut ist. Der Monatsmittelwert des PMV -Indexes für die kHR zeigt ein ähnliches Verhalten, liegt jedoch in den Wintermonaten näher am Optimum, dafür in den Übergangsmonaten weiter davon entfernt.

Die Jahresdauerlinie der Heizleistung zeigt Abbildung 4.68. Für eine bessere Unterscheidbarkeit der Kurven wurde jeweils nur der vordere Bereich, für den eine nennenswerte Heizleistung auftritt, dargestellt. Es zeigt sich, daß für alle untersuchten Bauweisen für die vsHR

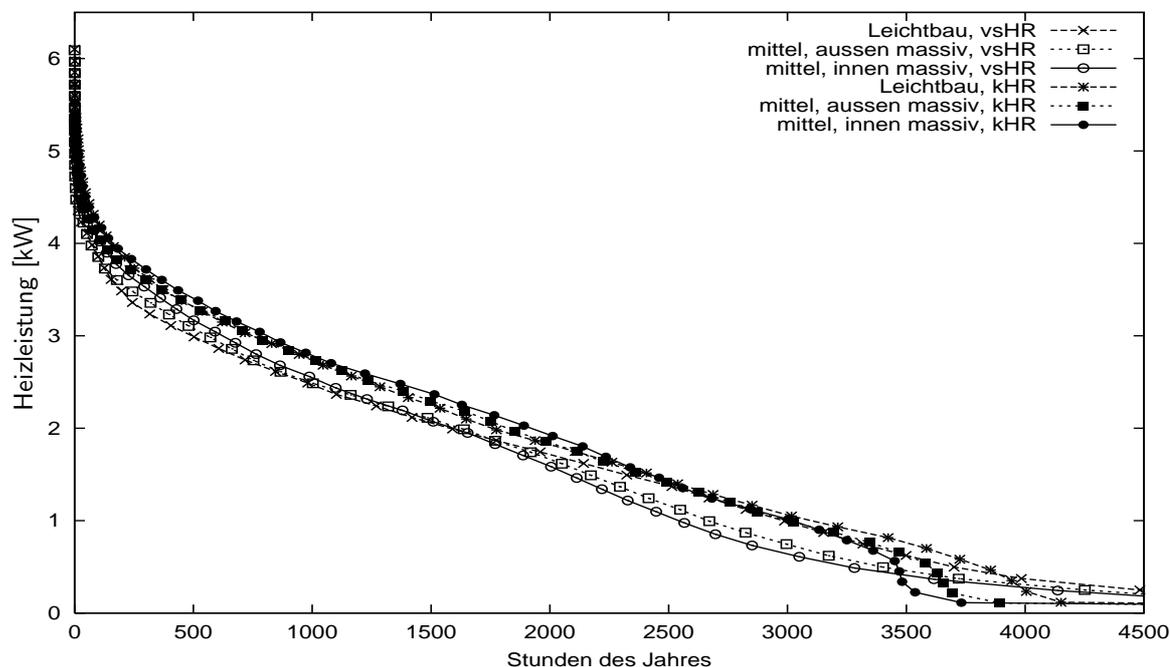


Abb. 4.68. Jahresdauerlinie der Heizleistung im Vergleich für die vsHR ($cl = 5$) und die konventionelle HR (kHR) mit elektronischem Thermostatventil für Gebäude verschiedener Bauweisen

im Vergleich zur kHR bis auf sehr wenige Stunden im Jahr geringere Heizleistungen benötigt werden. Interessant ist die Abhängigkeit von der Bauweise: im Bereich geringer Anzahl der Stunden (zwischen 200 und 1500 Stunden) wird eine umso höhere Heizleistung benötigt, je massiver das Gebäude ausgeführt ist. Dagegen treten kleinere Heizleistungen häufiger (zwischen 1500 und 4000 Stunden) bei Leichtbauweise auf. Dieses Verhalten ist auch anhand der Verläufe der Heizleistung in Abbildung 4.60 nachzuvollziehen. Für die Leichtbauweise treten zwar größere Heizleistungsspitzen auf, diese sind aber jeweils auf einen sehr kurzen Zeitraum begrenzt. Im Bereich mittlerer Heizleistungen werden für die Leichtbauweise jeweils geringere Einträge als für massivere Gebäudevarianten verlangt. Im Bereich kleiner Heizleistungen steigt die Häufigkeit des Auftretens wiederum für die Leichtbauweise an, da in größerem Umfang nachts Wärme zugeführt werden muß. Diese Abhängigkeit ist bei der vsHR erheblich ausgeprägter als bei der kHR, da die vsHR den jeweiligen Leistungsbedarf genauer ermittelt und zuführen kann, wie anhand des verbesserten Führungsverhaltens ersichtlich ist.

Eine Jahresdauerlinie des *PPD*-Indexes für die verschiedenen Bauweisen zeigt Abbildung 4.69. Es wurden jeweils nur die Zeiten in die Berechnung einbezogen, in denen ein Heizenergiebedarf vorhanden und der Tagessollwert der Raumtemperatur gesetzt war. Die Jahresdauerlinie des *PPD*-Indexes für die Massivbauweise ist der Übersichtlichkeit halber nicht eingezeichnet. Das Verhalten entspricht dem bereits in Abbildung 4.31 gezeigten für das Referenzgebäude. Gezeigt ist nur ein Ausschnitt, in welchem nennenswerte Änderungen des *PPD*-Indexes zu verzeichnen sind. Bei höherer Anzahl der Stunden finden keine prinzipiellen Änderungen der Abhängigkeit von Regelungsart und Bauweise mehr statt. Die Auftragung

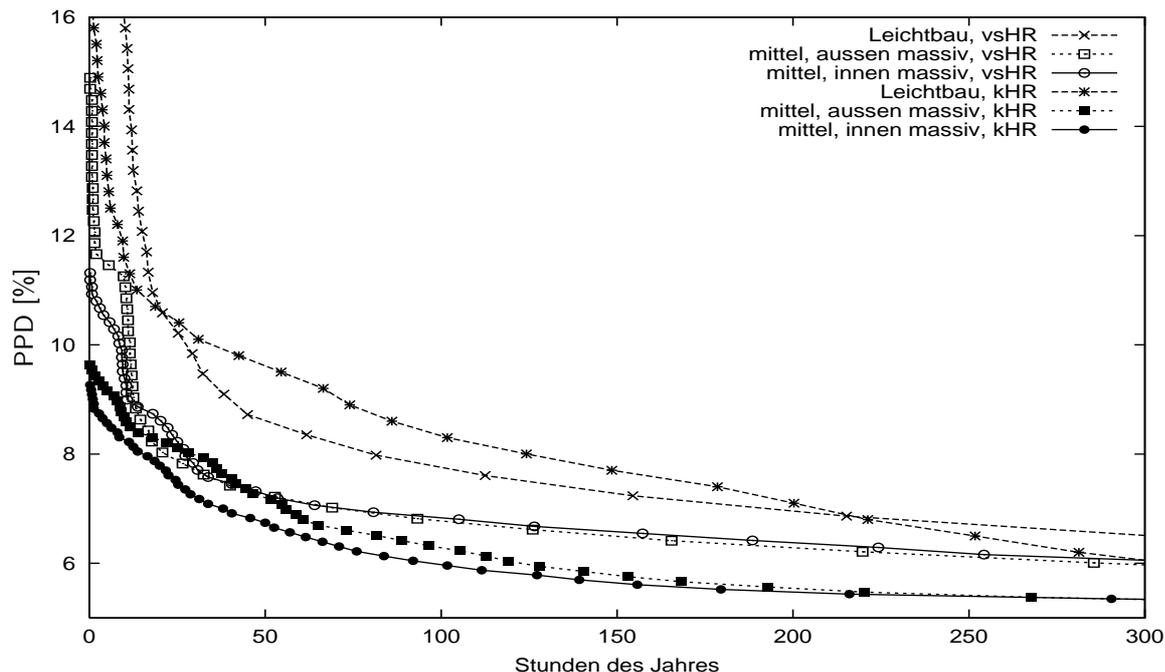


Abb. 4.69. Jahresdauerlinie des *PPD*-Indexes im Vergleich für die vsHR ($cl = 5$) und die konventionelle HR (kHR) mit elektronischem Thermostatventil für Gebäude verschiedener Bauweisen

zeigt, daß für leichtere Bauweise die Jahresdauerlinie des *PPD*-Indexes für die vsHR nicht mehr für jede Anzahl von Stunden oberhalb derjenigen für die kHR liegt. Es entsteht ein Überlappungsbereich, der umso größer ist, je weniger thermische Kapazität das Gebäude aufweist. Das Auftreten höherer *PPD*-Indizes an wenigen Stunden des Jahres resultiert wiederum aus der Startphase bei Regelung mit der konventionellen Heizkurve ohne Thermostatventil. Die dadurch auftretenden Überhitzungen sind um so gravierender, je weniger Speicherkapazität zum Aufheizen zur Verfügung steht. Wird der Starttag ausgeklammert, so läßt sich feststellen, daß nahezu immer während der Heizperiode 90% der Personen einer Testgruppe zufriedengestellt wären. Die Untertemperaturen, die durch die vsHR zur besseren Nutzung der solaren Gewinne zugelassen werden, erhöhen die Anzahl der unzufriedenen Personen nur geringfügig (im Bereich von 1 Prozentpunkt).

4.5.4 Der Einfluß des Heizsystems

Die Untersuchungen dieses Abschnitts dienen zum Test der Regeleigenschaften bei veränderten Eigenschaften des Heizsystems. Es wurde zum einen die Trägheit des Heizsystems variiert, zum anderen die Stellgröße zur Beeinflussung der Raumtemperatur verändert.

4.5.4.1 Variation der Trägheit des Heizsystems

Die Vorteile der vsHR gegenüber einer kHR sind beim bisher untersuchten vergleichsweise flink reagierenden Warmwasserheizsystem mit Heizkörpern noch nicht ausgeschöpft. Insbesondere bei trägen, im allgemeinen schwierig zu regelnden Heizsystemen ist die Vorhersage der Regelgröße von besonderer Bedeutung. Daher wird im folgenden die Regelung eines

Warmwasserfußbodenheizsystems bzw. -wandheizsystems untersucht. Zur Simulation wurde angrenzend an die zu beheizende Zone eine weitere Zone definiert. Der „Heizkörper“ wurde in diese Zone mit einer sehr guten thermischen Ankopplung an die Trennwand verlegt. Laut [68] beträgt die Dicke des Estrichs über den Heizrohren bei einer Fußbodenheizung 4,5-7 cm. Diese beiden Grenzfälle waren Gegenstand der folgenden Untersuchungen. Als konventionelle Regelung diente zum Vergleich eine PID-Regelung. Einen Vergleich zwischen kHR und vsHR zeigen die Abbildungen 4.70 und 4.71. Zur besseren Verdeutlichung des Verhaltens wurde ein Zeitraum in der Übergangszeit (10.3.-16.3.) ausgewählt. Der Vorhersage- und der Regelhorizont bei der vsHR wurde zur besseren Erfassung der Trägheiten auf 50 heraufgesetzt.

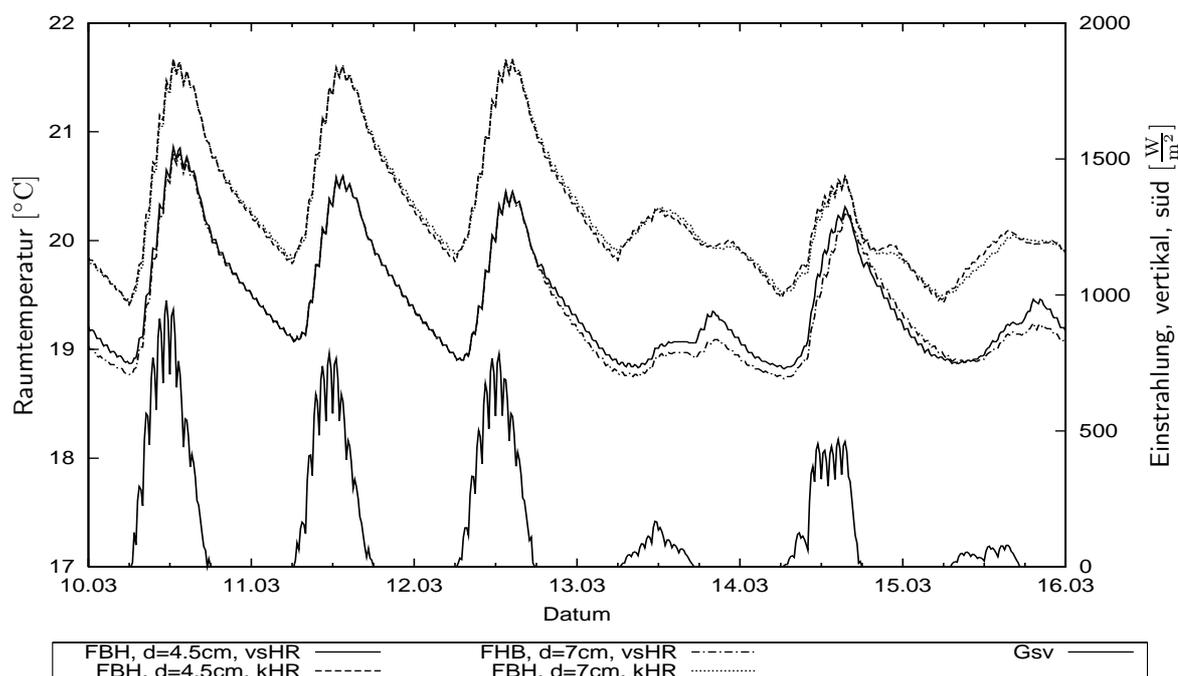


Abb. 4.70. Simulierte Raumtemperaturverläufe für Fußbodenheizung (FBH) mit unterschiedlicher Estrichdicke bei Regelung mit der vsHR, $cl = 5$, und der kHR (PID) sowie solare Einstrahlung auf die Südfassade G_{vs}

Die Wirkung der vsHR zeigt sich besonders an den einstrahlungsreichen Tagen. In Kenntnis der zukünftigen Regelgröße, beeinflusst u.a. durch die solaren Gewinne, wird morgens sehr wenig geheizt. Die PID-Regelung, die nur auf vergangene Sollwertabweichungen reagiert, heizt dagegen morgens bis zum Erreichen des Sollwerts. Dadurch kommt es im weiteren Tagesverlauf zu Überhitzungen. Bei der vsHR fallen die Sollwertüberschreitungen dagegen nur gering aus. Dagegen wird der Sollwert bei Regelung mit der vsHR am 13.3. aufgrund einer fehlerhaften Einstrahlungsvorhersage gantztägig unterschritten. Auch die Anhebung der Heizleistung am Nachmittag führt wegen der trägen Reaktion nicht mehr zum Erreichen des Sollwerts. Am darauffolgenden Tag wird die Heizleistung durch die vsHR deshalb schon morgens angehoben. Insgesamt zeigt sich bei trägeren Heizsystemen die bessere Vermeidbarkeit von Überhitzungen im Vergleich zur kHR, jedoch ist der gantztägige thermische Komfort auch empfindlicher hinsichtlich einer fehlerhaften Wettervorhersage. Die Monatssummen der Heizenergieverbräuche der vsHR und der kHR zeigt Abbildung 4.72. Die Einsparungen der vsHR im Vergleich zur PID-Regelung steigen in den Übergangsmonaten gegenüber den

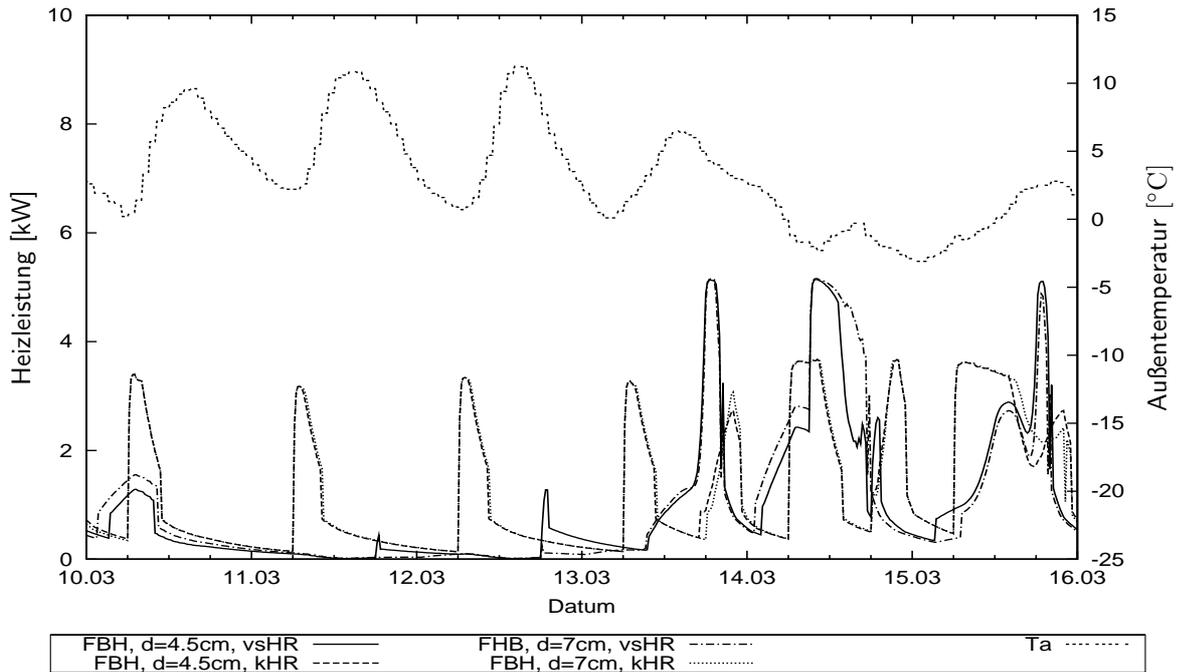


Abb. 4.71. Simulierte Verläufe der Heizleistung für Fußbodenheizung mit unterschiedlicher Estrichdicke bei Regelung mit der vsHR, $cl = 5$, und der kHR (PID) sowie Außentemperatur T_a

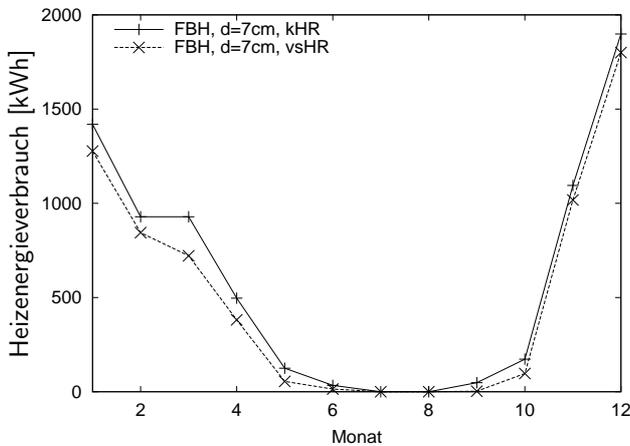


Abb. 4.72. Monatlicher Heizenergieverbrauch bei Regelung mit der vsHR und Komfortparameter $cl = 5$ und einer PID-Regelung

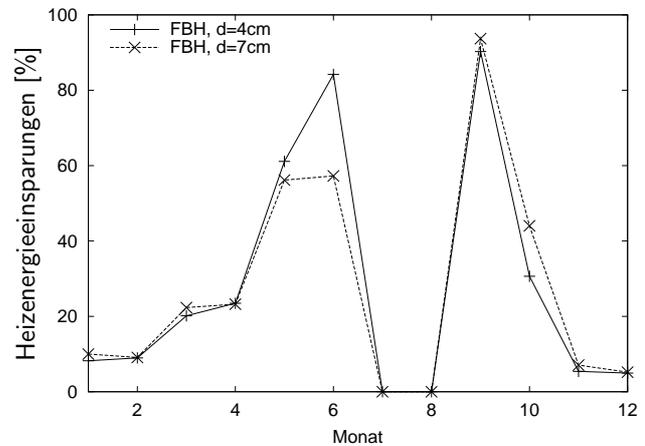


Abb. 4.73. Monatliche Heizenergieeinsparungen durch die vsHR im Vergleich zu einer PID-Regelung bei einer Fußbodenheizung mit verschiedenen Dicken der Estrichdecke

Wintermonaten an. Die Einsparungen bei 7 cm Estrichdecke liegen geringfügig höher. In der Summe über die Heizperiode betragen die Einsparungen 12% bzw. 13,1% für 4,5 cm bzw. 7 cm Estrichdecke bei einem Komfortparameter $cl = 5$. Die Auftragung der Maxima und Minima des PMV -Indexes für beide Regelungen zeigt, daß die vsHR zu geringeren mittleren Raumtemperaturen während der Heizperiode führt. Der Unterschied zwischen vsHR und kHR ist bei der Fußbodenheizung erheblich deutlicher als bei einer Heizung mit Radiatoren. Zwischen den beiden Varianten der Fußbodenheizung zeigen sich hingegen kaum Unterschiede.

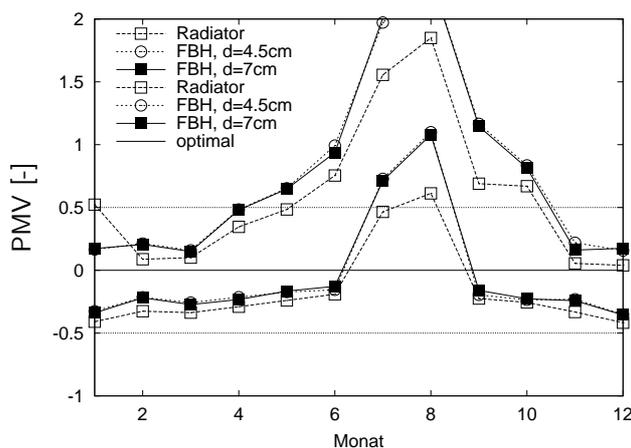


Abb. 4.74. Monatliche Maxima und Minima des PMV -Indexes für die vsHR ($cl = 5$) für eine Radiatorheizung und eine Fußbodenheizung mit jeweils 4,5 und 7 cm Estrichdecke

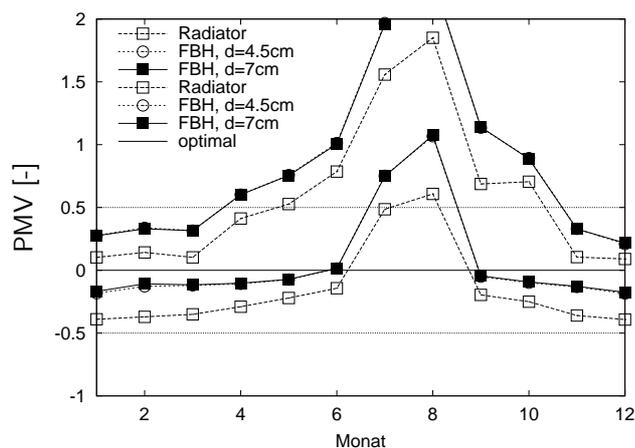


Abb. 4.75. Monatliche Maxima und Minima des PMV -Indexes für die kHR (PID) für eine Radiatorheizung und eine Fußbodenheizung mit jeweils 4,5 und 7 cm Estrichdecke

Die Untersuchungen zur Heizenergieeinsparung bestätigen die Ergebnisse von Nygård Ferguson [63]. Sie konnte mit Hilfe von Simulationen unter Nutzung von Wetterdaten von Lausanne eine Energieeinsparung von 10% für eine flinke Luftheizung und 15% für eine Fußbodenheizung nachweisen.

4.5.4.2 Variation der Stellgröße

Bei den bisher vorgestellten Untersuchungen wurde die Vorlauftemperatur als Stellgröße zur Beeinflussung der Regelgröße Raumtemperatur verwendet. Im folgenden finden der Massenstrom und die Heizleistung als Stellgrößen Verwendung. Die Untersuchungen mit anderen Stellgrößen hatten den Nachweis der Funktionsfähigkeit der Regelung bei veränderter Einflußnahme auf die Raumtemperatur zum Ziel. Die in Abschnitt 2.5.2 durchgeführten Betrachtungen zeigten, daß ein allgemeines Differenzgleichungsmodell 2. Ordnung zur Beschreibung des dynamischen Gebäudeverhaltens bei verschiedenen Stellgrößen geeignet ist. Demzufolge sollte eine Regelung mit anderen Stellgrößen ohne umfangreiche Anpassungen möglich sein. Lediglich die Gewichte der Kostenfunktion müssen angepaßt werden, da die Stellgröße dort mit ihrer Einheit eingeht. Die Anpassung wurde in der Weise vorgenommen, daß bei gleichem Komfortparameter ein ähnliches Führungsverhalten wie bei der Stellgröße Vorlauftemperatur erhalten wird. Abbildung 4.76 zeigt Raumtemperaturverläufe im Beispielzeitraum, Abbildung 4.77 die dazugehörigen Heizleistungen. Die Grafiken zeigen die prinzipielle Eignung der vsHR zur Regelung mit anderen Stellgrößen. Die Abweichungen im Führungsverhalten können durch die Anpassung der Gewichte der Kostenfunktion erklärt werden. Für eine marktfähige Lösung sollte durch Normierung eine allgemeine Formulierung der Gewichte verwendet werden, die sich automatisch der Stellgröße anpaßt.

