

**Modellbasierte Prädiktive Regelung komplexer
gebäudetechnischer Anlagen zur Optimierung der
Energieeffizienz und des Komforts**

Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Svenne Freund

aus Hamburg

2023

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Gerhard Schmitz
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Gerwald Lichtenberg
Prüfungsvorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Thorsten A. Kern

Tag der mündlichen Prüfung: 29.09.2022

Autor: <https://orcid.org/0000-0003-1716-8136>
DOI: <https://doi.org/10.15480/882.5018>
Handle: <http://hdl.handle.net/11420/15049>
URN: <urn:nbn:de:gbv:830-882.0214727>

Creative Commons Lizenzvertrag

Der Text steht, soweit nicht anders gekennzeichnet, unter der Creative-Commons-Lizenz Namensnennung 4.0 (CC BY 4.0). Das bedeutet, dass er vervielfältigt, verbreitet und öffentlich zugänglich gemacht werden darf, auch kommerziell, sofern dabei stets der Urheber, die Quelle des Textes und o. g. Lizenz genannt werden. Die genaue Formulierung der Lizenz kann unter <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode.de> aufgerufen werden.

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herr Prof. Dr.-Ing. Gerhard Schmitz, der mir viel Vertrauen entgegenbrachte und mir große Freiheiten gelassen hat, mich mit meinen eigenen Ideen und eigenem Fokus in das Forschungsthema zu vertiefen. Seine große Begeisterungsfähigkeit und der tolle menschliche Umgang haben mich während der gesamten Zeit immer wieder motiviert. Des Weiteren möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerwald Lichtenberg für die Anfertigung des Zweitgutachtens herzlich danken. Seine fachlichen Anregungen zu dieser Arbeit haben mir sehr geholfen. Herrn Prof. Dr.-Ing. Thorsten A. Kern danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Bei den Mitarbeitern der Behörde für Stadtentwicklung und Wohnen, allen voran Herrn Lambert Wiegand und Herrn Harald Lenuweit, möchte ich mich dafür bedanken, dass ich das Gebäude und die Messdaten für meine Forschungszwecke nutzen durfte.

Bei allen Kolleginnen und Kollegen möchte ich mich für die wunderbare Zeit am Institut bedanken, zu der jede und jeder durch interessante Diskussionen über fachliche Themen oder anderen Dingen des Lebens einen tollen Beitrag geleistet hat. Die gemeinsamen Aktivitäten während der Pausen oder nach Feierabend waren stets eine willkommene Abwechslung vom Büroalltag.

Zum Forschungsprojekt haben zahlreiche Studierende durch ihre Abschlussarbeit oder als wissenschaftliche Hilfskräfte beigetragen. Für ihr Engagement, ihre Ideen und ihr Feedback möchte ich mich bedanken.

Bei meiner Familie und meinen Freunden möchte ich mich für die Unterstützung und die schönen gemeinsamen Erlebnisse außerhalb des Büroalltags in all der Zeit von ganzem Herzen bedanken, besonders bei Inga Reinwardt und Dana Leithäuser. Zu guter Letzt bedanke ich mich bei meinen Eltern, die mich auf diesem Weg begleitet haben und in jeglicher Form unterstützt haben.

Hamburg, März 2023

Zusammenfassung

Der Gebäudesektor ist in Deutschland für etwa ein Viertel der CO₂-Emissionen verantwortlich. Die Transformation hin zu einem umweltfreundlichen und energieeffizienten Gebäudebestand ist damit ein wesentlicher Baustein für den Klimaschutz. Neben energetischen Sanierungsmaßnahmen stellen hard- oder softwaretechnische Maßnahmen an Steuerungs- und Regelungssystemen gebäudetechnischer Anlagen einen effektiven Ansatz dar, mit dem erhebliche Energieeinsparung und eine Verbesserung des Nutzerkomforts in Gebäuden erzielt werden können. In dieser Arbeit wird eine Modellbasierte Prädiktive Regelungsstrategie entwickelt und in einem großen Verwaltungsgebäude implementiert mit dem Ziel, den thermischen Komfort und die Energieeffizienz des Gebäudes zu optimieren.

Im Kern dieser Regelungsstrategie stehen Simulationsmodelle, die das thermische und dynamische Verhalten von einzelnen Referenzzonen im Gebäude beschreiben. Für die Modellierung wird ein hybrider Grey-Box-Modellierungsansatz verwendet, der eine vereinfachte physikalisch-basierte Modellstruktur mit einem Parameteridentifikationsverfahren unter Verwendung von Messdaten aus dem realen Gebäudebetrieb kombiniert. Mittels einer globalen Sensitivitätsanalyse werden zuvor die relevantesten Modellparameter identifiziert, um so eine Überanpassung der Parameter zu verhindern. Mithilfe dieser Methode werden Simulationsmodelle erstellt, die eine hohe Genauigkeit und Übertragbarkeit sowie eine geringe Simulationszeit aufweisen, sodass diese als Regler-Prozessmodelle zur Lösung eines Online-Optimierungsproblems geeignet sind.

Die in dieser Arbeit entwickelte Regelungsstrategie wird anschließend in das Gebäudeautomationssystem eines großen Verwaltungsgebäudes integriert und die Performance in zwei Heizperioden mit der bisherigen heizkurvenbasierten Steuerungsstrategie verglichen. Dabei übernimmt der Regler die Vorlauftemperaturregelung und Pumpensteuerung von Heizkreisen der vorhandenen Thermoaktiven Decken. Im Vergleich zur bisherigen herkömmlichen Steuerungsstrategie kann in den Untersuchungszeiträumen im Monatsmittel eine Einsparung an Heizenergie im Bereich von 8% bis 22% messtechnisch nachgewiesen werden. Es zeigt sich, dass die Regler-Performance dabei abhängig von den vorherrschenden Witterungsverhältnissen ist. Besonders in Übergangsmonaten wie April ist die Regelungsstrategie überlegen und es können Heizenergieeinsparungen von bis 75% erzielt werden. Auch hinsichtlich des thermischen Komforts kann eine Verbesserung im Vergleich zu den vorangegangenen Betriebsjahren nachgewiesen werden. In den Referenzzonen wird ein deutlich höherer Anteil an Raumluftzuständen innerhalb der Komfortkategorie I nach DIN EN 15251 erreicht. Durch den zusätzlichen Einsatz von Temperatur/Feuchte-Datenlogger in einer Vielzahl von Büroräumen kann zudem gezeigt werden, dass die Zielvorgaben an das thermische Komfortniveau im gesamten Gebäude durch die Regelungsstrategie eingehalten wird.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	iv
Tabellenverzeichnis	vi
Nomenklatur	vii
Formelzeichen	vii
Indizes	x
Abkürzungen	xii
1 Einleitung	1
1.1 Ziele der Arbeit	2
1.2 Struktur der Arbeit	3
2 Übersicht und Anforderungen der Gebäuderegelung	4
2.1 Grundlegende Anforderung	4
2.2 Thermischer Komfort	5
2.2.1 Bewertungskriterien	6
2.2.2 Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit	8
2.3 Regelbasierte Steuerung	9
2.4 Modellbasierte Prädiktive Regelung	9
2.5 Stand der Technik	15
2.5.1 Simulationsbasierte MPC-Studien	15
2.5.2 Experimentelle MPC-Studien	16
3 Demonstrationsgebäude	19
3.1 Gebäudekonzept	19
3.2 Energiekonzept	20
3.3 Messtechnik und Datenerfassung	24
4 Modellierung des Gebäudes	27
4.1 Thermodynamische Grundlagen	27
4.1.1 Der 1. Hauptsatz der Thermodynamik	27
4.1.2 Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik	28
4.1.3 Wärmeübertragung	28
4.2 Modellierung der Referenzzonen	32
4.2.1 Modellierungsansatz	34

4.2.2	Thermisches Ersatzschaltbild	37
4.2.3	Modellierung der TAD	39
4.2.4	Zonenmodell	41
4.3	Parameteridentifikation	45
4.3.1	Sensitivitätsanalyse	52
4.3.2	Einfluss der Modellordnung	55
4.3.3	Einfluss der Anzahl freier Parameter	57
4.3.4	Einfluss der Länge des Identifikationsdatensatzes	58
4.4	Fazit	59
5	Entwicklung einer modellbasierten prädiktiven Regelungsstrategie	61
5.1	Grundlegende Konfiguration des MPC-Reglers	61
5.2	Kostenfunktion	64
5.2.1	Energiekosten	65
5.2.2	Unbehaglichkeitskosten	66
5.2.3	Kosten der Steuergrößenänderung	66
5.2.4	Unterschiede zwischen Heiz- und Kühlobetrieb	67
5.3	Vorhersage der Störgrößen	70
5.3.1	Wettervorhersage	71
5.3.2	Interne Wärmegewinne	71
5.3.3	Nicht-messbare Störgrößen	72
5.4	Zustandsschätzung	73
5.5	Technische Umsetzung im Gebäude	75
6	Simulation und experimentelle Untersuchung	78
6.1	Reglerentwurf und Simulation	78
6.1.1	Heizbetrieb	79
6.1.2	Kühlobetrieb	88
6.1.3	Zusammenfassung der Simulationsergebnisse	90
6.2	Experimentelle Untersuchungsergebnisse	91
6.2.1	Methodisches Vorgehen	92
6.2.2	Untersuchungszeitraum 1	95
6.2.3	Untersuchungszeitraum 2	105
6.2.4	Ausweitung der MPC-Regelung auf das Gesamtgebäude	115
6.2.5	Zusammenfassung der experimentellen Untersuchungsergebnisse	116
7	Zusammenfassung und Ausblick	118

A	Modellierung des Gebäudes	120
A.1	TAD-Modell	120
A.1.1	EMPA-Modell nach [57]	121
A.1.2	Vereinfachtes TAD-Modell	122
A.2	Zonenmodell	122
B	Entwicklung einer modellbasierten prädiktiven Regelungsstrategie	126
B.1	Verlauf der Belegungsprofile	126
C	Simulation und experimentelle Untersuchung	127
C.1	Simulation des Heizbetriebs	127
C.2	Simulation des Kühlbetriebs	128
C.3	Experimenteller Untersuchungszeitraum 1	129
C.4	Experimenteller Untersuchungszeitraum 2	130
	Literaturverzeichnis	131

Abbildungsverzeichnis

2.1	Modell des Energiebedarfs und der Energieversorgung nach DIN EN 15232 . . .	5
2.2	Adaptives Komfortmodell nach DIN EN 15251	7
2.3	Funktionsweise von Modellbasierter Prädiktiver Regelung	10
3.1	Schematische Darstellung und äußeres Erscheinungsbild des Gebäudes	20
3.2	Schematische Darstellung des Wärmeversorgungssystems.	21
3.3	Energie- und Raumkonzept des Gebäudes	22
3.4	Heizkurve, Zeitplan Heizen, Kühlkurve und Zeitplan Kühlen	23
3.5	Lage und Orientierung der Referenzbüro Räume im Gebäude.	26
4.1	Schematische Darstellung einer Referenzzone	33
4.2	Beispielhafte Darstellung eines RC-Modells 1. Ordnung.	38
4.3	Schematische Darstellung der Thermoaktiven Decke	39
4.4	Überführung des EMPA-Modells in ein R2C1-Modell	40
4.5	Schematische Darstellung der Zonenmodelle als RC-Netzwerk	42
4.6	Ein- und Ausgangsdaten für die Parameteridentifikation	50
4.7	Ermittlung des Belegungsprofils	51
4.8	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse	54
4.9	Einfluss der Modellordnung auf den MAE	56
4.10	Einfluss der Anzahl freier Parameter auf den MAE	57
4.11	Einfluss der Länge des Datensatzes auf den MAE	58
5.1	Anordnung des MPC-Reglers im TAD-Regelkreis	62
5.2	Funktionsweise MPC-Regler	63
5.3	Ablaufdiagramm zur Steuerung der Umwälzpumpen	69
5.4	Vorlauf der internen Wärmegewinne	72
5.5	Einfluss der Fensterlüftung und Zonen-Gewichtungsfaktors	73
5.6	Prädiktor-Korrektor-Struktur des Kalman-Filters.	74
5.7	Technische Umsetzung des MPC-Frameworks	76
6.1	Variation des Prädiktionsintervalls	81
6.2	Einfluss des Prädiktionsintervalls auf die Raumtemperaturen	82
6.3	Variation des Abtastintervalls	85
6.4	Variation der Gewichtungsfaktoren	86
6.5	Variation der Temperaturgrenzen	87
6.6	Vergleich der Raumtemperaturen bei RBC- und MPC-Regelung	90

6.7	Untersuchungszeiträume MPC	91
6.8	Witterungsbedingungen Untersuchungszeitraum 1	95
6.9	Heizenergiebedarf der RBC-geregelten Gebäudeteile im Zeitraum 1	96
6.10	Heizenergiebedarf von Haus G im Zeitraum 1	97
6.11	Außentemperatur und Vorlauftemperatur im April 2020	98
6.12	Boxplot der Vorlauftemperaturen im Zeitraum 1	99
6.13	Raumtemperaturen Untersuchungszeitraum 1	101
6.14	Komfortkategorien Häuser A, C und G im Zeitraum 1	102
6.15	Gradstunden Zeitraum 1	103
6.16	Komfortkategorie und Gradstunden in Haus G Zeitraum 1	104
6.17	Witterungsbedingungen Zeitraum 2	105
6.18	Heizenergiebedarf der RBC-geregelten Häuser im Zeitraum 2	106
6.19	Heizenergiebedarf MPC Zeitraum 2	108
6.20	Raumtemperaturbereich in den Referenzzonen im Februar 2021	110
6.21	TAD-Heizenergiebedarf in Abhängigkeit der Außentemperatur	112
6.22	Vergleich der Anteile der Komfortkategorien für alle Betriebsjahre	113
6.23	Anteile Komfortkategorien und Gradstunden im Zeitraum 2	114
6.24	Anteile Komfortkategorien und Gradstunden im Zeitraum 2 nach Stockwerk	115
B.1	Vorlauf der internen Wärmegewinne Haus A und C	126
C.1	Umgebungsbedingungen im Heizbetrieb 2018	127
C.2	Umgebungsbedingungen im Kühlbetrieb 2019	128
C.3	Umgebungsbedingungen im Heizbetrieb 2020	129
C.4	Umgebungsbedingungen im Heizbetrieb 2020/2021	130
C.5	Umgebungsbedingungen im Heizbetrieb 2021	130

Tabellenverzeichnis

2.1	Auslegungswerte der operativen Temperatur und des PPD-Indizes	6
2.2	Literaturübersicht über experimentelle MPC-Studien	16
3.1	Messtechnik und Messunsicherheiten	25
4.1	Initiale Parameter des TAD-Modells	41
4.2	Initiale Modellparameter der Zonenmodelle	46
4.3	Geometrische Daten und initialer MAE der Zonenmodelle	51
4.4	Validierungszeiträume Zonenmodelle	55
5.1	Übersicht über die verwendete Notation	64
5.2	Steuergrößen, Nebenbedingungen, Reglerparameter und Komfortkriterien . . .	67
6.1	Gewichtungsfaktoren im Heizbetrieb	79
6.2	Parameterbereich der MPC-Reglerparameter	79
6.3	MPC-Reglerparameter im Kühlbetrieb	89
6.4	Änderung Pumpenlaufzeit und Gradstunden im Kühlbetrieb	89
6.5	Anzahl der Büros und Referenzzonen in der Häusern A, C und G	92
6.6	Anzahl Datenlogger und Anteil Büroräume	94
6.7	Korrekturfaktoren im Zeitraum 1	96
6.8	Heizenergieeinsparung im Zeitraum 1	97
6.9	Heizzeiten im Untersuchungszeitraum 1	99
6.10	Korrekturfaktoren im Zeitraum 2	106
6.11	Einsparungen Heizenergie Zeitraum 2	107
A.1	Materialeigenschaften der TAD	120
A.2	Bauphysikalische Daten und Maße der TAD	120
A.3	Rohreigenschaften der TAD	121
A.4	Wärmeübergangswiderstände der TAD	121
A.5	Geometrische Daten der Referenzzonen	123
A.6	Beheizte Fläche und Anzahl Büro sowie Referenzzonen	124
A.7	Wärmeschutztechnische Bemessungswerte der Materialien	124
A.8	Materialien und Aufbau des Elementfassade - Rahmen	125
A.9	Materialien und Aufbau der Trockenbauwand	125
A.10	Materialien und Aufbau der Trockenbauwand	125

Nomenklatur

Formelzeichen

Lateinische Formelzeichen

Für die mit (*) markierten Symbole gibt es massenspezifische Varianten, bei denen das Symbol kleingeschrieben ist und die Einheit um kg^{-1} erweitert wird.

Zeichen	Einheit	Bedeutung
a	-	Absorptionskoeffizient für kurzwellige Strahlung
A	$[\text{m}^2]$	Fläche
b	-	empirischer Faktor
C_p	$[\text{J}/(\text{K})]$	Wärmekapazität bei konstantem Druck*
C_{el}	$[\text{F}]$	elektrische Kapazität
C	$[\text{J}/\text{K}]$	Wärmekapazität*
c_{th}	$[\text{J}/(\text{m}^2\text{K})]$	flächenspezifische Wärmekapazität
d	-	(messbare) Störgröße
$\Delta e(\square)$	$[\%]$	relative Änderung von \square
E	$[\text{J}]$	Energie
EE	-	Elementareffekt
f	-	Faktor
f_g	$[1/\text{s}]$	Grenzfrequenz
f_s	$[1/\text{s}]$	Abtastfrequenz
g	$[\text{m}/\text{s}^2]$	Erdbeschleunigung
$G_{20/15}$	$[\text{Kd}]$	Gradtage bei einer Raumtemperatur von 20°C und Heizgrenztemperatur von 15°C
Gh	$[\text{Kh}]$	Gradstunden der Komfortverletzung
h	$[\text{m}]$	Höhe
i	-	Laufindex
I	$[\text{kWh}]$	(solare) Einstrahlung
I_{el}	$[\text{A}]$	elektrische Stromstärke
\dot{I}	$[\text{W}/\text{m}^2]$	(solare) Bestrahlungsstärke
j	-	Laufindex
J	-	Kostenfunktion
k	-	diskrete Zeit

Zeichen	Einheit	Bedeutung
k_D	[W/(m ² K)]	Wärmedurchgangskoeffizient
l	[m]	Dicke/Wandstärke
MAE	-	Mittlerer Absoluter Fehler
n	-	Anzahl
N	-	Zeithorizont/Anzahl diskreter Zeitschritte
N_c	-	Regelungshorizont
N_p	-	Prädiktionshorizont
occ	-	Belegungssignal
p	[Pa]	Druck
\mathbf{P}	-	Fehlerkovarianzmatrix
q	[J/m ²]	flächenspezifische Wärmemenge
Q	[J]	Wärmemenge
R	[K/W]	thermischer Widerstand
R_{el}	[Ω]	elektrischer Widerstand
R_D	[K/W]	Wärmedurchgangswiderstand (Konvektion und Leitung)
r_{th}	[(m ² K)/W]	flächenbezogener (thermischer) Widerstand
$RMSE$	-	Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers
s	-	Schlupfvariable
S	[J/K]	Entropie*
t	[s]	Zeit
t_c	[s]	Regelungsintervall
t_p	[s]	Prädiktionsintervall
t_s	[s]	Abtastintervall
T	[K] oder [°C]	Temperatur
u	-	Eingangsgröße
U	[J]	innere Energie*
U_{el}	[V]	elektrische Spannung
v	[m/s]	Geschwindigkeit
V	[m ³]	Volumen
W	[J]	Arbeit
x	[m]	1. kartesische Ortskoordinate
\mathbf{x}	-	Ausgangsgrößenvektor
y	[m]	2. kartesische Ortskoordinate
\mathbf{y}	-	Zustandsgrößenvektor
z	[m]	3. kartesische Ortskoordinate
\mathbf{z}	-	(nicht-messbare) Störgrößenvektor

Griechische Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
α	[W/(m ² K)]	Wärmeübergangskoeffizient
β	-	Gewichtungsfaktor
ϵ	-	Emissionsgrad
Θ	-	Modellparameter
λ	[W/(mK)]	Wärmeleitfähigkeit
μ	-	Mittelwert
ν	-	Messrauschen
σ	[W/(m ² K ⁴)]	Stefan-Boltzmann-Konstante
σ	-	Standardabweichung
ρ	[kg/m ³]	Dichte
ω	-	Systemrauschen

Indizes

Index	Bedeutung
0	= Anfangswert
a	= außen
abs	= absolut
AU	= Außenluft
ber	= witterungsbereinigt
eff	= effektiv
EK	= Energiekosten
el	= elektrisch
eq	= äquivalent
erw	= erwartet
f	= fluid
F	= Fenster
glo	= global
H	= Heizung
hor	= horizontal
i	= innen (raumseitig)
init	= initial
int	= intern
irr	= irreversibel
k	= Bauteilkern
kin	= kinetische Energie
kon	= konvektiv, Konvektion
kor	= korrigiert
l	= Luft
L	= Lüftung
m	= gemittelt
max	= maximal
min	= minimal
o	= oben
op	= operativ
orient	= orientiert/gerichtet
sp	= spezifisch
P	= Pumpe
pot	= potenzielle Energie

Indizes

Index	Bedeutung
ref	= Referenz
rel	= relevant
rev	= reversibel
R	= Raum
RL	= Rücklauf
str	= Strahlung
t	= total
T	= Transmission
th	= thermisch
sol	= solar
u	= unten
UK	= Unbehaglichkeitskosten
VL	= Vorlauf
W	= Wand
w	= Wasser
Z	= Zone
zm	= zonengemittelt

Abkürzungen

Abk.	Bedeutung
BBM	= Black-Box-Modell
BUE	= Behörde für Umwelt und Energie
BSU	= Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt
BSW	= Behörden für Stadtentwicklung und Wohnen
DDC	= Direct Digital Control
DWD	= Deutscher Wetterdienst
EG	= Erdgeschoss
EKF	= Extended-Kalman-Filter
EMPA	= Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
EnOB	= Energieoptimiertes Bauen
GA	= Gebäudeautomation
GBM	= Grey-Box-Modell
GLT	= Gebäudeleittechnik
HKD	= Heiz- und Kühldecke
HLK	= Heizung, Lüftung und Klimatisierung
ILP	= <i>Integer Linear Program</i>
INLP	= <i>Integer Non-Linear Program</i>
Kat.	= Kategorie
KNN	= Künstliches Neuronales Netz
LP	= <i>Linear Program</i>
LZM	= Langzeitmittel
MAE	= <i>Mean Absolute Error</i> , Mittlerer absoluter Fehler
MILP	= <i>Mixed-Integer Linear Program</i>
MiL	= <i>Model-in-the-Loop</i>
MINLP	= <i>Mixed-Integer Non-Linear Program</i>
MPC	= <i>Model Predictiv Control</i> , Modellbasierte Prädiktive Regelung
N	= Nord
NLP	= <i>Non-Linear Program</i>
NO	= Nordost
NW	= Nordwest
O	= Ost
OG	= Obergeschoss
OPC	= Open Platform Communications

Abk.	Bedeutung
PEX	= vernetztes Polyethylen
PMV	= Predicted Mean Vote
PPD	= Predicted Percentage Dissatisfied
RBC	= <i>Rule-Based Control</i> , Regelbasierte Regelung/Steuerung
RLT	= Raumluftechnik
RMSE	= <i>Root Mean Square Error</i> , Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers
S	= Süd
SO	= Südost
SQP	= Sequential Quadratic Program
SW	= Südwest
TABS	= Thermoaktive Bauteilsysteme
TAD	= Thermoaktive Decke
TUHH	= Technische Universität Hamburg
UKF	= Unscented Kalman Filter
VNS	= Verwaltungsgebäude Neuenfelder Straße
W	= West
WBM	= White-Box-Modell
ZRM	= Zustandsraummodell

Sonstiges

Zeichen	Einheit	Bedeutung
$d\Box$	\Box	Ableitung von \Box
$\partial\Box$	\Box	Partielle Ableitung von \Box
$\nabla\Box$	\Box	Vektor der partiellen Ableitungen von \Box
$\Delta\Box$	\Box	Differenz von \Box
$\dot{\Box}$	\Box/s	Zeitliche Ableitung von \Box
$\hat{\Box}$	\Box	Vorhergesagte/simulierte Größe von \Box
\Box^+	\Box	<i>A-priori</i> -Schätzung von \Box
\Box^-	\Box	<i>A-posteriori</i> -Schätzung von \Box
\Box^*	\Box	Optimaler Wert von \Box
ℓ	-	Straffunktion
ℓ_N	-	Strafterm am Ende des Prädiktionshorizontes (engl. <i>terminal penalty</i>)
$\mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$		Normalverteilung mit Erwartungswert μ und Varianz σ^2
\mathbf{x}	\Box	Vektor

1 Einleitung

In der Europäischen Union entfallen gut 40 % des Endenergiebedarfs auf den Gebäudesektor, der damit den größten Anteil aller Sektoren aufweist [39]. In Deutschland sind Gebäude direkt oder indirekt für etwa ein Viertel der CO₂-Emissionen verantwortlich [20]. Die Transformation hin zu einem umweltfreundlichen und energieeffizienten Gebäudebestand ist damit ein wesentlicher Baustein für den globalen Klimaschutz. Neben der Dekarbonisierung des Wärme- und Stromsektors kann die Vermeidung von CO₂-Emissionen durch die Verringerung des Energiebedarfs von Gebäuden als eine der effektivsten Klimaschutzmaßnahmen angesehen werden [98]. Laut dem Nationalen Aktionsplan Energieeffizienz 2.0 sollen die gebäudebezogenen CO₂-Emissionen bis 2030 um 40 % im Vergleich zu 2014 gesenkt werden [14].

Gleichzeitig verbringen wir Menschen etwa 90 % unserer Lebenszeit in Gebäuden. Die Schaffung von komfortablen Umgebungsbedingungen innerhalb dieser Gebäude ist damit gleichermaßen Herausforderung und Aufgabe von Architektinnen und Architekten, Planerinnen und Planern sowie dem Gebäudemanagement. Entsprechend entfallen in Deutschland 75 % des Endenergiebedarfs von Gebäuden auf die Bereitstellung thermischer Energie zur Schaffung von thermisch komfortablen Bedingungen [20].

Grundsätzlich gibt es zwei Maßnahmen zur Senkung des Energiebedarfs von Gebäuden. Zum einen können die bauphysikalischen Eigenschaften der Gebäudehülle hinsichtlich einer besseren Wärmedämmung oder die Ausnutzung solarer Wärmegewinne optimiert werden. Solche energetischen Sanierungen von Bestandsgebäuden sind jedoch zumeist mit einem erheblichen Ressourcenaufwand verbunden und nicht immer ökonomisch sinnvoll. Zum anderen kann die Effizienz der gebäudetechnischen Anlagentechnik für Heizung, Lüftung und Klimatisierung gesteigert werden; entweder durch Modernisierung der Anlagen oder durch hard- oder softwaretechnische Maßnahmen am Steuerungs- oder Regelungssystem der Anlage. Die letztere Möglichkeit stellt im Gegensatz zu den anderen Maßnahmen meist einen kostengünstigen und niederschweligen Ansatz dar, mit der signifikante Energieeinsparungen erzielt werden können [44, 97].

Die Kostenreduktion und Leistungssteigerung bei der Daten- und Sensortechnik haben die Digitalisierung von Gebäuden hin zum „Smart Building“ oder „Gebäude 4.0“ in den letzten Jahren vorangetrieben [85]. Dies ermöglicht auch die Entwicklung und den Einsatz von fortschrittlichen, komplexen und rechenintensiven Steuer- und Regelstrategien. Dennoch ist ein Großteil des heutigen Gebäudebestands immer noch mit herkömmlichen, sehr einfachen Steuerungs- und Regelungssystemen ausgestattet, die nur eine begrenzte Möglichkeit der Energieeinsparung aufweisen [74]. Gerade bei modernen, großen und meist zentral geregelten Bürogebäuden, die oftmals mit einem hohen Anspruch an die Energieeffizienz und den Komfort geplant und errichtet werden, wird damit nicht das volle Potenzial ausgeschöpft.

Die Modellbasierte Prädiktive Regelung (engl. *model predictiv control*, MPC) ist eine gehobene Regelungsstrategie, die in den letzten Jahren verstärkt für die energieeffiziente und intelligente Regelung von Gebäuden bzw. gebäudetechnischer Anlagen untersucht und als vielversprechender Ansatz identifiziert wurde [82]. Der Grund für den Erfolg der MPC-Methode liegt in der Berücksichtigung der Gebäudedynamik und der Integration von Vorhersagen externer und interner Einflussgrößen, sowie der expliziten Einbeziehung der beiden eingangs genannten grundlegenden Anforderungen in den Regelungsalgorithmus: einer Minimierung des Energiebedarfs und Maximierung des Komforts [36]. Die Implementierung von MPC zur Gebäuderegung ist derzeit noch mit einem erheblichen Aufwand verbunden. Maßgeblich zurückzuführen ist dies auf die dafür nötige Entwicklung und Erstellung geeigneter Gebäudemodelle, aber auch auf die Integration des Regelungsalgorithmus in bestehende Gebäudeautomationssysteme [55]. Die Zahl der praktischen Implementierungen von MPC in Gebäuden ist daher begrenzt. In dieser Arbeit soll ein Beitrag dazu geleistet werden, das tatsächliche Potenzial und die Performance von MPC für reale Gebäudesysteme unter dem Einfluss aller auftretenden Unwägbarkeiten und Unsicherheiten abzuschätzen.

1.1 Ziele der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung und Implementierung eines auf dem Prinzip der Modellbasierten Prädiktiven Regelung basierenden Reglers zur Optimierung der Energieeffizienz und des Komforts in einem großen Verwaltungsgebäude in Hamburg. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf einer möglichst einfachen und effizienten Entwicklung der dafür nötigen dynamischen Gebäudemodelle und einer robusten Integration des Regelungsalgorithmus in die bestehende Gebäudeautomation. Wichtigster Beitrag der Arbeit ist die ganzheitliche Analyse und Bewertung der Regler-Performance im praktischen Langzeitbetrieb, die hiermit nach aktuellem Stand die umfangreichste und längste experimentelle MPC-Studie darstellt.

Es findet dabei ein detaillierter Vergleich zwischen der ursprünglich implementierten, herkömmlichen Steuerungsstrategie und des MPC-Reglers unter identischen Betriebs- und Umgebungsbedingungen statt. Bei dem untersuchten Verwaltungsgebäude handelt es sich um ein energetisch hocheffizientes und modernes Gebäude, bei dem energetische Verbesserungspotentiale, wie eine Verbesserung der thermischen Gebäudehülle oder einer effizienten Energiebereitstellung, als nahezu ausgeschöpft betrachtet werden können. Der Einfluss einer rein softwareseitigen Optimierung der Regelungsstrategie auf die gesamte Energieeffizienz auf diesen Gebäudetypus kann daher sehr gut analysiert werden kann. Des Weiteren wird eine umfassende Untersuchung des Einflusses der Regelungsstrategie auf den thermischen Komfort im Gebäude durchgeführt, der in den wenigen bisher veröffentlichten experimentellen Studien zur MPC-Gebäuderegung kaum behandelt wurde.

1.2 Struktur der Arbeit

Die grundlegende Struktur dieser Arbeit orientiert sich an einem Entwicklungsprozess nach dem V-Modell für den Entwurf einer Regelungsstrategie [1]. In Kapitel 2 werden zunächst die grundsätzlichen Anforderungen an die Gebäuderegulung und deren Aufgabenstellung formuliert. Im Zuge dessen erfolgt eine Beschreibung der Bewertungskriterien für den thermischen Komfort als eine wichtige Zielgröße der Gebäuderegulung. Anschließend erfolgt eine Einführung in die Thematik der MPC-Regelung von Gebäuden, die mit einer Beschreibung des derzeitigen Stands der Technik und einer Einordnung dieser Arbeit abschließt.

In Kapitel 3 wird der zu regelnde Prozess, respektive das in dieser Arbeit untersuchte Demonstrationsgebäude vorgestellt. Dabei wird vor allem auf die für die Modellierung und Regelung des Gebäudes relevanten Aspekte des Gebäude- und Energiekonzeptes sowie die grundlegenden Funktionsweisen eingegangen. Von besonderer Bedeutung sind dabei die Messtechnik und Datenerfassung vor allem in den vorhandenen Referenzbüroräumen.

Das Kapitel 4 beschreibt die Entwicklung der Zonenmodelle, die vom MPC-Regler als Prozessmodelle zur Vorhersage der Gebäudedynamik genutzt werden. Zunächst werden hier die dafür relevanten Grundlagen der Thermodynamik und Wärmeübertragung vorgestellt. Für die Modellierung der Gebäudezonen wird ein hybrider Modellierungsansatz gewählt, der eine vereinfachte physikalisch-basierte Modellstruktur mit einer Methode zur Parameteridentifikation aus Messdaten kombiniert. Die Beschreibung der Zonenmodelle und die Ableitung der Startwerte der Modellparameter aus Konstruktionsdaten sowie die Parameteridentifikation werden in diesem Kapitel ausführlich behandelt.

Der MPC-Regelungsalgorithmus mit dem Ziel einer Erhöhung der Energieeffizienz und des thermischen Komforts wird in Kapitel 5 entwickelt. Im Kern steht dabei die zu minimierende Kostenfunktion. Weitere wichtige Bestandteile sind die Prädiktion von Störgrößen und die Zustandsschätzung. Abschließend erfolgt die Beschreibung der Implementierung des gesamten MPC-Frameworks im Gebäude.

In Kapitel 6 wird die Funktionsfähigkeit und das Potenzial der entwickelten MPC-Regelungsstrategie zunächst mittels Model-in-the-Loop Methode evaluiert, wobei das reale Gebäude zunächst durch ein Simulationsmodell ersetzt wird. Hierbei werden die zur Verfügung stehenden Reglerparameter variiert, um den Regler entsprechend einer größtmöglichen Zielerfüllung einzustellen. Auf Basis dieser Erkenntnisse wird der MPC-Regler im realen Gebäude in Betrieb genommen und die Ergebnisse hinsichtlich der Energieeinsparung und des thermischen Komforts im Vergleich zur herkömmlichen Regelung detailliert vorgestellt. In Kapitel 7 werden die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf zukünftige Fragestellung gegeben.

2 Übersicht und Anforderungen der Gebäuderegulung

In diesem Kapitel wird eine Übersicht der grundlegenden Anforderungen und Definitionen bei der Regelung und Steuerung von Gebäuden bzw. gebäudetechnischer Systeme gegeben. Der thermische Komfort als eine wichtige Zielgröße der Gebäuderegulung sowie die in dieser Arbeit verwendeten Bewertungskriterien von thermischem Komfort werden in Abschnitt 2.2 erläutert. Abschnitt 2.3 gibt eine kurze Übersicht über die im Gebäudebereich heutzutage üblichen Regelungsstrategien, um dann in Abschnitt 2.4 das in dieser Arbeit betrachtete Prinzip der Modellbasierten Prädiktiven Regelung einzuführen. Abschließend folgt in Abschnitt 2.5 ein Überblick über den Stand der Technik von Modellbasierten Prädiktiven Regelungsstrategien für Gebäude, sowie eine Einordnung der vorliegenden Arbeit.

2.1 Grundlegende Anforderung

Als Gebäuderegulung wird in dieser Arbeit die Regelung oder Steuerung aller gebäudetechnischer Systeme, wie etwa Anlagen zur Heizung, Lüftung und Klimatisierung (HLK-Anlagen), Beleuchtung oder Vorrichtungen zum Sonnenschutz bezeichnet. Ein häufig verwendetes Synonym für Gebäuderegulung ist die Gebäudeautomation (GA). Das Ziel der Gebäuderegulung ist der energieeffiziente, wirtschaftliche und sichere Betrieb aller gebäudetechnischer Anlagen sowie die Einhaltung des Komforts, z. B. im Bezug auf Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Luftqualität oder Beleuchtung in den vorhandenen Räumen bzw. Zonen eines Gebäudes [27]. Typische Aktuatoren bei der Gebäuderegulung sind Heizkessel, Wärmepumpen, Kältemaschinen, Mischventile, Pumpen, Ventilatoren sowie Stellmotoren von Jalousien oder Fenstern. Abbildung 2.1 zeigt ein Modell des Energiebedarfs und der Energieversorgung eines Gebäudes nach DIN EN 15232 [27]. Die Regelung hat die Aufgabe, die Bereitstellung und Verteilung der Energien in dem Maße zu gewährleisten, dass die Deckung des Energiebedarfs durch Anforderungen der nutzenden Personen jederzeit sichergestellt ist und dabei die entstehenden Verluste auf ein absolutes Minimum beschränkt werden. Die im Gebäudebereich auftretenden Energieformen sind hauptsächlich thermische Energie (Heizenergie, Kühlenergie) oder elektrische Energie.

Der Unterschied zwischen einer Steuerung und einer Regelung ist folgender: bei der Regelung ist die Rückführung einer Regelgröße (z. B. Raumtemperatur) zum Regler vorhanden und es entsteht somit ein geschlossener Wirkungskreis (engl. *closed-loop control*). Im Gegensatz dazu gibt es bei der Steuerung keine Rückführung, d. h. die Ausgangsgröße

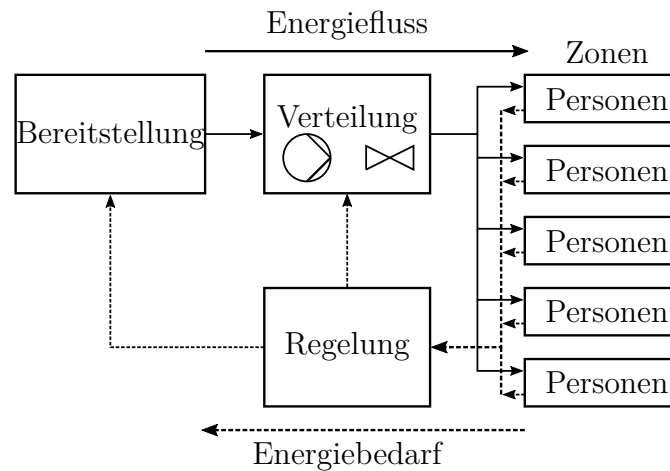


Abbildung 2.1: Modell des Energiebedarfs und der Energieversorgung nach DIN EN 15232 [27].

(z. B. Wärmeabgabe an einen Raum) wirkt nicht auf die Eingangsgröße (z. B. Vorlauftemperatur) zurück und es entsteht ein offener Wirkungskreis (engl. *open-loop control*) [5]. Zwischen Gebäuderegulierung und -steuerung wird jedoch häufig nicht sehr scharf getrennt (im englischsprachigen wird ausschließlich der Begriff *building control* verwendet), sodass in dieser Arbeit meist von Gebäuderegulierung gesprochen wird, auch wenn im eigentlichen Sinne nur eine Steuerung vorliegt.

2.2 Thermischer Komfort

Neben einem energieeffizienten Betrieb ist es auch Aufgabe jeder Gebäuderegulierung, behagliche raumklimatische Bedingungen innerhalb des Gebäudes zu schaffen und einzuhalten. Zur Bewertung unterschiedlicher Regelungsstrategien müssen daher neben energetischen Kennwerten auch quantitative Kriterien für den Komfort des Innenraumklimas herangezogen werden. Im Allgemeinen umfasst der Begriff eines behaglichen Raumklimas den thermischen Komfort, den akustischen Komfort, den visuellen Komfort sowie die Luftqualität. Der akustische und visuelle Komfort werden in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet. Auch die Innenraumluftqualität ist hier nur von untergeordneter Bedeutung, da die in dieser Arbeit entwickelte Regelungsstrategie nicht aktiv darauf Einfluss nehmen kann.

Die Wahrnehmung des thermischen Raumklimas und des thermischen Komforts ist maßgeblich von der Bilanz der Wärmeproduktion und Wärmeabgabe eines Menschen abhängig. Diese Wärmebilanz wird beeinflusst durch die körperliche Aktivität und den Bekleidungsstatus sowie durch Umgebungsbedingungen wie Lufttemperatur, Strahlungstemperatur, Luftfeuchte und Luftgeschwindigkeit [78].

2.2.1 Bewertungskriterien

Die beiden meist verwendeten Normen zur Bewertung des Raumklimas sind die DIN EN 15251 [25] und die DIN EN ISO 7730 [23]. In der DIN EN ISO 7730 werden die beiden erstmals von FANGER [40] eingeführten Indizes PMV (Predicted Mean Vote) und PPD (Predicted Percentage Dissatisfied) verwendet. Der PMV-Index beschreibt auf einer siebenstufigen Skala (-3: kalt bis +3: heiß) das thermische Empfinden einer Gruppe von Personen. Angestrebt wird ein thermisch neutraler Zustand mit dem PMV von 0. Damit verknüpft ist der PPD-Index, der den Prozentsatz von Personen darstellt, die mit einem bestimmten Raumklima unzufrieden sind. Anzumerken ist, dass der PPD-Index aufgrund des subjektiven Empfindens von thermischer Behaglichkeit selbst bei einem PMV von 0 stets $\geq 5\%$ ist. Eingangsp Parameter zur Berechnung des PMV/PPD-Indexes sind u. a. Lufttemperatur, mittlere Strahlungstemperatur, relative Luftgeschwindigkeit, Wasserdampfpartialdruck, Informationen über Bekleidung und Aktivitätsgrad der Personen sowie Größen zur Bewertung der lokalen Unbehaglichkeit. In praktischen Anwendungen sind jedoch nicht immer alle benötigten Größen messtechnisch erfassbar.

In der DIN EN 15251 wird daher die operative Raumtemperatur T_{op} als maßgebliches Bewertungskriterium verwendet, die die Größen Lufttemperatur, mittlere Strahlungstemperatur und Luftgeschwindigkeit vereint. Auf Basis der operativen Temperatur wird der thermische Komfort in vier Kategorien eingeteilt. Das Temperaturintervall der ersten drei Kategorien sowie der Zusammenhang zum PPD-Index nach DIN EN ISO 7730 sind in Tabelle 2.1 dargestellt.

Tabelle 2.1: Auslegungswerte der operativen Temperatur und des PPD-Indexes in einem Bürogebäude für die Kategorien nach DIN EN 15251 und DIN EN ISO 7730.

Kategorie		Operative Temperatur		PPD-Index
DIN EN 15251	DIN EN ISO 7730	Heizperiode	Kühlperiode	
I	A	$22,0 \pm 1,0\text{ °C}$	$24,5 \pm 1,0\text{ °C}$	$< 6\%$
II	B	$22,0 \pm 2,0\text{ °C}$	$24,5 \pm 1,5\text{ °C}$	$< 10\%$
III	C	$22,0 \pm 3,0\text{ °C}$	$24,5 \pm 2,5\text{ °C}$	$< 15\%$

Die Kategorien sind dabei wie folgt anzuwenden:

- Kategorie I: hohes Maß an Erwartung; empfohlen für Räume, in den sich empfindliche und anfällige Personen mit besonderen Bedürfnissen aufhalten; wird nur in Ausnahmefällen angewendet.
- Kategorie II: normales Maß an Erwartung; wird für neue und renovierte Gebäude empfohlen.

- Kategorie III: moderates Maß an Erwartung; kann bei bestehenden Gebäuden angewandt werden.
- Kategorie IV: umfasst alle Werte außerhalb der Kategorien I bis III und sollte nur zeitlich begrenzt angewendet werden.