In diesem Kapitel wurde eine umfassende Bewertung der entwickelten vorausschauenden selbstadaptierenden Heizungsregelung hinsichtlich ihrer Eigenschaften vorgenommen. Aus der Variation von Reglerparametern wurde ein geeigneter Parametersatz ermittelt ($SAK = 100$, $P = M = 20$) und für die weiteren Simulationen eingesetzt. Es konnte gezeigt werden,

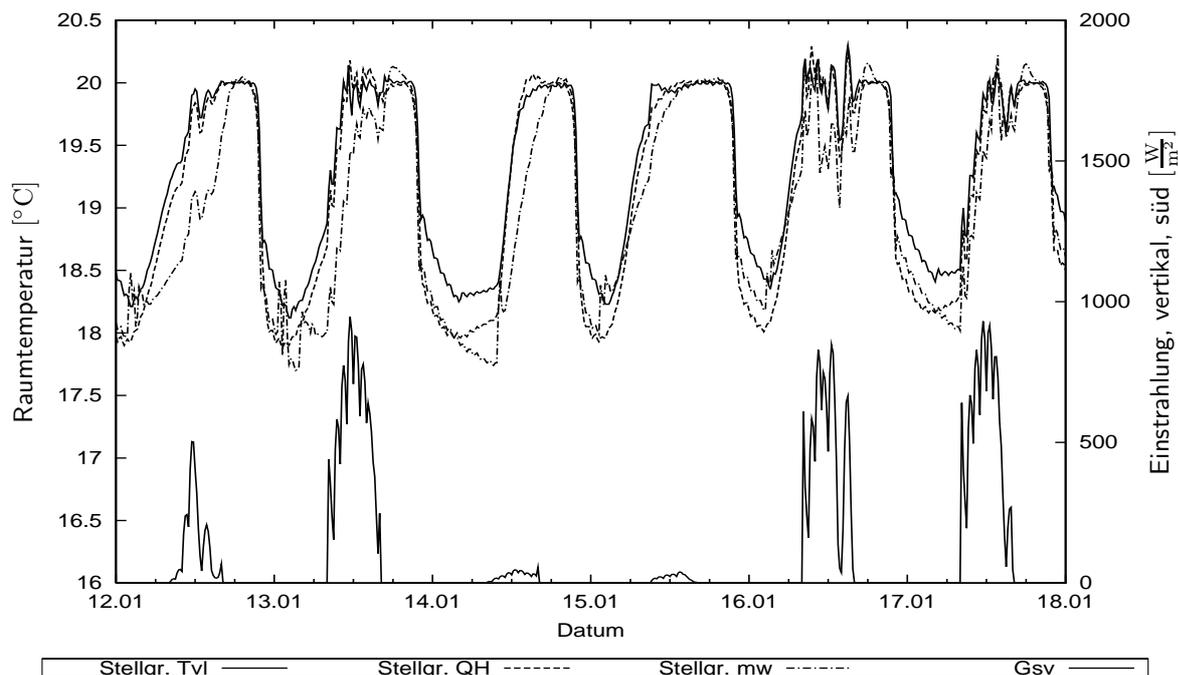


Abb. 4.76. Simulierte Raumtemperaturverläufe für verschiedene Stellgrößen bei Regelung mit der vsHR, $cl = 5$, sowie solare Einstrahlung auf die Südfassade Gsv

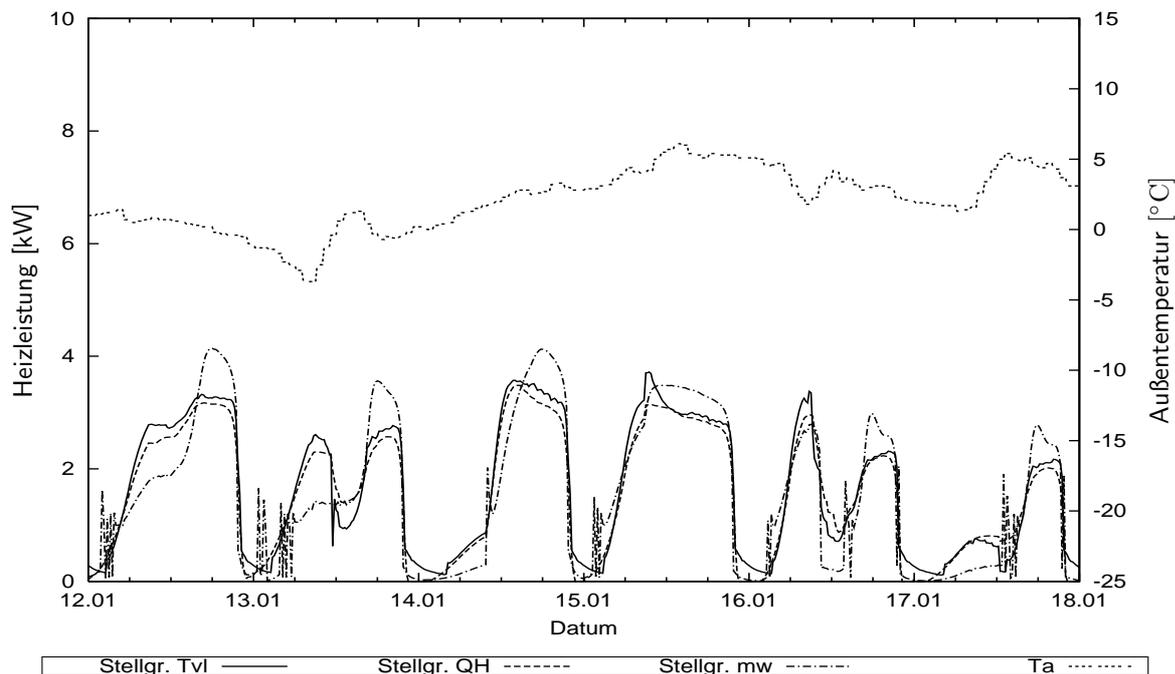


Abb. 4.77. Simulierte Verläufe der Heizleistung für verschiedene Stellgrößen bei Regelung mit der vsHR, $cl = 5$, sowie Außentemperatur Ta

daß die vsHR sich sehr robust gegenüber ungemessenen Störgrößen verhält. Gegenüber einer konventionellen Heizungsregelung sind Energieeinsparungen bei nur geringen Einbußen an thermischem Komfort möglich. Eine Quantifizierung der möglichen Einsparungen und des thermischen Komforts konnte auch für Variationen des Gebäudemodells hinsichtlich

der Fensterflächen des Dämmstandards, der Bauweise und des Heizsystems vorgenommen werden. Die höchsten Energieeinsparungen lassen sich in massiven Gebäuden mit hohem Dämmstandard und trägem Heizsystem erreichen.

Die Regelung stellte mit Hilfe der durchgeführten Untersuchungen ihr Anpassungsvermögen im Rahmen der durchgeführten Variationen von Gebäude und Heizsystem in einer Simulationsumgebung unter Beweis. Im nun folgenden Kapitel wird die entwickelte Heizungsregelung in einem realen Gebäude und Heizsystem zum Einsatz gebracht und getestet.

Kapitel 5

Experimentelle Untersuchungen

Die experimentellen Untersuchungen dienen dem Nachweis, daß der Regelalgorithmus auch unter praktischen Bedingungen funktionsfähig ist. Das in den Simulationen ermittelte Regelverhalten soll experimentell qualitativ nachgewiesen werden. Ein weiteres Ziel der Untersuchungen besteht in Tests der einzelnen Prozeduren und der Ermittlung von Optimierungsmöglichkeiten.

In diesem Kapitel wird zunächst die für die experimentellen Untersuchungen aufgebaute Testanlage vorgestellt. Anschließend wird auf das Betriebsverhalten des Regelalgorithmus insgesamt sowie einzelner Komponenten eingegangen.

5.1 Experimenteller Aufbau

Die Tests werden in den Versuchshäusern des ISFH Emmerthal durchgeführt (Abb. 5.1). Es handelt sich dabei um zwei vom Grundriß her spiegelbildlich aufgebaute Gebäude mit je 160 m² Wohnfläche. Das östliche Gebäude (Experimentierhaus) und das westliche Gebäude (Referenzhaus) sind durch den Garagentrakt voneinander getrennt. Im Experimentierhaus wurde der Algorithmus auf einem Personalcomputer (PC) in Verbindung mit einer Datenerfassunganlage getestet. Im Referenzhaus kam eine in einem Microcontroller (MC) implementierte Version des Algorithmus zum Einsatz. Beide Häuser werden als Bürogebäude genutzt. Dies bedeutet, daß Störgrößen durch interne Gewinne oder Öffnen von Türen und Fenstern vor allem in der Zeit montags bis freitags von 8 bis 18 Uhr auftreten. Die Nutzung der Gebäude beschränkt die Variationsmöglichkeiten von bestimmten Parametern wie Raumlufttemperatursollwerte und Komfortparameter während der experimentellen Tests.

Die passiv solare Hauptempfangsfläche der Gebäude zeigt nach Süden. Das Referenzhaus hatte während des Zeitraums der Untersuchungen neben Fenstern, deren Fläche etwa ein Drittel der Südfassadenfläche beträgt, kleinere Transparente Wärmedämmelemente (TWD-Elemente) als passiv solare Komponenten. Das Experimentierhaus weist, neben den gleichen Fensterflächen, TWD-Elemente in größerer Fläche auf. Zusätzlich ist ein Wintergarten vorgesetzt, der im thermischen Kontakt vor allem zum Erdgeschoß steht. Genaue Angaben über den Aufbau der Gebäude können dem Anhang B.1 entnommen werden.

Die Heizenergieversorgung erfolgt für jedes Gebäude über je einen Heizkreis. Ein Niedertemperaturgaskessel (20 kW) versorgt einen Primärkreis mit heißem Wasser. Vom Primärkreis zweigen die 3 Heizkreise ab. Je ein Dreiwegeventil mischt das heiße Wasser mit dem Wasser



Abb. 5.1. Die Experimentierhäuser des ISFH

aus dem Rücklauf, um die gewünschte Vorlauftemperatur einzuregeln. Vor Inbetriebnahme des neuen Regelalgorithmus war ein Analogregler der Firma Landys & Gyr eingesetzt, mit dem die in Abschnitt 4.2.1 erläuterte Heizkurve als Funktion der Außentemperatur eingestellt wurde. Die Sollraumtemperatur wurde, falls nicht anders bezeichnet, am Tag von 6 bis 22 Uhr auf 21 °C, während der Nacht auf 19 °C für die PC-Regelung und auf 18 °C für die Microcontrollerregelung gesetzt. Der gegenüber den Simulationstests höhere Raumtemperatursollwert resultiert aus der Gebäudenutzung (Personen mit vorwiegend sitzender Tätigkeit) und den Nutzerwünschen. Der niedrigere Nachtsollwert für die Microcontrollerregelung wurde gewählt, um nachts einen Energieeintrag zu vermeiden. Ebenfalls auf Nutzerwünsche nimmt die Einstellung des Komfortparameters auf $cl = 8$ Rücksicht.

5.1.1 Sensorik und Datenerfassung

Die Sensorik und Datenerfassung der PC-Regelung unterscheiden sich von denen der Regelung mit dem eigenständigen Regler (Microcontroller). Die Auswahl der Sensoren wurde von Genauigkeit, Preis und Marktverfügbarkeit bestimmt. Ziel war, einen vermarktungsfähigen Regler zu entwickeln. Daher mußte dessen Funktionsfähigkeit auch mit einer preiswerten und ungenaueren Sensorik gesichert sein.

5.1.1.1 PC-Regelung

Tabelle 5.1 gibt eine Aufstellung der für die PC-Regelung verwendeten Sensoren. Die ersten vier genannten Sensoren werden dabei tatsächlich für die Regelung verwendet, die anderen Sensoren dienen der Systemüberwachung.

Zur genauen Erfassung der Raumlufttemperatur ist ein ventilierter Sensor mit Strahlungsschutz erforderlich. Für einen breiten Einsatz ist ein solcher Sensor jedoch zu teuer und auch wegen der Geräuschentwicklung ungeeignet. Es wurde daher auf die Ventilation verzichtet und nur ein einfacher Strahlungsschutz zur Vermeidung einer direkten Besonnung

Tabelle 5.1. Für die PC-Regelung eingesetzte Sensoren

Meßgröße	Sensortyp	Genauigkeit
Raumtemperatur	Pt100 Klasse A	$\pm(0.15 + 0.002[t])^\circ\text{C}$
Außentemperatur	Pt100 Klasse A	$\pm(0.15 + 0.002[t])^\circ\text{C}$
Vorlauftemperatur	Pt100 Klasse A	$\pm(0.15 + 0.002[t])^\circ\text{C}$
Einstrahlung	Si-01TC	$\pm 8.9\%$ v.M.
Wärmeleistung	VMT 1.5 / T1	$\pm 1\%$ v.E. [67]
Rücklauftemperatur	Pt100 Klasse A	$\pm(0.15 + 0.002[t])^\circ\text{C}$
Vorlauftemperatur am Heizkörper	Pt100 Klasse A	$\pm(0.15 + 0.002[t])^\circ\text{C}$
Rücklauftemperatur am Heizkörper	Pt100 Klasse A	$\pm(0.15 + 0.002[t])^\circ\text{C}$

verwendet. Dies führt dazu, daß der Meßwert des Sensors auch in gewissem Maß von der Temperatur der umgebenden Wände beeinflusst wird. Aus diesem Grund ist im folgenden nur von Raumtemperatur und nicht von Raumlufttemperatur die Rede. Für die Raumtemperaturmessung wurde ein Referenzraum ausgewählt. Dabei handelt es sich jeweils um den kleinen südorientierten Raum im Obergeschoß.

Der Außentempersensord wurde strahlungsgeschützt an der Nordseite des Gebäudes angebracht. Ein strahlungsgeschützter Ort ist unbedingt notwendig, da sich ansonsten als Eingangsgröße für die Modellidentifikation Außentemperatur und Einstrahlung überlagern würden. Die Sensoren zur Messung von Temperaturen im Heizkreis wurden an der Rohrwandung unterhalb der Rohrisolation unter Herstellung eines guten thermischen Kontakts zur Rohraußenwand fixiert.

Die Widerstandsmessung erfolgte in Vierleitertechnik. Für den Einsatzbereich der Pt100 ergibt sich folgender Zusammenhang zwischen Temperatur ϑ in $^\circ\text{C}$ und Widerstand R in Ω [85]:

$$\vartheta = 3367.85046^\circ\text{C} - \sqrt{13065975.21^\circ\text{C}^2 + \frac{R/\Omega}{-5.80195 \cdot 10^{-5}}} \quad (5.1)$$

Der Einstrahlungssensor befindet sich an der Südfassade in ca. 3 m Höhe und ist vertikal ausgerichtet. Er besteht aus einer Siliziumsolarzelle mit interner Temperaturkorrektur. Der Kurzschlußstrom einer Siliziumsolarzelle ist proportional zur Bestrahlungsstärke. Allerdings hat er einen positiven Temperaturkoeffizienten, der ohne Korrektur zu einer maximalen relativen Meßabweichung von ca. 3.5% v.M. bei Vergleich mit einem thermoelektrischen Pyranometer führt. Mit der internen Temperaturkompensation des Sensors wird diese Abweichung auf $\pm 0.2\%$ verringert. Die Genauigkeit des Strahlungssensors selbst, bei Vergleich mit einem thermoelektrischen Pyranometer (Kipp & Zonen CM11) beträgt $\pm 5\%$ vom Meßwert [48]. Der Fehler des thermoelektrischen Pyranometers wird durch verschiedene Effekte (Langzeitdrift, Nichtlinearität, Winkelabhängigkeit, spektrale Empfindlichkeit und Temperaturabhängigkeit) hervorgerufen. Er beträgt unter den Kalibrierbedingungen insgesamt ca. 3.7% [51]. Damit ergibt sich ein maximaler relativer Fehler des Siliziumsensors von 8.9% bezogen auf die wahre Einstrahlung, was der Angabe in Tabelle 5.1 entspricht.

Der für die Messung der Wärmeleistung verwendete Sensor besteht aus einem Volumenstrommeßgerät (Mehrstrahl-Flügelradzähler mit magnetfreier elektronischer Abtastung) und 2 Temperatursensoren (PT500) im Heizungsvor- und -rücklauf. Das Volumenstrommeßgerät liefert Impulse an einen Mikrocomputer. Vom Mikrocomputer aus wird auch die Messung der Widerstände der Temperaturfühler in Vierleitertechnik durchgeführt. Die Meßwerte von

Volumenstrom, Heizleistung und Heizenergie können über ein Display abgerufen werden. An einen Analogausgang (4-20 mA, entspricht 0-16.32 kW) wird die Wärmeleistung abgegriffen. Dabei wird die über einen Widerstand von $9\ \Omega$ abfallende Spannung gemessen.

Die Meßdaten wurden mit einem Datenlogger der Firma Hewlett Packard erfaßt (siehe Abb. 5.1.1.1). Das Datenerfassungsgerät besteht aus einem Grundgerät sowie diversen Steck-

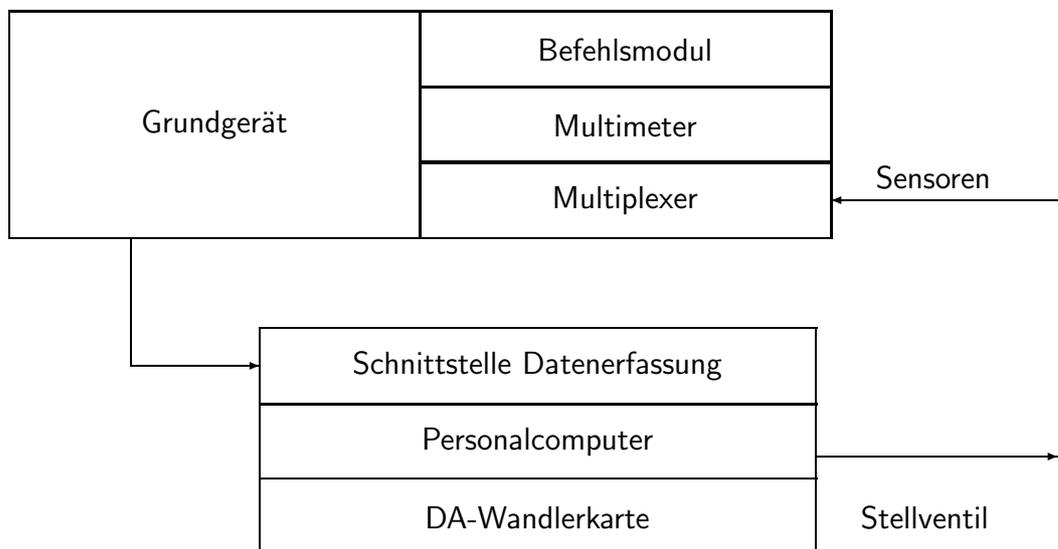


Abb. 5.2. Datenerfassungssystem und Analogsignalausgabe bei der PC-Regelung

karten. Das Befehlsmodul dient zur Steuerung aller Prozesse im Gerät. Das Multimeter ist das eigentliche Meßgerät. Mit dem Multiplexer, an dem die Sensoren angeschlossen sind, werden nacheinander alle Kanäle auf das Meßgerät geschaltet. Über eine Schnittstelle ist die PC-Kopplung realisiert.

Das Meßprogramm fragt die Daten der Sensoren im 10-Sekunden-Rhythmus ab. Nach 15 Minuten wird der Mittelwert gebildet, in der Meßdatei gespeichert sowie der Algorithmus zur Berechnung der Sollvorlauftemperatur aufgerufen. Die vom Algorithmus der vsHR berechnete optimale Stellgröße Vorlauftemperatur für den nächsten Zeitschritt dient als Sollwert für eine PID-Regelung des Mischerventils zur Rücklaufbeimischung (Dreiwegeventil), die im Meßprogramm ebenfalls im 10 Sekunden-Takt aufgerufen wird. Stellgröße ist hier der Ventilhub, der über eine Spannung (0..10 V) vorgegeben wird. Die Spannung wird als Digitalwert an eine Digital-Analog-Wandlerkarte im PC übertragen. Die am Ausgang der Karte anliegende Spannung wird auf den Stellmotor des Mischerventils gegeben.

5.1.1.2 Regelung durch Microcontroller

In dieser Variante werden alle durch den PC und das Datenerfassungsgerät erledigten Aufgaben auf einen Microcontroller übertragen. Dabei wurde auf eine bereits vorhandene Hardware der Firma Brauns Control GmbH zurückgegriffen. Die verwendete Basishardware BCR-552 V2.0 (Abb. 5.3) besteht aus dem Microcontroller mit einer Bedienoberfläche sowie einer Klemmenplatine mit Leistungselektronik und Anschlußklemmen [8].

Kern ist ein Philips SAB80C552-16-W Microcontroller, der mit 12 MHz Systemtakt arbeitet. Als Speicher stehen 512 kByte Flash-Memory zur Verfügung, welches sowohl als Daten-,



Abb. 5.3. Ansicht des getesteten Microcontrollers

als auch als Programmspeicher genutzt werden kann. Als Variablenspeicher sind 32 kByte statisches RAM vorhanden. Der Regelalgorithmus muß sich nicht zuletzt an diesen Beschränkungen orientieren. Für die Kommunikation mit dem Nutzer stehen eine alphanumerische Flüssigkristallanzeige und 4 Eingabetasten zur Verfügung. An der Klemmenplatine können 8 analoge Eingänge ($0..2V$, $0..400\mu A$) sowie 2 analoge Ausgänge und 2 schaltende Ausgänge angeschlossen werden. Damit bietet die Basishardware auch die Möglichkeit der Erweiterung der Regelung auf andere Komponenten. Alle Temperatursensoren nutzen

Tabelle 5.2. Für die Microcomputerregelung eingesetzte Sensoren

Meßgröße	Sensortyp	Genauigkeit
Raumtemperatur	BCTF-205RF	$\pm 1.5 K$
Außentemperatur	BCTF-205W	$\pm 1.5 K$
Vorlauftemperatur	BCTF-R2	$\pm 1.5 K$
Einstrahlung	Si-01TC	$\pm 8.9\%$ v.M.

den Baustein AD592AN von Analog Device, der eine temperaturabhängige Stromquelle ist. Der Raumtemperatursensor befindet sich in einem Plastikgehäuse mit Luftschlitzen, welches an einer Raumwand auf einer 10 mm starken Styroporplatte befestigt ist. Der Außentemperatursensor ist ebenfalls in einem Gehäuse untergebracht, welches an der Nordfassade angebracht wurde. Der Vorlauftemperatursensor wurde unter der Rohrdämmung an das Rohr angelegt. Eine Kalibrierung der Temperatursensoren ließ sich mit Hilfe der Meßdaten des vorhandenen Datenerfassungssystems in den Experimentierhäusern vornehmen.

Zur Bewertung des Regelverhaltens bei der Regelung mit dem Microcontroller wurden Meßdaten der vorhandenen Datenerfassungsanlage der Experimentierhäuser verwendet.

5.1.1.3 Test der Sensorik

Die Überprüfung der Sensorik hatte zum Ziel, auftretende Meßabweichungen der für den Algorithmus relevanten Größen Außentemperatur, Vorlauftemperatur, solare Einstrahlung

sowie Raumtemperatur zu erfassen und in die Beurteilung des Regelverhaltens einfließen zu lassen. Insbesondere war zu klären, ob mit einer einfachen Sensorik gegenüber aufwendiger Meßtechnik nennenswerte Meßabweichungen auftreten, die die Funktionsfähigkeit der Regelung beeinträchtigen können.

Die für die Bewertung des Betriebsverhaltens der Regelung verwendeten Meßwerte wurden zum einen mit der Standard-Datenerfassungsanlage der Experimentierhäuser „Helios“ sowie dem für die Regelung verwendeten Gerät „HP“ und den in Tabelle 5.1 genannten Sensoren erfaßt. Die Abbildungen 5.4 bis 5.7 zeigen einen Vergleich der gemessenen Verläufe der Meßgrößen für beide Datenerfassungsanlagen. Die Verläufe sind versetzt dargestellt, da die Ergebnisse bei Datenerfassung mit dem Gerät „Helios“ in Solarzeit umgerechnet werden, beim Gerät „HP“ jedoch in Ortszeit angegeben sind. Für den dargestellten Zeitraum (26.2.-27.2.2000) beträgt der Unterschied zwischen Solar- und Ortszeit etwa 37 min. Zur besseren Unterscheidbarkeit der Verläufe wurde die Zeitangabe unverändert gelassen.

Die Raum- und Vorlauftemperatur wurde bei Erfassung mit dem Gerät „Helios“ ebenfalls mit Hilfe von PT-100 Sensoren vorgenommen. Die Positionierung des Raumtemperatursensors wich jedoch vom dem für die Regelung verwendeten ab (ca. 3.50 m Entfernung). Für die Einstrahlungsmessung wird beim Gerät „Helios“ ein thermoelektrisches Pyranometer (Kipp & Zonen CM11) verwendet. Die Außentemperaturmessung erfolgt mit einem ventilierten strahlungsgeschützten Lufttemperatursensor, der auf dem Dach des Gebäudes angebracht ist.

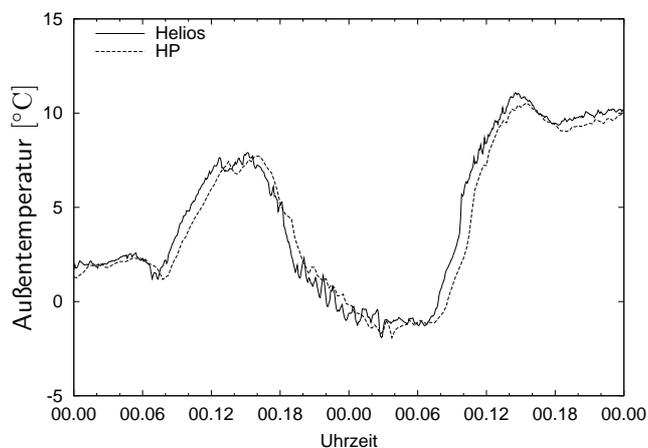


Abb. 5.4. Gemessene Verläufe der Außentemperatur mit Datenerfassung „Helios“ (in Solarzeit, 5 min Mittelwerte) und „HP“ (in Ortszeit, 15 min Mittelwerte) vom 26.2.-27.2.2000

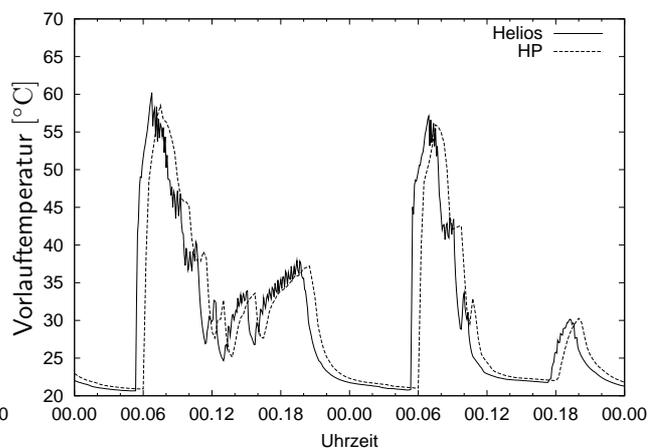


Abb. 5.5. Gemessene Verläufe der Vorlauftemperatur mit Datenerfassung „Helios“ (in Solarzeit, 5 min Mittelwerte) und „HP“ (in Ortszeit, 15 min Mittelwerte) vom 26.2.-27.2.2000

Deutlich sind die sich aufgrund des kürzeren Zeitintervalls der Mittelung ergebenden Meßwertschwankungen bei der Datenerfassung mit dem Gerät „Helios“ zu erkennen. Im Hinblick auf eine Reduktion der Wirkung zufälliger Meßabweichungen ist daher auch ein größerer Zeitschritt für den Aufruf des Regelalgorithmus vorteilhaft. Für die Messung der Außentemperatur wirkt sich die Position des Sensors auf dem Dach und die Ventilation in Richtung einer größeren Tag-Nacht-Schwankungsbreite aus. Die Unterschiede der Meßwerte beider Außentemperatursensoren liegen jedoch unter 1 K. Die in Abschnitt 4.3.3.3 dargestellten Simulationsergebnisse haben gezeigt, daß eine systematische Meßabweichung der Außentemperatur in dieser Größenordnung für den Regelalgorithmus keine Beeinträchtigung darstellt.

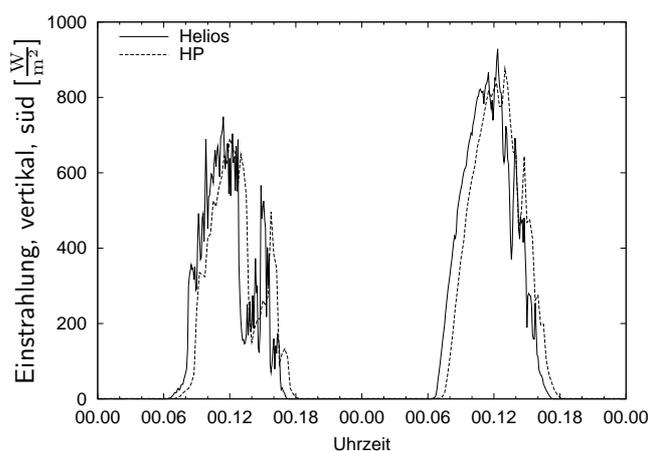


Abb. 5.6. Gemessene Verläufe der solaren Einstrahlung auf die Südvertikale mit Datenerfassung „Helios“ (in Solarzeit, 5 min Mittelwerte) und „HP“ (in Ortszeit, 15 min Mittelwerte) vom 26.2.-27.2.2000

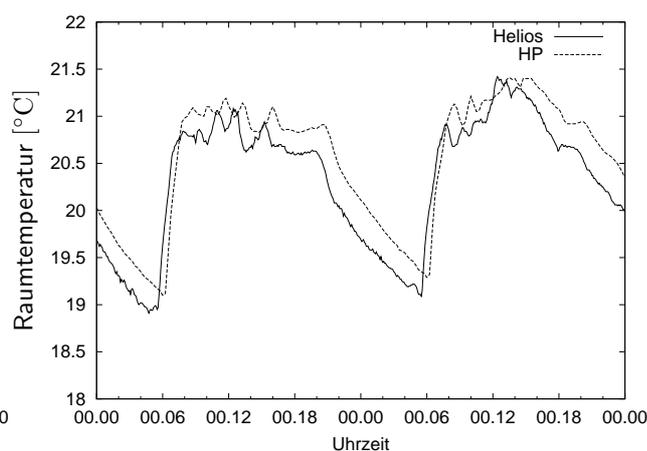


Abb. 5.7. Gemessene Verläufe der Raumtemperatur mit Datenerfassung „Helios“ (in Solarzeit, 5 min Mittelwerte) und „HP“ (in Ortszeit, 15 min Mittelwerte) vom 26.2.-27.2.2000

Die für die Einstrahlungsmessung verwendete temperaturkorrigierte Solarzelle erreicht eine sehr gute Übereinstimmung der Meßwerte mit denen des thermoelektrischen Pyranometers, so daß die mittlere relative Abweichung im Vergleich zum Pyranometer unter der Herstellerangabe von 5 % vom Meßwert liegt.

Wesentliche Unterschiede sind bei der Raumtemperaturmessung festzustellen. Der in der Nähe zweier Innenwände positionierte, für die Regelung verwendete Sensor („HP“) liefert ein um etwa 0.3 K höheres Signal als der „Helios“-Sensor, welcher sich in der Nähe der Trennwand zum Garagentrakt befindet. Offensichtlich wird der Meßwert beider Sensoren nicht unerheblich durch den Strahlungsaustausch mit den Umgebungsflächen beeinflusst. Die Positionierung des Raumtemperatursensors ist daher von großer Bedeutung sowohl für das Erreichen der gewünschten Raumtemperatur als auch für den Energieverbrauch der Heizung.

Die für die Microcontrollerregelung verwendeten Sensoren konnten während der Meßperiode nicht direkt im Vergleich getestet werden. Ein Vergleich wurde daher außerhalb der Meßperiode mit einem PT-100 Sensor, der in gutem thermischen Kontakt mit dem Raumtemperatursensor der MC-Regelung stand, vorgenommen. Die ermittelten Unterschiede lagen unter 0.1 K über einen Zeitraum von mehreren Tagen. Somit kann der für die Temperaturmessung bei der MC-Regelung verwendete Sensor als geeignet angesehen werden. Größere Unterschiede (im Bereich von bis zu 0.6 K) wurden zwischen dem Meßwert des Raumtemperatursensors für die MC-Regelung und dem an der Datenerfassung „Helios“ angeschlossenen Sensor festgestellt (siehe Abbildung 5.8). Beide Sensoren befanden sich in ca. 50 cm Abstand voneinander, wobei der Sensor der MC-Regelung in der bereits beschriebenen Weise an der Wand befestigt war.

Eine direkte Abspeicherung der vom MC gemessenen Größen war nicht möglich, daher mußten für eine Bewertung des Regelverhaltens die von der Datenerfassungsanlage „Helios“ registrierten Meßwerte verwendet werden. Sollwertabweichungen bei der MC-Regelung sind daher unter diesem Gesichtspunkt zu bewerten.

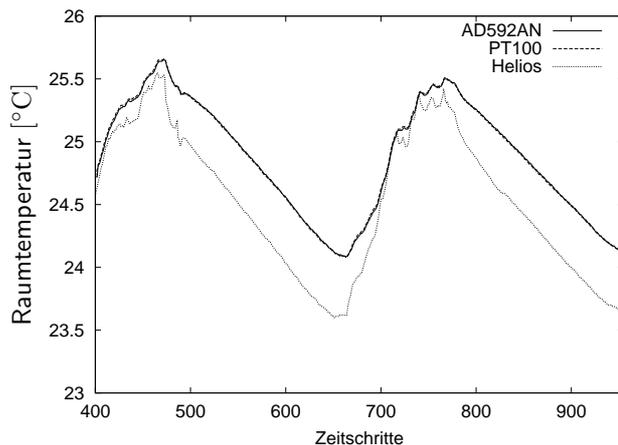


Abb. 5.8. Gemessene Verläufe der Raumtemperatur mit MC-Sensor "AD592AN", Pt100 in direktem thermischen Kontakt und Fühler der „Helios“ Datenerfassungsanlage (5 min Mittelwerte)

5.2 Allgemeines Regelverhalten

In diesem Abschnitt werden zunächst die Ergebnisse der experimentellen Tests des Regelalgorithmus, integriert in einem Personalcomputer vorgestellt. Nach einer Bewertung des allgemeinen Regelverhaltens werden die Ergebnisse einzelner Programmodule vorgestellt, die aus den zu jedem Zeitschritt abgespeicherten Werten ausgewählter Variablen ermittelt wurden. Die Darstellung der Meßergebnisse für die Microcontrollerregelung beschränkt sich auf das allgemeine Regelverhalten, da die Werte der Variablen nicht abgespeichert werden konnten. Für die Darstellung wurde ein Beispielzeitraum vom 22.2.-28.2.2000 ausgewählt.

5.2.1 Das Regelverhalten der PC-Regelung

Das Regelverhalten der PC-Regelung wird direkt anhand der für den Algorithmus verwendeten Daten bewertet. In Abbildung 5.9 und Abbildung 5.10 ist das Verhalten von Regel- und Stellgröße sowie die gemessenen Wetterdaten an den jeweiligen Tagen des Beispielzeitraums dargestellt. Zunächst ist zu erkennen, daß der Verlauf der gemessenen Raumtemperatur hervorragend dem Sollwert folgt. Mit der im dargestellten Zeitraum gewählten Einstellung $cl = 8$ wird die Soll-Istwert-Abweichung in der Kostenfunktion relativ hoch gewichtet, die zukünftigen Einstrahlungsgewinne dagegen relativ gering. Nachts wird die Stellgrößenänderung im dargestellten Zeitraum nur sehr gering gewichtet, da die Raumtemperatur über dem Sollwert liegt. Die Vorlauftemperatur ist auf den Minimalwert gesetzt, d.h. daß der Sollwert im dargestellten Zeitraum nachts nur aufgrund der langsamen Auskühlung von Gebäude und Heizsystem nicht erreicht wird. Bei solarer Einstrahlung und Überhitzungsgefahr wird die Vorlauftemperatur verringert, so daß im gezeigten Zeitraum keine nennenswerte Überschreitung der Sollraumtemperatur auftrat. Lediglich am 27. und 28.2.2000 treten bei sehr hoher Einstrahlung leichte Überschreitungen des Raumtemperatursollwertes auf. Die Reaktion der Stellgröße auf Schwankungen von Einstrahlung und Außentemperatur ist ebenfalls erkennbar.

Abbildung 5.11 zeigt den Verlauf des *PMV*- und *PPD*-Indexes für den Beispielzeitraum. Dabei wurde angenommen, daß beim Tagessollwert der Raumtemperatur der maximal mögliche

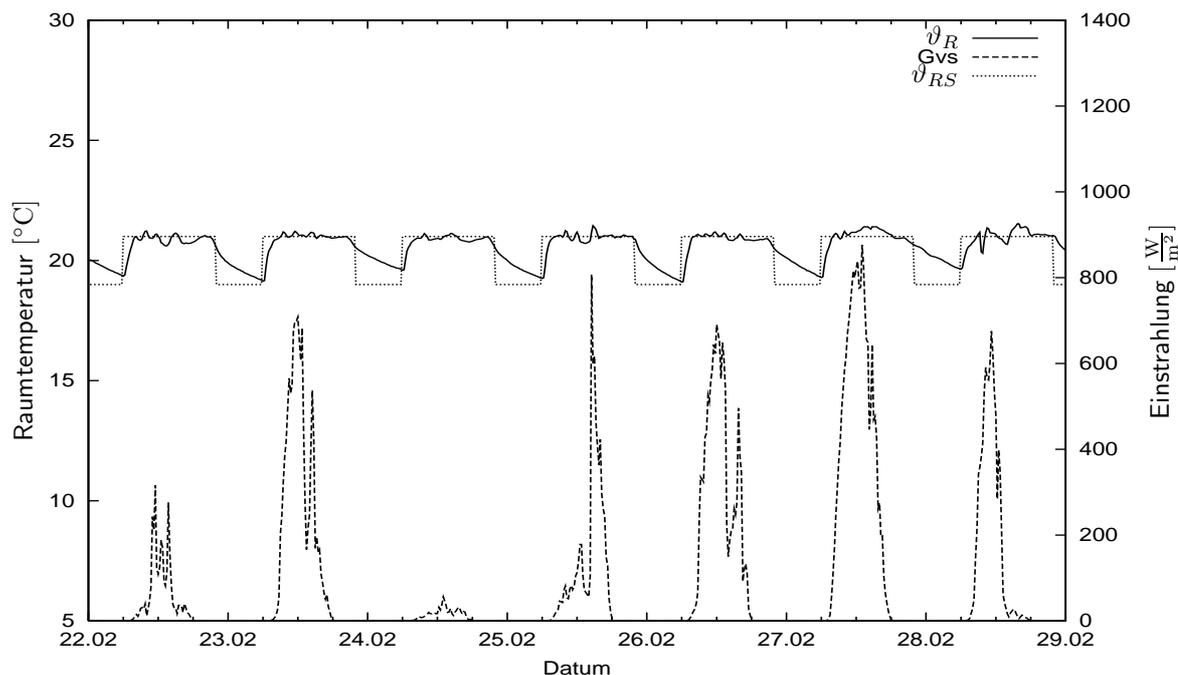


Abb. 5.9. Gemessene Raumtemperatur (ϑ_R) und ihr Sollwert (ϑ_{RS}) sowie Einstrahlung (G_{sv}) für den Zeitraum 22.2.-28.2.2000 für die Regelung mit PC, basierend auf 15-min Mittelwerten

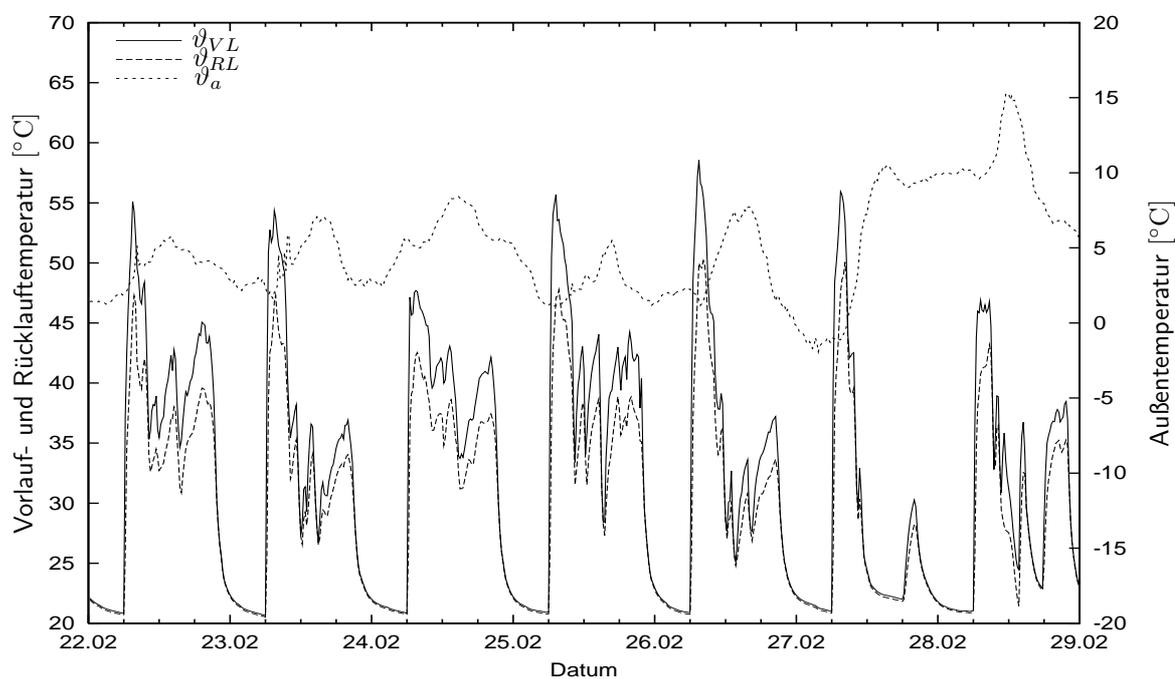


Abb. 5.10. Gemessene Vorlauf- (ϑ_{VL}) und Rücklauf- (ϑ_{RL}) sowie die Außentemperatur (ϑ_a) für den Zeitraum 22.2.-28.2.2000 für die PC-Regelung, basierend auf 15-min Mittelwerten

Teil einer Testpersonengruppe zufrieden gestellt würde, d.h. der Wärmewiderstand der Kleidung entsprechend angepaßt. Vereinfachend wurde weiterhin angenommen, daß die Temperatur der Umgebungsflächen gleich der Lufttemperatur ist. Die Komfortindizes zeigen,

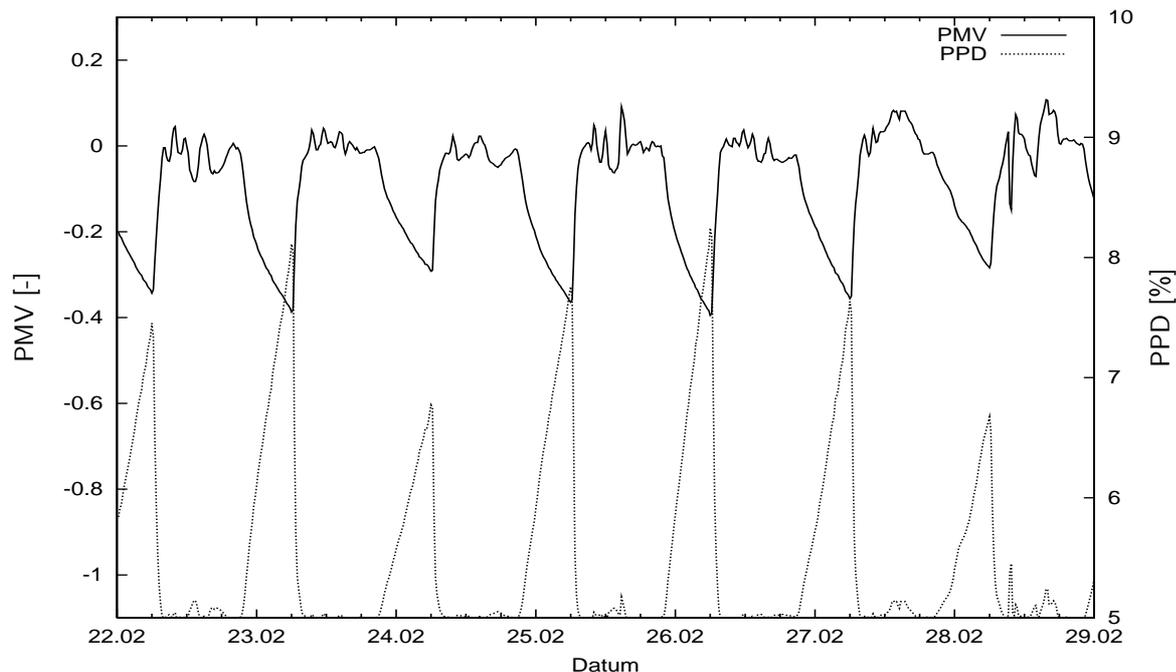


Abb. 5.11. Berechneter *PMV*- und *PPD*-Index für den Zeitraum 22.2.-28.2.2000 für die PC-Regelung, auf Basis von 15-min Mittelwerten

daß während der Stunden des Tagessollwertes ein sehr guter thermischer Komfort unter der Voraussetzung, daß die Temperatur der Umgebungsflächen gleich der Lufttemperatur ist, herrscht. Da der Algorithmus als Information über die Komfortgröße lediglich einen Meßwert der Raumtemperatur erhält, ist aus seiner Sicht die Regelaufgabe optimal erfüllt. Die Meßwerte der Wandtemperaturen in Abb. 5.12 machen jedoch deutlich, daß erhebliche Unterschiede zwischen Wand- und Lufttemperatur auftreten können. Als Sensoren für die Wandtemperaturmessung dienten PT-100 Widerstandsfühler, die auf der Innenwandseite in ca. 1,50 m Höhe befestigt waren.

Temperaturen ähnlich der Raumlufttemperatur weisen die Innenwände (ost und nord) auf. Die Westwand grenzt an den Garagentrakt bzw. teilweise an die Außenluft, wodurch an der Wandinnenseite eine im Mittel geringere Temperatur gemessen wird. Erhebliche Variationen der Temperatur der Südwand des Referenzraums entstehen an strahlungsreichen Tagen durch die Gewinne der transparenten Dämmelemente. Zu erkennen ist der zeitverzögerte Energieeintrag im Vergleich zu Direktgewinnen durch Fenster. Im Hinblick auf diese erheblichen Solareinträge in den Abendstunden ist zunächst festzustellen, daß die Regelung in der Weise reagiert, daß keine nennenswerten Überschreitungen des Raumtemperatursollwertes auftreten. Jedoch fällt die Bewertung des thermischen Komforts unter Einbeziehung der Wandtemperaturen mit Hilfe des *PMV*-Indexes deutlich in Richtung „zu warm“ aus. Eine Information des Algorithmus über die aktuelle mittlere Temperatur der umgebenden Flächen könnte zur Verbesserung des thermischen Komforts beitragen. Allerdings ist der meßtechnische Aufwand entsprechend größer. Die mittlere Temperatur der Umgebungsflächen kann mit einem sogenannten Globe-Sensor gemessen werden. Dabei ist ein Temperatursensor im Innern einer absorbierenden Hohlkugel angebracht. Die Einbeziehung der Wandtemperatur in die Regelgröße bringt allerdings auch Probleme für die selbstadaptierende Funktion des Algorithmus mit sich. Aufgrund der vergleichsweise zeitverzögerten und gedämpften Re-

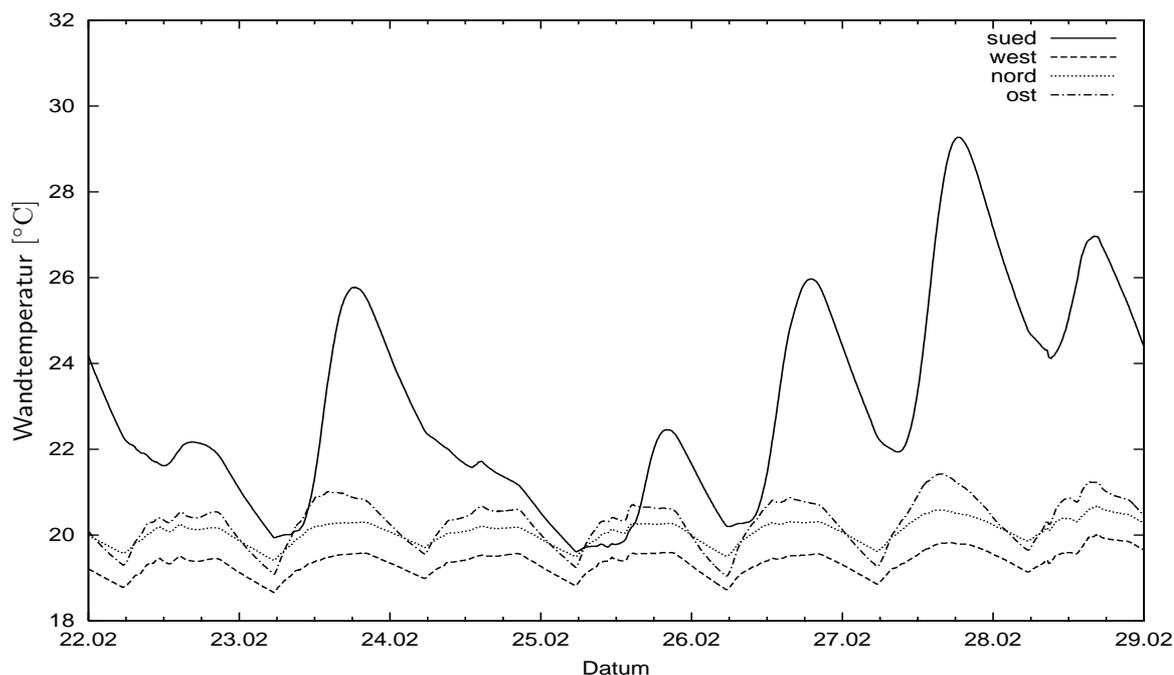


Abb. 5.12. Gemessene Wandtemperaturen im Referenzraum für den Zeitraum 22.2.-28.2.2000 für die Regelung mit PC, basierend auf 15-min Mittelwerten

aktion der Massivbauteile auf die Modelleingangsgrößen verschlechtert sich das Signal zu Rauschverhältnis und damit die Identifizierbarkeit der Modellparameter.

In Abbildung 5.13 ist der Verlauf der Raumtemperaturen in allen vier südorientierten Räumen des Experimentierhauses dargestellt. Für die Grafik wurden Meßwerte der „Helios“-Datenerfassungsanlage als 5-min-Mittelwerte in Solarzeit verwendet.

Die Abweichung der Raumlufttemperaturen bleibt während des größten Teils des abgebildeten Intervalls unter 1 K. Der Referenzraum ist der Raum mit der durchschnittlich niedrigsten Temperatur. D.h. trotz der in der Regel niedrigeren Vorlauftemperatur gegenüber der klassischen Regelung wird allen Räumen ausreichend Heizleistung zur Verfügung gestellt. Die höheren Temperaturen an Tagen mit geringer solarer Einstrahlung sind auf die Voreinstellungen der Heizkörperthermostatventile durch die Nutzer der jeweiligen Räume zurückzuführen.

Kurzzeitige Temperaturabfälle besonders in den Morgenstunden sind auf Querlüften zurückzuführen. Am 23.2.2000 auftretende kurzzeitige Temperaturspitzen entstanden durch das Öffnen der Türen der Räume im Untergeschoß zum Wintergarten. Auffällig sind weiterhin sehr hohe Temperaturen in Raum 10 am Samstag, den 26.2. und Sonntag, den 27.2.2000. Diese entstehen durch einen Lüfterbetrieb, der warme Luft aus dem Wintergarten in das Obergeschoß befördert. Der Lüfterbetrieb ist aus Gründen der Geräuschentwicklung nur am Wochenende aktiviert. Die Lufteinlaßklappen des Referenzraums wurden für die Tests verschlossen, da anderenfalls die Modellidentifikation stark beeinträchtigt worden wäre. Die Temperaturabfälle während der Nachtstunden reflektieren die unterschiedlichen dynamischen Eigenschaften der betrachteten 4 Südräume, die aus dem unterschiedlichen Wärmeverlustbeiwert resultieren. Raum 10 weist die mit Abstand größte Außenwandfläche (Süd- und Ostfassade sowie Dachfläche) und demzufolge nachts den schnellsten Temperaturabfall

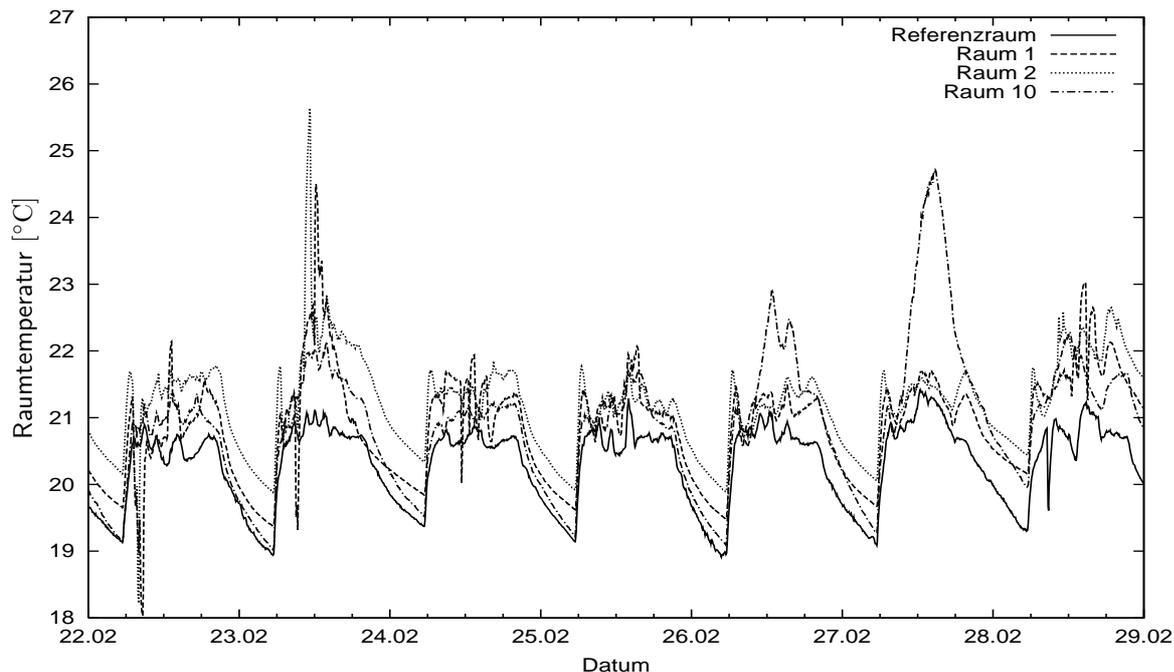


Abb. 5.13. Gemessene Raumtemperaturen in den südorientierten Räumen des Experimentierhauses bei Regelung des Referenzraums (kleiner Raum im Obergeschoß) durch die Vorlauftemperatur für den Zeitraum 22.2.-28.2.2000. Raum 1: großer Raum im Erdgeschoß, Raum 2: kleiner Raum im Erdgeschoß, Raum 10: großer Raum im Obergeschoß

auf. Am günstigsten sind die Verhältnisse bezüglich der Wärmeverluste für Raum 2, da nur die Südfassade direkt an die Außenluft grenzt.

Einen Vergleich zwischen dem berechneten Sollwert der Vorlauftemperatur des vorausschauenden selbstadaptierenden Algorithmus und dem Sollwert der durch die klassische Heizkurve vorgegeben wird, zeigt Abbildung 5.14.