Um zu berücksichtigen, dass die Gebäudenutzenden ihr Verhalten vor allem im Sommer an das vorliegende Raumklima anpassen können, z. B. durch Anpassung der Bekleidung, der Aktivität oder durch Öffnen von Fenstern wird in der DIN EN 15251 ein adaptives Komfortmodell eingeführt, das die oberen und unteren Grenzen der operativen Temperatur in Abhängigkeit des gleitenden Mittelwertes der Außentemperatur T_{AU} vorgibt. Voraussetzung ist u. a., dass im Gebäude keine maschinelle Kühlung zum Einsatz kommt. In Abbildung 2.2 sind die Verläufe der oberen und unteren Grenzen der operativen Raumtemperatur in Abhängigkeit der Außentemperatur für die drei Komfortkategorien dargestellt.

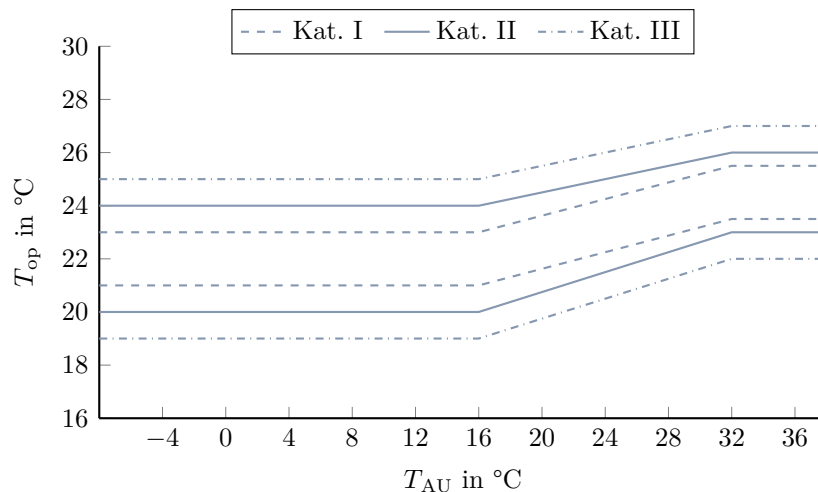


Abbildung 2.2: Bereiche der operativen Raumtemperatur in Abhängigkeit des gleitenden Mittelwertes der Außentemperatur für die drei Komfortkategorien nach DIN EN 15251.

Um den thermischen Komfort eines Gebäudes in einem längeren Zeitraum messtechnisch bewerten zu können, gibt es nach DIN EN 15251 zwei Verfahren. Zum einen kann der Prozentsatz an Raumluftzuständen während der Belegungs- bzw. Nutzungszeit berechnet werden, in denen die Raumluftzustände außerhalb einer festgelegten Kategorie liegen. Es wird empfohlen, dass diese Abweichung nicht größer als 5% der Nutzungszeit ist. Zum anderen können die sogenannten Gradstunden Gh (Einheit: Kh) berechnet werden, die Dauer und Höhe der Abweichung von den vorgegebenen Temperaturgrenzen berücksichtigten und wie folgt bestimmt werden:

$$Gh = \int \Delta_{Gh} dt \quad (2.1)$$

mit

$$\Delta_{Gh} = \begin{cases} T_{\text{op,min}} - T_{\text{op}} & \text{für } T_{\text{op}} < T_{\text{op,min}} \\ 0 & \text{für } T_{\text{op,min}} \leq T_{\text{op}} \leq T_{\text{op,max}} \\ T_{\text{op}} - T_{\text{op,max}} & \text{für } T_{\text{op}} > T_{\text{op,max}}. \end{cases} \quad (2.2)$$

Für $T_{\text{op,min}}$ und $T_{\text{op,max}}$ müssen die nach Tabelle 2.1 bzw. Abbildung 2.2 Temperaturgrenzen für die angewandte Kategorie eingesetzt werden. Die zulässige Abweichung vom Gradstunden-Kriterium wird in der DIN EN 15251 mit 1% der Nutzungszeit angegeben. Für eine Nutzungszeit von 12 h ergibt sich damit beispielsweise für die Kategorie II eine jährliche zulässige Abweichung von $\frac{1}{100} \cdot (12 \text{ h/d} \cdot 365 \text{ d/a}) \cdot 2 \text{ K} = 87,6 \text{ Kh/a}$ bzw. eine tägliche Abweichung von 0,24 Kh/d.

2.2.2 Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit

In dieser Arbeit wird die Bewertung des thermischen Komforts hauptsächlich auf Basis der gemessenen Raumtemperaturen im Demonstrationsgebäude durchgeführt, da diese Größe durch die Regelung der Heizungsanlage aktiv beeinflusst werden kann. Die relative Luftfeuchtigkeit in den Büroräumen kann systembedingt nicht aktiv geregelt werden. Dennoch soll an dieser Stelle kurz auf den Einfluss der relativen Luftfeuchte auf den Komfort eingegangen werden, da diese bei bestimmten Witterungsbedingungen in der Vergangenheit zu Problemen und Klagen über zu trockene Luft im Demonstrationsgebäude führte [80].

Von den relevanten zuvor genannten Normen wird der Einfluss der relativen Luftfeuchte auf den Komfort als eher gering eingestuft. Auf das Temperaturempfinden hat die relative Luftfeuchte bei normalen Raumtemperaturen um 22 °C nur eine sehr geringe Auswirkung [25]. Dennoch kann die Luftfeuchtigkeit direkt oder indirekt einen Einfluss auf die Gesundheit und Physiologie von Personen haben. So kann eine sehr niedrige Luftfeuchte von < 15 % r.F. bis 20 % r.F. Trockenheit und Reizung der Atemwege, Augen und Haut hervorrufen [45]. Langanhaltende hohe Luftfeuchte von über 60 % r.F. fördert hingegen das Überleben und die Infektiosität von Bakterien und Viren in der Luft [7]. Die DIN EN 15251 empfiehlt einen maximalen Wassergehalt der Luft von 11,5 g/kg. Des Weiteren werden für die Komfortkategorien Auslegungswerte für die relative Feuchte angegeben (Kategorie II: 25 % r.F. bis 60 % r.F.), die jedoch nur bei installierter Be- und Entfeuchtungsanlage empfohlen werden. Für Gebäude ohne entsprechende technische Ausrüstung sind keine Grenzwerte angegeben. Dennoch können gerade die jüngsten Entwicklungen, auch im Zusammenhang mit der COVID-19-Pandemie, die Notwendigkeit einer kontrollierten Be- und Entfeuchtung in Gebäuden und einer einheitlichen Definition von Grenzwerten verstärken [88].

2.3 Regelbasierte Steuerung

Heutzutage werden bei der Gebäuderegulung überwiegend Regelbasierte Strategien (engl. *rule-based control*, im Folgenden mit RBC abgekürzt) eingesetzt. Diese Strategien basieren auf dem Prinzip „WENN *Bedingung* DANN *Aktion*“ mit denen Sollwerte einzelner Komponenten bestimmt werden. Hierzu gehören beispielsweise auch Außentemperaturgeführte Heiz- und Kühlkurven. Die Nachführung der Sollwerte geschieht dann meist mit stetigen (P-, PI- oder PID-Regler, z. B. Heizkörperthermostatventilen) oder unstetigen (Zweipunktregler, z. B. Thermostaten) Reglern. RBC-Strategien sind daher einfach, kostengünstig, wenig rechenintensiv sowie seit Jahrzehnten etabliert und erfüllen in den meisten Fällen die Anforderungen an einen sicheren und Komfort gerechten Betrieb eines Gebäudes.

Das Potenzial einer Steigerung der Energieeffizienz durch RBC ist jedoch als gering einzuschätzen, u. a. ist es schwierig, diese in eine Regelungsstrategie zu überführen, bei der die Regelung unterschiedliche Teilsysteme miteinander vernetzt. Des Weiteren nimmt mit zunehmender Komplexität der gebäudetechnischen Anlagen auch die Anzahl von Reglerparametern und die Herausforderung bei der Wahl geeigneter Reglerparameter zur Erreichung einer anwendungsspezifischen ausreichenden Regelgüte zu. Diese sind jedoch entscheidend für die Performance von RBC-Strategien.

Die Notwendigkeit der Energieeinsparung im Gebäudebereich treibt die Forschung zunehmend in Richtung energieeffizienter Gebäuderegulungen. Zusammen mit der stetigen Zunahme der Leistungsfähigkeit im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnik in den letzten Jahrzehnten und die damit einhergehende Kostenreduktion für Datenverarbeitung und -speicherung werden daher fortschrittliche, komplexere Regel- und Steuerstrategien für Gebäude vermehrt untersucht und eingesetzt. Eine solche Regelungsstrategie ist die Modellbasierte Prädiktive Regelung, auf die im Folgenden eingegangen werden soll.

2.4 Modellbasierte Prädiktive Regelung

Das Konzept der Modellbasierten Prädiktiven Regelung gehört zu den gehobenen Regelungsmethoden (engl. *advanced process control*), die seit der Entwicklung Ende der 70er Jahre vor allem erfolgreich in der Prozessindustrie eingesetzt werden und mittlerweile z. B. in der Raffinerieindustrie zum Stand der Technik gehören [31]. Im letzten Jahrzehnt wurde MPC verstärkt für die energieeffiziente Regelung von Gebäuden bzw. gebäudetechnischer Anlagen untersucht [82]. Im Folgenden sollen kurz die Grundprinzipien und Begriffe der Modellbasierten Prädiktiven Regelung erläutert werden und anschließend speziell auf die Anwendung von MPC zur Gebäuderegulung eingegangen werden.

Das grundlegende Funktionsprinzip einer prädiktiven Regelung ist in Abbildung 2.3 dargestellt. Im Kern von MPC steht ein dynamisches Modell der Regelstrecke (im Folgenden

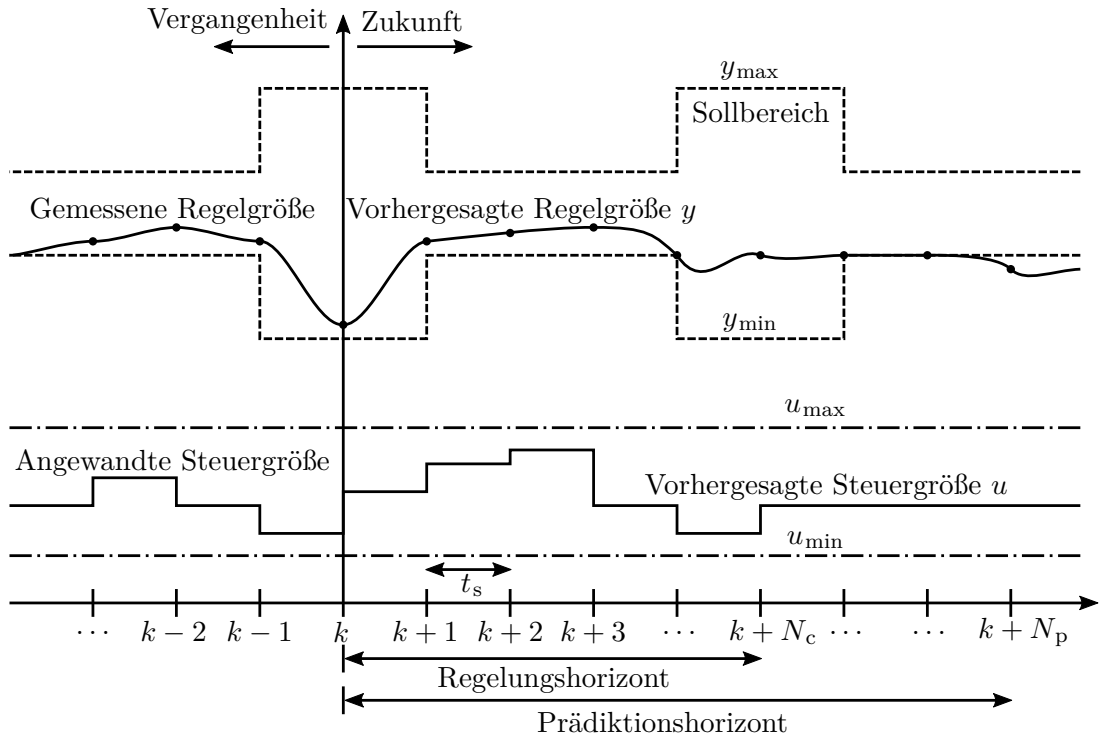


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung der grundlegenden Funktionsweise von Modellbasierter Prädiktiver Regelung.

als Prozessmodell bezeichnet) mithilfe dessen das zukünftige Verhalten von ein oder mehreren Regelgrößen \mathbf{y} unter dem Einfluss von messbaren bzw. vorhersagbaren Störgrößen und manipulierbaren Steuergrößen \mathbf{u} vorhergesagt werden kann. In einem dynamischen Optimierungsproblem wird unter Verwendung des Prozessmodells eine Kostenfunktion minimiert und der zukünftige optimale Verlauf der Steuergrößen ermittelt. Dabei können Beschränkungen in Form von Nebenbedingungen (z. B. Vorgabe eines Sollbereichs durch obere und untere Grenzwerte) für die Steuer- und Regelgrößen explizit berücksichtigt werden, wie in Abbildung 2.3 dargestellt ist. Von der berechneten optimalen Folge von Steuergrößenänderungen wird nur das erste Element auf den Prozess angewendet und die gesamte Prozedur im nächsten Regelungsschritt nach Ablauf eines definierten Abtastintervalls wiederholt. Dieses Vorgehen wird als Prinzip des gleitenden Horizonts bezeichnet. Folgende grundlegende „Hyperparameter“ von MPC lassen sich damit definieren:

- Abtastintervall t_s : Zeitintervall zwischen zwei Regelungsschritten, d. h. vor einer erneuten Ausführung der Optimierung zur Bestimmung des Steuergrößenverlaufs. Die Steuergrößen sind innerhalb dieses Zeitintervalls konstant oder können ggf. mit geeigneten Methoden von einem Zeitschritt zum nächsten interpoliert werden.

- Prädiktionshorizont N_p (bzw. Prädiktionsintervall $t_p = N_p \cdot t_s$): Anzahl diskreter Zeitschritte, für die der Regler die Vorhersage der Regelgrößen mithilfe des Prozessmodells zur Minimierung der Kostenfunktion berechnet.
- Regelungshorizont N_c (bzw. Regelungsintervall $t_c = N_c \cdot t_s$): Anzahl diskreter Zeitschritte, für die der Regler eine optimale Folge von Steuergrößenänderungen berechnet, i. d. R. gleichbedeutend mit der Anzahl an Optimierungsvariablen.

Die Wahl des Abtastintervalls wird maßgeblich durch die Dynamik des Gebäudes bzw. des zu regelnden Prozesses bestimmt. Es existieren verschiedene Faustregeln zur geeigneten Wahl des Abtastintervalls [31], wobei in diesem Zusammenhang das grundlegende Abtasttheorem nach Nyquist und Shannon genannt werden kann, nachdem die Abtastfrequenz $f_s = \frac{1}{t_s}$ größer als die doppelte Grenzfrequenz f_g eines bandbegrenzten Signals sein muss, um dieses fehlerfrei rekonstruieren zu können [42]. Des Weiteren muss das gewählte Abtastintervall im Allgemeinen kleiner als die Zeit zur Berechnung, Kommunikation und Anwendung der nächsten Steuergrößenänderung sein. Aufgrund der langsamen Dynamik von Gebäuden können typischerweise Abtastintervalle von 15 min bis 180 min gewählt werden, was in der Regel ausreichend ist um eine rekursive Berechnung der optimierten Steuergrößen zu ermöglichen [36]. Das typische Prädiktionsintervall bei der Anwendung zur Gebäuderegulation liegt zwischen 5 h und 48 h, je nach Dynamik des zu regelnden Systems [2]. Beispielsweise kann die Regelung von sehr trägen Thermoaktiven Bauteilsystemen (TABS) bedingt durch die hier dominierende Zeitkonstante der großen thermischen Massen von längeren Prädiktionszeiträumen profitieren. Der Regelungshorizont wird typischerweise so gewählt, dass $N_c \leq N_p$. Der Vorteil eines kürzeren Regelungshorizonts ($N_c < N_p$) liegt darin, dass die Anzahl an Optimierungsvariablen hierdurch reduziert wird und damit der Rechenaufwand erheblich abnimmt. Des Weiteren nimmt mit fortschreitendem Vorhersagezeitraum sowohl die Genauigkeit der Vorhersage des Prozessmodells als auch der Einfluss der Steuergröße auf den Verlauf der Regelgröße ab, sodass keine signifikante Verbesserung des Reglerverhaltens mit der Wahl eines längeren Regelungshorizonts einhergeht [36]. Die Wahl dieser Hyperparameter hängt immer vom betrachteten System bzw. der Regelungsaufgabe ab. In der Entwurfsphase des MPC-Reglers können diese mithilfe von Simulationen in denen das reale System durch ein weiteres Modell ersetzt wird, ermittelt werden (siehe hierzu Abschnitt 6.1.1).

Damit lassen sich die grundlegenden Elemente eines MPC-Frameworks zur Gebäuderegulation wie folgt zusammenfassen:

Prozessmodell Wie bereits erwähnt, stehen dynamische Simulationsmodelle des zu regelnden Systems im Zentrum von MPC. Die Entwicklung und Identifizierung geeigneter Modelle stellen den schwierigsten und zeitaufwändigsten Teil beim Entwurf von MPC-Reglern dar [55]. Dabei wird die gesamte Performance des Reglers maßgeblich von der Genauigkeit der Prozessmodelle beeinflusst [12]. Die Modellierungsansätze zur Entwicklung von Prozessmodellen können in drei Klassen unterteilt werden: White-Box-Modelle (physikalisch basiert), Black-Box-Modelle (datenbasiert) und Grey-Box-Modelle (hybrid). Weitere Informationen zu den unterschiedlichen

Modellierungsansätzen sowie zu der Entwicklung der in dieser Arbeit verwendeten Modelle sind in Kapitel 4 gegeben.

Kosten- bzw. Zielfunktion Die Zielfunktion, oder auch Kostenfunktion genannt, repräsentiert in mathematischer Weise das Regelungsziel. Der Wert dieser Zielfunktion wird durch das Lösen eines Optimierungsproblems minimiert. Die am häufigsten verwendeten Reglerziele bei der Gebäuderegulation sind die Minimierung der eingesetzten Energiemengen, die Maximierung des thermischen Komforts oder die Einhaltung eines Sollwertes. Weitere mögliche Zielvorgaben sind die Minimierung von monetären Kosten oder Treibhausgasemissionen, die Reduzierung von Lastspitzen (Peak Shaving) oder die Maximierung des Einsatzes regenerativer Energiequellen. Werden mehrere Zielgrößen in der Zielfunktion berücksichtigt, so stehen diese meist im Konflikt zueinander (z. B. Energiebedarf und thermischer Komfort) und es kann von einem mehrkriteriellen Optimierungsproblem gesprochen werden. Über die Gewichtung der einzelnen Ziele mittels Faktoren und anschließender Summierung kann dieses in ein einkriterielles Problem überführt werden und der Regler versucht somit einen Kompromiss zwischen den konfligierenden Zielgrößen zu finden. Auf die Entwicklung der Kostenfunktion wird in Kapitel 5 eingegangen.

Störgrößenvorhersage Störgrößen sind nicht manipulierbare Eingangsgrößen, die einen Einfluss auf das zu regelnde System haben. Es kann unterschieden werden zwischen *messbaren* Störgrößen, deren Einfluss auf das System direkt im Prozessmodell integriert werden, und *nicht-messbaren* Störgrößen, die nicht berücksichtigt werden können und damit die Unsicherheit und Genauigkeit des Prozessmodells beeinflussen. Typische Störgrößen die im Gebäudebereich auftreten sind zum einen Witterungsbedingungen (z. B. Außentemperatur, Solarstrahlung), personenbezogene Störgrößen (z. B. interne Lasten durch Personen und Geräte) oder netzbezogene Größen (z. B. zeitvariable Strompreise). Für eine gute Reglerperformance sind möglichst akkurate Vorhersagen der Störgrößen nötig, da ungenaue oder inkorrekte Vorhersagen zu falschen Regelaktionen führen können [94]. Diese Vorhersagen können z. B. im Fall der Wettervorhersage entweder *online* bezogen werden oder auf Basis vergangener Messdaten am Gebäude und ggf. einem Vorhersagemodell *offline* ermittelt werden. Auf die Vorhersage der Störgrößen für den in dieser Arbeit entwickelten MPC-Regler wird in Abschnitt 5.3 eingegangen.

Zustandsbeobachter Ein Zustandsbeobachter bzw. eine Zustandsschätzung ist ein weiteres zentrales Element bei der erfolgreichen Anwendung von MPC. Hier wird der Regelkreis geschlossen und die aktuellen gemessenen Werte der Regelgrößen in den Regler zurückgeführt. Das Prozessmodell benötigt in jedem Regelungsschritt möglichst genaue Informationen über Anfangswerte der Zustandsgrößen. Da jedoch nicht alle Zustandsgrößen gemessen werden können, müssen diese mithilfe eines Zustandsschätzers auf Basis gemessener Eingangs- und Ausgangsgrößen geschätzt werden. Dies trägt auch zur Korrektur der modellgestützten Vorhersage bei, da hierbei ein Teil der nicht-messbaren Störgrößen sowie die stets vorhandene Ungenauigkeit des

Prozessmodells berücksichtigt werden. In dieser Arbeit wird zur Zustandsschätzung ein Unscented-Kalman-Filter implementiert, der in Abschnitt 5.4 detaillierter dargestellt wird.

Einordnung von MPC in die mathematische Optimierung

Wie zuvor erwähnt, wird bei MPC in jedem Regelungsschritt ein Optimierungsproblem mit dem Ziel gelöst, eine gegebene Kostenfunktion über einen finiten Zeithorizont unter Einhaltung von Nebenbedingungen zu minimieren. Dabei handelt es sich im Allgemeinen um ein *restringiertes Optimierungsproblem*, d. h. unter Vorhandensein von Nebenbedingungen. Die Standardform eines skalaren, einkriteriellen Optimierungsproblems mit Nebenbedingungen lautet [68]:

$$J^* = \min_{\mathbf{x}} f(\mathbf{x}) \tag{2.3}$$

mit den Nebenbedingungen:

$$g_i(\mathbf{x}) \leq 0, \quad i \in \mathbb{N}_1^m \tag{2.4}$$

$$h_j(\mathbf{x}) = 0, \quad j \in \mathbb{N}_1^p. \tag{2.5}$$

Dabei ist f die Kostenfunktion (auch Zielfunktion genannt), \mathbf{x} sind die Optimierungsvariablen, g stellt die m Ungleichungsnebenbedingungen und h die p Gleichungsnebenbedingungen dar. Der optimale Wert der Zielfunktion wird als J^* bezeichnet. Je nach Eigenschaft der Kostenfunktion, Optimierungsvariablen und Nebenbedingungen werden Optimierungsprobleme in unterschiedliche Problemklassen eingeteilt [32]. Sind sowohl Kostenfunktion als auch alle Nebenbedingungen lineare Funktionen, wird dies als lineares Programm (engl. *Linear Program*, LP) bezeichnet. Sind f , g oder h nichtlineare Funktionen wird dies entsprechend als nichtlineares Programm (engl. *Non-Linear Program*, NLP) bezeichnet. Des Weiteren kann nach dem zulässigen Wertebereich der Optimierungsvariablen unterschieden werden. Ist dieser rein ganzzahlig ($\mathbf{x} \in \mathbb{Z}$), wie z. B. bei binären Entscheidungsvariablen $\mathbf{x} \in \{0,1\}$, werden die Optimierungsprobleme als ILP (*Integer Linear Program*) bzw. INLP (*Integer Non-Linear Program*) klassiert. Sind die Optimierungsvariablen sowohl ganzzahlig als auch kontinuierlich wird entsprechend von MILP (*Mixed-Integer Linear Program*) bzw. MINLP (*Mixed-Integer Non-Linear Program*) gesprochen.

Des Weiteren kann zwischen konvexen und nicht-konvexen Optimierungsproblemen unterschieden werden. Ein Optimierungsproblem ist konvex, wenn sowohl die Zielfunktion als auch der durch die Nebenbedingungen aufgespannte Lösungsraum konvex sind [68]. Die Konvexitätsbedingung impliziert, dass jedes gefundene lokale Optimum auch ein globales Optimum der Zielfunktion ist. Konvexe Probleme sind in der Regel einfach und mit einer Reihe von verfügbaren Lösungsverfahren effizient zu lösen. Bei praktischen Problemen treten jedoch häufig nicht-konvexe Probleme auf, beispielsweise sind alle Probleme mit

(gemischt-)ganzzahligen Optimierungsvariablen nicht-konvex. Solche Optimierungsprobleme sind im Allgemeinen deutlich schwieriger und rechenaufwändiger zu lösen. Oftmals kann sogar gar keine exakte Lösung gefunden werden bzw. es ist nicht nachweisbar, dass ein gefundenes lokales Optimum auch das globale Optimum der Zielfunktion darstellt. Für die unterschiedlichen Klassen von Optimierungsproblemen existiert eine Vielzahl von speziell entwickelten und angepassten Lösungsalgorithmen bzw. heuristischen Methoden. An dieser Stelle sei lediglich auf weiterführende Literatur, z. B. REINHARDT et al. [73] oder LEE und LEYFFER [58] verwiesen.

Eine weitere Klasse von Optimierungsproblemen, die eng mit Modellbasierter Prädiktiver Regelung verknüpft ist, ist die optimale Steuerung (engl. *Optimal Control Problem*). Hierbei wird eine Abfolge von Steuergrößen $u^*(k)$ für ein gegebenes System gesucht, die eine definierte Kostenfunktion über einen theoretisch infiniten Zeithorizont minimiert. Dabei wird nur der offene Wirkungskreis betrachtet. Bei Modellbasierter Prädiktiver Regelung wird das infinite optimale Steuerungsproblem entsprechend des Prinzips des gleitenden Horizontes in endliche, sich überlappende Zeithorizonte eingeteilt und rekursiv gelöst. In jedem Regelungsschritt wird also ein finites optimales Steuerungsproblem mit offenem Wirkungskreis gelöst und durch die Rückkopplung der Zustandsgrößen mittels Zustandschätzung in einen geschlossenen Regelkreis überführt [71]. Dies wird auch als dynamisches Optimierungsproblem bezeichnet.

Die Standardformulierung eines MPC-Optimierungsproblem in allgemeiner Form lautet [34]:

$$\min_{\mathbf{u}_0, \dots, \mathbf{u}_{N_p-1}} \ell_{N_p}(x_{N_p}) + \sum_0^{N_p-1} \ell(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k)) \quad (2.6)$$

mit den Nebenbedingungen:

$$\mathbf{x}(k+1) = f(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k), \mathbf{d}(k)), \quad k \in \mathbb{N}_0^{N_p-1} \quad (2.7)$$

$$\mathbf{x}(k) \in \mathcal{X}, \quad k \in \mathbb{N}_0^{N_p-1} \quad (2.8)$$

$$\mathbf{u}(k) \in \mathcal{U}, \quad k \in \mathbb{N}_0^{N_p-1} \quad (2.9)$$

$$\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0, \quad (2.10)$$

wobei $\mathbf{x}(k)$, $\mathbf{u}(k)$ und $\mathbf{d}(k)$ entsprechend die vom Prozessmodell (2.7) vorhergesagten Zustandsgrößen, Eingangsgrößen und Störgrößen des Systems am Zeitschritt k des Prädiktionshorizonts darstellen. Die Zustandsgrößen und Eingangsgrößen können den in (2.8) und (2.9) gegebenen Beschränkungen unterliegen. Die Anfangsbedingungen des Systems sind in Gleichung (2.10) gegeben. Der Ausdruck $\ell_{N_p}(x_{N_p})$ in (2.6) stellt einen Strafterm an Ende des Prädiktionshorizonts dar (engl. *terminal penalty*) während $\ell(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k))$ die Kosten bei entsprechender Wahl von $\mathbf{x}(k)$ und $\mathbf{u}(k)$ angibt (engl. *stage cost*).

Das Prozessmodell (2.7) kann entweder linear oder nichtlinear sein. Im linearen Fall erfolgt die Darstellung meist als Zustandsraummodell (ZRM) und die Kostenfunktion kann

über Matrixrechnung ausgewertet werden. Im nichtlinearen Fall ist die Auswertung über Matrixrechnung nicht möglich und das zukünftige Systemverhalten des Prozesses muss in geeigneter Weise simuliert werden um die Kostenfunktion berechnen zu können. Bei der Optimierung kann dann keine Konvergenz zu einem globalen Optimum garantiert werden, sodass möglicherweise nur lokale Optima gefunden werden können. Für einen stabilen und zielführenden Einsatz von MPC ist ein globales Optimum nicht zwangsweise notwendig, da durch die Optimierung in der Regel immer eine Reduktion der Kostenfunktion erreicht wird und damit eine „bessere“ Lösung gefunden wird [62].

2.5 Stand der Technik

Die Forschung zu Modellbasierter Prädiktiver Regelung lässt sich unterteilen in *simulationsbasierte* (die Regelstrecke ist ein Simulationsmodell) und *praktische* bzw. *experimentelle* (die Regelstrecke ist ein reales Gebäude oder Teil eines realen Gebäudes) Untersuchungen. Aufgrund des erheblichen Aufwands bei der Implementierung von MPC in reale Gebäudesysteme und der experimentellen Untersuchung, waren und sind simulationsbasierte Studien immer noch vorherrschend. Nach SERALE et al. [82] werden in gerade einmal 21 % der Publikationen zu MPC-Anwendung in Gebäuden praktische Anwendungsfälle untersucht, wobei hier auch solche mit berücksichtigt sind, bei denen das reale System ein Versuchsgebäude oder Versuchsraum mit sehr genau erfassten Umgebungs- und Randbedingungen ist. Die Anzahl an Studien zur experimentellen Untersuchung des Langzeitverhaltens von MPC in realen, großskaligen und sich im Vollbetrieb befindlichen Gebäuden ist damit überschaubar. Im Folgenden wird zunächst kurz auf simulationsbasierte Studien eingegangen. Anschließend wird ein umfassender Überblick über den Stand der Technik bei praktischen MPC-Anwendungen in Gebäuden gegeben, um die vorliegende Arbeit in einen Kontext zu stellen.

2.5.1 Simulationsbasierte MPC-Studien

Bei simulationsbasierten Studien wird das reale Gebäude durch ein weiteres Modell ersetzt. Dies kann entweder als detailliertes White-Box-Modell ausgeführt sein oder im einfachsten Fall identisch mit dem Prozessmodell sein, was den Modellierungsaufwand erheblich reduziert. Typischerweise werden dann zwei Simulationen unter identischen Randbedingungen durchgeführt: eine mit der vorgeschlagenen MPC-Strategie und eine mit einer zu vergleichenden Baseline-Regelungsstrategie. Die Ergebnisse der Simulationen weisen dann teils erhebliche Vereinfachungen auf, da sie zum einen stark von der Güte der Baseline-Strategie abhängen und zum anderen häufig „perfekte“ Vorhersagen aller Stör- und Zustandsgrößen sowie ideale Prozessmodelle (d. h. keine Modellfehler) angenommen werden. In jeder experimentellen Untersuchung sind solche Simulationen in der ersten

Phase dennoch nötig, um den MPC-Regler durch entsprechende Wahl der Reglerparameter zu entwerfen und im Hinblick auf eine gute Reglerperformance einzustellen. Des Weiteren kann hierdurch das theoretische, maximale Potenzial einer MPC-Strategie im untersuchten Gebäude im Vorhinein aufgezeigt werden um so ggf. die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes von MPC zu bewerten.

Aufgrund der umfangreichen Literatur zu simulationsbasierten MPC-Studien würde an dieser Stelle ein vollständiger Überblick über den Rahmen dieser Arbeit hinausgehen. Hierfür sei auf die umfangreichen Literaturübersichten von AFRAM und JANABI-SHARIFI [2], KATHIRGAMANATHAN et al. [53], SERALE et al. [82] und THIEBLEMONT et al. [94] verwiesen. Diese Arbeit konzentriert sich auf die praktische Implementierung von MPC, worauf im Folgenden detaillierter eingegangen wird.

2.5.2 Experimentelle MPC-Studien

In Tabelle 2.2 ist eine Literaturübersicht über die für diese Arbeit relevanten experimentellen MPC-Studien zur Gebäuderegulung gegeben, auf die im Folgenden jeweils kurz eingegangen wird.

Tabelle 2.2: Literaturübersicht über experimentelle MPC-Studien zur Gebäuderegulung. Die verwendeten Abkürzungen sind: Black-Box-Modell (BBM), Grey-Box-Modell (GBM), Künstliche Neuronale Netze (KNN), White-Box-Modell (WBM)

Studie	Beschreibung des Gebäudes	Geregeltes System	Dauer	Prozessmodell
[84] & [70]	Universitätsgebäude	TABS (Heizen)	90 Tage	lineares GBM
[11]	Bürogebäude im Vollbetrieb	RLT-Anlage (Heizen und Kühlen)	21 Tage	nicht angegeben
[89]	Bürogebäude im Vollbetrieb	TABS (Heizen und Kühlen), RLT-Anlage, Jalousien	14 Wochen (Kühlperiode) + 15 Wochen (Heizperiode)	bilineares, vereinfachtes WBM
[18]	Bürogebäude im Vollbetrieb	Heizungskessel und Wärmepumpen	eine Heizperiode	lineares GBM (RC-Modell)
[46]	Flughafenterminal	Klimaanlage	4 Tage	lineares GBM + KNN
[56]	Universitätsgebäude	TABS und FanCoil	110 Tage	BBM auf Basis von linearen AR-X-Modellen
[35]	Bürogebäude im Vollbetrieb	TABS (Heizen und Kühlen) und Ventilsteuerung	150 Tage	linearisiertes, vereinfachtes WBM

Eine der ersten experimentellen Untersuchungen von MPC in einem großen, sich vollständig im Betrieb befindlichen Gebäude wurde von ŠIROKÝ et al. [84] und PRÍVARA et al. [70]

durchgeführt. Hierbei wurden die Thermoaktiven Decken (TAD) eines 8-stöckigen Gebäudeblocks einer Universität in Prag über einen dreimonatigen Zeitraum in der Heizperiode mit MPC geregelt. Als Prozessmodell wurde ein lineares Zustandsraummodell verwendet, das aus Messdaten identifiziert wurde. Die Performance des MPC-Reglers wurde mit einem Standardregler verglichen der einen identischen Gebäudeblock steuerte. Das Energieeinsparpotenzial wurde von den Autorinnen und Autoren mit 15 % bis 28 % angegeben, abhängig vom Grad der Wärmedämmung und der Außentemperatur. Quantitative Aussagen zum thermischen Komfort wurden nicht gemacht.

In BENGEA et al. [11] wurde die raumluftechnische Anlage (RLT-Anlage) zur Heizung und Kühlung eines mittelgroßen Bürogebäudes (650 m² Nutzungsfläche) in Champaign, Illinois mit MPC geregelt. Dabei konnte eine Energieeinsparung von 20 % bis 70 % in der Übergangszeit und der Heizperiode messtechnisch nachgewiesen werden, während gleichzeitig der thermische Komfort verbessert werden konnte.

STURZENEGGER et al. [89] implementierten eine MPC-Strategie in einem modernen Bürogebäude (6000 m² Nutzungsfläche) in der Schweiz um die TAD, die RLT-Anlage und die Jalousien zu regeln. Als Untersuchungszeiträume wurden ein 14-wöchiger Zeitraum während der Kühlperiode und ein 15-wöchiger Zeitraum während der Heizperiode gewählt. Ein bilineares ZRM wurde genutzt um die Dynamik des Gebäudes abzubilden. In beiden Zeiträumen wurde ein akzeptables thermisches Komfortlevel erreicht. Mangels eines geeigneten Vergleichszeitraums wurde die Energieeinsparung durch die MPC-Strategie auf Basis einer Ganzjahressimulation mit 17 % angegeben.

Ein MPC-Regler zur Regelung von zwei Wärmepumpen und einem Heizkessel in einem Bürogebäude (960 m² Nutzungsfläche) in Brüssel wurde von CONINCK und HELSEN [18] implementiert. Als Prozessmodell wurde ein Modelica Grey-Box-Modell auf Basis eines Widerstands-Kapazitätsnetzwerkes (engl. *Resistance-Capacitance-Model*, RC-Modell) verwendet das aus Messdaten identifiziert wurde. Die Einsparung an Primärenergie innerhalb einer Heizperiode im Vergleich zur herkömmlichen Steuerung wurde mit 20 % bis 30 % angegeben, während der thermische Komfort leicht verbessert werden konnte.

Eine MPC-Strategie zur Vorkühlung eines Flughafenterminals in Adelaide, Australien unter der Berücksichtigung von zeitvariablen Strompreisen wurde von HUANG et al. [46] untersucht. Die Gebäudedynamik wurde mit einem linearen ZRM in Kombination mit einem Künstlichen Neuronalen Netz (KNN) modelliert. In einem viertägigen Experiment konnten die Stromkosten durch eine zeitliche Verschiebung der Kühllasten in Tageszeiten mit niedrigeren Strompreisen um 13 % gesenkt werden, während gleichzeitig der Komfortbereich eingehalten wurde.

Von KILLIAN und KOZEK [56] wurde das Konzept *cooperative Fuzzy model predictive control* (CFMPC) entwickelt und in einem Universitätsgebäude in Salzburg implementiert. Zur Beschreibung des nicht-linearen Gebäudeverhaltens wurden mehrere lokale, lineare ARX-Modelle (*autoregressive models with exogeneous inputs*) genutzt, die über Fuzzylogik zu einem Black-Box-Modell miteinander kombiniert werden. Jede Gebäudezone be-

sitzt dabei einen eigenen Fuzzy MPC-Regler (FMPC) die zusätzlich über einen globalen MPC-Regler miteinander koordiniert werden. Geregelt wurden TABS und FanCoils (Umluft-Gebläsekonvektoren). Quantitative Aussagen zur Energieeinsparung oder Komfortverbesserung im Untersuchungszeitraum sind nicht gegeben. In einer Ganzjahressimulation wurde die Energieeinsparung mit 31 % (TABS) bzw. 38 % (FanCoil) bei gleichbleibendem thermischem Komfort abgeschätzt.

In einer kürzlich veröffentlichten Studie haben DRGOŇA et al. [35] einen MPC-Regler in einem Bürogebäude in Hasselt, Belgien angewandt. Das Gebäude ist dem in dieser Arbeit untersuchten Gebäude sehr ähnlich. Beide gehören zu der Klasse der sogenannten „GEOTABS“-Gebäude, bei denen oberflächennahe Geothermie mit Wärmepumpen und Thermoaktiven Bauteilsystemen zur energieeffizienten Beheizung und Kühlung kombiniert werden. Als Prozessmodell wurde hier ein lineares ZRM verwendet, das von einem Modelica White-Box-Modell abgeleitet wurde. Geregelt wurden das TABS-System, die Wärmepumpen und die Heiz- bzw. Kühlkreisventile. Die experimentelle Untersuchung im Zeitraum April bis September 2019 ergab eine Energieeinsparung der Wärmepumpe um 53,5 % und eine Verbesserung des thermischen Komforts um 36,9 % im Vergleich zur vorherigen konventionellen Regelungsstrategie.

Darüber hinaus gibt es eine Vielzahl von praktischen MPC-Anwendungen in (teilweise unbelegten) Versuchsgebäuden oder -räumen, bei denen der MPC-Regler unter sehr genau definierten Randbedingungen zum Einsatz kommt [3, 33, 48, 105]. Da sich jedoch gerade das Vorhandensein nicht-messbarer Unsicherheiten oder Einflüssen durch z. B. Personen bei realen Anwendungen als kritisch erweist, wird an dieser Stelle nicht weiter auf die Ergebnisse der Untersuchungen in Versuchsgebäuden eingegangen.

Das in dieser Arbeit untersuchte Bürogebäude hat eine Netto-Grundfläche von etwa 46 500 m² und ist damit nach derzeitigem Stand das größte Gebäude, indem eine MPC-Regelung implementiert wird. Da das Gebäude aus acht nahezu identischen Gebäudeteilen besteht, die unabhängig voneinander geregelt werden können, bietet sich die einzigartige Möglichkeit, die Auswirkungen von MPC auf die Energieeffizienz und den thermischen Komfort direkt mit herkömmlichen Steuerungs- und Regelungsstrategien bei identischen Betriebs- und Umgebungsbedingungen zu vergleichen. Bis auf [84] ist dies in keiner der zuvor genannten Studien erfolgt. Der MPC-Regler übernimmt dabei die Regelung von Thermoaktiven Decken, indem die Vorlauftemperatur und der Betrieb der Umwälzpumpen optimiert wird. Der Untersuchungszeitraum beläuft sich insgesamt auf 270 Tage in zwei Heizperioden und stellt damit nach aktuellem Stand auch den längsten Zeitraum einer experimentellen MPC-Studie dar. Des Weiteren handelt es sich bei dem Gebäude um ein energetisch hocheffizientes und modernes Bürogebäude, bei dem die Gebäudekonstruktion und Anlagentechnik auf dem aktuellen Stand der Technik sind und das Verbesserungspotential in dieser Hinsicht als nahezu ausgeschöpft betrachtet werden kann. Somit kann der Einfluss der MPC-Regelungsstrategie auf die Maximierung der Energieeffizienz sehr gut analysiert werden kann. Im folgenden Kapitel wird das hier untersuchte Bürogebäude beschrieben.

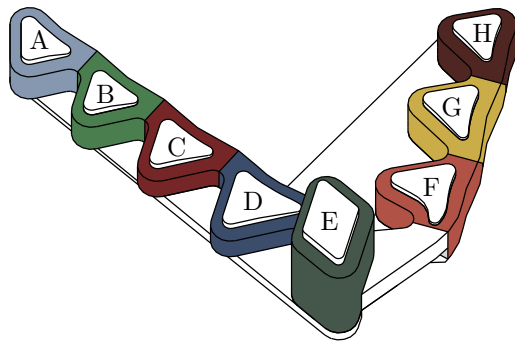
3 Demonstrationsgebäude

In diesem Kapitel wird auf die wesentliche und für diese Arbeit relevanten Aspekte zu den zugrunde liegenden Konzepten und Funktionsweisen des Demonstrationsgebäudes, das Verwaltungsgebäude Neuenfelder Straße (VNS) in Hamburg-Wilhelmsburg, eingegangen. Das Gebäude wurde im Jahr 2013 im Zuge der Internationalen Bauausstellung Hamburg und im Rahmen der Forschungsinitiative Energieoptimiertes Bauen (EnOB) errichtet. Es ist heute Verwaltungshauptsitz der Behörden für Stadtentwicklung und Wohnen (BSW) sowie Umwelt und Energie (BUE), ehemals Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt (BSU). Im Folgenden wird zunächst auf das grundlegende Gebäudekonzept eingegangen. Anschließend erfolgt die Darstellung des Energiekonzeptes, wobei auch auf die relevanten Aspekte der Gebäuderegulierung eingegangen wird. Im letzten Teil dieses Kapitel wird auf die vorhandene Messtechnik und Systeme zur Datenerfassung eingegangen.

3.1 Gebäudekonzept

In Abbildung 3.1 ist das äußere Gebäudekonzept schematisch abgebildet sowie das Erscheinungsbild dargestellt. Das Gebäude besteht aus zwei 5-geschossigen Seitenflügeln und einem zentralen 13-geschossigen Hochhaus. Der Nordflügel ist in drei, der Westflügel in vier Abschnitte eingeteilt, die auch als „Häuser“ bezeichnet werden. Die insgesamt acht Häuser sind alphabetisch benannt, beginnend mit „Haus A“ im äußersten Teil des Westflügels über „Haus E“ als Hochhaus bis „Haus H“ als äußerster Teil des Nordflügels. Insgesamt umfasst das Gebäude eine Netto-Grundfläche von 46 500 m² und bietet Platz für rund 1500 Arbeitsplätze. Die ca. 1250 Büroräume sind außenseitig angeordnet und meist als zweiachsige Einzelraumbüros mit einer Grundfläche von etwa 12 m² ausgeführt. Die Büros in den konvexen und konkaven Gebäudespitzen sind als mehrachsige Kombibüros realisiert. In den inneren Kernbereichen der Häuser sind Sanitäräume, Technikräume, Lager und Archive und zum Teil Besprechungsräume vorhanden.