Gegenüber der vorher verwendeten Heizkurve erhält man beim Algorithmus der vsHR fast durchgängig niedrigere Vorlauftemperaturen. Damit bestätigen sich auch experimentell die Ergebnisse der Simulationstests (siehe Abschnitt 4.4.4). Durch die verringerten Vorlauftemperaturen können bei bestimmten wärmeversorgenden Anlagen zusätzliche Energieeinsparungen durch eine verbesserte Effizienz sowie durch kleinere Wärmeverluste im Verteilnetz erreicht werden. Wie bereits in Abschnitt 4.4.4 erläutert, läßt sich auch die Rücklauftemperatur anstelle der Vorlauftemperatur durch geschickte Wahl der Betriebsparameter absenken, wenn dies erforderlich ist.

Für einige Tage während der Heizperiode wurden durch die vsHR höhere Vorlauftemperaturen als im konventionellen Fall verlangt, aber gleichzeitig der Raumtemperatursollwert eingehalten. Dies war zu Zeiten mit hohen Windgeschwindigkeiten der Fall, die bei der vorherrschenden Hauptwindrichtung die Wärmeverluste des Referenzraums erhöht haben. Daraus kann gefolgert werden, daß bei Verwendung der konventionellen HR im gleichen Zeitraum die geforderte Sollraumtemperatur nicht erreicht worden wäre. Die vsHR hat in diesem Fall richtig reagiert und eine entsprechend höhere Heizleistung zur Verfügung gestellt. Die verwendete konventionelle Heizkurve für das Gebäude läßt damit wenig Spielraum bzgl. höherer Verluste, ist also bereits ein sehr „energiesparender“ Standard für die vergleichenden Untersuchungen mit Hilfe der Simulation.

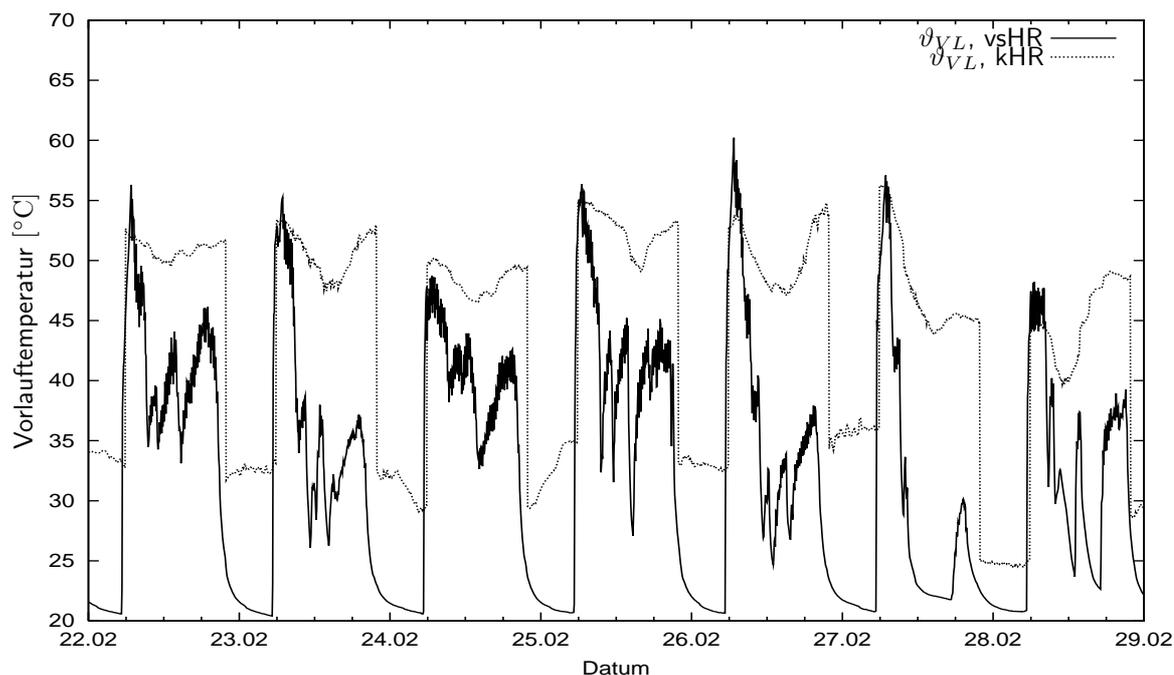


Abb. 5.14. Gemessene Vorlauftemperatur für die vsHR und berechnete Vorlauftemperatur der konventionellen Heizkurve (kHR) für den Zeitraum 22.2.-28.2.2000 für die PC-Regelung basierend auf 5-min Mittelwerten

Die morgendlichen Spitzen der Vorlauftemperatur beim Aufheizvorgang resultieren aus dem relativ hoch eingestellten Komfortparameter und der Tatsache, daß das Stellgrößeninkrement für diese Tests nicht begrenzt wurde. Damit sollte ermittelt werden, welche Stellgrößensprünge der Algorithmus im Extremfall fordert. Durch die bei der Inbetriebnahme geforderte Einstellung der maximal zulässigen Stellgrößenänderung kann eine Begrenzung dieses Wertes von vornherein erfolgen, um eine Überforderung des Wärmeversorgungsgerätes zu vermeiden. Die Darstellung der Vorlauftemperatursollwerte und der tatsächlich erreichten Vorlauftemperaturen in Abbildung 5.15 macht deutlich, daß der Heizkessel mit dem vom Algorithmus berechneten hohen positiven Sprung während des Aufheizvorgangs überfordert ist. Dies hat aber außer der Tatsache, daß die Raumtemperatur weniger schnell ihren Sollwert erreicht, keine weiteren Konsequenzen.

Probleme, den gewünschten Sollwert der Vorlauftemperatur auszuregeln, entstehen insbesondere bei Vorgabe hoher Stellgrößeninkremente sowie bei Absenken der Vorlauftemperatur. So wird nachts sowie in den Mittagstunden bei hohen solaren Gewinnen ein Absenken der Vorlauftemperatur auf 20 °C gefordert, wegen der thermischen Kapazität des Heizsystems und des Gebäudes jedoch nicht erreicht. Das Verringern der Heizleistung zur besseren Nutzung solarer Gewinne funktioniert also in der praktischen Anwendung nicht so gut wie erwünscht. Eine Verbesserung des Regelalgorithmus wäre durch Einbeziehung der Grenzen, innerhalb derer die Stellgröße änderbar ist und das maximale Stellgrößeninkrement direkt in die Optimierungsrechnung möglich. Dies führt jedoch zu einem wesentlich erhöhten mathematischen Aufwand und wurde deshalb mit Rücksicht auf die Rechenkapazität des Microcontrollers nicht vorgesehen.

Abbildung 5.16 zeigt den Verlauf von Vor- und Rücklauftemperatur, jeweils hinter bzw. vor dem Dreiwegeventil zur Rücklaufbeimischung und am Heizkörper gemessen. Es zeigt sich bei

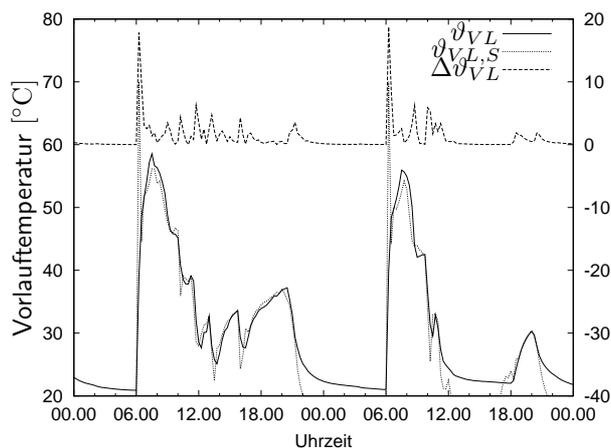


Abb. 5.15. Gemessene Vorlauftemperatur (ϑ_{VL}) und ihr durch die vsHR vorgegebener Sollwert ($\vartheta_{VL,S}$) sowie berechneter Regelaufwand ($\Delta\vartheta_{VL}$) für den Zeitraum 26.2.-27.2.2000 für die Regelung mit PC, basierend auf 15-min Mittelwerten

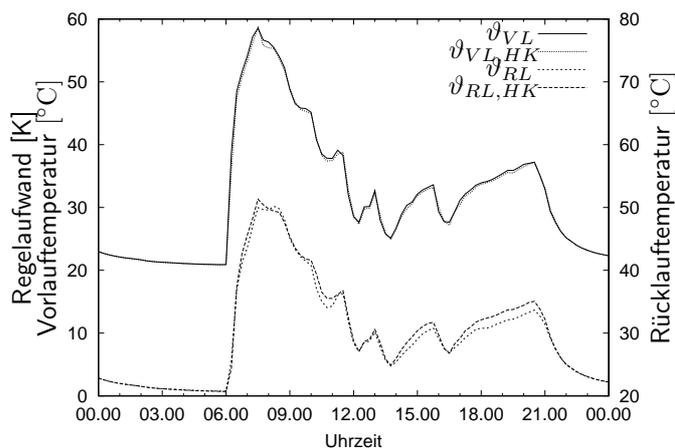


Abb. 5.16. Gemessene Vorlauftemperatur am Stellventil (ϑ_{VL}) und am Heizkörper des Referenzraums ($\vartheta_{VL,HK}$) sowie gemessene Rücklauftemperatur am Stellventil (ϑ_{RL}) und am Heizkörper des Referenzraums ($\vartheta_{RL,HK}$) für den 26.2.2000 für die Regelung mit PC, basierend auf 15-min Mittelwerten

der hier verwendeten Darstellung auf Basis von 15 min Mittelwerten keine merkliche Zeitverzögerung zwischen den am Mischerventil und am Heizkörper gemessenen Temperaturen. Die Verteilungsverluste sind aufgrund der kurzen Leitungswege ebenfalls gering.

Experimentelle Untersuchungen mit einem kleineren Komfortparameter als in der hier ausgewählten Meßperiode bestätigten, daß die vsHR das gewünschte Verhalten zeigt. Untertemperaturen werden bei kleiner werdendem Komfortparameter und erwarteten solaren Gewinnen in zunehmendem Maß zugelassen. Damit ist das in den Simulationstests ermittelte Verhalten (vgl. Abbildung 4.14) auch experimentell bestätigt worden.

5.2.2 Das Regelverhalten der Microcontrollerregelung

Die Microcontrollerregelung wurde am 21.12.99 in Betrieb genommen. Die Raumtemperatur sowie die solare Einstrahlung auf die Südvertikale für den Beispielzeitraum zeigt Abbildung 5.17. Die entsprechenden Vor- und Rücklauftemperaturen sowie die Außentemperatur ist in Abb. 5.18 dargestellt. Bei der Bewertung des Regelverhaltens muß berücksichtigt

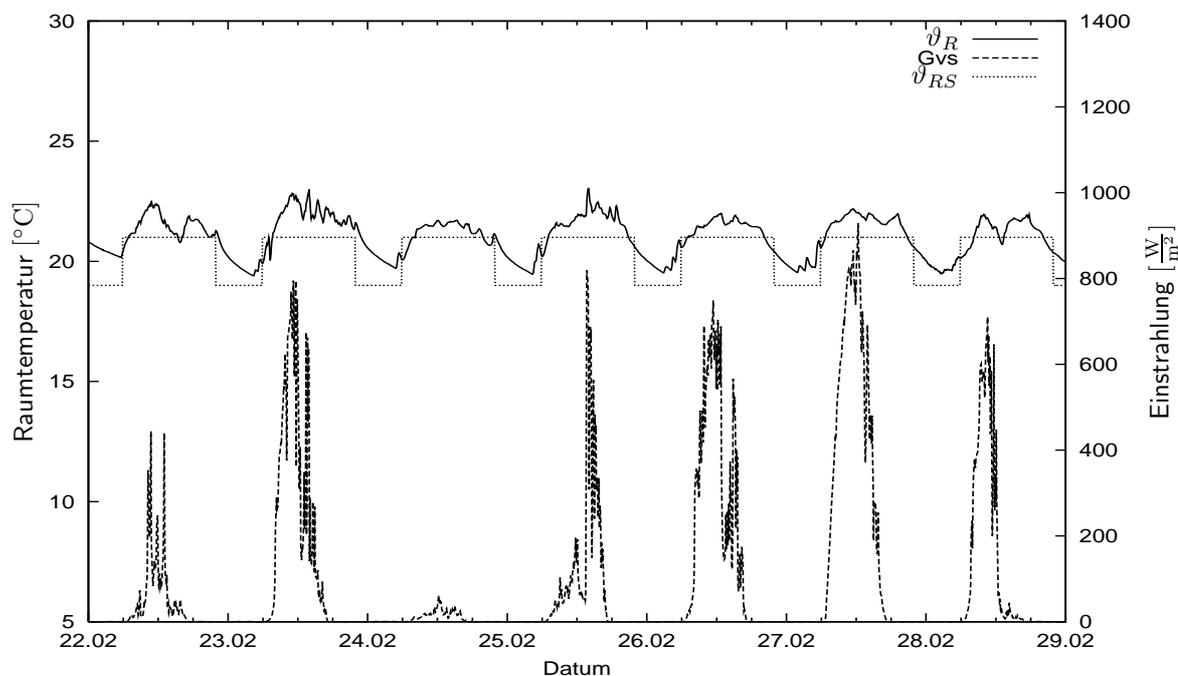


Abb. 5.17. Gemessene Raumtemperatur (ϑ_R) und ihr Sollwert (ϑ_{RS}) sowie Einstrahlung (G_{sv}) für den Zeitraum 22.2.-28.2.2000 für die Regelung mit Microcontroller, basierend auf 5-min-Mittelwerten

werden, daß der Meßwert der Regelgröße im Microcontroller selbst für die Darstellung nicht zur Verfügung steht. Wie bereits in Abschnitt 5.1.1.3 diskutiert, ergeben sich nicht unerhebliche Unterschiede zwischen dem Meßwert der Raumtemperatur für den Microcontroller sowie dem hier verwendeten PT-100 Fühler, der an der Datenerfassungsanlage angeschlossen war. Die Microcontrollerregelung weist bei Bewertung mit dem PT-100 Sensor ein deutlich schlechteres Führungsverhalten auf als die PC-Regelung. Allein die Abweichung der beiden Sensoren kann dieses Verhalten jedoch nicht erklären. Aus den Temperaturen im Heizkreis ist ein deutlich instabileres Verhalten der MC-Regelung zu erkennen. Die Temperaturen im Heizkreis liegen insgesamt höher, da der Wärmebedarf des Referenzhauses im Vergleich zum Experimentierhaus aufgrund kleinerer passiv solarer Empfangsflächen erhöht ist. Prinzipiell zeigt also auch die MC-Regelung die richtige Reaktion auf den Heizleistungsbedarf. Die Instabilitäten werden nach Untersuchungen mit Hilfe der PC-Regelung von Schwankungen der Vorhersage der Regelgröße verursacht. Diese wiederum resultieren aus einem Schwanken des aktuellen Meßwerts um seinen Mittelwert (zufällige Meßabweichung). Da der Raumtemperatursensor selbst kein solches Verhalten aufweist, kann die Abweichung nur durch die interne Meßwertverarbeitung entstehen. Eine genauere Klärung dieser Frage war im Rahmen der Arbeiten aufgrund der unzureichenden Möglichkeiten zur Kontrolle der internen Abläufe im Controller nicht möglich. Die heute abzusehende zunehmende Automatisierung im Haustechnikbereich wird auch die Entwicklung von preiswerter und leistungsfähiger Hardware

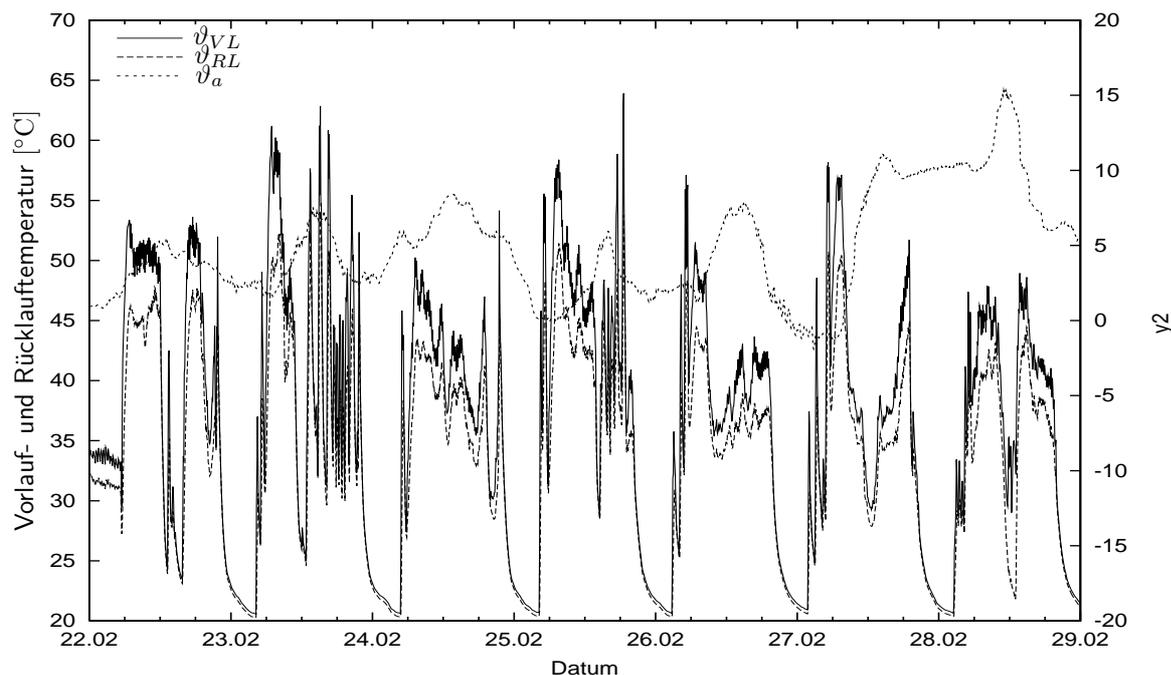


Abb. 5.18. Gemessene Vorlauf- (ϑ_{VL}) und Rücklauf- (ϑ_{RL}) sowie die Außentemperatur (ϑ_a) für den Zeitraum 22.2.-28.2.2000 für die Regelung mit Microcontroller, basierend auf 5-min-Mittelwerten

für diese Anwendungen fördern. Insofern sind auch von dieser Seite Verbesserungen hinsichtlich der Implementierbarkeit mathematisch aufwendiger Funktionen zu erwarten.

Abbildung 5.19 zeigt Verläufe von Raumtemperaturen der 4 Südräume des Referenzhauses bei der MC-Regelung. Die Differenzen der Raumtemperaturen sind fast immer kleiner als 1 K. Überhitzungen durch solaren Gewinne treten vor allem in den unteren Räumen (51 und 52) auf, da diese den kleinsten Wärmeverlustbeiwert aufweisen. Dies ist auch am nächtlichen Auskühlverhalten zu erkennen. Die Wandtemperaturen des Referenzraums zeigt Abb. 5.20.

Im Gegensatz zum Experimentierhaus, wo die Temperatur der Südwand aufgrund der Gewinne der transparenten Dämmelemente sehr hoch war, liegt die Temperatur der Südwand im Referenzhaus unter der mittleren Raumlufttemperatur. Am kältesten ist im Mittel die Ostwand, die an den Garagentrakt und die Außenluft grenzt. Die höchste mittlere Wandtemperatur wird an der Westwand, die an Raum 60 grenzt, gemessen. Die Temperatur der Nordwand ist dagegen geringer, obwohl es sich auch um eine interne Wand handelt. Dies liegt an der geringeren Lufttemperatur des sich im Norden an den Referenzraum anschließenden Raums.

Die Microcontrollerregelung zeigt prinzipiell das gewünschte Regelverhalten. Verbesserungen sind jedoch möglich, um Schwingungen der Stellgröße zu reduzieren.

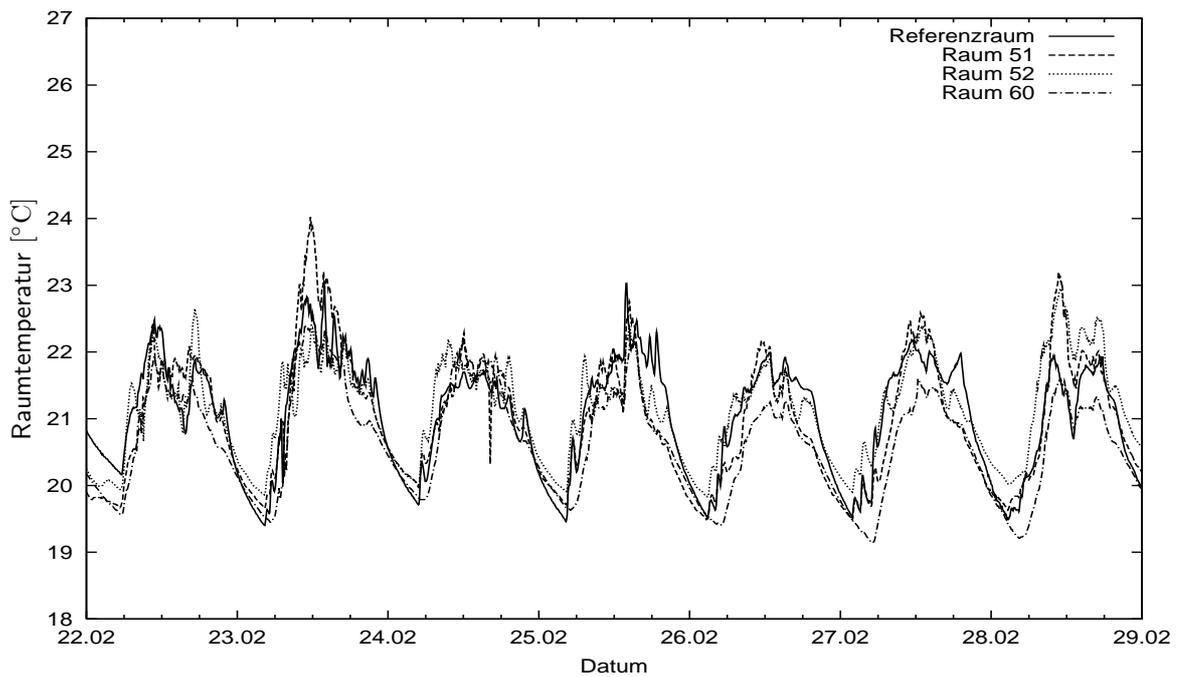


Abb. 5.19. Gemessene Raumtemperaturen in den südorientierten Räumen des Experimentierhauses bei Regelung des Referenzraums (kleiner Raum im Obergeschoß) durch die Vorlauftemperatur mit MC für den Zeitraum 22.2.-28.2.2000. Raum 51: großer Raum im Erdgeschoß, Raum 52: kleiner Raum im Erdgeschoß, Raum 60: großer Raum im Obergeschoß

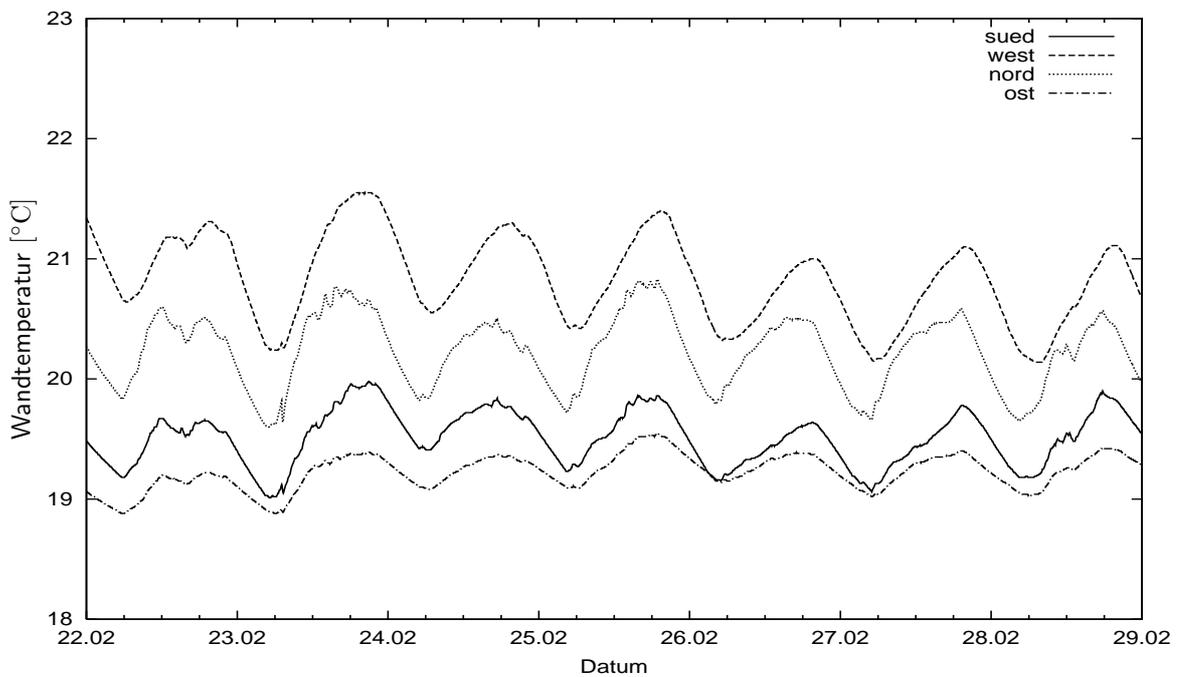


Abb. 5.20. Gemessene Wandtemperaturen im Referenzraum für den Zeitraum 22.2.-28.2.2000 für die Regelung mit MC, basierend auf 15-min Mittelwerten

5.3 Ergebnisse der experimentellen Parameteridentifikation

Das genutzte ARX-Modell wurde anhand physikalischer Überlegungen und Tests mit Hilfe von Meßdaten ausgewählt. In diesem Abschnitt wird geprüft, inwieweit das Modell und die gewählte Identifikationsmethode im Reglerbetrieb funktionieren.

Bereits in Abschnitt 3.5.1 wurde eine ausführliche Diskussion der „offline“ Identifizierbarkeit der Modellparameter aus experimentellen Daten vorgenommen. Die freie Systemantwort Y_0 bietet eine Möglichkeit zur Überprüfung der Güte des „online“ ermittelten Modells. Bei exaktem Modell und Erfassung aller Einflußgrößen muß der zweite Wert des Vektors Y_0 gleich dem Meßwert des folgenden Zeitschritts sein. Beispielhaft werden die beiden Verläufe für einen Tag mit mittlerer Einstrahlung (26.11.99) in Abbildung 5.21 dargestellt.