Das äußere Erscheinungsbild ist geprägt durch geschwungene, horizontal verlaufende Bänder bestehend aus einzelnen Keramikpaneelen unterschiedlicher Farben. Die dahinter liegende Fassade ist als vorgehängte Elementfassade realisiert. Die einzelnen Elemente bestehen aus einem Fensterflügel, einer Nachtlüftungsclappe und zwei opaken Paneelfeldern und sind aus einem Verbundsystem aus Aluminium und Mineralwolle aufgebaut. In einigen Bereichen ist die Fassade als verglaste Pfosten-Riegel-Fassade ausgeführt.



(a) Schematische Darstellung des Gebäudes



(b) Außenansicht

Abbildung 3.1: Schematische Darstellung mit Benennung der Häuser (a) und äußeres Erscheinungsbild des Gebäudes (b).

3.2 Energiekonzept

Als ein Exempel für nachhaltiges Bauen ist das VNS als energetisch hocheffizientes Gebäude geplant und errichtet worden. Die energetischen Zielwerte wurden mit einem maximalen Jahres-Primärenergiebedarf von $70 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ und einem maximalen Jahres-Heizenergiebedarf von $15 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ festgelegt, was in Bezug auf den Heizenergiebedarf dem aktuellen Passivhaus-Standard entspricht. Im Zuge des Grund- und Intensivmonitorings konnte gezeigt werden, dass die Zielvorgabe an den Jahres-Primärenergiebedarf eingehalten wird, während der Jahres-Heizenergiebedarf etwa doppelt so hoch wie der Planungswert ist [37, 64].

Die Deckung des Wärmebedarfs erfolgt zum einen über die Nutzung oberflächennaher Geothermie durch die thermische Aktivierung eines Teils der Gründungspfähle des Gebäudes (auch als Energiepfähle bezeichnet) in Verbindung mit zwei elektrischen Sole/Wasser-Wärmepumpen und zum anderen über den Anschluss an das Nahwärmenetz *Energieverbund Wilhelmsburg Mitte*. Abbildung 3.2 zeigt schematisch das Wärmeversorgungssystem des Gebäudes. Die beiden Wärmepumpen mit einer thermischen Nennleistung von je 232 kW dienen zur Grundlastversorgung. Die Nahwärmeeinbindung mit einer thermischen Nennleistung von 750 kW wird zur Spitzenlastabdeckung und Warmwasserbereitung genutzt. Zur Entkopplung von Wärmebereitstellung und -bedarf sind insgesamt vier Pufferspeicher vorhanden, zwei im Heiz- bzw. Kühlwasserkreislauf mit je 5 m^3 und zwei im Warmwasserbereitungssystem mit je $1,5 \text{ m}^3$.

Im Heizbetrieb wird das Gebäude primär über Thermoaktive Decken beheizt, welche als thermische Aktivierung des Betonkerns der Geschossdecken realisiert sind (Abbildung 3.3a). Durch die dadurch genutzten Speichermassen und Flächen der Geschossdecken können die TAD mit einer maximalen Vorlauftemperatur von 32 °C versorgt werden. In einigen Bereichen sind Heiz- und Kühldecken (HKD) als Unterbau-Decken installiert, die an

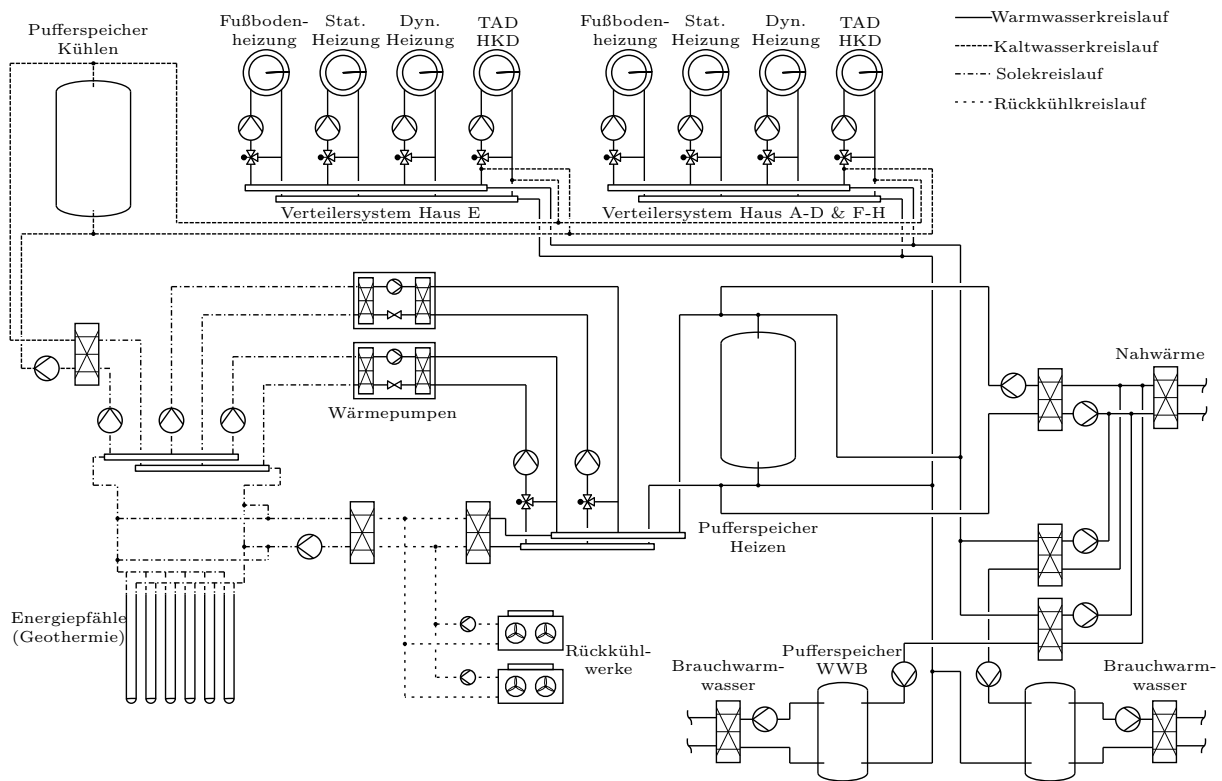


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung des Wärmeversorgungssystems.

die TAD-Stränge angeschlossen sind. Büroräume in den konvexen Gebäudespitzen sowie Räume im Erdgeschoss sind zusätzlich mit einer Fußbodenheizung ausgestattet. Darüber hinaus werden in einigen Bereichen statische Heizungssysteme in Form von Konvektoren oder Radiatoren eingesetzt.

Zur kontrollierten mechanischen Be- und Entlüftung werden die Büroräume im Heizbetrieb mit temperierter Zuluft versorgt. Die raumlufttechnischen Anlagen sind als reine Außenluftanlagen mit effizienter Wärmerückgewinnung ausgestattet. Zur Nacherwärmung sind die RLT-Anlagen an den Warmwasserkreislauf des Heizungsnetzes angeschlossen, was in Abbildung 3.2 als „dynamische Heizung“ bezeichnet ist, auch wenn es sich hierbei nicht um ein Heizungssystem im klassischen Sinne handelt. Über Drallauslässe in den Decken wird die auf 22 °C temperierte Zuluft den Büroräumen zugeführt und die Abluft durch freie Nachströmung über die Überströmelemente oberhalb der Bürotür in die Flure und Atrien geleitet und schließlich zentral unter dem Dach abgesaugt, siehe Abbildung 3.3a.

Die Kühlung des Gebäudes im Sommerbetrieb erfolgt hauptsächlich durch die Nutzung der oberflächennahen Geothermie als Wärmesenke über die Energiepfähle. Analog zur Beheizung werden dazu die TAD bzw. HKD mit Kaltwasser mit einer minimalen Temperatur von 18 °C beschickt. Die kontrollierte mechanische Be- und Entlüftung wird im Kühlbetrieb durch eine manuelle, freie Lüftung über die Fenster oder Nachtlüftungsklap- pen ersetzt. Die aktive Nutzung der Nachtlüftungsklappen zur freien Lüftung mit kühler Außenluft während der Nachtstunden ist ebenfalls Bestandteil des Kühlkonzeptes. Die

kühle Außenluft wird durch die Büros über Überströmelemente in die Atrien geführt und schließlich über das Dach aus dem Gebäude abgeführt (Abbildung 3.3b). Dabei geben die thermischen Speichermassen des Gebäudes Wärme an den durch natürliche Konvektion entstehenden Luftstrom ab. Für den sommerlichen Wärmeschutz ist in jedem Bürofenster ein automatisch gesteuerter sonnenstands- und jahreszeitabhängiger außenanliegender Sonnenschutz integriert, der aber jederzeit vom Nutzenden individuell übersteuert werden kann. Bei der freien, passiven Kühlung unter Ausnutzung des vorherrschenden Temperaturniveaus im Erdreich ist eine nachhaltige Nutzung des Geothermiefeldes von entscheidender Bedeutung. Um die natürliche Regeneration des Erdreichs zu ermöglichen, müssen die Wärmeeinträge im Sommer den Wärmeentzug im Winter möglichst vollständig kompensieren [38]. In diesem Zusammenhang können auch die vorhandenen Rückkühlwerke eingesetzt werden, um die Energiebilanz des Erdreichs gezielt zu beeinflussen.

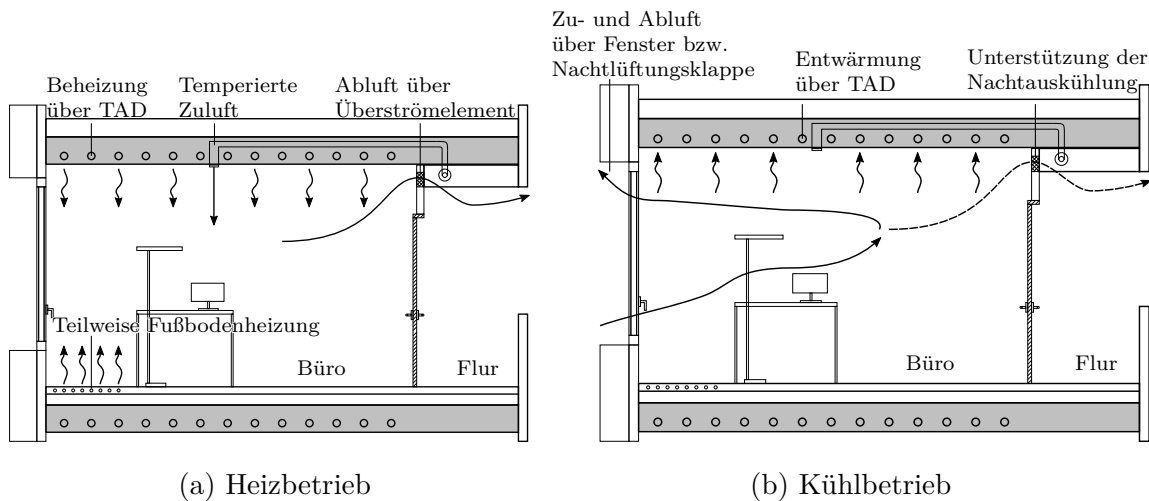


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung des Energie- und Raumkonzeptes im Heizbetrieb (a) und Kühlbetrieb (b).

Aktuelle Gebäuderegulung

Standardmäßig erfolgt die Regelung der in Abbildung 3.2 dargestellten Heizkreise hauptsächlich aus einer Kombination von außentemperaturgeführten Heiz- bzw. Kühllkurven und Zeitplänen zur Aktivierung der Umwälzpumpen. Da es jedoch keine Rückkopplung z. B. in Form von Raumtemperaturen gibt, kann hier vielmehr von einer Steuerung mit Störgrößenaufschaltung als von einer Regelung gesprochen werden. Insgesamt gibt 16 TAD-Heizkreise, je zwei pro Haus, wobei diese jeweils getrennt nach Himmelsrichtung in TAD-West und TAD-Ost (Nordflügel) sowie TAD-Südwest und TAD-Nordost (Westflügel und Hochhaus) sind. Bei allen TAD-Heizkreisen sind standardmäßig die identischen Heiz- und Kühllkurven hinterlegt, lediglich die Zeitpläne unterscheiden sich je nach Heizkreis. Eine individuelle Raumtemperaturregelung auf Raum- oder Geschosebene ist nicht mög-

lich. Abbildung 3.4 zeigt Heiz- und Kühlkurve sowie die Zeitpläne der Pumpen für die TAD-Heizkreise.

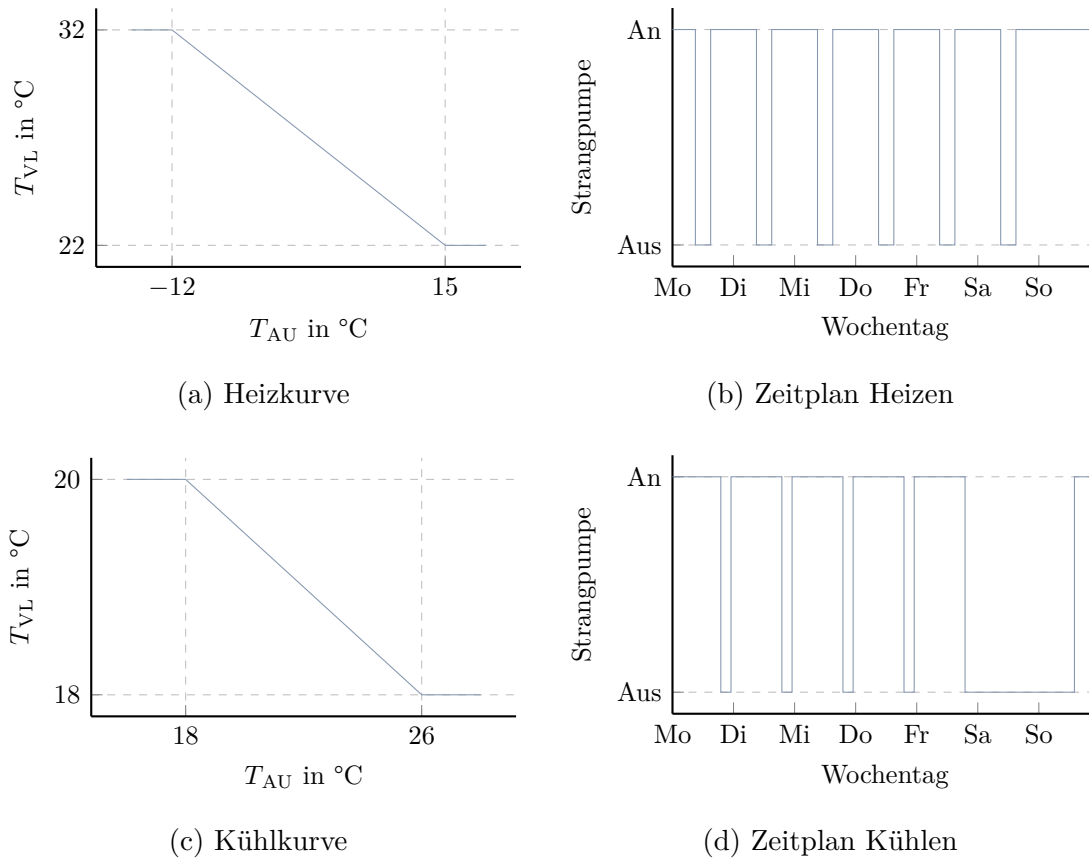


Abbildung 3.4: Heizkurve (a), Zeitplan der Strangpumpe Heizen (b), Kühlkurve (c) und Zeitplan der Strangpumpe Kühlen (d) für die TAD-Heizkreise.

Im Heizbetrieb wird die Soll-Vorlauftemperatur linear in Abhängigkeit der aktuellen Außentemperatur in einem Bereich von 22 °C bis 32 °C ermittelt (vgl. Abbildung 3.4a). Dieser Sollwert wird mithilfe von PI-Reglern durch Regelung der Öffnung der Dreiwegeventile in den jeweiligen Heizkreisen eingestellt. Zur passiven Kühlung des Gebäudes werden die TAD im Kühlbetrieb mit einer Soll-Vorlauftemperatur von 18 °C bis 20 °C beschickt (vgl. Abbildung 3.4c). Die in den Abbildungen 3.4b und 3.4d dargestellten Zeitpläne geben die Zeiten an, in denen die Umwälzpumpen aktiviert werden können. Die tatsächlichen Start- und Stoppzeiten werden auf Basis einer internen Steuerungslogik von der Gebäudeleittechnik (GLT-Software) ermittelt. Im Heizbetrieb erfolgt die Beschickung hauptsächlich abends/nachts zwischen 15 und 8 Uhr, im Kühlbetrieb zusätzlich auch tagsüber zwischen 23 und 18 Uhr, wobei an Samstagen keine Aktivierung möglich ist. Die Umschaltung zwischen Heiz- und Kühlbetrieb erfolgt automatisch auf Basis des dynamischen Mittelwerts der Außentemperatur der vergangenen 36 Stunden bei 16 °C mit einem Totband von 2 K. Dabei betrifft die Umschaltung die Gesamtanlage, d. h. eine individuelle Umschaltung einzelner Heizkreis ist nicht möglich.

Die anderen Heizkreise (Fußbodenheizung, statische Heizung und dynamische Heizung) werden in ähnlicher Weise gesteuert, wobei hier unterschiedliche Heizkurven und Zeitpläne verwendet werden. Die maximale Vorlauftemperatur beträgt hier 50 °C. Im Kühlbetrieb sind diese Heizkreise inaktiv.

Die Regelung der Heizungsanlage erfolgt grundsätzlich auf Basis einer Kaskadenregelung. Die beiden kaskadenweise betriebenen Wärmepumpen bedienen primär den Heizungspufferspeicher, wobei sich die erforderliche Soll-Speichertemperatur aus der aktuell höchsten Vorlauftemperatur aller Heizkreise ergibt. Ist die thermische Leistungsabgabe der Wärmepumpen nicht ausreichend um den Sollwert zu erreichen, wird zusätzlich die Nahwärmeversorgung als weitere Stufe zugeschaltet. Aus hygienischen Anforderungen, vor allem in Bezug auf Legionellenschutz, werden die beiden Pufferspeicher zur Warmwasserbereitung um das hierfür erforderliche Temperaturniveau zu erreichen ausschließlich mit Wärme aus dem Nahwärmenetz bedient.

3.3 Messtechnik und Datenerfassung

In diesem Abschnitt werden die für diese Arbeit relevante und im Gebäude vorhandene Messtechnik sowie die Systeme der Messdatenerfassung vorgestellt. Grundsätzlich stehen insgesamt vier Systeme zur Erfassung von Messdaten aus dem Gebäudebetrieb zur Verfügung:

- TREND Leitstation 963 (GLT-Software)
- TREND Energy Manager
- LabVIEW Messdatenerfassung der Technische Universität Hamburg (TUHH)
- Temperaturerfassung Geothermiefeld

In dieser Arbeit werden ausschließlich Daten aus dem Messdatenerfassungssystem der TUHH verwendet, welches im Rahmen des IMOBS-Forschungsprojektes [37] eingerichtet wurde und seit September 2014 im vollen Umfang zur Verfügung steht. Auf dem TUHH-Messrechner ist dazu ein OPC-Server (Open Platform Communications) eingerichtet, der parallel zur Datenerfassung über die GLT-Software Messdaten von den DDC-Stationen (Direct Digital Control) der Gebäudeautomation abgreift. Über LabVIEW als OPC-Client werden die vom Server bereitgestellte Daten verarbeitet, dargestellt und archiviert. Hierbei kann auf über 1000 für das Gebäudemonitoring relevante Messpunkte in einem Messintervall von 1 min zurückgegriffen werden. Der auf dem Messrechner vorhandene OPC-Server ermöglicht auch die Kommunikation zwischen dem in MATLAB® implementierten MPC-Regelungsalgorithmus und der GLT-Software mithilfe der OPC Toolbox™ [91]. Details hierzu sind in Abschnitt 5.5 aufgeführt.

Zusätzlich zu der zentralen Messdatenerfassung wird in dieser Arbeit mobile Messtechnik in Form von Datenloggern zur Erfassung von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit

eingesetzt. In Tabelle 3.1 sind die in dieser Arbeit verwendeten Messgrößen unter Angabe des Messprinzips und der zugehörigen Messunsicherheit zusammengefasst.

Tabelle 3.1: Verwendete Messtechnik und zugehörige Messunsicherheiten.

Messgröße	Hersteller/Modell	Sensortyp/Messprinzip	Messunsicherheit
Referenzräume			
Lufttemperatur	Thermokon FTW04 VV	NTC 10k Thermistor	$\leq \pm 0,5 \text{ °C}$ (0...50 °C)
Relative Feuchte	Thermokon FTW04 VV	Kapazitiver Feuchtesensor	$\pm 2 \%$ r.F. (10...90 % r.F.)
Lufttemperatur	Thermokon WRF04 CO2 VVV	NTC 10k Thermistor	$\pm 1 \%$ v. Mb. (0...50 °C)
Relative Feuchte	Thermokon WRF04 CO2 VVV	Kapazitiver Feuchtesensor	$\pm 3 \%$ r.F. (20...80 % r.F.)
Datenlogger			
Lufttemperatur	Lascar Electronics EL-USB-2+	NTC	$\pm 0,45 \text{ °C}$ (5...60 °C)
Relative Feuchte	Lascar Electronics EL-USB-2+	Kapazitiver Feuchtesensor	$\pm 2 \%$ r.F. (10...90 % r.F.)
Thermische Energien			
Thermische Energie	Sensus Wärmemengenzähler bestehend aus Rechenwerk, Temperaturfühler und Durchflusssensor		$\pm 6 \%$ v. Mw.
Warm- und Kaltwassertemperatur	Sensus Typ 6338 / Pt 500	Pt500 Widerstandsthermometer	$\pm (0,5 + 3 \cdot \frac{\vartheta_{\min}}{\Delta\vartheta}) \%$
RLT-Anlage			
Lufttemperatur	Trend TB/TI/L	NTC 10k Thermistor	$\pm 1,28 \text{ °C}$ (-30...100 °C)
Volumenstrom	Thermokon DPT Flow-D-1000	Wirkdruck	$\pm 5 \text{ Pa} + 1,5 \%$ v. Mw.
Wetterstation			
Lufttemperatur	Warema MWG Hygrotherm	Pt100 Widerstandsthermometer	$\pm \frac{1}{3} \cdot (0,3 \text{ °C} + 0,005 \cdot \vartheta)$
Solarstrahlung	Siemens QLS60	Solarzelle	(0...1000 W/m ²)
Globalstrahlung	Warema MWG Globalstrahlung	Thermosäule	$\leq \pm 10 \%$ (0...1300 W/m ²)

Referenzräume

Zur Untersuchung des Komforts wurden im Zuge des Monitoring-Projektes in dem Gebäude insgesamt 32 Referenzräume eingerichtet. In diesen Referenzräumen wird die Raumlufttemperatur und relative Luftfeuchte kontinuierlich messtechnisch erfasst. Um zusätzlich

den Einfluss von Personen auf den Gebäudebetrieb untersuchen zu können, erfolgt in Referenzräumen eine Präsenzmessung auf Basis von Infrarot-Bewegungssensoren sowie die Registrierung der Bedienung von Fenstern und Nachtlüftungsklappen über entsprechende Kontakte. Des Weiteren sind zehn der Referenzräume als erweiterte Referenzräume ausgeführt, bei denen zusätzlich die CO_2 -Konzentration, die operative Raumtemperatur sowie die Deckenoberflächentemperatur gemessen wird.

Abbildung 3.5 zeigt den Grundriss des Gebäudes mit der Lage und Orientierung der vorhandenen Referenzräume. Die mit * gekennzeichneten Räume sind erweiterte Referenzräume. Die Räume befinden sich im dritten Obergeschoss der Häuser A, C und G (bezeichnet als A_i , C_i und G_i) sowie im fünften (Räume E_i) und zehnten (Räume E_{1i}) Obergeschoss des Hochhauses (Haus E).

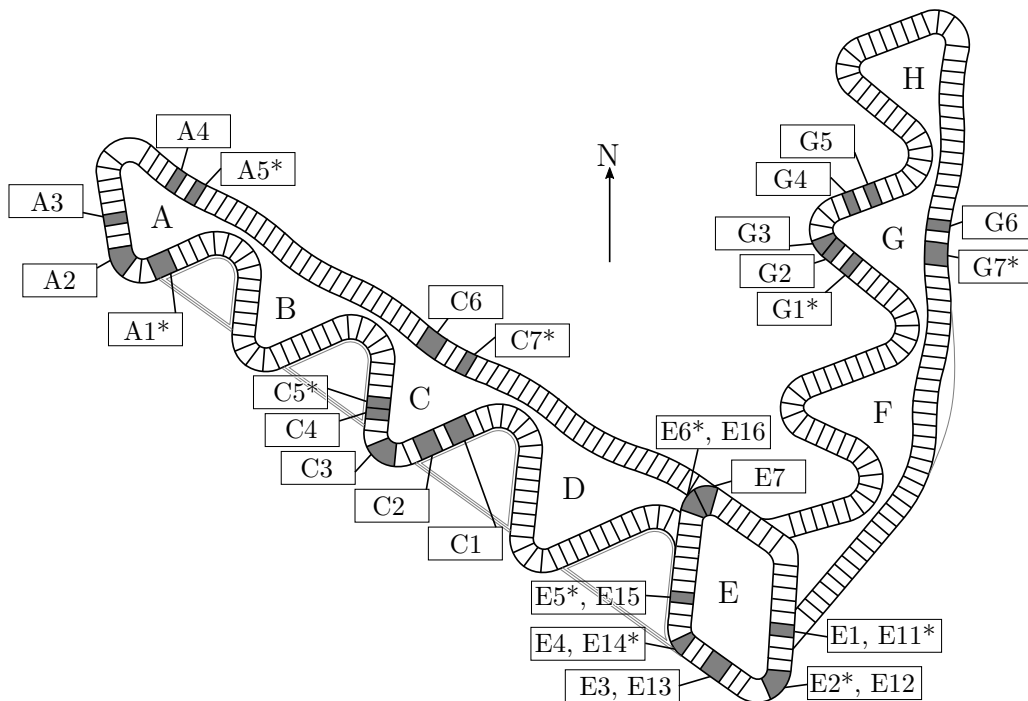


Abbildung 3.5: Lage und Orientierung der Referenzbüroräume im Gebäude.

Diese Referenzräume spielen eine Schlüsselrolle in dem hier entwickelten Konzept der Modellbasierten Prädiktiven Regelung des Gebäudes. Von diesen Referenzräumen werden im folgenden Kapitel Modelle entwickelt, die als Prozessmodelle vom Regler verwendet werden. Die MPC-Regelung eines TAD-Heizkreises eines gesamten Gebäudeabschnitts erfolgt dann ausschließlich auf Basis dieser Modelle und der gemessenen Raumtemperaturen in den Referenzräumen.

4 Modellierung des Gebäudes

In diesem Kapitel wird auf die Entwicklung der Modelle eingegangen, die im MPC-Regler als Prozessmodelle zur Prädiktion des thermischen Verhaltens des Demonstrationsgebäudes verwendet werden. Zunächst werden dafür in Abschnitt 4.1 die relevanten Grundlagen der Thermodynamik und Wärmeübertragung vorgestellt. Die entwickelten Modelle können zu der Klasse der *Grey-Box-Modelle* zugeordnet werden, einem hybriden Modellierungsansatz bestehend aus einer vereinfachten physikalischen Modellstruktur und einer datenbasierten Methode zur Parameteridentifikation. Auf die Motivation des gewählten Modellierungsansatzes und auf die Modellstruktur wird in Abschnitt 4.2 eingegangen. Anschließend folgt in Abschnitt 4.3 eine detaillierte Beschreibung der Parameteridentifikation zur Ermittlung von Modellparametern auf Basis der im Gebäudebetrieb ermittelten Messdaten.

4.1 Thermodynamische Grundlagen

Die fundamentalen Grundlagen für die Bilanzierung von Energien und damit für die thermische Modellierung von Gebäuden bilden der 1. und 2. Hauptsatz der Thermodynamik, die im Folgenden vorgestellt werden.

4.1.1 Der 1. Hauptsatz der Thermodynamik

Der 1. Hauptsatz für ein instationäres und offenes System lässt sich wie folgt formulieren:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{\partial E_{\text{kin}}}{\partial t} + \frac{\partial E_{\text{pot}}}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial t} = \dot{W} + \dot{Q} + \sum_{i=1}^n \dot{m}_i \left(u_i + \frac{p_i}{\rho_i} + \frac{1}{2} v_i^2 + g \cdot \Delta z_i \right) \quad (4.1)$$

Die Energie eines Systems E setzt sich zusammen aus der Summe der beiden *äußeren Energien*, der kinetischen Energie E_{kin} und potentiellen Energie E_{pot} sowie der *inneren Energie* U . Die innere Energie kann dabei in innere thermische Energie, innere chemische Energie und innere nukleare Energie unterteilt werden. Aus dem 1. Hauptsatz folgt, dass sich die Energie eines Systems nur durch Energietransport in Form von Leistungen \dot{W} oder Wärmeströmen \dot{Q} sowie durch konvektiven Energietransport durch die Summe der ein- und austretende Massenströme \dot{m}_i über die Systemgrenzen ändern kann. Wird ein ruhendes System betrachtet, das nicht von Masse durchströmt wird, wie es beispielsweise bei einfachen Bauteilen in Gebäuden der Fall ist, dann vereinfacht sich der 1. Hauptsatz zu:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \dot{W} + \dot{Q} \quad (4.2)$$

4.1.2 Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik

Mit dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik wird die Zustandsgröße *Entropie* eingeführt, mit der sich die Einschränkungen in der Wandelbarkeit von verschiedenen Energieformen quantifizieren lässt. Der 2. Hauptsatz für ein instationäres, offenes System lautet:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\dot{Q}_{\text{rev}}}{T} + \sum_{i=1}^n \dot{m}_i \cdot s_i + \dot{S}_{\text{irr}} \quad \text{mit} \quad \dot{S}_{\text{irr}} \geq 0 \quad (4.3)$$

Die Entropie S eines Systems kann sich durch (reversiblen) Energietransport in Form von Wärme ($\frac{\dot{Q}_{\text{rev}}}{T}$ mit T als absolute Temperatur) oder durch konvektiven Transport über die Systemgrenzen ($\dot{m}_i \cdot s_i$ mit s_i als spezifische Entropie) sowie durch irreversible Prozesse mit \dot{S}_{irr} als die durch Irreversibilitäten erzeugte Entropieproduktion ändern. Eine Implikation des 2. Hauptsatzes ist unter anderem, dass Wärme nur in Richtung abnehmender Temperatur fließen kann, also niemals „von selbst“ von einem Körper niedriger Temperatur auf einen Körper höherer Temperatur übergeht. Für weitere Ausführungen zu thermodynamischen Grundlagen sei hier auf Lehrbücher wie z. B. SCHMITZ [79] verwiesen.

4.1.3 Wärmeübertragung

Wärme kann auf drei verschiedene Arten übertragen werden: über Leitung, Konvektion und Strahlung. Bei der Beschreibung des thermischen Verhaltens von Gebäuden treten dabei oftmals alle drei Phänomene gleichzeitig auf. Im Folgenden soll daher kurz auf die drei Arten der Wärmeübertragung sowie für die Modellierung relevanten Vereinfachungen eingegangen werden.

Wärmeleitung

Wärmeleitung findet in festen oder ruhenden flüssigen oder gasförmigen Körpern statt. Nach dem Fourier'schen Gesetz ist die Wärmestromdichte \dot{q} in W/m^2 durch Wärmeleitung proportional zu der Größe des Temperaturgradienten ∇T mit negativen Vorzeichen zu diesem Gradienten:

$$\dot{q} = -\lambda \nabla T \quad (4.4)$$

Der Proportionalitätsfaktor ist die Wärmeleitfähigkeit λ in $\text{W}/(\text{mK})$, eine stoffspezifische Größe die im Allgemeinen eine Funktion der Temperatur ist. Im eindimensionalen und stationären Fall mit konstanter (oder ggf. gemittelter) Wärmeleitfähigkeit vereinfacht sich diese Gleichung und der durch Wärmeleitung übertragene Wärmestrom kann beschrieben werden mit:

$$\dot{Q} = -\lambda A \frac{\Delta T}{l} = -\frac{1}{R_\lambda} \Delta T \quad (4.5)$$

Wird beispielsweise die Wärmeleitung durch eine ebene Wand betrachtet sind dabei

- A in m^2 : Oberfläche der Wand,
- ΔT in K: treibende Temperaturdifferenz zwischen den beiden Wandoberflächen,
- $R_\lambda = \frac{l}{\lambda A}$ in K/W: Wärmeleitwiderstand,
- l in m: Wandstärke.

Aus dem ersten Hauptsatz für instationäre Systeme (Gleichung 4.2) und dem oben genannten Fourier'schen Gesetz kann die dreidimensionale instationäre Wärmeleitungsgleichung in kartesischen Koordinaten hergeleitet werden:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \cdot \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (4.6)$$

Dabei ist ρ die Dichte und c die spezifische Wärmekapazität. Mithilfe dieser partiellen Differentialgleichung lässt sich das transiente, dreidimensionale Temperaturfeld in einem Bauteil, z. B. einer Wand, berechnen. Für einige technische Anwendungsfälle existieren analytische Lösung der Wärmeleitungsgleichung. Bei komplexeren Geometrien und komplizierteren Anwendungsfällen kann diese häufig aber nur noch numerisch gelöst werden [10].

Konvektive Wärmeübertragung

Konvektive Wärmeübertragung tritt immer dann auf, wenn Strömungen gasförmiger oder flüssiger Fluide vorliegen, z. B. bei der Durchströmung von Kanälen oder der Überströmung von Wänden. Dabei kann zwischen *erzwungener* Konvektion und *freier* Konvektion unterschieden werden. Bei erzwungener Konvektion wird die Strömung durch äußere Kräfte, z. B. durch Pumpen oder Ventilatoren hervorgerufen. Bei freier Konvektion wird die Strömung durch Dichteunterschiede im Fluid hervorgerufen. Die konvektive Wärmeübertragung ist bei der Beschreibung von Wärmeübertragungsprozessen in Gebäuden schwieriger zu bestimmen als die Wärmeleitung. Im Allgemeinen kann der Wärmestrom durch Konvektion an der Oberfläche eines Körpers beschrieben werden durch:

$$\dot{Q} = \alpha_{\text{kon}} A (T_{\text{W}} - T_{\text{f}}) = \frac{1}{R_{\alpha_{\text{kon}}}} (T_{\text{W}} - T_{\text{f}}) \quad (4.7)$$

Dabei sind

- α_{kon} in $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$: konvektiver Wärmeübergangskoeffizient,
- T_{W} in K: (Wand)-Oberflächentemperatur,
- T_{f} in K: Temperatur des Fluids gerade außerhalb der sich ausbildenden Strömungsgrenzschicht,
- $R_{\text{kon}} = \frac{1}{\alpha_{\text{kon}} A}$ in K/W: Wärmeübergangswiderstand.

Bei gebäudetechnischen Anwendungen kann die Fluidtemperatur T_f in guter Näherung mit der (messtechnisch erfassten) Raumlufttemperatur T_R gleichgesetzt werden. Für den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten α_{kon} gibt es für zahlreiche, technisch relevante Konfigurationen Korrelationen oder Standardwerte, z. B. im VDI-Wärmeatlas [100] oder der DIN EN ISO 6946 [29]. Für TABS (z. B. Deckenheizung oder -kühlung) wurden u. a. von AWBI H. B. und HATTON A. [9] empirische Korrelationen entwickelt.

Kombinierte Wärmeübertragung durch Leitung und Konvektion

Die kombinierte Wärmeübertragung von einem bewegten Fluid (Konvektion) durch einen festen Körper (Leitung) zu einem weiteren Fluid (Konvektion) wird als Wärmedurchgang bezeichnet. Ein einfaches Beispiel ist eine Wand, die auf der einen Seite mit der Außenluft und auf der anderen Seite mit Innenraumluft in Kontakt steht. In Anlehnung an die zuvor aufgeführten Gleichungen zur Wärmeübertragung wird der Wärmedurchgang beschrieben mit:

$$\dot{Q} = k_D A (T_{f,1} - T_{f,2}) = \frac{1}{R_D} (T_{f,1} - T_{f,2}) \quad (4.8)$$

Dabei sind

- k_D in $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$: Wärmedurchgangskoeffizient,
- $T_{f,1}$ und $T_{f,2}$ in K : Fluidtemperaturen auf den jeweiligen Seiten der Wand,
- $R_D = \frac{1}{k_D A}$ in K/W : Wärmedurchgangswiderstand.

Wärmestrahlung

Jeder Körper emittiert Wärmestrahlung in Form elektromagnetischer Wellen an seine Umgebung. Diese Form der Wärmeübertragung ist daher nicht-stoffgebunden. Nach dem STEFAN-BOLTZMANN-Gesetz ist die emittierte Wärmestrahlung proportional zur vierten Potenz der Oberflächentemperatur des Körpers. Werden zwei oder mehr Körper betrachtet, so stehen diese miteinander im Strahlungsaustausch, wobei sich dadurch netto übertragene Wärmeströme zwischen den Körpern ergeben. Im realen Fall stehen daher alle z. B. in einem Raum vorhandenen Oberflächen miteinander im Strahlungsaustausch. Eine Berechnung der übertragenen Wärmeströme ist gerade bei komplexen Gebäude- oder Raumgeometrien sehr aufwändig. Bei der Modellierung müssen zur Berechnung der Wärmestrahlung daher Vereinfachungen getroffen werden. Für den in Gebäuden relevanten Temperaturbereich und die dort auftretenden Temperaturdifferenzen kann der übertragene Wärmestrom von einem Körper mit der mittleren Oberflächentemperaturen T_W an die

in einem Raum vorhandenen Umschließungsflächen ohne großen Fehler wie folgt linearisiert werden [86]:

$$\begin{aligned}
 \dot{Q} &= \epsilon \sigma A (T_{\text{W}}^4 - T_{\text{str}}^4) \\
 \dot{Q} &= 4\epsilon \sigma A \left(\frac{T_{\text{W}} + T_{\text{str}}}{2} \right)^3 (T_{\text{W}} - T_{\text{str}}) \\
 \dot{Q} &= 4\epsilon \sigma A T_{\text{m}}^3 (T_{\text{W}} - T_{\text{str}}) \\
 \dot{Q} &= \alpha_{\text{str}} A (T_{\text{W}} - T_{\text{str}}) \\
 \dot{Q} &= \frac{1}{R_{\text{str}}} (T_{\text{W}} - T_{\text{str}})
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

mit

- ϵ : Emissionsgrad der Oberfläche,
- $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$: STEFAN-BOLTZMANN-Konstante,
- T_{str} in K: Strahlungstemperatur des Raumes,
- T_{m} in K: arithmetischer Mittelwert aus T_{W} und T_{str} ,
- $\alpha_{\text{str}} = \epsilon \sigma 4T_{\text{m}}^3$ in $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$: (Strahlungs)-Wärmeübergangskoeffizient,
- $R_{\text{str}} = \frac{1}{\alpha_{\text{str}} A}$ in W/K : (Strahlungs)-Wärmeübergangswiderstand.

Als die „Strahlungstemperatur“ eines Raumes T_{str} wird die mittlere Oberflächentemperatur unbeheizter Oberflächen (engl. *average unheated surface temperature, AUST*) unter Berücksichtigung der Sichtfaktoren zwischen den Oberflächen verwendet [107]. Häufig wird als Vereinfachung jedoch die flächengewichteten Temperaturen der Umschließungsflächen gewählt.

Kombinierte Wärmeübertragung durch Konvektion und Strahlung

In Gebäuden treten Konvektion und Strahlung häufig parallel auf, da beispielsweise eine Wand sowohl mit einem Fluid (der Raumluft) im Kontakt steht als auch mit anderen Oberflächen der Umgebung zusätzlich im Strahlungsaustausch steht. Für diesen Fall werden häufig weitere Vereinfachungen zur Beschreibung des übertragenden Wärmestroms gemacht. Dazu werden die Wärmeströme durch Konvektion und Strahlung addiert und mit einem gemeinsamen Wärmeübergangskoeffizienten zusammengefasst:

$$\begin{aligned}
 \dot{Q} &= \alpha_{\text{kon}} A (T_{\text{W}} - T_{\text{f}}) + \alpha_{\text{str}} A (T_{\text{W}} - T_{\text{str}}) \\
 \dot{Q} &= \alpha_{\text{kon+str}} A (T_{\text{W}} - T_{\text{ref}}) \\
 \dot{Q} &= \frac{1}{R_{\text{kon+str}}} (T_{\text{W}} - T_{\text{ref}})
 \end{aligned} \tag{4.10}$$

Für die zur Berechnung gewählte Referenztemperatur T_{ref} gibt es keine einheitliche Definition. Ein häufig gewählter Ansatz ist die Verwendung der operativen Temperaturen T_{op} [15]. In Anlehnung an SOURBRON et al. [87] wird in dieser Arbeit zur weiteren Vereinfachung hierfür der Begriff „Zonentemperatur“ T_Z verwendet, unter der Annahme, dass sich diese Zonentemperatur für alle in einem Raum vorhandenen Oberflächen nicht stark von der jeweiligen Referenztemperatur unterscheidet. Des Weiteren wird im Folgenden angenommen, dass diese Zonentemperatur der in den Referenzräumen gemessenen Raumlufttemperatur T_R entspricht, da nur in wenigen Referenzräumen die tatsächliche operative Temperatur gemessen wird (vgl. Abbildung 3.5).

4.2 Modellierung der Referenzzonen

Die Entwicklung von Modellen, die das thermische Verhalten von Gebäuden dynamisch abbilden und dabei gleichzeitig in regelungstechnischen Echtzeitanwendungen verwendet werden können, stellt derzeit noch die größte und arbeitsintensivste Herausforderung für die Implementierung von MPC im Gebäudebereich dar [55]. Die Klassen von hier eingesetzten Gebäudemodellen können als *regelungsorientierte* (aus dem engl. *control-oriented model*, siehe z. B. [8]) Modelle bezeichnet werden, die speziell für regelungstechnische Anwendungen wie MPC entwickelt werden. Die Eigenschaften und Anforderungen solcher Modelle lassen sich wie folgt zusammenfassen: 1) ausreichende Vorhersagegenauigkeit auf einem anwendungsspezifischen Zeithorizont (meist mehrere Tage), 2) effizient im Sinne einer kurzen Simulationszeit um das Online-Optimierungsproblem in ausreichender Zeit zu lösen, 3) leicht verständlich und einfach umsetzbar, 4) übertrag- und anpassbar um für unterschiedliche Gebäude eingesetzt werden zu können. Für diese Klasse der regelungsorientierten Modelle ist die Fähigkeit, das Systemverhalten auf einem für die Regelungsaufgabe relevanten Zeithorizont vorherzusagen, von entscheidender Bedeutung. Daher können diese Modelle bei längeren Zeithorizonten, z. B. bei Ganzjahressimulationen ein schlechtes Simulationsverhalten, d. h. eine geringe Genauigkeit, aufweisen.