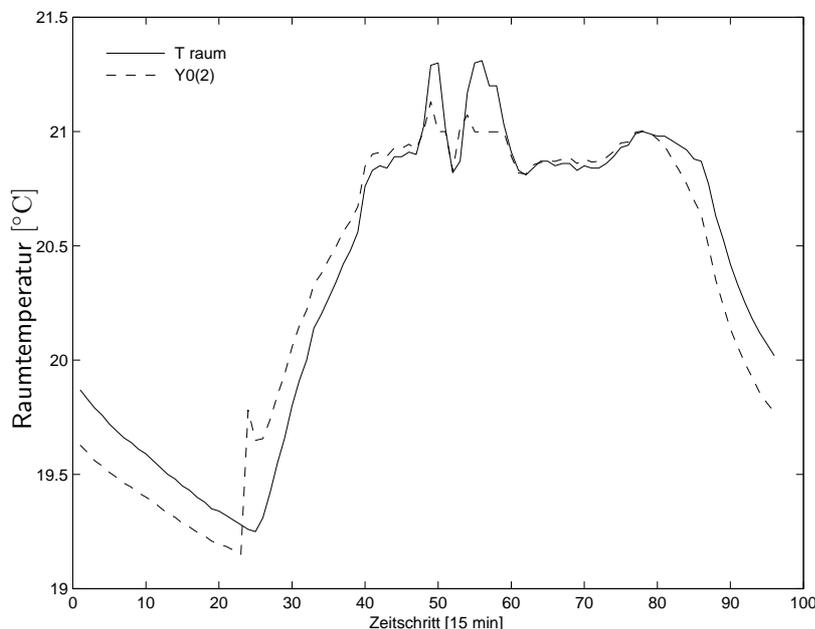


Abb. 5.21. Vergleich zwischen gemessener Raumtemperatur und vorhergesagter freier Systemantwort Y_0 am 26.11.99

Aufgrund von Modellfehlern und einer Anzahl nicht erfaßter Störgrößen ergeben sich Abweichungen, die aber unter 0.3 K bleiben. Die Abweichungen sind besonders hoch bei Raumtemperaturerhöhungen aufgrund solarer Gewinne, was auf eine Unterbewertung der Einstrahlung bei der Sprungantwort hindeutet. Tatsächlich wurde an den vorangegangenen Tagen, die mit größter Wichtung in die Identifikation eingehen, nur eine jeweils geringe Einstrahlung gemessen, wodurch sich das Signal/ Rauschverhältnis verschlechtert. Damit ist eine entsprechende Modellgenauigkeit zu begründen. Abweichungen sind auch in den Nachtstunden zu erkennen, wo das Modell eine schnellere Auskühlung erwartet, als sie tatsächlich eintritt. Zusätzliche ungemessene interne Energieeinträge können für diese Uhrzeit für den Referenzraum ausgeschlossen werden. Es wird vermutet, daß die Sprungantwort auf die Außentemperatur eine wesentliche Ursache darstellt, da sie, wie bereits in Abschnitt 3.5.1 dargestellt, mit der größten Unsicherheit behaftet ist. Außerdem kann sich aufgrund nicht

erfaßter Klimagrößen wie der Windgeschwindigkeit und der Luftfeuchte die Systemreaktion bei gleichen Sprüngen der Außentemperatur unterscheiden.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß die Online-Modellidentifikation im Praxistest ihre Tauglichkeit bewiesen hat. Die Tests haben jedoch gezeigt, daß die Identifikation bei einem kleinen Signal-Rauschverhältnis zu einem größeren Fehler der Modellparameter führt. Aus diesem Grund sollte die Identifikation nur dann durchgeführt werden, wenn auch ein Heizenergiebedarf vorhanden ist. Möglich wäre weiterhin, die Wichtung der Meßwerte für die Identifikation vom Signal-Rauschverhältnis abhängig zu machen. Beispielsweise könnte während der Übergangszeit der Vergessensfaktor erhöht (also die für die Identifikation relevante Meßperiode vergrößert), im Winter aber verringert werden. Derzeit wird ein konstanter Vergessensfaktor von $\lambda = 0.999$ verwendet.

5.4 Ergebnisse der Online-Wettervorhersage

Zur Bewertung der Qualität der Wettervorhersage wurden die vorhergesagten Verläufe von Außentemperatur und Einstrahlung zu jedem Zeitschritt der Messung mit PC abgespeichert. Da das Gebäude eine integrierende Wirkung hat, wird bei der Einstrahlung nicht die Leistung, sondern die eingestrahelte Energie verglichen.

$$Abw = \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} (G_{pred} - G_{mess}) dt \quad (5.2)$$

wobei Δt jeweils zu 1, 2 und 4 Stunden festgelegt wurde. Für die Bewertung der Außentemperaturvorhersage wird die Standardabweichung der Differenz zwischen gemessenem und vorhergesagtem Wert berechnet. Abbildung 5.22 zeigt beispielhaft die ermittelten Werte für den Zeitraum 26.11.99-28.11.99.

Die Außentemperaturvorhersage funktioniert in den meisten Fällen sehr gut. Auch bei einem Vorhersagezeitraum von 4 Stunden liegt die Standardabweichung in der Regel unter 1 K. Größere Abweichungen traten auf, wenn durch Störeinflüsse der „natürliche“ Verlauf der Außentemperatur verändert wurde. Beispielsweise führten offene Türen in Sensornähe zu kurzzeitigen Temperaturerhöhungen, die nicht vorhergesagt werden konnten. Allerdings sind diese Temperaturerhöhungen lokal begrenzt und daher kaum relevant für die Energieverluste über die ganze Gebäudehülle. Solche Einflüsse sollten aber bei der Sensorplatzierung beachtet werden.

Die Vorhersage der Einstrahlung weist mit dem gewählten Ansatz noch eine hohe Ungenauigkeit auf. Insbesondere bei stark schwankenden Einstrahlungsleistungen sind Abweichungen von mehreren 100% zu einzelnen Zeitschritten zu beobachten. Beim Verfolgen der Verläufe der vorhergesagten Einstrahlung fällt auf, daß zwischen einzelnen Zeitschritten starke Schwankungen auftreten. Diese werden verursacht durch Einstrahlungsspitzen, die sich stark beim jeweils aktuellen Meßwert durch die entsprechende Wichtung mit Vergesseffekt auswirken.

Wie bereits in den Simulationstests ermittelt, liegt in der Verbesserung der Wettervorhersage noch ein signifikantes Potential zur Komfortverbesserung und Energieeinsparung. Im Rahmen des hier benutzten Ansatzes könnte eine Verbesserung der Anpassungsfunktion und der Wichtungsfunktion bei der Approximation an vergangene Meßwerte erfolgen. Ferner kann eine Kopplung zwischen gemessener Einstrahlung und Außentemperatur in die

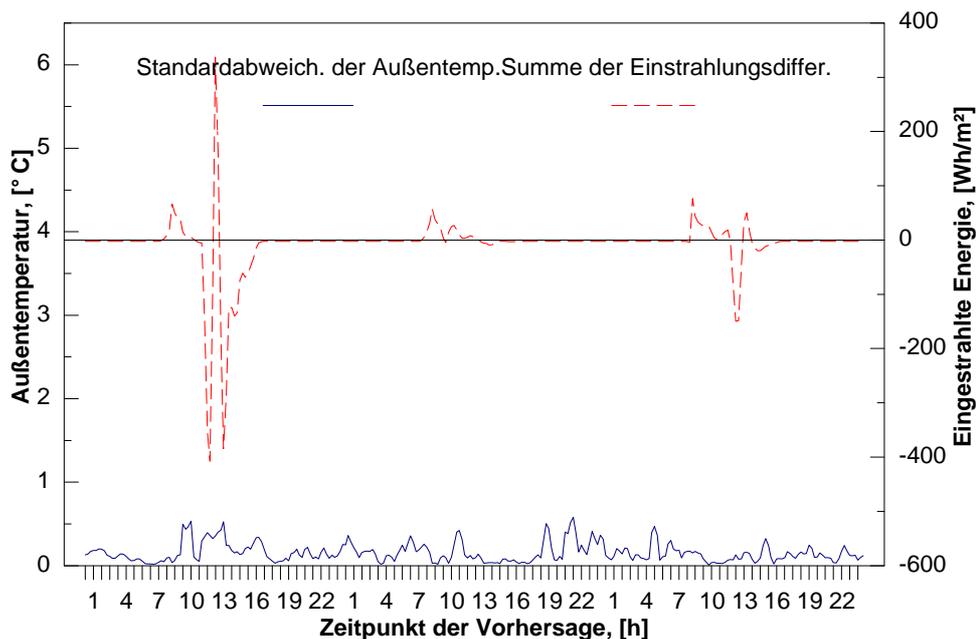


Abb. 5.22. Standardabweichung der Differenz zwischen vorhergesagter und eingetrophener Außentemperatur und Differenz zwischen vorhergesagter und eingetrophener eingestrahelter Energie für einen Vorhersagezeitraum von je 1 Stunde dargestellt für den Zeitraum 26.11-28.11.99

Vorhersage aufgenommen werden, wie es auch der allgemeinen Erfahrung entspricht. Da die Stärke der Kopplung in unterschiedlichen Klimazonen variieren kann, wird vorgeschlagen, sie durch einen selbstlernenden Algorithmus zu ermitteln.

Als Alternative zum hier verwendeten Ansatz könnten für eine rein interne Vorhersage von Einstrahlung und Außentemperatur nur auf Basis ihrer Meßwerte auch Transferfunktionenmodelle ohne zusätzliche Eingangsgröße (AR, IAR, ARMA, und ARIMA) verwendet werden.

Es ist jedoch absehbar, daß in nicht allzuferner Zukunft eine für diese Zwecke brauchbare Wettervorhersage über Online-Dienste verfügbar sein wird, die den finanziellen Rahmen für die Regelung der Heizung von Einfamilienhäusern nicht überschreitet. Bei großen Gebäuden oder Siedlungen sind die entstehenden Kosten gegenüber anderen Kosten so gering, daß eine Nutzung auch heute schon möglich wäre. Der modulare Aufbau des Algorithmus ermöglicht dann problemlos das Ersetzen der bisherigen Vorhersageprozedur durch eine externe Vorhersage.

5.5 Betriebserfahrungen

Als für die Messung problematisch erwies sich die Fremdsteuerung der Heizkreispumpen durch nicht strahlungsgeschützte Außentemperatursensoren. Dies führte teilweise zu Pumpenabschaltungen an strahlungsreichen Tagen der Übergangszeit. Eine Modellidentifikation mit Daten aus solchen Perioden muß zwangsläufig zu einem falschen Modell führen. Da

die Hardwaregegebenheiten keine direkte Pumpenansteuerung vom PC aus ermöglichen, wurde für die Messungen in der Heizperiode 1999/2000 eine Abschattung dieser Sensoren angebracht. Bei Implementierung der vsHR in einem eigenständigen Gerät muß eine direkte Pumpenansteuerung über einen Schaltausgang vorgesehen werden.

Die alleinige Berücksichtigung der Raumlufttemperatur sowohl für die Komfortbewertung als auch als Regelgröße liefert noch nicht das optimale Ergebnis der Regelung hinsichtlich möglicher Energieeinsparung und Einhaltung oder Verbesserung des thermischen Komforts. Beispielsweise wurden durch die Nutzer im Referenzhaus während der Heizperiode Unterschreitungen des Sollwertes der Lufttemperatur als unangenehmer empfunden als Überschreitungen. Dies läßt sich mit der teilweisen Kompensation höherer Lufttemperaturen mit den in der Regel geringeren Oberflächentemperaturen der Wände bzw. Steigerung des Unbehagens bei Unterschreitung des Sollwertes durch Luft- und Oberflächentemperatur begründen. Bei Gebäuden mit transparenter Dämmung könnte eine entsprechende Berücksichtigung der mittleren Oberflächentemperatur der Wände zu merklichen Energie- und Komfortverbesserungen führen im Vergleich zu einer Regelung mit nur der Lufttemperatur als Regelgröße.

Die Windgeschwindigkeit wurde sowohl aus Gründen der Kosten und des Rechenaufwands nicht als Modelleingangsgröße in die Identifikation einbezogen. Während einer windreichen Meßperiode wurden dadurch in den ersten Tagen die Sollwerte der Raumtemperatur leicht unterschritten. Nach wenigen Tagen wurde jedoch die Sollraumtemperatur trotz anhaltend hoher Windgeschwindigkeiten erreicht. Die dazu notwendigen Vorlauftemperaturen lagen in diesem Zeitraum durchgängig über denen der konventionellen Heizkennlinie. Dies zeigt, daß bereits mit den vorhandenen Modelleingangsgrößen auch der Einfluß der Windgeschwindigkeit erfaßt wird.

Die Rückmeldungen der Nutzer der Experimentierhäuser über die Komfortbedingungen zeigten, daß eine kurzfristige Unterschreitung des Raumlufttemperatursollwertes um 2 K tolerierbar ist. Langfristiger wird eine Unterschreitung von ca. 0.5 K als tolerabel empfunden. Überschreitungen des Sollwertes werden während der Heizperiode als weniger problematisch eingeschätzt als Unterschreitungen.

Die Einbeziehung der Stellgrößenbegrenzungen in das Optimierungsverfahren wurde im vorgestellten Algorithmus mit Rücksicht auf die Rechenkapazität des Microcontrollers nicht implementiert. Die Meßerfahrung zeigt jedoch, daß häufig vorgegebene Stellgrößensollwerte nicht erreicht wurden. Eine Einbeziehung in die Optimierung läßt eine merkliche Verbesserung des Regelverhaltens und der möglichen Energieeinsparung insbesondere bei Gebäuden mit noch trägerem Heizsystem erwarten, erhöht jedoch den Rechenaufwand beträchtlich.

Die Ergebnisse dieses Kapitels zeigten, daß die Funktionsfähigkeit der entwickelten vorausschauenden selbstadaptierenden Heizungsregelung auch beim praktischen Einsatz gegeben ist. Auch die im Microcontroller implementierte Regelung stellte die prinzipielle Funktionsfähigkeit unter Beweis. Durch Optimierung der einzelnen Module ist noch ein Verbesserungspotential vorhanden.

Kapitel 6

Zusammenfassung und Diskussion

Ziel der vorliegenden Arbeit war die Entwicklung sowie der theoretische und experimentelle Test eines Algorithmus zur vorausschauenden und selbstadaptierenden Regelung der Heizung in Gebäuden mit erhöhten passiv solaren Energiegewinnen. Der Algorithmus sollte in einem vermarktbareren Gerät funktionsfähig sein. Dementsprechend ergeben sich Forderungen nach einer preiswerten, einfach zu konfigurierenden und einfach zu bedienenden Hardware, die ohne nennenswerte Veränderungen in verschiedenen Gebäuden einsetzbar ist.

Aufgabe einer Heizungsregelung ist es, in den beheizten Räumen hohen thermischen Komfort bei möglichst niedrigem Energieverbrauch bereitzustellen. Zur Lösung dieses Optimierungsproblems wird im entwickelten Algorithmus die Raumtemperatur auf Basis eines Gebäudemodells unter Einbeziehung äußerer Störgrößen vorhergesagt. So kann auf zusätzliche Gewinne beispielsweise aus solarer Einstrahlung bereits vor deren Eintreten reagiert werden. Die Raumtemperatur wird mit Hilfe der Vorlauftemperatur des Heizsystems geregelt.

Ein implementiertes Modellidentifikationsverfahren ermittelt das dynamische Gebäudeverhalten während des Prozesses, so daß keine Vorinformationen über den Gebäudeaufbau notwendig sind. Zum Modell und dem Identifikationsverfahren wurden zahlreiche Untersuchungen durchgeführt. Das gewählte Differenzgleichungsmodell und die Identifikation der Modellparameter mit einer rekursiven Methode der kleinsten Quadrate haben seine Tauglichkeit in der Simulation für verschiedene Gebäudemodelle sowie im Experiment über eine Heizperiode mit unterschiedlichsten äußeren Bedingungen unter Beweis gestellt. Die gewählte Beschränkung auf drei Modelleingangsgrößen resultiert aus der Forderung nach geringen Kosten für die notwendige Sensorik. Die Tests in Simulation und Experiment zeigten jedoch, daß der Algorithmus auch bei Vorhandensein erheblicher ungemessener Störgrößen richtig reagiert. Wichtig für die Identifizierbarkeit der Modellparameter ist die Wahl einer hinreichend großen Datenbasis (mindestens 10 Tage).

Mit Hilfe der Simulationstests wurde weiterhin untersucht, wie sich verschiedene Parameter, die entweder voreingestellt oder durch einen Anwender verändert werden können, auf das Regelverhalten auswirken. Als wichtigster durch einen Anwender zu wählender Parameter wurde neben der Sollraumtemperatur ein Komfortparameter eingeführt, mit dem zwischen Komfort und Energieeinsparung gewichtet werden kann. Wird hoher Komfort gewünscht, so strebt die Regelung ein schnellstmögliches Erreichen des Sollwertes an. Wird Energieeinsparung gewünscht, so werden bei Vorhersage von Einstrahlungsgewinnen zur besseren Nutzung derselben bereits vor ihrem Eintreten Untertemperaturen zugelassen.

Als Referenz für den Vergleich zwischen einer herkömmlichen und der entwickelten vorausschauenden selbstadaptierenden Heizungsregelung wurde das Verfahren der Vorlauftemperatursteuerung als Funktion der Außentemperatur (Heizkennlinie) und Regelung der Raumtemperatur mit Hilfe von Heizkörperthermostatventilen verwendet. Die experimentellen und theoretischen Untersuchungen zeigten, daß diese Referenz hinsichtlich Regelverhalten und Energieverbrauch im Rahmen eines konventionellen Regelverfahrens bereits einen guten Standard darstellt. Trotz dieses hohen Standards läßt sich mit der entwickelten Regelung noch Energie selbst bei hohem Komfort einsparen. Die Höhe der erreichbaren Einsparungen ist weiterhin vom dynamischen Verhalten des Heizungssystems und des Gebäudes abhängig. Die relativen Einsparungen steigen mit besserer Dämmung des Gebäudes und massiverer Bauweise. Vorteile des verwendeten Verfahrens zeigen sich vor allem bei trägeren Heizsystemen wie beispielsweise Fußbodenheizungen. Anhand der Untersuchungen konnte gezeigt werden, daß die Regelung ohne umfangreiche Anpassungen auch andere Stellgrößen (Massenstrom, Heizleistung) als die im untersuchten Standardfall verwendete Vorlauftemperatur zur Beeinflussung der Raumtemperatur nutzen kann.

Ein Vergleich zwischen verschiedenen Wettervorhersagemöglichkeiten in der Simulation zeigte, daß noch ein signifikantes Potential zur Energieeinsparung und insbesondere Komfortverbesserung bei Optimierung der Einstrahlungsvorhersage, vor allem auch für Heizsysteme mit hoher Trägheit vorhanden ist. Die Regelung ist jedoch auch ohne Wettervorhersage funktionsfähig. Die Raumtemperaturvorhersage basiert dann nur auf vergangenen Wetterdaten.

Die experimentellen Untersuchungen wurden zunächst mit Hilfe eines Personalcomputers und einer Datenerfassungsanlage im Experimentierhaus des ISFH Emmerthal durchgeführt. Sie zeigten ein hervorragendes Regelverhalten des Algorithmus auch unter den Bedingungen des praktischen Einsatzes. Trotz erheblicher Einwirkung von Störgrößen wurden die Parameter des Gebäudemodells richtig identifiziert. Qualitativ ließ sich das bereits in den Simulationstests ermittelte Betriebsverhalten nachweisen. In Meßperioden mit höherer Heizleistungsanforderung, als mit einer konventionellen Regelung lieferbar, zeigten sich sogar Komfortverbesserungen durch das adaptive Verhalten der entwickelten Regelung. Die experimentellen Tests bestätigten, daß die Außentemperatur mit guter Genauigkeit vorhergesagt wird. Ihre Vorhersage ist jedoch von geringerer Bedeutung für die Energieeinsparung. Der hier gewählte Ansatz zur Vorhersage der Einstrahlung läßt sich noch verbessern, z.B. durch Einbeziehung externer Daten. Der modulare Aufbau des Algorithmus erlaubt problemlos, die Vorhersageprozedur später durch effizientere Algorithmen zu ersetzen.

Der entwickelte Algorithmus wurde in seiner optimierten Form in einen Microcontroller implementiert. Das Gerät ist bereits mit einer herkömmlicher Heizungsregelung auf dem Markt verfügbar. So konnten allgemeine Aufgaben zur Datenverwaltung und Nutzerkommunikation mit bereits vorhandener Software gelöst werden. Ein experimenteller Test der vorausschauenden selbstadaptierenden Regelung mit dem Microcontroller wurde im Referenzhaus des ISFH Emmerthal durchgeführt. Der Regler stellte seine prinzipielle Tauglichkeit ebenfalls unter Beweis. Es wurde jedoch eine etwas geringere Regelqualität registriert als bei der PC-Regelung. Die Ursachenanalyse ergab, daß es sich um Probleme der internen Datenverarbeitung handelt. Die Untersuchungen mit Hilfe der Simulationen zeigen die Wichtigkeit einer möglichst genauen Ermittlung der Raumtemperatur. Wichtig in diesem Zusammenhang ist neben der internen Datenverarbeitung die Auswahl eines geeigneten Sensors sowie dessen Positionierung. Ein noch besseres Verhalten der entwickelten Regelung hinsichtlich der Zielgrößen ist zu erwarten, wenn in die Optimierung die Grenzen der Stellgröße einbezogen

werden. Dies wurde mit Rücksicht auf die verfügbare Rechenkapazität des Microcontrollers nicht implementiert.

Der getestete Microcontroller ist als Prototyp verfügbar. Er erfüllt die Forderungen hinsichtlich geringem Preis und einfacher Bedienbarkeit. Die Kosten der ausgewählten Hardware sind gegenüber denen einer herkömmlichen Regelung nur um die des Einstrahlungs- und Raumtemperatursensors zuzüglich Montage erhöht. Wie in den Simulationstests nachgewiesen, ist jedoch nur für den Raumtemperatursensor eine hohe Genauigkeit erforderlich. Das verwendete Regelkonzept erfordert keine wesentlichen baulichen Veränderungen am Heizsystem. Es ist auch mit entsprechenden Anpassungen auf größere Gebäude übertragbar.

Neben den bereits genannten Möglichkeiten zur weiteren Optimierung des Algorithmus sind auch Erweiterungen auf andere Anwendungen zukünftig denkbar. Das allgemeine Konzept der Regelung bietet die Möglichkeit der Einbeziehung weiterer Systeme wie Lüftung oder Verschattung in die Regelstrategie. Die Optimierung der Temperaturen im Heizsystem zur Verbesserung der Effizienz der wärmeversorgenden Anlage kann direkter in das Regelkonzept einbezogen werden. Interessant ist auch eine Übertragung der Methodik auf Regelung aktiv thermischer solarer Systeme (z.B. zur Ladung von Pufferspeichern) sein. Hinsichtlich der industriellen Umsetzung der hier vorgestellten Lösung ist noch eine Optimierung des Regelverhaltens des Microcontrollers notwendig. Ein experimenteller Breitentest an verschiedenen Gebäuden und Heizsystemen wird vor einer Marktverbreitung für sinnvoll erachtet.

Anhang A

Systemtheoretische Grundlagen

A.1 Einführung und Definitionen

Im folgenden werden die wichtigsten im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendeten systemtheoretischen Begriffe definiert. Die Definitionen basieren auf Angaben in [66], [43] und [79].

System: eine Menge von miteinander in gesetzmäßiger Beziehung stehenden Komponenten. Es ist durch eine konkrete oder abstrakte Umgrenzung von seiner Umgebung getrennt. Ein System setzt mehrere Signale zueinander in Beziehung.

Eingangsgrößen: u sind die Quantifizierung von veränderlichen, von der Umgebung auf das System wirkenden ursächlichen Einflüssen (treibende Kräfte).

Ausgangsgrößen: y sind die Größen, die nach außen wirken bzw. von außen beobachtet werden oder aus solchen Größen gebildete weitere Größen.

Dynamisches System: ein System, dessen innerer Zustand sich unter dem Einfluß von außen erfolgender Aktionen kausal so verändert, daß eine gegenwärtige Aktion die zukünftigen Zustände des Systems beeinflusst. Anders ausgedrückt, hängen die Ausgangsgrößen zum gegenwärtigen Zeitpunkt von Eingangsgrößen aus einem bestimmten vergangenen Zeitintervall ab. Man nennt solche Systeme deshalb auch gedächtnisbehaftet.

Übertragungsverhalten: der Zusammenhang zwischen dem Verlauf der Eingangsgrößen und dem dadurch verursachten Verlauf der Ausgangsgrößen.

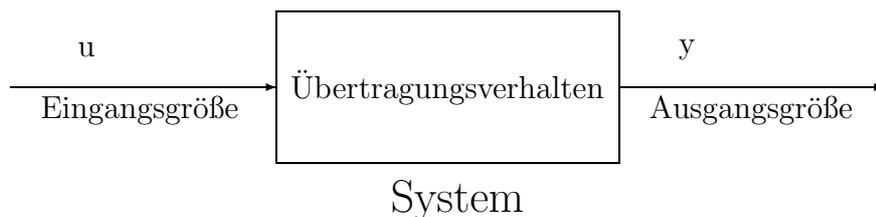


Abb. A.1. Blockschema eines Systems mit je einer Eingangs- und Ausgangsgröße

Linearität: Wenn die Reaktion eines Systems auf eine Linearkombination von Eingangssignalen stets aus der entsprechenden Linearkombination von Ausgangssignalen besteht, dann gilt für dieses System das Superpositionsprinzip. Solche Systeme heißen lineare Systeme.

Zeitinvarianz: Ein zeitinvariantes System liegt vor, wenn die Form des Ausgangssignals nicht vom Zeitpunkt des Einwirkens des Eingangssignals abhängt. Anderenfalls spricht man von einem zeitvarianten System.

Kausalität: Ein System heißt kausal, wenn der Verlauf des Ausgangssignals bis zu jedem Zeitpunkt stets nur vom Verlauf des Eingangssignals bis zu diesem Zeitpunkt abhängt. Anders ausgedrückt besteht ein kausaler Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangssignal dann, wenn zwei, bis zu einem bestimmten Zeitpunkt gleiche Eingangssignale $u_1(t)$ und $u_2(t)$ auch zwei bis zu diesem Zeitpunkt gleiche Ausgangssignale $y_1(t)$ und $y_2(t)$ hervorrufen.

Prozeßmodell: das durch mathematische Beziehungen beschriebene Abbild bestimmter Eigenschaften eines Systems. Für die weiteren Betrachtungen ist die Beschreibung des Übertragungsverhaltens von Interesse.

Es gibt eine Vielzahl von Möglichkeiten der Beschreibung des Übertragungsverhaltens. Das universellste Beschreibungsmittel für das Übertragungsverhalten von Systemen ist die Differentialgleichung. Lineare zeitinvariante Systeme mit konzentrierten Parametern¹ lassen sich durch Gleichungen vom Typ

$$e_0 \cdot u + e_1 \cdot \frac{du}{dt} + \dots + e_m \cdot \frac{d^m u}{dt^m} = a_0 \cdot y + a_1 \cdot \frac{dy}{dt} + \dots + a_n \cdot \frac{d^n y}{dt^n} \quad (\text{A.1})$$

darstellen. Näherungsweise lassen sich auch Systeme mit verteilten Parametern sowie Totzeitsysteme mit dieser Form beschreiben. In den folgenden Abschnitten werden weitere Möglichkeiten zur Beschreibung des Übertragungsverhaltens dargestellt.