Oftmals ist es aufgrund der hohen Komplexität nicht zielführend ein Gebäude in seiner Gesamtheit mit allen vorhandenen Elementen zu modellieren. Stattdessen wird sich auf die Modellierung einzelner Gebäudezonen konzentriert. Als eine Zone wird im Folgenden ein räumlich definierter Teilbereich eines Gebäudes bezeichnet, dessen thermisches Verhalten als homogen angenommen wird und repräsentativ für einen Gebäudebereich steht. Eine Referenzzone ist eine mit Messtechnik ausgestattete Zone und damit identisch mit den in Abschnitt 3.3 vorgestellten Referenzbüroräumen. Ein Zonenmodell ist damit ein Simulationsmodell einer Referenzzone, das vom MPC-Regler als Prozessmodell zur Prädiktion genutzt wird. Im späteren Verlauf werden zur MPC-Regelung eines TAD-Heizkreises mehrere Zonenmodelle zu Mehrzonenmodellen zusammengefasst.

In Abbildung 4.1 ist eine typische Referenzzone des betrachteten Gebäudes dargestellt. Neben den auftretenden Wärmeströmen sind in der Abbildung zusätzlich die in einer Refe-

renzzone bzw. am Gebäude gemessenen Temperaturen dargestellt. Die Einflussgrößen auf

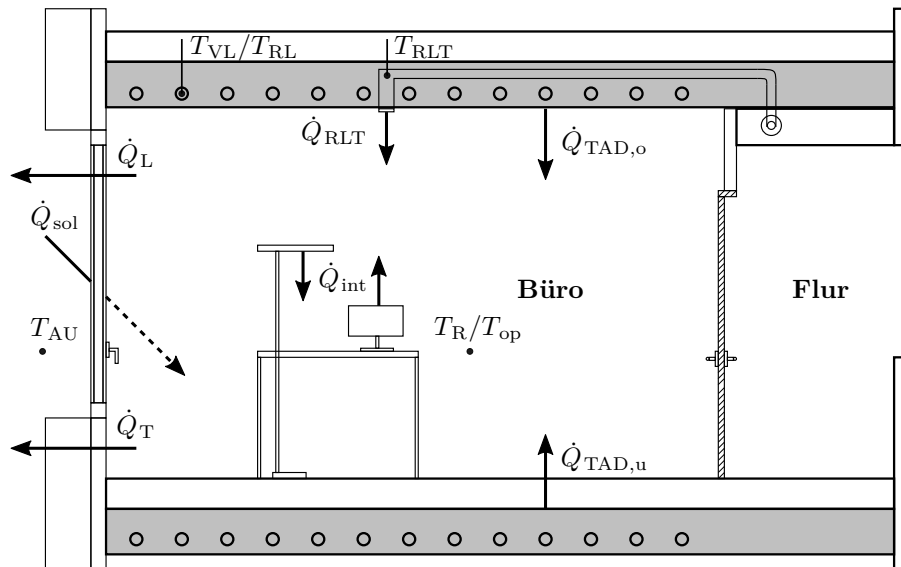


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung einer Referenzzone mit auftretenden Wärmeströmen und gemessenen Temperaturen.

die Raumlufttemperatur T_R bzw. operative Temperatur T_{op} können in äußere und innere Faktoren aufgeteilt werden. Die maßgebliche äußere Einflussgröße ist die Außentemperatur T_{AU} , die einen Transmissionswärmestrom \dot{Q}_T über die Gebäudehülle induziert. Je nach Temperaturdifferenz zwischen Außentemperatur und Raumtemperatur kann dieser der Referenzzone abgeführt (in der Regel im Heizfall) oder zugeführt (in der Regel im Kühlfall) werden. Des Weiteren können durch Undichtigkeiten der Gebäudehülle, aber auch durch Öffnung des Fensters oder der Nachtlüftungsklappe Lüftungsverluste \dot{Q}_L auftreten. Wie in Abschnitt 3.2 erläutert, sind diese Lüftungsverluste im Sommer explizit Teil des Energiekonzeptes. Ein weiterer äußerer Faktor ist die auf die Gebäudefassade und Fenster auftreffende Solarstrahlung \dot{Q}_{sol} . Diese Solarstrahlung wird vom Fenster reflektiert, absorbiert und transmittiert. Der transmittierte Strahlungsanteil trifft auf die in der Referenzzone vorhandenen Oberflächen, wird dort absorbiert und trägt damit zu einem Wärmegewinn bei. Auch von der opaken Fassade kann ein Teil der Solarstrahlung absorbiert werden, was zu einer Erhöhung der äußeren Oberflächentemperatur führt.

Zu den inneren Wärmegewinnen \dot{Q}_{int} zählen die Wärmeabgabe von Personen und elektrischen Geräte, wie Computer oder Beleuchtung. Diese Wärmeabgabe an den Raum erfolgt über Konvektion und Strahlung bzw. im Falle von Personen auch latent, d. h. über die Abgabe von Wasserdampf. Die Thermoaktive Decke dient zur Beheizung oder Kühlung des Raums und gleicht somit die unterschiedlichen Wärmeverluste und -gewinne aus, damit der thermische Komfort eingehalten werden kann. Über die Decke und zum Teil auch über den Fußboden wird dem Raum je nach Betriebsmodus (Heizen oder Kühlen) ein Wärmestrom $\dot{Q}_{TAD,o}$ bzw. $\dot{Q}_{TAD,u}$ zu- oder abgeführt. Die RLT-Anlage dient zur mechanischen

Belüftung im Heizbetrieb mit temperierter Zuluft und überträgt somit einen konvektiven Wärmestrom \dot{Q}_{RLT} an die Raumluft.

4.2.1 Modellierungsansatz

In diesem Abschnitt wird kurz auf die unterschiedlichen Modellierungsansätze zur Erstellung regelungsorientierter Gebäude- bzw. Zonenmodelle eingegangen. Die Modellierungsansätze zur Beschreibung des thermischen Verhaltens von Gebäuden oder Gebäudezonen lassen sich in drei Gruppen kategorisieren:

- White-Box-Modell
- Black-Box-Modell
- Grey-Box-Modell

Auf die Vor- und Nachteile der drei unterschiedlichen Modellierungsansätze sowie auf die Motivation des in dieser Arbeit verwendeten Ansatzes wird im Folgenden kurz eingegangen.

White-Box-Modelle Unter White-Box-Modelle sind detaillierte Gebäudemodelle zu verstehen, die auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten von Massen-, Energie- und Impulsbilanzen basieren. Darunter fallen klassische Software-Tools wie EnergyPlus oder TRNSYS, aber auch Open Source Modelica-Bibliotheken wie die Buildings Library [109]. Klassischerweise werden hierbei die Gebäudehülle und das Gebäudevolumen in mehrere Schichten aufgeteilt und auf ein eindimensionales Wärmeübertragungsproblem unter Berücksichtigung von Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung reduziert. Auch wenn White-Box-Modelle von den drei genannten Modellierungsansätzen den geringsten Grad an Vereinfachung aufweisen, so ist häufig dennoch eine Kalibrierung (meist per Hand) mit Messdaten notwendig. Aufgrund der Vielzahl an vorhandenen Modellparametern ist die Erstellung und Kalibrierung solcher Modelle zeit- und arbeitsaufwendig. Des Weiteren ist eine detaillierte Kenntnis über Geometrie, Konstruktion und Materialeigenschaften des zu modellierenden Gebäudes notwendig. White-Box-Modelle sind im Allgemeinen nicht für modellbasierte Regelungsanwendungen (wie MPC) geeignet, da sie aufgrund ihrer Nichtlinearität, Zeitabhängigkeit und daraus resultierenden großskaligen Gleichungssystemen zu rechenintensiv für Echtzeitsysteme sind. Mittels Techniken der Modellreduktion werden White-Box-Modelle häufig in vereinfachte Modelle überführt [35, 67]. Häufig werden White-Box-Modelle in der Entwurfs- und Designphase von Reglern als Emulationsmodell für das reale Gebäude genutzt [82].

Black-Box-Modelle Unter dem Begriff Black-Box-Modell werden rein datenbasierte Modellierungsansätze zusammengefasst, bei denen keinerlei Wissen über die Physik des zu modellierenden Systems nötig ist. Es existiert eine Vielzahl an datenbasierten Modellierungsansätzen, von einfachen linearen Übertragungsfunktionen bis hin zum

maschinellen Lernen unter Verwendung künstlicher neuronaler Netze (KNN). Allen ist gemeinsam, dass sie auf einen großen Datensatz an vorliegenden Eingangs- und Ausgangsgrößen des Systems angewiesen sind, mit denen die Modelle mithilfe statistischer Methoden trainiert werden. Diese Trainingsdaten können durch Messungen am realen System oder durch detaillierte White-Box-Modelle gewonnen werden. Ein Vorteil von Black-Box-Modellen in Bezug auf regelungstechnische Anwendungen ist, dass sowohl deren Erstellung als auch Simulation vergleichsweise schnell und wenig rechenintensiv ist. Ein großer Nachteil ist, dass diese Modelle nur zuverlässig den Bereich an Ein- und Ausgangsdaten abbilden können, der auch im Spektrum der Trainingsdaten enthalten ist, d. h. eine Extrapolation außerhalb dieses Bereiches ist unbedingt zu vermeiden [111]. Auch datenbasierte Black-Box-Modelle wurden bereits erfolgreich für MPC von Gebäuden eingesetzt [112].

Grey-Box-Modelle Die Grey-Box-Modellierung ist ein hybrider Modellierungsansatz der, wie der Name bereits suggeriert, Elemente aus der White-Box- und der Black-Box-Modellierung vereint. Hier wird grundlegendes physikalisches Wissen über das zu modellierende System, z. B. in Form von parametrierbaren Gleichungen oder vorgegeben Modellstrukturen mit Methoden zur Parameteridentifikation kombiniert. Hierbei werden die Vorteile der anderen beiden Modellierungsansätze vereint: die physikalische Interpretierbarkeit der Parameter, hohe Genauigkeit und Übertragbarkeit der White-Box-Modelle sowie der datenbasierte Ansatz, eine vergleichsweise geringe Anzahl an Modellparametern mithilfe geeigneter Identifikationsverfahren aus gemessenen (oder simulierten) Eingangs- und Ausgangsdaten zu ermitteln. Auch können Grey-Box-Modelle in gewissen Grenzen außerhalb des in den zur Identifikation genutzten Datensatzes abgedeckten Bereiches extrapolieren [75]. Häufig wird als vereinfachte Modellstruktur ein Netzwerk aus thermischen Widerständen und Kapazitäten gewählt, worauf im folgenden Abschnitt genauer eingegangen wird. Ein solches Modell kann als eine starke Vereinfachung eines detaillierten White-Box-Gebäudemodells angesehen werden. Der Grey-Box-Modellierungsansatz ist mit Abstand der meist genutzte Ansatz zur Erstellung von Modellen, die bei MPC für Gebäude eingesetzt werden [53].

In dieser Arbeit wird zur Beschreibung des thermischen Verhaltens der Referenzzonen ein Grey-Box-Modellierungsansatz gewählt. Dieser hat sich in vielen Studien für MPC-Anwendungen im Gebäudebereich etabliert. Des Weiteren wurden im Rahmen des Projekts IMOBS [37] seit 2014 umfangreiche Messdaten am untersuchten Gebäude erhoben, die als Datensätze für die Identifikation genutzt werden können. Der zeitliche Umfang der Daten würde es auch ermöglichen Black-Box-Modelle, z. B. auf Basis neuronaler Netze zu erstellen. Dabei gibt es jedoch ein sehr grundlegendes Hindernis: alle Daten wurden im laufenden Gebäudebetrieb und damit im geschlossenen Regelkreis erhoben. Die Gewinnung von Messdaten durch Experimente am Gebäude im offenen Regelkreis kann aus naheliegenden Gründen nicht durchgeführt werden. Messdaten aus dem realen Gebäudebetrieb sind korreliert (als einfache Korrelation sei beispielsweise der lineare Zusammenhang zwischen Außentemperatur und Vorlauftemperatur aus der Heizkurve genannt)

und erschweren oder verunmöglichen sogar die Erstellung zuverlässiger, rein datenbasierter Modelle [8]. Auf die Möglichkeit mittels kalibrierter White-Box-Modelle synthetische Datensätze zu generieren wird hier verzichtet.

Modellierungssprache Modelica

Alle im Zuge dieser Arbeit entwickelten Modelle sind in der gleichungsbasierten, objektorientierten Modellierungssprache Modelica implementiert. Modelica ermöglicht die dynamische Modellierung komplexer zeitkontinuierlicher und zeitdiskreter physikalischer Systeme und wird von der gemeinnützigen Modelica Association [93] entwickelt und veröffentlicht. Ein reales System wird in Modelica mit einem Satz hybrider differenzial-algebraischer Gleichungen (engl. *differential-algebraic system of equation, DAE*) beschrieben. Eine Simulationsumgebung analysiert und optimiert die Gleichungen, übersetzt sie in ausführbaren C-Code und verknüpft diesen mit einem Lösungsalgorithmus zur Berechnung des zeitlichen Verlaufs aller Zustandsgrößen. Als Simulationsumgebung wird in dieser Arbeit die kommerzielle Software Dymola von Dassault Systems[®] [19] verwendet. Eine alternative Open Source Simulationsumgebung für Modelica ist mit OpenModelica [66] verfügbar.

Im Gegensatz zu imperativen Programmiersprachen ermöglicht die gleichungsbasierte, akausale Sprache von Modelica die mathematischen Modellgleichungen ohne Kenntnis über bekannte und/oder unbekannte Variablen. Gleichungsumformungen sind damit nicht notwendig und die Gleichungen können in beliebiger Reihenfolge in ein Modell implementiert werden. Des Weiteren erlaubt die Objektorientierung das Zusammensetzen von Modellen aus austauschbaren Teilmodellen unter Verwendung sogenannter Konnektoren. Dies kann auch grafisch erfolgen und ermöglicht somit die Visualisierung von Modellstrukturen. Werden diese Teilmodelle in einer Bibliothek organisiert, kann hierdurch die Wiederverwendbarkeit erhöht werden.

Ein in Modelica implementiertes Gebäude- oder Zonenmodell erfüllt damit viele der zuvor genannten Anforderungen an regelungsorientierte Modelle. Durch die Kombination von Objektorientierung, grafischer Visualisierung und Akausalität können Modelle erstellt werden, die skalierbar, übertragbar und einfach anpassbar sowie leicht verständlich und wiederverwendbar sind. Ein aus der Modellierungsperspektive betrachteter großer Vorteil von Modelica ist zudem, dass der Modellierungsprozess vom Lösungsprozess mit der dafür erforderlichen mathematischen Beschreibung größtenteils entkoppelt ist, da dies in Dymola automatisch im Hintergrund geschieht. Darüber hinaus existieren für die Modellierung von Gebäuden und HLK-Systemen eine Reihe von frei verfügbaren Modelica-Bibliotheken wie beispielsweise die Buildings Library [109]. Damit ist z. B. eine einfache Erweiterung der im Folgenden dargestellten Zonenmodelle um Anlagenkomponenten möglich. Die Kompatibilität mit der Modelica-Standardbibliothek gewährleistet damit die Nutzung und Kombination von Bibliotheken aus verschiedenen physikalischen Bereichen. Abschließend

sei als Vorteil und Motivation für die Verwendung von Modelica auf den Open Source Ansatz verwiesen. Im Falle der Anwendung zur MPC-Regelung müssen die Prozessmodelle ggf. über einen sehr langen Zeitraum genutzt werden. Bei kommerzieller Software können hierfür teils signifikante Lizenzgebühren anfallen. Auch wenn in dieser Arbeit Dymola als kommerzielle Simulationsumgebung genutzt wird, können die dort entwickelten Modelle exportiert und auf jedem beliebigen PC, auch ohne Dymola-Lizenz, ausgeführt werden.

Optimierung mit Modelica-Modellen

Wie in WETTER et al. [108] gezeigt, eignen sich gleichungsbasierte Modellierungssprachen wie Modelica sehr gut dafür, große, nichtlineare und dynamische Optimierungsprobleme zu formulieren, allerdings sind hierfür weitere Softwaretools nötig. Die Spracherweiterung Optimica [4], welche von JModelica und teilweise OpenModelica unterstützt wird, erlaubt die Formulierung von Zielfunktion und Nebenbedingungen im Modelica-Code. Hierfür ist das auf JModelica basierte kommerzielle Optimica Compiler Toolkit [60] nötig. Über eine Schnittstelle zu dem Tool CasADi [6] wird das Optimierungsproblem symbolisch dargestellt und die benötigten ersten und zweiten Ableitungen ermittelt. Nach einer zeitlichen Diskretisierung kann das nichtlineare Optimierungsproblem mit entsprechenden Algorithmen gelöst werden [81].

Da die Integration und Unterstützung von Optimica in Simulationsumgebungen wie OpenModelica erst in den letzten Jahren erfolgte, wird diese Toolchain in dieser Arbeit jedoch nicht verwendet. Stattdessen wird eine Schnittstelle zu MATLAB[®] entwickelt, die es ermöglicht, Parameter, Startwerte von Zustandsgrößen und Eingangsgrößen von in Dymola erstellten Modelica-Modellen beliebig aus MATLAB[®] zu manipulieren sowie die Trajektorien von Ausgangs- und Zustandsgrößen nach der Simulation auszulesen. Ein Nachteil dieser Toolchain ist, dass das zugrundeliegende Gleichungssystem der Modelica-Modelle nicht ohne weiteres explizit einsehbar ist. Die für die gradientenbasierte Optimierung benötigten ersten und zweiten Ableitungen können also nicht aus dem Gleichungssystem symbolisch ermittelt werden, sondern müssen numerisch approximiert werden. MATLAB[®] bietet mit der Optimization Toolbox[™] [92] bzw. Global Optimization Toolbox [90] ein umfangreiches Tool zur Lösung unterschiedlicher Klassen von Optimierungsproblemen.

4.2.2 Thermisches Ersatzschaltbild

Ein häufig gewählter Ansatz zur vereinfachten Beschreibung von instationären Wärmeübertragungsvorgängen in Bauteilen ist die Verwendung eines thermischen Ersatzschaltbildes bzw. eines thermischen Widerstands-Kapazitätsnetzwerkes (RC-Modell) [54]. In Analogie zur Elektrotechnik wird ein Bauteil aus einem Netzwerk von thermischen Widerständen und thermischen Kapazitäten aufgebaut und ermöglicht es so, die grundlegende geometrische und physikalische Struktur abzubilden. In dieser Analogie entspricht der

Spannungsabfall ΔU_{el} über einen Widerstand dem Temperaturabfall ΔT und die Stromstärke I_{el} einem Wärmestrom \dot{Q} . Entsprechend gelten die Grundgleichungen:

$$\Delta U_{\text{el}} = R_{\text{el}} \cdot I_{\text{el}} \quad \cong \quad \Delta T = R \cdot \dot{Q} \quad (4.11)$$

$$I_{\text{el}} = C_{\text{el}} \cdot \frac{dU_{\text{el}}}{dt} \quad \cong \quad \dot{Q} = C \cdot \frac{dT}{dt} \quad (4.12)$$

Die Anzahl der Kapazitäten in einem Modell definiert dabei die Ordnung eines Modells. Abbildung 4.2 zeigt beispielhaft ein RC-Modell 1. Ordnung mit T_a und T_i als äußere und innere Temperatur an der Bauteiloberfläche. Die äußeren und inneren thermischen Wi-

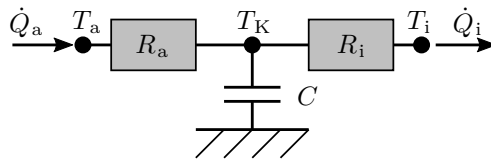


Abbildung 4.2: Beispielhafte Darstellung eines RC-Modells 1. Ordnung.

derstände R_a und R_i umfassen dabei die Wärmeleitung innerhalb des Bauteils sowie die Wärmeübertragung durch Konvektion und Strahlung mit der Umgebung, in der Regel der Außen- oder Raumluft. Entsprechend vereinen die thermischen Widerstände den Wärmeleitwiderstand (Gleichung 4.5) und den Wärmeübergangskoeffizienten durch Konvektion und Strahlung (Gleichung 4.10) zu einem gemeinsamen Wärmedurchgangswiderstand. Die thermische Speicherfähigkeit des Bauteils wird in diesem Fall zu einer thermischen Kapazität C mit der Bauteilkerntemperatur T_K zusammengefasst.

Bauphysikalische Kenngrößen werden meist als auf die jeweilige Bauteilfläche bezogene Größen angegeben. Die Terminologie für die entsprechenden Größen wird jedoch in der Literatur nicht immer einheitlich verwendet. Für einen thermischen Widerstand R wird häufig auch die Einheit $(\text{m}^2\text{K})/\text{W}$ verwendet. Analog dazu wird in dieser Arbeit der „flächenbezogener“ thermischen Widerstand definiert zu:

$$r_{\text{th}} = R \cdot A \quad (4.13)$$

Damit entspricht die Einheit des thermischen Widerstands dem Kehrwert der Einheit des Wärmedurchgangskoeffizienten.

Auch die thermische Kapazität kann auf die Bauteilfläche bezogen werden, wobei hiermit die thermische Speicherfähigkeit eines Bauteils einer vorgegebenen Dicke l beschrieben wird. Der Zusammenhang zwischen der flächenbezogenen Wärmekapazität c_{th} und der (massen-)spezifischen Wärmekapazität c ist damit

$$c_{\text{th}} = \frac{C}{A} = c \cdot \rho \cdot l \quad (4.14)$$

mit ρ als Dichte des Bauteilmaterials.

4.2.3 Modellierung der TAD

Da die TAD zentraler Bestandteil bei der Beheizung und Kühlung der Büroräume sowie der in dieser Arbeit entwickelten Regelungsstrategie sind, soll im Folgenden kurz auf die Modellierung der TAD eingegangen werden, bevor dieses Modell im nächsten Abschnitt in ein Zonenmodell integriert wird.