A.2 Modelle zur Beschreibung des dynamischen Systemverhaltens

A.2.1 Sprung- und Impulsantwortmodelle

Antwortmodelle basieren auf der Reaktion des Systems auf normierte Testfunktionen als Systemeingangsgrößen. Für die Bestimmung der Impulsantwort wird als Eingangsfunktion des Systems die δ -Funktion² $\delta(t - \tau)$ mit

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) dt = 1$$

¹Ein System mit konzentrierten Parametern weist eine endliche Anzahl von Speichern mit begrenzter Kapazität und ausschließlich zeitabhängigem Ladezustand auf. Dagegen ist bei einem System mit verteilten Parametern die Speicherwirkung zusätzlich ortsabhängig, was auf partielle Differentialgleichungen führt [66].

²Andere Bezeichnungen für die δ -Funktion sind Einheits-Nadelfunktion oder Dirac-Funktion

verwendet. Die Systemreaktion auf die δ -Funktion als Eingangsfunktion nennt man Einheits-Impulsantwortfunktion oder Gewichtsfunktion $g(\tau)$.

Die Ausgangsfunktion eines kausalen Systems für eine beliebige Eingangsfunktion $u(t)$ ergibt sich durch Faltung (Operator $*$) mit der Gewichtsfunktion [79]:

$$y(t) = g(t) * u(t) = \int_{\tau=0}^{\infty} g(\tau)u(t - \tau)d\tau \quad , \quad (\text{A.2})$$

Durch Laplace-Transformation erhält man

$$Y(s) = G(s)U(s) \quad , \quad (\text{A.3})$$

mit der komplexen Variable $s = \delta + i\omega$. Die Laplace-Transformierte der Ausgangsgröße ist gleich dem Produkt aus der komplexen Übertragungsfunktion $G(s)$ und der Laplace-Transformierten der Eingangsfunktion. Gleichung A.3 liefert gleichzeitig die Definition der Übertragungsfunktion:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} \quad . \quad (\text{A.4})$$

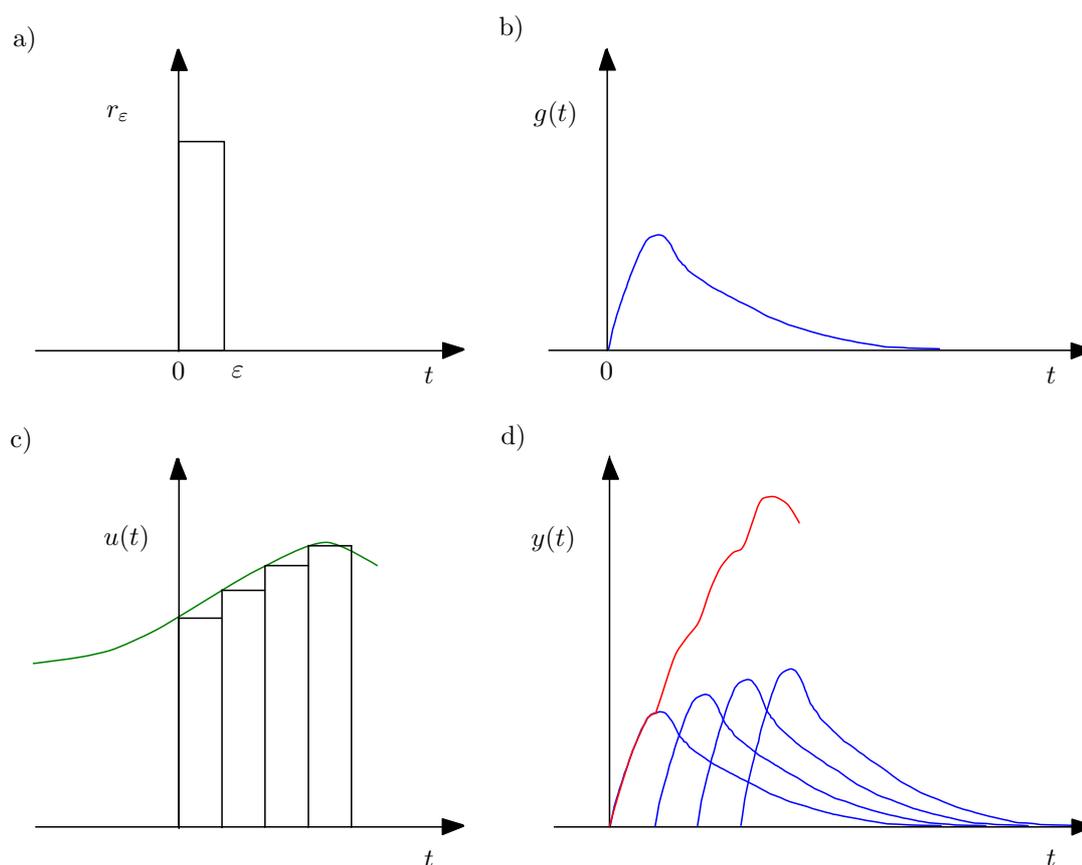


Abb. A.2. Zur Erläuterung von Impulsantwortmodellen: a) Approximation der δ -Funktion durch eine Rechteckfunktion, b) Impulsantwortfunktion auf die Einheits-Rechteckfunktion (Gewichtsfunktion), c) Approximation einer beliebigen stetigen Funktion durch Rechteckfunktionen, d) Superposition der um das entsprechende Zeitintervall verschobenen Impulsantwortfunktionen

Die δ -Funktion läßt sich näherungsweise durch eine Rechteckfunktion

$$r_\varepsilon(t) = \begin{cases} \frac{1}{\varepsilon} & : 0 < t < \varepsilon \\ 0 & : \text{sonst} \end{cases}$$

beschreiben (Abb. A.2). Für $\varepsilon \rightarrow 0$ geht die Rechteckfunktion gegen die δ -Funktion.

Da sich jede beliebige stetige Eingangsfunktion näherungsweise mit Hilfe von Rechteckfunktionen darstellen läßt, ergibt sich die Ausgangsfunktion für ein lineares zeitinvariantes System als Überlagerung der um die entsprechende Zeit verschobenen Impulsantworten auf die einzelnen Rechteckimpulse.

Eine andere Darstellung nutzt als normiertes Testsignal die Einheitssprungfunktion:

$$s_e(t) = \begin{cases} 1 & : t \geq 0 \\ 0 & : \text{sonst} \end{cases} .$$

Die Systemreaktion auf die Sprungfunktion als Eingangsfunktion nennt man Einheits-Sprungantwortfunktion oder Übergangsfunktion $s(\tau)$.

Damit ergibt sich analog zu Gl. A.2 die Ausgangsfunktion für ein lineares zeitinvariantes System dann als Überlagerung der um die entsprechende Zeit verschobenen Sprungantworten auf die einzelnen Sprünge:

$$y(t) = s(t) * u(t) = \int_{\tau=0}^{\infty} s(\tau)u(t - \tau)d\tau \quad . \quad (\text{A.5})$$

Jede stetige Funktion läßt sich wiederum durch Sprungfunktionen approximieren.

Sprung- und Impulsantwort enthalten also die gesamte Information über das dynamische Verhalten eines linearen zeitinvarianten Systems. Für den Zusammenhang zwischen beiden Funktionen gilt [79]:

$$g(t) = \frac{ds(t)}{dt}$$

und

$$s(t) = \int_{-\infty}^t g(\tau)d\tau \quad .$$

Für ein System mit mehreren Ein- und Ausgangsgrößen sind so viele Sprung- bzw. Impulsantworten zur vollständigen Beschreibung notwendig, wie es dem Produkt der Anzahl der Ein- und Ausgangsgrößen entspricht.

Die Abbildungen A.3 bis A.6 verdeutlichen die Beschreibung der Systemreaktion bei Anregung mit einer Sinusfunktion³. Die Ausgangsfunktion ist gegenüber der Eingangsfunktion amplitudengedämpft und phasenverschoben. Sie läßt sich sowohl durch Überlagerung der Einheitsimpulsantworten (Abb. A.5) als auch der Einheitssprungantworten (Abb. A.6) darstellen.

Für ein lineares diskontinuierliches System setzt sich die Folge der Ausgangsgröße aus der Eingangsgrößenfolge Δu_k gefaltet mit den Impulsantwortkoeffizienten g_i zusammen. Die

³Das für diese Berechnungen verwendete Modell beschreibt das Übertragungsverhalten zwischen der Eingangsgröße Außentemperatur und der Ausgangsgröße Raumtemperatur. Seine Parameter wurden anhand von experimentellen Daten der Experimentierhäuser des ISFH im Emmerthal identifiziert (siehe Abschnitt 3.5.1)

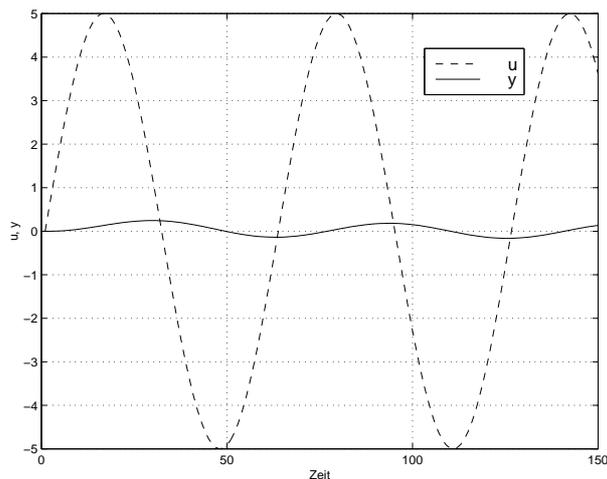


Abb. A.3. Eingangs- und Ausgangsfunktion bei Systemanregung mit einer Sinusfunktion

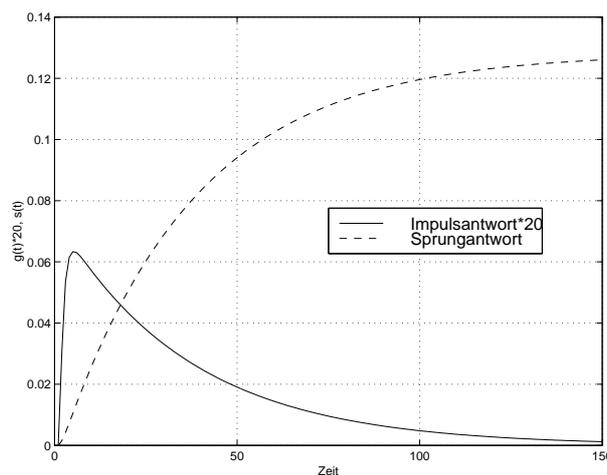


Abb. A.4. Einheitssprung- und -impulsantwort des Systems

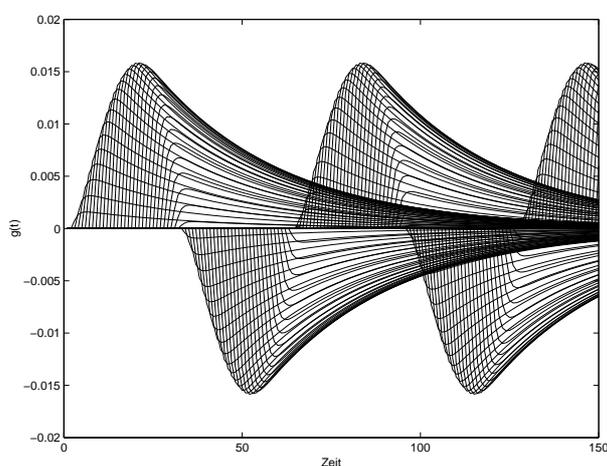


Abb. A.5. Impulsantwortfunktionen auf Anregung mit Sinusfunktion

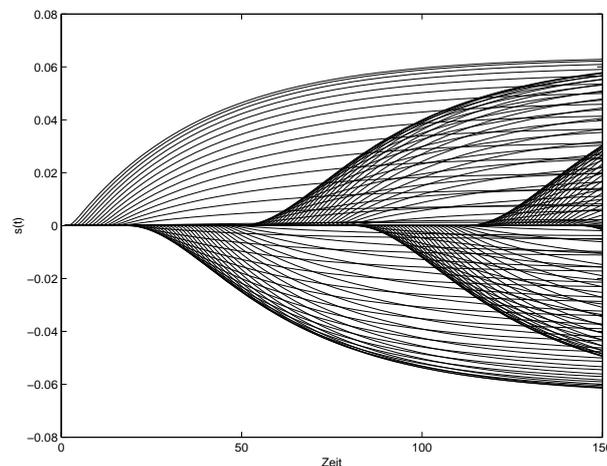


Abb. A.6. Sprungantwortfunktionen auf Anregung mit Sinusfunktion

Impulsantwortkoeffizienten werden erhalten, wenn auf das System ein Einheitsimpuls ($u_k = 1$ für $k = 0$ sonst $u_k = 0$) für gegeben wird.

$$y_k = \sum_{i=1}^k g_i u_{k-i} \quad (\text{A.6})$$

Wirken mehrere Eingangsgrößen (treibende Kräfte) auf das System, so überlagern sich die Systemantworten auf jede einzelne Eingangsgröße bei linearen zeitinvarianten Systemen nach dem Superpositionsprinzip.

Bei Nutzung der diskontinuierlichen Sprungantwort setzt sich die Ausgangsgröße aus Sprüngen der Eingangsgröße Δu_k multipliziert mit den Sprungantwortkoeffizienten s_i zusammen. Die Sprungantwortkoeffizienten s_i werden als Ausgangsfolge erhalten, wenn auf das System eine Einheitssprungfolge ($\Delta u_k = 1$ für $k > 0$ sonst $\Delta u_k = 0$) für eine Eingangsgröße gegeben wird.

$$y_k = \sum_{i=1}^k s_i \Delta u_{k-i} \quad (\text{A.7})$$

Die Sprungantwortkoeffizienten können auch durch Summation der Impulsantwortkoeffizienten erhalten werden:

$$s_i = \sum_{j=-\infty}^i g_j \quad .$$

Die Impulsantwortkoeffizienten berechnen sich dementsprechend aus den Sprungantwortkoeffizienten zu:

$$g_i = s_i - s_{i-1} \quad .$$

Die Vorteile der Systembeschreibung mit Hilfe von Sprung- oder Impulsantwortmodellen sind die Einfachheit der Berechnung der Ausgangsgröße oder ihrer Vorhersage und die Tatsache, daß keine Annahmen über die Ordnung des Prozesses gemacht werden müssen. Nachteilig wirkt sich die große Anzahl der Parameter (=Antwortkoeffizienten) im Fall einer Selbstidentifikation aus.

A.2.2 Transferfunktionenmodelle

Werden in einer Differentialgleichung wie Gl. A.1 die Differentialquotienten durch Differenzenquotienten z.B. der folgenden Art ersetzt:

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dt} &\cong \frac{y(k+1) - y(k)}{\Delta t} \\ \frac{d^2y}{dt^2} &\cong \frac{y(k+2) - 2y(k+1) + y(k)}{(\Delta t)^2} \quad , \end{aligned}$$

und analog für die Eingangsfunktion u , so erhält man eine Übertragung kontinuierlicher Differentialgleichungsmodelle auf die diskrete Form. Der neue Wert $y(k)$ ergibt sich bei einer Differentialgleichung 2. Ordnung als gewichtete Summe der vorangegangenen Ausgangswerte $y(k-1)$, $y(k-2)$ und des vorangegangenen Eingangswertes $u(k-1)$. In $y(k-1)$, $y(k-2)$ sind wiederum die Wirkungen von $y(k-2)$, $y(k-3)$ und $u(k-2)$, $u(k-3)$ usw. enthalten.

Eine allgemeine Form dieser Differenzgleichungen in SISO-Formulierung (SISO: Single-Input-Single-Output) läßt sich angeben mit:

$$\sum_{n=0}^{na} a_n y(k-n) = \sum_{n=0}^{nb} b_n u(k-n) \quad (\text{A.8})$$

wobei k einen diskreten Zeitpunkt darstellt. na und nb ist die Ordnung des Modells bzgl. der Aus- und Eingangsgrößen. nk bezeichnet die Anzahl der Verzögerungszeitschritte, mit der eine Eingangsgröße auf die Ausgangsgröße wirkt. Mit Hilfe der der Z-Transformation (analog zur Laplace-Transformation für kontinuierliche Signale):

$$X(z) = Zx(k) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k)z^{-k} \quad (\text{A.9})$$

mit z als komplexwertiger Variable und dem Verschiebungssatz der Z-Transformation:

$$Zx(k - \kappa) = z^{-\kappa} X(z)$$

läßt sich Gleichung A.8 auf folgende Form bringen:

$$\begin{aligned} Y(z) &+ a_1 Y(z) z^{-1} + \dots + a_{na} Y(z) z^{-na} \\ &= b_{nk} Y(z) z^{-nk} + b_{nk+1} Y(z) z^{-(nk+1)} + \dots + b_{nb} Y(z) z^{-nb} \quad . \end{aligned}$$

Die Differenzgleichung A.8 ist somit in eine algebraische Gleichung überführt worden. Durch Ausklammern von $X(z)$ und $Y(z)$ und Umstellen erhält man die diskrete komplexe Übertragungsfunktion

$$H(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{B(z)}{A(z)} \quad (\text{A.10})$$

mit

$$\begin{aligned} A(z) &= 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_{na} z^{-na} \\ B(z) &= b_{nk} z^{-nk} + b_{nk+1} z^{-(nk+1)} + \dots + b_{nb} z^{-nb} \quad . \end{aligned}$$

Hier sind na und nb die Ordnung der Polynome A und B . Diese Art von Beschreibung heißt ARX-Modell (**A**uto**R**egressive Model with **e**Xogeneous input). Die *gemessene* Ausgangsgröße wird noch von einem Störungsterm überlagert:

$$\sum_{n=0}^{na} a_n y(k-n) = \sum_{n=nk}^{nb} b_n u(k-n) + \varepsilon(k) \quad . \quad (\text{A.11})$$

ARX-Modelle gehören zur Klasse der Transferfunktionenmodelle. Andere Modellarten aus dieser Klasse nehmen beispielsweise eine detailliertere Beschreibung des Meßrauschens vor. Eine Übersicht über verschiedene Arten von Transferfunktionenmodellen gibt [50].

Durch Partialbruchzerlegung läßt sich Gleichung A.10 auf die Form:

$$H(z) = \frac{k \cdot (z - p_1) \cdot (z - p_2) \cdot (z - p_{nb-nk})}{(z - q_1) \cdot (z - q_2) \cdot (z - q_{na})} \quad (\text{A.12})$$

bringen, worin p_i Nullstellen bzw. q_j die Pole der Übertragungsfunktion $H(z)$ bezeichnen. Anhand dieser sogenannten Pol-Nullstellenverteilung lassen sich Untersuchungen zur Stabilität des Systems und einer geeigneten Modellordnung zur Beschreibung besonders einfach vornehmen.

Sprung- und Impulsantwortmodelle sind Sonderfälle der Beschreibung in A.10. Für ein Impulsantwortmodell wird $A = 1$ und die Koeffizienten des B-Polynoms sind die Impulsantwortkoeffizienten. Für ein Sprungantwortmodell gilt $A = 1$ und $b_1 = s_1$, $b_j = s_j - s_{j-1}$.

Ein Vorteil der Beschreibung mit Transferfunktionenmodellen ist die geringe Anzahl von Parametern, die benötigt wird, um einen linearen Prozeß zu beschreiben. Allerdings sind Annahmen über die Prozeßordnung zu treffen.

Die obige Darstellung läßt sich auf Systeme mit mehreren Eingangs- und einer Ausgangsgröße (MISO - Multi input single output) und auf Systeme mit mehreren Ein- und Ausgangsgrößen (MIMO) verallgemeinern. Die Verallgemeinerung auf ein MISO-System wurde in Abschnitt 3.2.1 angewendet.

Für eine Identifikation der Modellparameter ordnet man die Meßwerte aus Gleichung A.8 dem Regressionsvektor

$$\varphi^T(k) = [-y(k-1) \dots - y(k-na) \quad u(k-nk) \dots u(k-nk-nb+1)]$$

und die Parameter dem Parametervektor

$$\theta = [a_1 \dots a_{na} \quad b_1 \dots b_{nb}]^T$$

zu. Durch Multiplikation von $\varphi^T(k)$ und θ erhält man ein lineares Regressionsmodell:

$$y(k) = \varphi^T(k)\theta + \varepsilon(k)$$

zur Ermittlung der Modellparameter in θ . Das Verfahren ist in Abschnitt A.4 beschrieben.

A.3 Das Übertragungsverhalten linearer Elementarkomponenten

Jedes lineare System läßt sich durch Verschaltung einiger weniger Elementarkomponenten darstellen. Im folgenden werden nur die Komponenten vorgestellt, die im betrachteten System Gebäude auftreten.

Proportionalglied: Wird auch P-Glied genannt. Der Übergang zwischen Ein- und Ausgangsgröße wird durch die Gleichung:

$$y = K \cdot u$$

charakterisiert. Die Ausgangsgröße ergibt sich durch Multiplikation der Eingangsgröße mit einem Faktor k . Die komplexe Übertragungsfunktion gemäß der Definition in Gl. A.3 lautet: $G(s) = k$. Die Sprungantwort ist der mit dem Faktor k multiplizierte Einheitssprung.

Integrierglied: Wird auch als I-Glied bezeichnet. Der Übergang wird durch die Integralgleichung:

$$y = K_I \cdot \int u \, dt$$

beschrieben. Die Ausgangsgröße ergibt sich durch Integration der Eingangsgröße und Multiplikation mit einem Faktor K_I . Die komplexe Übertragungsfunktion lautet:

$$G(s) = \frac{K_I}{s} \quad .$$

Die Sprungantwort ist eine lineare Funktion von t mit dem Anstieg K_I .

Verzögerungsglied 1. Ordnung: Ist aus P- und I-Glied zusammengesetzt. Wird auch PT1-Glied genannt. Der Übergang wird durch die Differentialgleichung:

$$y + T \cdot \dot{y} = K \cdot u$$

charakterisiert. Die komplexe Übertragungsfunktion ergibt sich zu: $G(s) = \frac{K}{1+sT}$. Die Sprungantwort des PT1-Gliedes lautet:

$$s(t) = K(1 - e^{-t/T})$$

Nach einer sprungartigen Veränderung der Eingangsgröße strebt die Ausgangsgröße exponentiell dem neuen Beharrungswert $y = K \cdot u$ zu (siehe Abbildung A.7). Die Zeitkonstante T läßt sich aus dem Schnittpunkt der Tangente an die Sprungantwortfunktion mit der Funktion $y = K$ ablesen.

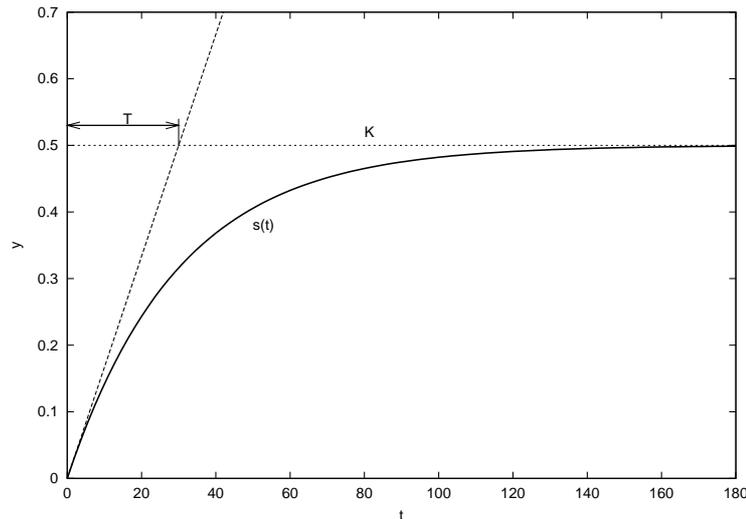


Abb. A.7. Sprungantwort des PT1-Gliedes für eine Zeitkonstante $T = 30$ und einen Verstärkungsfaktor $K = 0.5$

Verzögerungsglied 2. Ordnung: Wird auch PT2-Glied genannt. Der Übergang wird durch die Differentialgleichung

$$y + 2DT \cdot \dot{y} + T^2 \cdot \ddot{y} = k \cdot u$$

charakterisiert. Die komplexe Übertragungsfunktion lautet:

$$G(s) = \frac{k}{1 + 2DT \cdot s + T^2 \cdot s^2} \quad .$$

D heißt Dämpfungsgrad und bestimmt weitgehend das dynamische Verhalten. Für $D \geq 1$ ergibt sich schwingungsfreies Verhalten, während die Sprungantwort für $D < 1$ oszilliert. Das PT2-Glied kann im Bereich $D > 1$ als Serienschaltung zweier PT1-Glieder interpretiert werden. Für die Parameter D und T gilt dann

$$T_1 + T_2 = 2DT \qquad T_1 \cdot T_2 = T^2$$

Verzögerungsglied höherer Ordnung: Wird auch PT n -Glied genannt. Ein Verzögerungsglied höherer Ordnung ergibt sich aus Serienschaltung von PT1- und PT2-Gliedern.

Totzeitglied: Bewirkt, daß die Ausgangsgröße gleich der um ein festes Zeitintervall verspäteten Eingangsgröße ist. Es tritt auf, wenn Signale über bewegte Medien transportiert werden. Der Zusammenhang wird durch die Gleichung

$$y(t) = u(t - T_t)$$

charakterisiert. Die komplexe Übertragungsfunktion lautet: $G(s) = e^{-sT_t}$. Durch ein PT n Glied mit $n \rightarrow \infty$ läßt sich ein Totzeitglied approximieren.

Für die Verschaltung von linearen Elementarkomponenten müssen folgende Rechenregeln berücksichtigt werden. Für die Serienschaltung zweier Übertragungsglieder ergibt sich die komplexe Übertragungsfunktion als Produkt der einzelnen Übertragungsfunktionen.

$$G(s) = G_1(s) \cdot G_2(s) \quad .$$

Für die Parallelschaltung gilt

$$G(s) = G_1(s) \pm G_2(s) \quad ,$$

wobei + für Überlagerung (Verstärkung) und – für Kompensation gilt.

A.4 Bestimmung der Modellparameter

In diesem Abschnitt werden die im weiteren verwendeten Verfahren zur Modellidentifikation vorgestellt. Die Darstellung orientiert sich an [5].

A.4.1 Methode der kleinsten Quadrate

Die Darstellung in den beiden folgenden Abschnitten orientiert sich an den Ausführungen von Åström und Wittenmark [5]. Die Methode der kleinsten Quadrate kann zur Bestimmung von Parametern von Modellen der Form

$$y(i) = \varphi_1(i)\theta_1^0 + \varphi_2(i)\theta_2^0 + \dots + \varphi_n(i)\theta_n^0 = \varphi^T(i)\theta^0 \quad (\text{A.13})$$

eingesetzt werden. Verschiedenste Arten von Modellen lassen sich auf diese Weise darstellen, da $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ bekannte Funktionen sind, die wiederum von anderen Variablen abhängen können. y ist die beobachtete Variable, $\theta_1^0, \theta_2^0, \dots, \theta_n^0$ sind die zu bestimmenden Parameter. Weiterhin sind folgende Abkürzungen eingeführt worden:

$$\varphi^T(i) = [\varphi_1(i) \ \varphi_2(i) \ \dots \ \varphi_n(i)] \quad ,$$

$$\theta^0 = [\theta_1^0 \ \theta_2^0 \ \dots \ \theta_n^0]^T \quad .$$

$\varphi^T(i)$ ist der Vektor aller Meßgrößen bis auf die aktuelle Ausgangsgröße zu einem bestimmten Zeitpunkt. Paare von $y(i)$ und $\varphi(i)$ für $i = 1, 2, \dots, t$ werden durch ein Experiment erhalten. Die Parameter sollen so bestimmt werden, daß die Verlustfunktion

$$V(\theta, t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^t (y(i) - \varphi^T(i)\theta)^2 \quad (\text{A.14})$$

minimiert wird, d.h. die Modellausgangswerte so gut wie möglich mit den gemessenen Ausgangswerten übereinstimmen⁴. Folgende Schreibweise wird eingeführt:

$$\mathbf{Y}(t) = [y(1) \ y(2) \ \dots \ y(t)]^T \quad ,$$

$$\mathbf{E}(t) = [\varepsilon(1) \ \varepsilon(2) \ \dots \ \varepsilon(t)]^T \quad ,$$

$$\mathbf{\Phi}(t) = \begin{bmatrix} \varphi^T(1) \\ \vdots \\ \varphi^T(t) \end{bmatrix} \quad ,$$

⁴Häufig wird die Verlustfunktion auch auf die Anzahl der Datenpunkte normiert

$$P(t) = (\Phi^T(t)\Phi(t))^{-1} = \left(\sum_{i=1}^t \varphi(i)\varphi^T(i) \right)^{-1} . \quad (\text{A.15})$$

Die Residuen $\varepsilon(i)$ sind definiert als die Abweichung zwischen aktueller gemessener und mit Hilfe des Modells berechneter Ausgangsgröße:

$$\varepsilon(i) = y(i) - \hat{y}(i) = y(i) - \varphi^T(i)\theta \quad ,$$

oder kurz

$$\mathbf{E} = \mathbf{Y} - \hat{\mathbf{Y}} = \mathbf{Y} - \Phi\theta \quad . \quad (\text{A.16})$$

Die Verlustfunktion läßt sich dann schreiben als:

$$V(\theta, t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^t \varepsilon^2(i) = \frac{1}{2} \mathbf{E}^T \mathbf{E} = \frac{1}{2} \|\mathbf{E}\|^2 \quad .$$

Das Minimum der Verlustfunktion erhält man durch Berechnung der Nullstelle der ersten Ableitung der Funktion nach den Parametern θ . Folgende minimale Verlustfunktion für die Parameter ergibt sich:

$$\Phi^T \Phi \hat{\theta} = \Phi^T \mathbf{Y} \quad (\text{A.17})$$

Für eine nichtsinguläre Matrix $\Phi^T \Phi$ wird eine eindeutige Lösung erhalten:

$$\hat{\theta} = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T \mathbf{Y} \quad (\text{A.18})$$

die ausgeschrieben lautet:

$$\hat{\theta}(t) = \left(\sum_{i=1}^t \varphi(i)\varphi^T(i) \right)^{-1} \left(\sum_{i=1}^t \varphi(i)y(i) \right) = P(t) \left(\sum_{i=1}^t \varphi(i)y(i) \right) \quad (\text{A.19})$$

Sollen nicht alle Abweichungen $\varepsilon(i)$ gleich gewichtet werden, führt man folgende Verlustfunktion ein:

$$V = \frac{1}{2} \mathbf{E}^T \mathbf{W} \mathbf{E}$$

wobei \mathbf{W} eine Diagonalmatrix mit den Gewichten in der Diagonalen ist. Die Minimierung der Verlustfunktion führt auf die Parameter:

$$\hat{\theta} = (\Phi^T \mathbf{W} \Phi)^{-1} \Phi^T \mathbf{W} \mathbf{Y}$$

Die Verwendung der Methode der kleinsten Quadrate in der hier erläuterten Form erfordert einen hohen Aufwand hinsichtlich Speicherbedarf und Rechenzeit, da zu jedem Zeitschritt das gesamte Wissen über den Prozeß neu ermittelt wird.

A.4.2 Rekursive Methode der kleinsten Quadrate

Bei selbstadaptierenden Reglern werden die Messungen nacheinander in Echtzeit erhalten. Um Rechenzeit und Speicherplatz zu sparen, ist ein rekursiver Algorithmus gesucht, bei dem sich die Parameter $\theta(t)$ aus den zum vorangegangenen Zeitschritt bestimmten Parametern

$\theta(t-1)$ berechnen und somit das erlernte Wissen zum vorigen Zeitschritt erhalten bleibt. Aus der Definition von $P(t)$ in Gleichung (A.15) lässt sich ableiten:

$$\begin{aligned} P^{-1}(t) &= \Phi^T(\mathbf{t})\Phi(\mathbf{t}) = \sum_{i=1}^t \varphi(i)\varphi^T(i) \\ &= \sum_{i=1}^{t-1} \varphi(i)\varphi^T(i) + \varphi(t)\varphi^T(t) = P^{-1}(t-1) + \varphi(t)\varphi^T(t) \quad . \end{aligned} \quad (\text{A.20})$$

Die Parameterbestimmung in Gl. (A.19) lässt sich analog umformen:

$$\hat{\theta}(t) = P(t) \left(\sum_{i=1}^t \varphi(i)y(i) \right) = P(t) \left(\sum_{i=1}^{t-1} \varphi(i)y(i) + \varphi(t)y(t) \right) \quad .$$

Aus den Gleichungen (A.19) und (A.20) folgt

$$\sum_{i=1}^{t-1} \varphi(i)y(i) = P^{-1}(t-1)\hat{\theta}(t-1) = P^{-1}(t)\hat{\theta}(t-1) - \varphi(t)\varphi^T(t)\hat{\theta}(t-1) \quad .$$

Setzt man die letzten beiden Gleichungen ineinander ein, so ergibt sich die Berechnungsvorschrift der rekursiven Parameterbestimmung.

$$\begin{aligned} \hat{\theta}(t) &= \hat{\theta}(t-1) - P(t)\varphi(t)\varphi^T(t)\hat{\theta}(t-1) + P(t)\varphi(t)y(t) \\ &= \hat{\theta}(t-1)P(t)\varphi(t) \left(y(t) - \varphi^T(t)\hat{\theta}(t-1) \right) \\ &= \hat{\theta}(t-1) + K(t)\varepsilon(t) \quad , \end{aligned} \quad (\text{A.21})$$

wobei

$$\begin{aligned} K(t) &= P(t)\varphi(t) \quad , \\ \varepsilon(t) &= y(t) - \varphi^T(t)\hat{\theta}(t-1) \quad . \end{aligned}$$

Das Residuum $\varepsilon(t)$ lässt sich als der Vorhersagefehler zwischen dem mit Hilfe der Parameter vom vorherigen Zeitschritt $\hat{\theta}(t-1)$ berechneten Modellausgang $\hat{y}(t)$ und der gemessenen Größe $y(t)$ interpretieren. Durch einige Umformungen [5] erhält man eine rekursive Berechnungsvorschrift für $K(t)$ und $P(t)$:

$$K(t) = P(t)\varphi(t) = P(t-1)\varphi(t) \left(I + \varphi^T(t)P(t-1)\varphi(t) \right)^{-1} \quad (\text{A.22})$$

$$\begin{aligned} P(t) &= P(t-1) - P(t-1)\varphi(t) \left(I + \varphi^T(t)P(t-1)\varphi(t) \right)^{-1} \varphi^T(t)P(t-1) \\ &= \left(I - K(t)\varphi^T(t) \right) P(t-1) \quad . \end{aligned} \quad (\text{A.23})$$

Für die Wahl der sogenannten Verstärkung $K(t)$ gibt es verschiedene Ansätze. Bei der rekursiven Berechnung nach der Methode der kleinsten Quadrate mit exponentiellem Vergessen wird eine Verlustfunktion der Form:

$$V(\theta, t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^t \lambda^{t-i} (y(i) - \varphi^T(i)\theta)^2 \quad (\text{A.24})$$

minimiert. Dies führt auf folgende rekursive Berechnungsvorschrift für die Parameter:

$$\begin{aligned}\hat{\theta}(t) &= \hat{\theta}(t-1)K(t) \left(y(t) - \varphi^T(t)\hat{\theta}(t-1) \right) \\ K(t) &= P(t)\varphi(t) = P(t-1)\varphi(t) (\lambda I + \varphi^T(t)P(t-1)\varphi(t))^{-1} \\ P(t) &= \frac{(I - K(t)\varphi^T(t)) P(t-1)}{\lambda} .\end{aligned}\tag{A.25}$$

Die rekursive Form der Methode der kleinsten Quadrate mit Vergessensfaktor ist besonders für den Einsatz in selbstadaptierenden Reglern geeignet. Untersuchungen zur Wahl des Vergessensfaktors werden in Abschnitt 3.5.2 vorgestellt.

Anhang B

Daten zu den Testumgebungen

B.1 Der Aufbau der Experimentierhäuser des ISFH in Emmerthal

Allgemeine Daten:

- Geographische Breite: 52°07' nB
- Geographische Länge: 9°22' öL
- Höhe: 90 m üNN
- Ausrichtung Süd, Südhang 20° Neigung.

Die beiden Testhäuser sind spiegelbildlich aufgebaut und durch einen Garagentrakt voneinander getrennt. Der Aufbau wird hier anhand des östlichen Gebäudes, dem sogenannten Experimentierhaus erläutert. Das Gebäude zeichnet sich durch eine kompakte Bauweise, d.h. ein kleines Verhältnis von Gebäudeoberfläche zu -volumen aus. Die Hanglage wird durch eine Split-Level Bauweise ausgenutzt. Abbildung B.1 zeigt eine Schnittzeichnung durch das Experimentierhaus. Die vertikalen Innenwände führen zu einer natürlichen thermischen Zonierung. Diese wird durch die Anordnung der Hauptaufenthaltsräume in der südlichen Zone ausgenutzt. In der nördlichen Zone befinden sich Treppen und Abstellräume, während im mittleren Bereich Räume, in denen sich Personen vergleichsweise nur kurze Zeit aufhalten (Küche, Bad), angeordnet sind. Die Südfensterfläche (Rohbaumaß) macht ca. ein Drittel der Südfassadenfläche aus. Die Häuser sind in Massivbauweise (Kalksandsteinwände, Betondecken) errichtet und verfügen somit über hohe Speicherkapazitäten.

Das Experimentierhaus weist an der Südfassade zusätzlich einen Wintergarten mit 16,7 m² Grundfläche auf. Der Wintergarten ist unbeheizt. Ein direkter Luftaustausch kann über Türen und Fenster der Südräume des Erdgeschosses erfolgen. Beide Gebäude sind an der Südfassade teils mit opaker Dämmung (12 cm Mineralwolle), teils mit transparenten Dämmelementen verschiedener Größe und Effizienz versehen. Da die Elemente nicht Teil der hier vorgestellten Untersuchungen sind, wird auf eine genauere Erläuterung hier verzichtet.

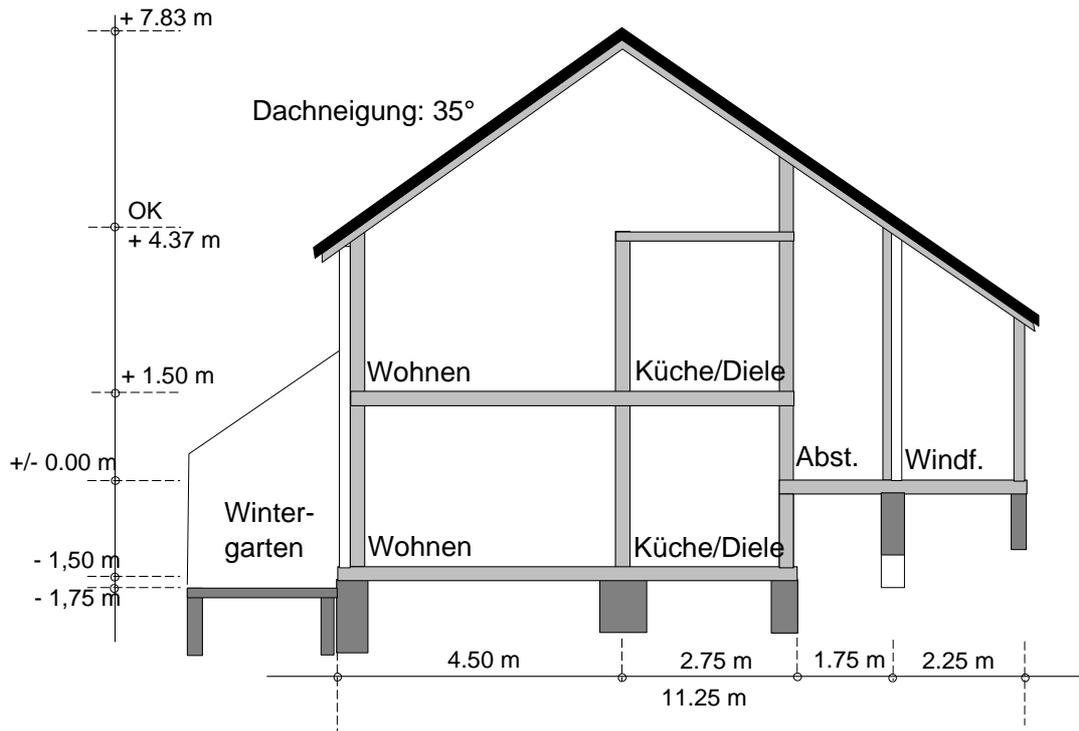


Abb. B.1. Schnittzeichnung des Experimentierhauses des ISFH in Emmerthal

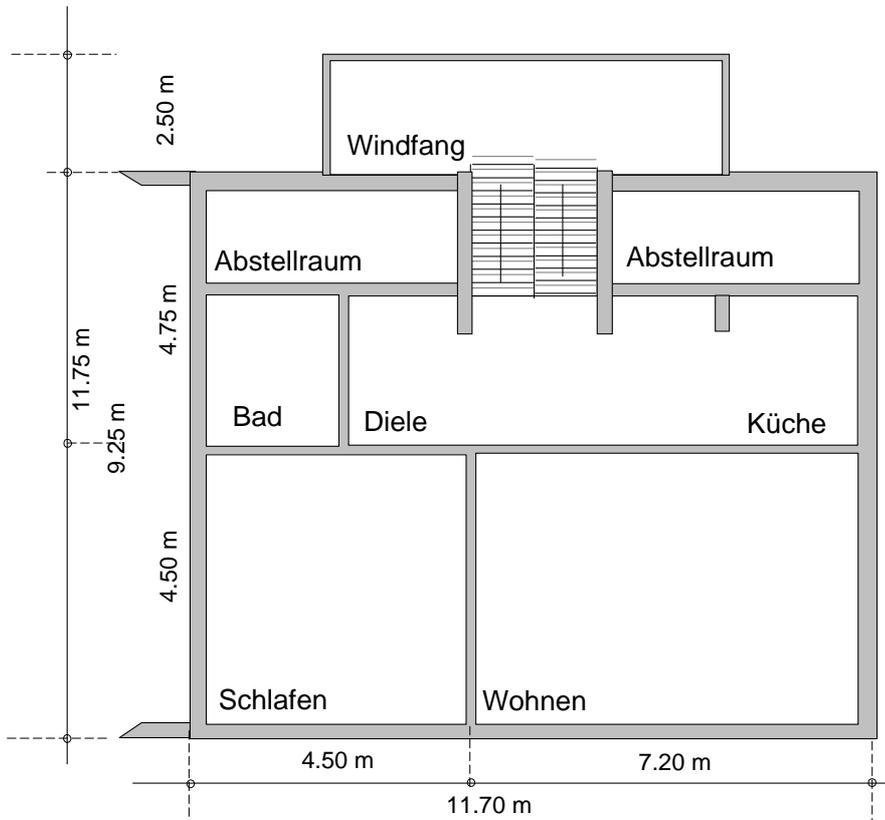


Abb. B.2. Grundriß des Experimentierhauses des ISFH in Emmerthal

Die Gebäude werden als Bürogebäude genutzt. Zwischen 9.00 und 18.00 Uhr werktags kann mit einer Belegung der Südräume von 1-2 Personen und einer entsprechenden Anzahl von eingeschalteten Computern gerechnet werden.

B.2 Die Simulationsgebäudemodelle

B.2.1 Das geometrische Grundmodell

Alle für die Simulation verwendeten Gebäudemodelle gehen von einem unveränderten geometrischen Grundmodell aus. Dieses Grundmodell basiert auf dem realen Aufbau des Experimentierhauses, wie in den Abbildungen B.1 und B.2 gezeigt. Das Gebäude wird vertikal in drei thermische Zonen unterteilt (Abbildung B.3). Zone 1 (Südzone) faßt die südlichen Räume des Erd- und Obergeschosses zusammen. Zone 2 (mittlere Zone) umfaßt Küche, Bad und Diele der beiden Etagen. Die nördliche Zone (Zone 3) setzt sich aus Treppenhaus und Abstellräumen zusammen. Tabelle B.1 faßt wichtige Eigenschaften der drei Zonen zusammen. Der Wintergarten wird nicht simuliert.

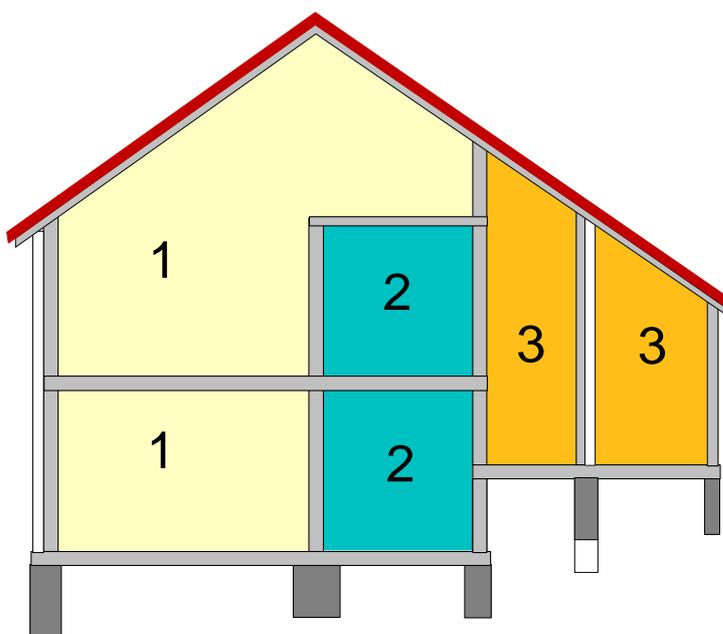


Abb. B.3. Schnittzeichnung des Gebäudemodells mit den thermischen Zonen

Die begrenzenden Wandflächen der drei Zonen sind in den Tabellen B.2 bis B.4 aufgelistet. Die Außenwandflächen verstehen sich exklusive Fensterflächen. Fensterflächen sind im Rohbaumaß angegeben, d.h. der transparente Anteil ist noch um den Rahmenanteil (hier 30%) verringert. Die im realen Gebäude vorhandene Trennwand zum Garagentrakt wurde nicht simuliert, sondern das Gebäude als freistehend betrachtet. An die Außenluft grenzende Wände werden mit einer Orientierung angegeben, ansonsten die angrenzende Zone benannt.

Tabelle B.1. Eigenschaften der drei simulierten Zonen

Zone	Volumen [m ³]	Grund- fläche [m ²]	Räume	Heizung	Raumtemperatur- sollwert nachts/tags [°C]
1	412	55	Wohnen, Schlafen	Heizkörper, vsHR, kHR	18/20
2	134	31	Küche, Bad, Diele	TRNSYS- intern	18/20
3	126	31	Windfang, Treppenhaus, Abstellräume	TRNSYS- intern	5

Tabelle B.2. Begrenzende Wandflächen der Zone 1

Bauteil	Orientie- rung/ Grenze zu	Fläche [m ²]
Außenwand	süd	48,0
Fenster	süd	20,4
Außenwand	ost	44,3
Außenwand	west	44,3
Trennwand	Zone 2	108,4
Trennwand	Zone 3	10,5
Dach	35° süd	73,0
Dach	35° nord	40,6
Boden	Erdreich, $\vartheta = 9^{\circ}C$	56,9
Interne Wand		83,2
Zwischendecke		101,4

Tabelle B.3. Begrenzende Wandflächen der Zone 2

Bauteil	Orientie- rung/ Grenze zu	Fläche [m ²]
Außenwand	ost	17,3
Außenwand	west	11,7
Fenster	west	5,6
Trennwand	Zone 2	63,5
Trennwand	Zone 1	10,5
Wand zu Erdreich	Erdreich, $\vartheta = 9^{\circ}C$	16,5
Boden	Erdreich, $\vartheta = 9^{\circ}C$	31,6
Interne Wand		32,6
Zwischendecke		59,6

Tabelle B.4. Begrenzende Wandflächen der Zone 3

Bauteil	Orientierung/ Grenze zu	Fläche [m ²]
Außenwand	ost	10,5
Windfangwand	ost	5,0
Fenster	ost	2,5
Außenwand	west	10,5
Windfangwand	west	4,0
Fenster	west	3,5
Windfangwand	nord	13,0
Fenster	nord	6,2
Trennwand	Zone 1	10,5
Trennwand	Zone 2	63,5
Boden	Erdreich, $\vartheta = 9^{\circ}C$	44,2
Dach	35° süd	51,5

B.2.2 Basismodell Niedrigenergiehaus in Massivbauweise

Tabelle B.5 listet die Aufbauten der begrenzenden Wandflächen für das Basismodell eines Niedrigenergiehauses in Massivbauweise für den im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen geometrischen Grundaufbau auf. Der äußere Wärmeübergangskoeffizient wurde zu $18 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$, der innere Wärmeübergangskoeffizient zu $3 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$ konstant festgelegt. Der Absorptionskoeffizient der Wände beträgt 0.6. Der Wärmedurchgangskoeffizient der Fensterrahmen beträgt $2.70 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$

Tabelle B.5. Aufbau der begrenzenden Wandflächen für das Niedrigenergiehaus in Massivbauweise

Bauteil	Schicht	Dicke [m]	$\lambda \frac{\text{W}}{\text{mK}}$	$c_p \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$	$\rho \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Widerstand $\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$
Außenwand	Kalkzement	0.015	0.87	1.01	1800.00	
	Kalksandstein	0.240	0.79	0.94	1600.00	
	Luftspalt					0.036
	Spanplatte	0.020	0.13	2.01	700.00	
	Mineralwolle	0.120	0.036	0.90	40.00	
	Fichte	0.020	0.13	2.01	600.00	
Trennwand	Kalkzement	0.015	0.87	1.01	1800.00	
	Kalksandstein	0.240	0.79	0.94	1600.00	
	Kalkzement	0.015	0.87	1.01	1800.00	
Dach	Gipskarton	0.015	0.41	0.83	900.00	
	Luftspalt					0.036
	Mineralwolle	0.180	0.036	0.90	80.00	
Boden	Estrich	0.040	1.2	1.00	2100.00	
	Luftspalt					0.047
	Estrich	0.060	1.4	1.00	2000.00	
	Polystyrol	0.080	0.039	1.25	30.00	
	Beton	0.160	2.1	1.00	2400.00	
Interne Wand	Kalksandstein	0.190	0.99	1.00	1800.00	
Zwischendecke	Estrich	0.040	1.2	1.00	2100.00	
	Luftspalt					0.047
	Estrich	0.060	1.4	1.00	2000.00	
	Polystyrol	0.050	0.039	1.25	30.00	
	Beton	0.160	2.1	1.00	2400.00	
Windfangwand	Fichte	0.020	0.13	2.01	600.00	
	Mineralwolle	0.120	0.036	0.90	40.00	
	Fichte	0.020	0.13	2.01	600.00	
Fenster						0.77

B.2.3 Variationen

Variationen des Gebäudeaufbaus wurden hinsichtlich des Dämmstandards und der thermischen Gebäudekapazität vorgenommen.

Tabelle B.6. Aufbau der begrenzenden Wandflächen für das Gebäudemodell Altbau

Bauteil	Schicht	Dicke [m]	λ $\frac{\text{W}}{\text{mK}}$	c_p $\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$	ρ $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Widerstand $\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$
Außenwand	Kalkzement	0.015	0.87	1.01	1800.00	
	Kalksandstein	0.240	0.79	0.94	1600.00	
	Kalkzement	0.015	0.87	1.01	1800.00	
Trennwand	Kalkzement	0.015	0.87	1.01	1800.00	
	Kalksandstein	0.240	0.79	0.94	1600.00	
	Kalkzement	0.015	0.87	1.01	1800.00	
Dach	Gipskarton	0.015	0.41	0.83	900.00	
	Luftspalt					0.036
	Mineralwolle	0.060	0.036	0.90	40.00	
Boden	Estrich	0.040	1.2	1.00	2100.00	
	Luftspalt					0.047
	Estrich	0.060	1.4	1.00	2000.00	
	Beton	0.160	2.1	1.00	2400.00	
Interne Wand	Kalksandstein	0.190	0.99	1.00	1800.00	
Zwischendecke	Estrich	0.040	1.2	1.00	2100.00	
	Luftspalt					0.047
	Estrich	0.060	1.4	1.00	2000.00	
	Polystyrol	0.050	0.039	1.25	30.00	
	Beton	0.160	2.1	1.00	2400.00	
Windfangwand	Fichte	0.020	0.13	2.01	600.00	
	Mineralwolle	0.060	0.036	0.90	40.00	
	Fichte	0.020	0.13	2.01	600.00	
Fenster						0.36

Tabelle B.7. Aufbau der begrenzenden Wandflächen für das Gebäudemodell nach Wärmeschutzverordnung 1995

Bauteil	Schicht	Dicke [m]	$\lambda \frac{\text{W}}{\text{mK}}$	$c_p \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$	$\rho \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Widerstand $\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$
Außenwand	Kalkzement	0.015	0.87	1.01	1800.00	
	Kalksandstein	0.240	0.79	0.94	1600.00	
	Luftspalt					0.036
	Spanplatte	0.020	0.13	2.01	700.00	
	Mineralwolle	0.080	0.044	0.90	80.00	
	Fichte	0.020	0.13	2.01	600.00	
Trennwand	Kalkzement	0.015	0.87	1.01	1800.00	
	Kalksandstein	0.240	0.79	0.94	1600.00	
	Kalkzement	0.015	0.87	1.01	1800.00	
Dach	Gipskarton	0.015	0.41	0.83	900.00	
	Luftspalt					0.036
	Mineralwolle	0.120	0.036	0.90	40.00	
Boden	Estrich	0.040	1.2	1.00	2100.00	
	Estrich	0.060	1.4	1.00	2000.00	
	Polystyrol	0.080	0.039	1.25	30.00	
	Beton	0.160	2.1	1.00	2400.00	
Interne Wand	Kalksandstein	0.190	0.99	1.00	1800.00	
Zwischendecke	Estrich	0.040	1.2	1.00	2100.00	
	Luftspalt					0.047
	Estrich	0.060	1.4	1.00	2000.00	
	Polystyrol	0.050	0.039	1.25	30.00	
	Beton	0.160	2.1	1.00	2400.00	
Windfangwand	Fichte	0.020	0.13	2.01	600.00	
	Mineralwolle	0.060	0.036	0.90	40.00	
	Fichte	0.020	0.13	2.01	600.00	
Fenster						0.77

Tabelle B.8. Aufbau der begrenzenden Wandflächen für das Passivhausmodell

Bauteil	Schicht	Dicke [m]	$\lambda \frac{\text{W}}{\text{mK}}$	$c_p \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$	$\rho \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Widerstand $\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$
Außenwand	Kalkzement	0.015	0.87	1.01	1800.00	
	Kalksandstein	0.240	0.79	0.94	1600.00	
	Luftspalt					0.036
	Spanplatte	0.020	0.13	2.01	700.00	
	Mineralwolle	0.360	0.036	0.90	40.00	
	Fichte	0.020	0.13	2.01	600.00	
Trennwand	Kalkzement	0.015	0.87	1.01	1800.00	
	Kalksandstein	0.240	0.79	0.94	1600.00	
	Kalkzement	0.015	0.87	1.01	1800.00	
Dach	Gipskarton	0.015	0.41	0.83	900.00	
	Luftspalt					0.036
	Mineralwolle	0.480	0.036	0.90	80.00	
Boden	Estrich	0.040	1.2	1.00	2100.00	
	Luftspalt					0.047
	Estrich	0.060	1.4	1.00	2000.00	
	Mineralwolle	0.300	0.036	0.90	80.00	
	Beton	0.160	2.1	1.00	2400.00	
Interne Wand	Kalksandstein	0.190	0.99	1.00	1800.00	
Zwischendecke	Estrich	0.040	1.2	1.00	2100.00	
	Luftspalt					0.047
	Estrich	0.060	1.4	1.00	2000.00	
	Polystyrol	0.050	0.039	1.25	30.00	
	Beton	0.160	2.1	1.00	2400.00	
Windfangwand	Fichte	0.020	0.13	2.01	600.00	
	Mineralwolle	0.480	0.036	0.90	40.00	
	Fichte	0.020	0.13	2.01	600.00	
Fenster						2.5

Tabelle B.9. Aufbau der begrenzenden Wandflächen für das Niedrigenergiehaus in Mischbauweise, Massivbauteile außen

Bauteil	Schicht	Dicke [m]	$\lambda \frac{\text{W}}{\text{mK}}$	$c_p \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$	$\rho \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Widerstand $\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$
Außenwand	Kalkzement	0.015	0.87	1.01	1800.00	
	Kalksandstein	0.240	0.79	0.94	1600.00	
	Luftspalt					0.036
	Spanplatte	0.020	0.13	2.01	700.00	
	Mineralwolle	0.120	0.036	0.90	40.00	
	Fichte	0.020	0.13	2.01	600.00	
Trennwand	Gipskarton	0.015	0.41	0.83	900.00	
	Luftspalt					0.047
	Gipskarton	0.015	0.41	0.83	900.00	
Dach	Gipskarton	0.015	0.41	0.83	900.00	
	Luftspalt					0.036
	Mineralwolle	0.180	0.036	0.90	80.00	
Boden	Estrich	0.040	1.2	1.00	2100.00	
	Luftspalt					0.047
	Estrich	0.060	1.4	1.00	2000.00	
	Polystyrol	0.080	0.039	1.25	30.00	
	Beton	0.160	2.1	1.00	2400.00	
Interne Wand	Gipskarton	0.015	0.41	0.83	900.00	
	Luftspalt					0.047
	Gipskarton	0.015	0.41	0.83	900.00	
Zwischendecke	Estrich	0.040	1.2	1.00	2100.00	
	Luftspalt					0.047
	Estrich	0.060	1.4	1.00	2000.00	
	Polystyrol	0.050	0.039	1.25	30.00	
	Beton	0.160	2.1	1.00	2400.00	
Windfangwand	Fichte	0.020	0.13	2.01	600.00	
	Mineralwolle	0.120	0.036	0.90	40.00	
	Fichte	0.020	0.13	2.01	600.00	
Fenster						0.77

Tabelle B.10. Aufbau der begrenzenden Wandflächen für das Niedrigenergiehaus in Mischbauweise, Massivbauteile innen

Bauteil	Schicht	Dicke [m]	$\lambda \frac{\text{W}}{\text{mK}}$	$c_p \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$	$\rho \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Widerstand $\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$
Außenwand	Fichte	0.020	0.13	2.01	600.00	
	Spanplatte	0.020	0.13	2.01	700.00	
	Luftspalt					0.036
	Mineralwolle	0.120	0.036	0.90	40.00	
	Fichte	0.040	0.13	2.01	600.00	
Trennwand	Kalkzement	0.015	0.87	1.01	1800.00	
	Kalksandstein	0.240	0.79	0.94	1600.00	
	Kalkzement	0.015	0.87	1.01	1800.00	
Dach	Gipskarton	0.015	0.41	0.83	900.00	
	Luftspalt					0.036
	Mineralwolle	0.180	0.036	0.90	80.00	
Boden	Estrich	0.040	1.2	1.00	2100.00	
	Luftspalt					0.047
	Estrich	0.060	1.4	1.00	2000.00	
	Polystyrol	0.080	0.039	1.25	30.00	
	Beton	0.160	2.1	1.00	2400.00	
Interne Wand	Kalksandstein	0.190	0.99	1.00	1800.00	
Zwischendecke	Estrich	0.040	1.2	1.00	2100.00	
	Luftspalt					0.047
	Estrich	0.060	1.4	1.00	2000.00	
	Polystyrol	0.050	0.039	1.25	30.00	
	Beton	0.160	2.1	1.00	2400.00	
Windfangwand	Fichte	0.020	0.13	2.01	600.00	
	Mineralwolle	0.120	0.036	0.90	40.00	
	Fichte	0.020	0.13	2.01	600.00	
Fenster						0.77

Tabelle B.11. Aufbau der begrenzenden Wandflächen für das Niedrigenergiehaus in Leichtbauweise

Bauteil	Schicht	Dicke [m]	$\lambda \frac{\text{W}}{\text{mK}}$	$c_p \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$	$\rho \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Widerstand $\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$
Außenwand	Fichte	0.020	0.13	2.01	600.00	
	Spanplatte	0.020	0.13	2.01	700.00	
	Luftspalt					0.036
	Mineralwolle	0.120	0.036	0.90	40.00	
	Fichte	0.040	0.13	2.01	600.00	
Trennwand	Gipskarton	0.015	0.41	0.83	900.00	
	Luftspalt					0.047
	Gipskarton	0.015	0.41	0.83	900.00	
Dach	Gipskarton	0.015	0.41	0.83	900.00	
	Luftspalt					0.036
	Mineralwolle	0.180	0.036	0.90	80.00	
Boden	Estrich	0.040	1.2	1.00	2100.00	
	Luftspalt					0.047
	Estrich	0.060	1.4	1.00	2000.00	
	Polystyrol	0.080	0.039	1.25	30.00	
	Beton	0.160	2.1	1.00	2400.00	
Interne Wand	Gipskarton	0.015	0.41	0.83	900.00	
	Luftspalt					0.047
	Gipskarton	0.015	0.41	0.83	900.00	
Zwischendecke	Estrich	0.030	0.47	1.00	1400.00	
	Polyurethan	0.040	0.03	2.09	40.00	
	Spanplatte	0.020	0.13	2.01	700.00	
	Luftspalt					0.047
	Spanplatte	0.020	0.13	2.01	700.00	
Windfangwand	Fichte	0.020	0.13	2.01	600.00	
	Mineralwolle	0.120	0.036	0.90	40.00	
	Fichte	0.020	0.13	2.01	600.00	
Fenster						0.77

Literaturverzeichnis

- [1] Argiriou A., I. Bellas-Velidis, and C. Balaras. Development of a neural network heating controller for solar buildings (submitted). *Neural Networks*, 1999.
- [2] Matthias Altenhoff. Entwicklung und Erprobung einer klimageführten Heizungsregelung. Diplomarbeit, Universität Hannover, Institut für Thermodynamik, Hannover, April 1998.
- [3] H.-O. Arend and D. Pfannstiel. Heizungsregelung mit Fuzzy-Logic, Erfahrungen bei der Entwicklung. *IKZ-Haustechnik*, 6 1995.
- [4] H.-O. Arend and D. Pfannstiel. Gebäude mit niedrigem Wärmebedarf, Das Zusammenspiel von intelligenter Heizungstechnik und moderner Haustechnik. *IKZ-Haustechnik*, page 70 ff., 8 1997.
- [5] K.J. Åström and B. Wittenmark. *Adaptive Control*. Addison Wesley, Reading, Massachusetts, 2. edition, 1995.
- [6] H. D. Baehr and K. Stephan. *Wärme- und Stoffübertragung*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1994.
- [7] I. Bellas-Velidis, A. Argiriou, C. Balaras, and S. Kontoyanidis. Predicting energy demand of single solar houses using artificial neural networks. In *Proceedings of the 6th European Congress on Intelligent Technologies & Soft Computing EUFIT'98, Aachen, Germany*, volume 2, pages 873–877, September 7-10 1998.
- [8] I. Brauns. BC-2000 System. Herstellerprospekt.
- [9] Bundesgesetzblatt. Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden (Wärmeschutzverordnung-WärmeschutzV) vom 16. August 1994. Jahrgang 1994, Teil I, Bonn.
- [10] Bundesgesetzblatt. Verordnung über energiesparende Anforderungen an heizungstechnische Anlagen und Warmwasseranlagen (Heizungsanlagen-Verordnung- HeizAnIV. Jahrgang 1998, Teil I Nr. 25, Bonn, 8. Mai 1998.
- [11] Bundesministerium für Verkehr Bau- und Wohnungswesen BMVBW gemeinsam mit dem Bundesministerium für Wirtschaft BMWi Bonn. Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden. <http://www.gre-online.de/enev/bmvbw>, 28. Juni 1999.
- [12] E.F. Camacho and C. Bordons. *Model Predictive Control*. Springer Verlag, London, 1999.

- [13] T. Chen and A. K. Athienitis. Ambient temperature and solar radiation prediction for predictive control of HVAC systems and a methodology for optimal building heating dynamic operation. *ASHRAE Transactions: Research*, pages 26–36.
- [14] D. Christoffers and D. Kang. Performance analysis of passive solar buildings. validation of a frequency domain approach. In *ISES Solar World Congress Proceedings*, 1993.
- [15] D. Clarke. *Advances in Model-Based Predictive Control*. Oxford University Press, Oxford, 1994.
- [16] D.W. Clarke, C. Mohtadi, and P.S. Tuffs. Generalized predictive control - part i. *Automatica*, 23(2):137–148, 1987.
- [17] Costronic Engineering S. A. Die neue, ökologische, vorhersehende Heizungs-Steuerung. Firmenprospekt.
- [18] Costronic Engineering S. A. Régulateur prévisionnel de chauffage. Firmenprospekt.
- [19] P.S. Curtiss, J.F. Kreider, and M.J. Brandemuehl. Adaptive control of HVAC processes using predictive neural networks. *ASHRAE Transactions: Research*, 99(1):496–504, 1993.
- [20] Deutsches Institut für Normung e.V. DIN 1946, Teil 2, Raumluftechnik, Gesundheitstechnische Anforderungen (VDI-Lüftungsregeln). Beuth Verlag Berlin, Januar 1994.
- [21] Deutsches Institut für Normung e.V. DIN 3841, Teil 2, Heizkörperventile: Thermostatische Heizkörperventile, Anforderungen und Prüfung. Beuth Verlag Berlin, 1986.
- [22] Deutsches Institut für Normung e.V. DIN 4108, Teil 6, Berechnung des Jahresheizwärmebedarfs von Gebäuden. Beuth Verlag Berlin, 1999.
- [23] Deutsches Institut für Normung e.V. DIN 4701, Regeln für die Berechnung des Wärmebedarfs von Gebäuden. Beuth Verlag Berlin, 1999.
- [24] Deutsches Institut für Normung e.V. DIN 4702, Teil 1, Heizkessel, Begriffe, Heiztechnische Anforderungen, Prüfung, Kennzeichnung. Beuth Verlag Berlin, 1985.
- [25] Deutsches Institut für Normung e.V. DIN 4704, Prüfung von Raumheizkörpern. Beuth Verlag Berlin, 1976.
- [26] Deutsches Institut für Normung e.V. DIN EN 12098-1, Mess-, Steuer- und Regeleinrichtungen für Heizungen, Teil 1: Witterungsgeführte Regeleinrichtungen für Warmwasserheizungen. Beuth Verlag Berlin, September 1996.
- [27] Deutsches Institut für Normung e.V. DIN EN 832, Berechnung des Heizenergiebedarfs, Europäische Norm. Beuth Verlag Berlin, 1998.
- [28] Deutsches Institut für Normung e.V. DIN EN ISO 13786, Wärmetechnisches Verhalten von Bauteilen, Dynamisch-thermische Kenngrößen. Beuth Verlag Berlin, Dezember 1999.
- [29] John. A. Duffie and William A. Beckman. *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 2 edition, 1991.

- [30] W. Eckert, J. Heidrich, and U. Knopf. Fuzzy-logic beim Einsatz komplexer solarthermischer Gebäudesysteme. *IKZ-Haustechnik*, page 205 ff., 6 1997.
- [31] Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. NEUROBAT: Système biomimétique de gestion énergétique du bâtiment. (EPFL), Laboratory of Solar Energy and Building Physics (LESO), Projektinformation, <http://research.epfl.ch/research>.
- [32] G. Eisenmann. Ist das Heizsystem im künftigen Niedrigenergiehaus problematisch? *Bauphysik, Verlag Ernst & Sohn*, 20(4):115–121, 1998.
- [33] Harald Erker. *Vorausschauende Regelung von Heizungsanlagen basierend auf einer lokalen Wettervorhersage*. Doktorarbeit, Universität Kaiserslautern, Fachbereich Elektrotechnik, Mai 1992.
- [34] P.O. Fanger. Thermal comfort analysis and application in environmental design, 1972. Mac Graw Hill.
- [35] G. Favier and D. Dubois. A review of k-step-ahead predictors. *Automatica*, 26(1):75–84, 1990.
- [36] W. Feist. Vom Niedrigenergiehaus zum Passivhaus — Erfahrungen mit Gebäuden ohne Heizung. <http://www.lpb.bwue.de/publikat/forum6/forum6m.htm>.
- [37] W. Feist. *Thermische Gebäudesimulation, Kritische Prüfung unterschiedlicher Modellsätze*. Verlag C.F. Müller, Heidelberg, 1994.
- [38] O. Föllinger. *Regelungstechnik*. Hüthig Buch Verlag, Heidelberg, 7. Auflage, 1992.
- [39] O. Föllinger. *Optimale Regelung und Steuerung*. R. Oldenbourg Verlag, München, 1994.
- [40] T. Frank. Instationärer Wärmedurchgang nach der Response-Faktoren-Methode. EMPA Nr. 106436, Eidgenössische Material- und Prüfanstalt, Abteilung Bauphysik, Dübendorf, 1988.
- [41] N. Fruck. Entwicklung und Aufbau eines Sensors für von der Außentemperatur und der solaren Einstrahlung geführte Heizungsregelungen, 1996. Große konstruktive Studienarbeit, Universität Hannover, Institut für Kältetechnik und angewandte Wärmetechnik.
- [42] Bundesministerium für Wirtschaft. Erneuerbare Energien verstärkt nutzen. Bonn, Mai 1995.
- [43] B. Girod, R. Rabenstein, and A. Stenger. *Einführung in die Systemtheorie*. B. G. Teubner, Stuttgart, 1. Auflage, 1997.
- [44] P.-Y. Glorennec. Fuzzy modeling of building. In *Proceedings of the 6th European Congress on Intelligent Technologies & Soft Computing EUFIT'98, Aachen, Germany*, volume 2, pages 901–904, September 7-10 1998.
- [45] A. Goetzberger and V. Wittwer. *Sonnenenergie: physikalische Grundlagen und thermische Anwendungen*. B. G. Teubner, Stuttgart, 1993.
- [46] Michael Hartmann. Entwicklungsstand der thermostatischen Einzelraumregelung. *Heizung Lüftung/Klima Haustechnik*, 51(5):30–31, Mai 2000.

- [47] F. Hell. *Rationelle Heiztechnik, Energetik und Energiewirtschaft*. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1989.
- [48] Ingenieurbüro Mencke und Tegtmeier. Produktkatalog.
- [49] Institut Wohnen und Umwelt. Energieeinsparung im Gebäudebestand — Anforderungen, technische und wirtschaftliche Potentiale. <http://www.iwu.de/>.
- [50] P. P. Kanjilal. *Adaptive prediction and predictive control*. Peter Peregrinus Ltd., London, 1995.
- [51] Kipp and Zonen. Instruction manual pyranometer CM 11. Delft, Herstellerbeschreibung.
- [52] S. A. Klein, W. A. Beckman, et al. *TRNSYS, A transient system simulation program*. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, WI 53706 USA, January 1994.
- [53] M. Klingner, G. Knabe, G. Lauckner, H. Werdin, and G. Billerbeck. Bedarfsgerechte Regelung des Raumluftzustanden in Wohngebäuden - Teil 1. *Heizung Lüftung/Klima Haustechnik*, 50(1):46–55, 1999.
- [54] M. Klingner, G. Knabe, G. Lauckner, H. Werdin, and G. Billerbeck. Bedarfsgerechte Regelung des Raumluftzustanden in Wohngebäuden - Teil 2. *Heizung Lüftung/Klima Haustechnik*, 50(2):26–33, 1999.
- [55] M. Kummert. Description of the shell proposed for controllers exchange. Working document of FUL, Fondation Universitaire Luxembourgeoise (FUL), 185, Avenue de Longwy, B-6700 Arlon, Belgium, 1999.
- [56] M. Kummert and Ph. André. Development and test of modern control techniques applied to solar buildings, Work performed by FUL. Final report, Fondation Universitaire Luxembourgeoise (FUL), 185, Avenue de Longwy, B-6700 Arlon, Belgium, February 2000.
- [57] M. Kummert, Ph. André, and J. Nicolas. Optimal thermal zone controller for integration within a building energy management system. In *CLIMA '2000, Brussels*, 1997.
- [58] Lennart Ljung. *System Identification: Theory for the user*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1987.
- [59] Lennart Ljung. *MATLAB System identification toolbox User's Guide*. The MathWorks Inc., 24 Prime Park Way, Natick, MA 01760, August 1995.
- [60] H. Melgaard, H. Madsen, and B. Nielsen. Identification of the heat dynamics of greenhouses: a course on using CTLSM. In *Workshop on Application of System Identification in Energy Savings in Buildings*, pages 61–71. Joint research centre of the Commission of the European Communities, 1993.
- [61] M. Morari and N. L. Ricker. *Model Predictive Control Toolbox for Use with MATLAB*. The MathWorks Inc., 24 Prime Park Way, Natick, MA 01760, April 1995.

- [62] S. Nowotny and H. E. Feustel. *Lüftungs- und klimatechnische Gebäudeausrüstung*. Bauverlag, Wiesbaden, 1996.
- [63] A. M. Nygård Ferguson. *Predictive thermal control of building systems*. PhD thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1990. These No. 876.
- [64] H. Palsson, O. P. Madsen and H.T. Søgaaard. Application of predictive control in district heating systems. *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, 207:157–163, 1993.
- [65] D. Pfannstiel and H.-O. Arend. Entwicklungsstand der Regelungstechnik, Übersicht und Trends von der ISH '99, Teil 1. *Heizung Lüftung/Klima Haustechnik*, 50(8):23–27, August 1999.
- [66] P. Profos. *Einführung in die Systemdynamik*. B.G. Teubner, Stuttgart, 1982.
- [67] Raab Karcher Energieservice. SENSONIC. Herstellerprospekt.
- [68] Recknagel, Sprenger, and Hönnmann. *Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik*. R. Oldenbourg Verlag, München, 66. Auflage, 1992.
- [69] K. Reinisch. *Analyse und Synthese kontinuierlicher Steuerungssysteme*. Verlag Technik, Berlin, 1. Auflage, 1979.
- [70] Rheinisch Westfälische Elektrizitätswerke. Energiesparen im Haushalt. <http://www.rwe.com>.
- [71] H. Rietschel and H. Esdorn. *Raumklimatechnik*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 16. Auflage, 1994.
- [72] Klaus Rohlfss. Modellierung des thermischen Verhaltens komplexer Gebäude und Untersuchungen zum Potential prädiktiver Regelung im thermischen Bereich. Diplomarbeit, Universität Freiburg, Fakultät für Physik, Freiburg, Januar 1997.
- [73] J. M. M. Sánchez and J. Rodellar. *Adaptive Predictive Control, From the concepts to plant optimization*. Prentice Hall, London, 1996.
- [74] A. Schwab, K. Babetzki, E. Pützer, and F.D. Heidt. Energetische Diagnose von Gebäuden. In *VDI-Fortschrittberichte, Statusseminar Niedrigenergie- und Solar-Architektur*, volume 6, pages 12–21, November 1994.
- [75] D.E. Seborg, T.F. Edgar, and D.A. Mellichamp. *Process Dynamics and Control*. Wiley & Sons, New York, 1989.
- [76] T. Söderström. System identification i-iii. In *Workshop on Application of System Identification in Energy Savings in Buildings, Joint Research Centre of the Commission of the European Communities*, pages 123–185, October 1993.
- [77] R. Soeterboek. *Predictive Control, A unified approach*. Prentice Hall, New York, 1992.
- [78] Holger Stadtmann. Entwicklung einer vorausschauenden Verschattungsregelung für eine transparent gedämmte Solarwand. Diplomarbeit, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, Oktober 1995.

- [79] Rolf Unbehauen. *Systemtheorie*. R. Oldenbourg Verlag, München, 7. Auflage, 1997.
- [80] G. van der Linden and D. van Dijk. Extracts from: MRQT user guide, manual for MRQT and the package MRQT/PASTA. In *Workshop on Application of System Identification in Energy Savings in Buildings*, pages 3–39. Joint research centre of the Commission of the European Communities, 1993.
- [81] J. van der Maas and E. Maldonado. A new thermal inertia model based on effusivity. *Int. J. of Solar Energy*, 19:131–160, 1997.
- [82] D. van Dijk and G. van der Linden. Parameter identification applied on PASSYS test at TNO: light weight reference wall. In *Workshop on Application of System Identification in Energy Savings in Buildings*, pages 211–225. Joint research centre of the Commission of the European Communities, 1993.
- [83] Verein Deutscher Ingenieure. VDI-Wärmeatlas. VDI Verlag Düsseldorf, 1994.
- [84] C. von Altrock and H.-O. Arend. Adaptive fuzzy control applied to home heating system. *Fuzzy Sets and Systems*, 61:29–35, 1994.
- [85] D. Weber and M. Nau. *Elektrische Temperaturmessung*. M.K.Juchheim, D-36035 Fulda, 6. Auflage, 1991.
- [86] R. C. Winn and C. B. Winn. Optimal control of auxiliary heating of passive-solar-heated buildings. *Solar Energy*, 35(5):419–427, 1985.
- [87] Christof Wittwer. *ColSim - Simulation von Regelungssystemen in aktiven solarthermischen Anlagen*. Doktorarbeit, Universität Karlsruhe, Fakultät für Architektur, 1999.

Wissenschaftlicher Werdegang

Name: Ute Thron
Geburtsname: Schramm
Geburtsort: Karl-Marx-Stadt (heute Chemnitz)
Familienstand: verheiratet

1975 - 1985	Polytechnische Oberschule Burg, Abschluß: Mittlere Reife
1985 - 1987	Erweiterte Oberschule Burg, Allgemeine Hochschulreife
1987 - 1993	Studium an der Technischen Universität Magdeburg, Fachrichtung Physik, Abschluß: Diplomphysikerin
Sept. 1993 - Nov. 1995	Aufbaustudiengang „Europäisches Diplom in Umweltwissenschaften“ an der Fondation Universitaire Luxembourgeoise in Arlon/ Belgien
April 1994 - Nov. 1995	Forschungsarbeit am Institut für Solarenergieforschung GmbH in Hameln/ Emmerthal
seit Nov. 1995	Wissenschaftliche Angestellte am Institut für Solarenergieforschung GmbH in Hameln/ Emmerthal

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all jenen danken, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt und auf dem Weg zum Doktorhut begleitet haben. Mein besonderer Dank gilt:

Meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. habil. Stefan Kabelac vom Institut für Thermodynamik der Universität Hannover für die hervorragende fachliche, methodische und betreuende Begleitung, die weiterbringenden Diskussionen, die Akzeptanz meiner praxisorientierten Herangehensweise und das angenehme Miteinander.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Manfred Gietzelt vom Institut für Energietechnik der Universität Hannover für die zielorientierte Betreuung und die hilfreiche Unterstützung.

Dr. Dirk Christoffers für die Projektidee, die Themenstellung und die Betreuung am Institut für Solarenergieforschung GmbH Hameln/ Emmerthal.

Der Europäischen Kommission als Geldgeber des Forschungsprojekts, im Rahmen dessen Teile der Arbeit finanziert wurden.

Dem Institut für Solarenergieforschung GmbH Hameln/ Emmerthal für die Möglichkeit der Durchführung der Forschungsarbeiten, die Zurverfügungstellung der Infrastruktur und die Finanzierung meiner Stelle außerhalb der Projektlaufzeit.

Meinem Kollegen Juri Neidlin für die programmiertechnische Umsetzung von Datenerfassung und Auswertung sowie die Hilfe bei der Übersetzung des MATLAB-Algorithmus in die Sprache C.

Meinen Kollegen Barbara Jacobi und Gerd Schiewe für die jederzeit bereitwillige Unterstützung bei der Präsentation meiner Arbeiten und der technischen Realisierung.

Michael Kummert für die Programmierung und Dokumentation der im Rahmen der Arbeit intensiv genutzten MATLAB-TRNSYS-Schnittstelle.

Den Industriepartnern im Forschungsprojekt Herrn Horst Zacharias und Herrn Ingo Brauns für die fruchtbare Zusammenarbeit bei der Implementierung des Algorithmus in einen Microcontroller.

Meinen Kollegen am ISFH für die gute Arbeitsatmosphäre, besonders Gunter Rockendorf und Prof. Dr. Konrad R. Schreitmüller für das mühevollen Korrekturlesen sowie Stefan Janßen für viele Tips zum Arbeiten mit TRNSYS.

Meinen Diplomanden, Studienarbeitern und Praktikanten: Nicolai Fruck, Philipp Kneser, Michael Tödter, Christiane Kreye, Matthias Altenhoff, Stefan Swiderek, Ralf Blachnik.

Meiner Mutter Helga Schramm, die mich jederzeit gefördert und unterstützt hat.

Meinem Ehemann Mario Thron für viele fruchtbare Diskussionen, Unterstützung beim Einstieg in das fremde Fachgebiet, Hilfe bei der Auswertung der Daten und vor allem für das Mutmachen und das Ertragen jahrelanger Einbußen im Familienleben.