Die TAD sind als Betonkerntemperierung ausgeführt, siehe Abbildung 4.3. Die wasserfüh-

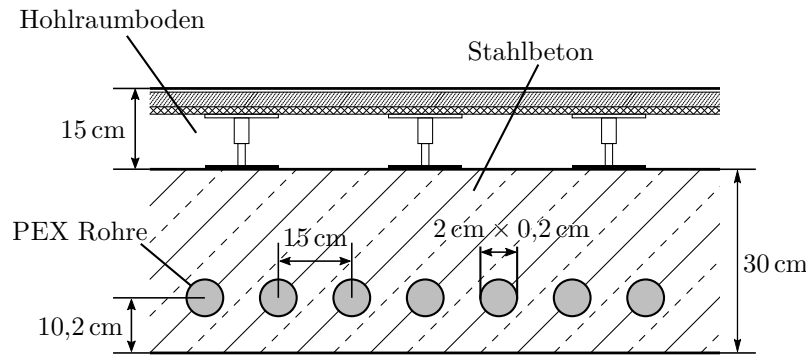


Abbildung 4.3: Schematische Darstellung der Thermoaktiven Decke, ausgeführt als Betonkerntemperierung.

renden Rohre sind mit einem Verlegeabstand von 15 cm in den 30 cm dicken Stahlbeton der Geschossdecken integriert. Der Abstand zur Unterseite der Decke beträgt 10,2 cm. Bei den Rohren handelt es sich um PEX Rohre mit einem Außendurchmesser von 2 cm und einer Wandstärke von 0,2 cm. Der über der Geschossdecke liegende Fußboden ist als Hohlraumboden ausgeführt.

Bei der physikalischen Modellierung von TAD muss im Allgemeinen die dreidimensionale instationäre Wärmeleitungsgleichung verwendet werden (vgl. Gleichung 4.6). Aufgrund der großen thermischen Kapazität und der damit verbundenen großen Zeitkonstante wird sich das System TAD im Betrieb niemals in einem stationären Zustand befinden. Ein solcher Modellierungsansatz ist jedoch für die regelungstechnische Anwendung zu komplex und rechenintensiv, da die Simulationszeit dieser dreidimensionalen instationären Wärmeübertragungsprobleme im Allgemeinen nicht in Echtzeit möglich ist.

Ein vereinfachtes Modell auf Basis eines RC-Netzwerkes wurde von KOSCHENZ und LEHMAN [57] von der schweizerischen Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA) entwickelt, siehe Abbildung 4.4a. Dieses Modell wird daher auch als „EMPA-Modell“ bezeichnet und ist zudem in der DIN EN ISO 11855 2 [26] aufgeführt. Das dreidimensionale Wärmeleitungsproblem wird hierbei mithilfe der Definition einer mittleren, homogenen Betonkerntemperatur T_K und einer Stern-Dreiecks-Transformation von thermischen Widerständen in ein eindimensionales Wärmeleitungsproblem überführt. Details dazu können [57] entnommen werden. Die Berechnungsvorschriften für die einzelnen Widerstände sind im Anhang A.1 gegeben.

Für das hier entwickelte Zonenmodell wird ein noch weiter vereinfachtes TAD-Modell verwendet, siehe Abbildung 4.4b, das aus zwei Widerständen und einer Kapazität besteht (R2C1-Modell). Die aus dem EMPA-Ansatz berechneten Werte für die Widerstände werden zusammengefasst und als Startwerte für die Parameteridentifikation verwendet. Des Weiteren wird angenommen, dass die Temperaturen in den Räumen ober- und unterhalb der TAD identisch sind, was bei dem betrachteten Gebäude in guter Näherung zutrifft, da eine individuelle Anpassung der Raumtemperaturen auf Raumebene nicht möglich ist. Die beiden Wärmeströme durch den oberen und unteren Teil der Decke werden damit zu einem Wärmestrom zusammengefasst. Die thermische Kapazität der TAD wird mit einer einzigen Kapazität beschrieben, die hauptsächlich die thermische Speicherfähigkeit des Stahlbetons darstellt.

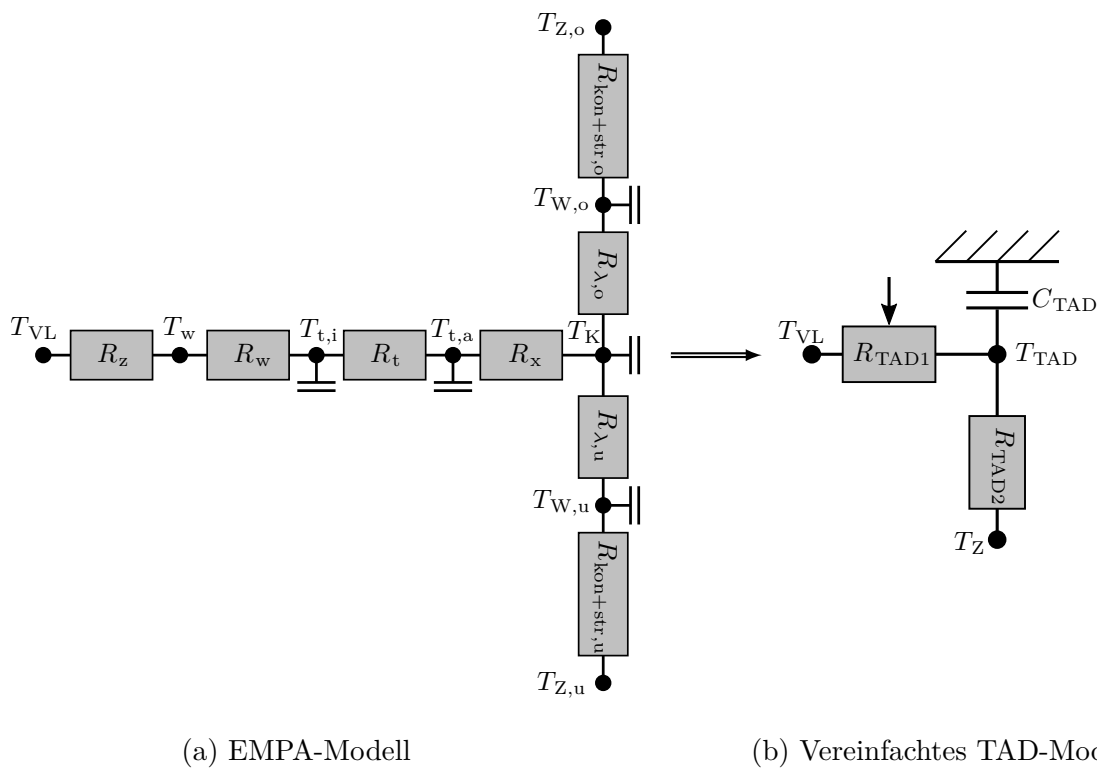


Abbildung 4.4: Überführung des EMPA-Modells nach [57] in ein vereinfachtes R2C1-Modell der TAD.

Die auf die Fläche der TAD bezogenen Startwerte des vereinfachten TAD-Modells sind in Tabelle 4.1 gegeben. Die Berechnung der Startwerte sowie die benötigten Materialwerte sind in Anhang A.1.2 gegeben. Der Widerstand r_{TAD1} beschreibt die Wärmeübertragung durch Leitung und Konvektion vom Heizungswasser an den Betonkern. Dieser ist als veränderlicher bzw. schaltbarer Widerstand ausgeführt, um zu berücksichtigen, dass die Vorlauftemperatur T_{VL} nur bei Durchströmung der TAD d. h. bei aktiver TAD-Umwälzpumpe anliegt. Ist die TAD-Umwälzpumpe inaktiv, wird der Widerstand sehr groß gewählt (siehe Tabelle 4.1), sodass keine Wärme vom Heizungswasser an die TAD übertragen wird. Der

Tabelle 4.1: Startwerte der Widerstände und Kapazitäten für das vereinfachte TAD-Modell.

Parameter	Startwert	Einheit
$r_{\text{th},\text{TAD1}}$ (Pumpe an)	0,122	$(\text{m}^2\text{K})/\text{W}$
$r_{\text{th},\text{TAD1}}$ (Pumpe aus)	$1 \cdot 10^6$	$(\text{m}^2\text{K})/\text{W}$
$r_{\text{th},\text{TAD2}}$	0,183	$(\text{m}^2\text{K})/\text{W}$
$c_{\text{th},\text{TAD}}$	$7,3 \cdot 10^5$	$\text{J}/(\text{m}^2\text{K})$

Widerstand r_{TAD2} beschreibt die Wärmeübertragung vom Betonkern an die Raumluft und inneren Massen über Wärmeleitung, Strahlung und natürliche Konvektion. Dieser berechnet sich aus einer Parallelschaltung der Widerstände für die aufwärts und abwärts gerichteten Wärmeübertragungspfade (vgl. Abbildung 4.4a und Anhang A.1.2).

4.2.4 Zonenmodell

In Abbildung 4.5 sind drei unterschiedliche RC-Netzwerke zur Modellierung des thermischen Verhaltens der Referenzbüro Räume dargestellt. Diese drei vereinfachten Zonenmodelle sollen im Folgenden kurz beschrieben und anschließend hinsichtlich ihrer Eignung als Prozessmodelle in einem modellbasierten Regler untersucht werden. Die Zonenmodelle unterscheiden sich vor allem hinsichtlich ihrer Ordnung, d. h. der Anzahl der vorhandenen Kapazitäten und der damit verbundenen Anzahl an Zustandsgrößen. Die Thermoaktive Decke wird bei allen Zonenmodellen als R2C1-Modell ausgeführt, das bereits im vorangehenden Abschnitt eingeführt wurde.

Im einfachsten R5C2-Modell (Abb. 4.5a) wird die thermische Kapazität einer Zone über lediglich eine Kapazität C_Z mit der zugehörigen Temperatur T_Z abgebildet. Diese Kapazität umfasst damit sowohl die Raumluft als auch alle internen Massen wie z. B. Innenwände oder Möblierung. Auf den Knoten T_Z wirken die beiden Störgrößen \dot{Q}_{int} und \dot{Q}_{sol} , die die internen Wärmegewinne und die Wärmegewinne durch Solarstrahlung darstellen. Die internen Wärmegewinne werden durch Multiplikation eines zeitabhängigen Belegungsprofils $occ(t)$ mit einem konstanten Modellparameter \dot{q}_{int} , der bei der späteren Parameteridentifikation für die jeweilige Zone ermittelt wird, bestimmt:

$$\dot{Q}_{\text{int}} = occ(t) \cdot \dot{q}_{\text{int}} \cdot A_Z \quad (4.15)$$

Dabei ist \dot{q}_{int} auf die Grundfläche A_Z der jeweiligen Zone bezogen. Auf die Ermittlung des Belegungsprofils wird in Abschnitt 4.3 genauer eingegangen.

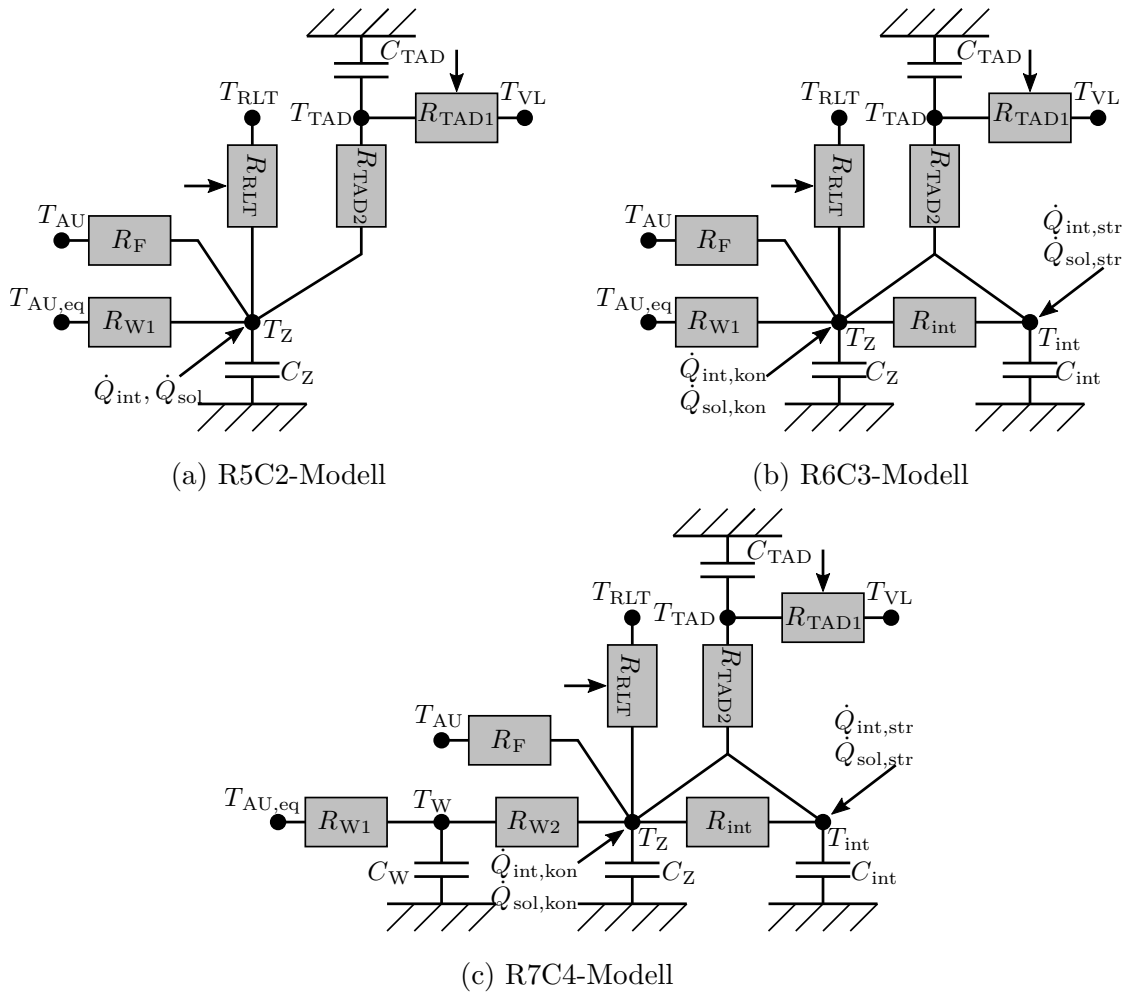


Abbildung 4.5: Schematische Darstellung der Zonenmodelle als Widerstands-Kapazitätsnetzwerke in den drei unterschiedlichen hier untersuchten Konfigurationen.

Die Wärmegewinne durch Solarstrahlung \dot{Q}_{sol} werden vereinfacht mit einer effektiven Fensterfläche $A_{F,\text{eff}}$ und der auf die jeweilige Fassadenorientierung auftreffenden globalen Bestrahlungsstärke $\dot{I}_{\text{glo,orient}}$ bestimmt:

$$\dot{Q}_{\text{sol}} = A_{F,\text{eff}} \cdot \dot{I}_{\text{glo,orient}} = A_F \cdot f_{\text{sol}} \cdot \dot{I}_{\text{glo,orient}} \quad (4.16)$$

Die effektive Fensterfläche wird wiederum durch Multiplikation der Fensterfläche A_F mit dem Faktor f_{sol} bestimmt, der im Identifikationsprozess identifiziert wird. Das Fenster (d. h. die Verglasung und der Rahmen) und die Außenwand werden jeweils über einen einzelnen Widerstand R_F bzw. R_W modelliert, wobei an der Außenseite des Fensters die Außentemperatur T_{AU} anliegt und an der Außenwand die äquivalente Außentemperatur $T_{\text{AU,eq}}$ verwendet wird. Diese äquivalente Außentemperatur nach VDI 6007 [103]

berücksichtigt zusätzlich die Erhöhung der außenseitigen Oberflächentemperatur durch die auftreffende Solarstrahlung und wird berechnen nach:

$$T_{\text{AU,eq}} = T_{\text{AU}} + \dot{I}_{\text{glo,orient}} \cdot \frac{a_{\text{abs,W,a}}}{\alpha_{\text{a}}} \quad (4.17)$$

mit $a_{\text{abs,W,a}}$ als Absorptionskoeffizient für kurzwellige Strahlung der Außenfassade und α_{a} als äußerer Wärmeübergangskoeffizient. Der Widerstand des Fensters berücksichtigt zusätzlich die Lüftungsverluste durch Undichtigkeiten der Gebäudehülle.

Die mechanische Belüftung wird ebenfalls mit einem thermischen Widerstand modelliert, der über

$$R_{\text{RLT}} = \frac{1}{\dot{V}_{\text{RLT}} \cdot \rho_1 \cdot c_{p,l}} \quad (4.18)$$

bestimmt wird. Dabei sind \dot{V}_{RLT} der Volumenstrom der Zuluft, ρ_1 die Dichte und $c_{p,l}$ die spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck von Luft. An dem Widerstand liegt die im Betrieb auf einen konstanten Wert geregelte Zulufttemperatur T_{RLT} an. Wie bei der TAD, ist dieser Widerstand veränderlich, um zu berücksichtigen, dass die Zulufttemperatur nur bei eingeschalteter RLT-Anlage anliegt. Ist die RLT-Anlage inaktiv, wird der Widerstand sehr groß gewählt.

Der grundlegende Unterschied vom R5C2-Modell zum R6C3-Modell (Abb. 4.5b) bzw. R7C4-Modell (Abb. 4.5c) ist die Aufteilung der thermischen Kapazität einer Zone auf zwei Kapazitäten. Die Kapazität C_Z repräsentiert dabei nur die Raumluft und Möblierung, während C_{int} die Kapazität der inneren Massen wie die der Innenwände und des Fußbodens darstellt. Die flächenbezogene thermische Kapazität einer Zone wird mit

$$c_{\text{th,Z}} = b \cdot h_Z \cdot \rho_1 \cdot c_{p,l} \quad (4.19)$$

bestimmt, wobei h_Z die lichte Deckenhöhe einer Zone ist. Der Faktor b ist ein empirischer Faktor, der eine scheinbare Erhöhung der Kapazität durch Möblierung oder durch inhomogene Temperaturschichtung berücksichtigt. Dieser wird häufig mit $b = 5$ abgeschätzt [87].

Die beiden Kapazitäten sind durch einen Widerstand R_{int} miteinander verbunden, der den Wärmedurchgang von den inneren Massen zur Raumluft beschreibt. Durch diese Anordnung ist auch eine Aufteilung der Wärmeströme in Konvektion und Strahlung möglich. Die konvektiven Anteile wirken dabei auf den Knoten für die Zonentemperatur T_Z und die Strahlungsanteile auf den Knoten T_{int} . Die Temperatur T_{int} kann dabei als „die Strahlungstemperatur“ (siehe Gleichung 4.9) einer Zone angesehen werden. Da bei Flächenheizungen, insbesondere bei Thermoaktiven Decken, die Wärmeübertragung an den Raum zum Großteil über Strahlung erfolgt, wird dadurch eine höhere Genauigkeit des Modells erwartet. Die jeweiligen Anteile von Konvektion bzw. Strahlung an den Wärmeströmen durch interne Gewinne, Solarstrahlung und der TAD sind Modellparameter, für die aus entsprechenden Normen Startwerte für die Parameteridentifikation festgelegt werden kön-

nen. Der über die Zuluft der RLT-Anlage übertragene Wärmestrom wird konvektiv an die Raumluft übertragen. Beim R7C4-Modell wird der thermische Widerstand der Außenwand auf R_{W1} und R_{W2} aufgeteilt und mit einer zusätzlichen Kapazität C_W versehen. Dadurch ergibt sich ein lineares Modell 4. Ordnung mit insgesamt vier Zustandsgrößen.

Das Systemverhalten der in Modelica implementierten Zonenmodelle kann in der Form eines impliziten differenzial-algebraischen Gleichungssystems dargestellt werden:

$$\mathbf{F}(\dot{\mathbf{x}}(t), \mathbf{x}(t), \mathbf{y}(t), \mathbf{u}(t), \Theta) = 0 \quad (4.20)$$

mit:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} T_Z \\ T_{TAD} \end{bmatrix} \text{ bzw. } \begin{bmatrix} T_Z \\ T_{\text{int}} \\ T_{TAD} \end{bmatrix} \text{ bzw. } \begin{bmatrix} T_Z \\ T_{\text{int}} \\ T_W \\ T_{TAD} \end{bmatrix} \quad \mathbf{u} = \begin{bmatrix} T_{\text{AU}} \\ T_{\text{VL}} \\ T_{\text{RLT}} \\ \dot{I}_{\text{glo,orient}} \\ occ \\ u_{\text{TAD}} \\ u_{\text{RLT}} \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

$$\mathbf{y} = [T_Z] \quad \Theta = \begin{bmatrix} \Theta_1 \\ \vdots \\ \Theta_n \end{bmatrix}$$

Dabei ist \mathbf{x} der Zustandsvektor, der je nach Modellordnung eine unterschiedliche Anzahl an Zustandsgrößen enthält, \mathbf{y} der Ausgangsgrößenvektor, \mathbf{u} der Eingangsgrößenvektor und Θ der Parametervektor. Ein Zonenmodell hat insgesamt sieben Eingangsgrößen: die Außentemperatur T_{AU} , die TAD-Vorlauftemperatur T_{VL} , die RLT-Zulufttemperatur T_{RLT} , die globale Solarstrahlung auf die vertikale Fassade $\dot{I}_{\text{glo,orient}}$ mit der entsprechenden Orientierung, das normierte Lastprofil für interne Wärmegewinne occ , dem binären Signal (an/aus bzw. 0/1) der TAD-Pumpe u_{TAD} und dem binären Signal der RLT-Anlage u_{RLT} . Die Ausgangsgröße ist die Zonentemperatur T_Z . Die Modellparameter Θ werden als zeitlich konstant angenommen.

Initiale Modellparameter

Da alle Parameter der Zonenmodelle eine eindeutige physikalische Bedeutung haben, können basierend auf Konstruktionsdaten und Materialeigenschaften initiale Modellparameter bestimmt werden. Diese initialen Modellparameter sind insofern von Bedeutung, da diese die Startwerte für die nachfolgende Parameteridentifikation bilden. Je näher diese Startwerte an den durch die Parameteridentifikation ermittelten „optimalen“ Werten liegen, desto einfacher, effizienter und ggf. eindeutiger ist die Lösung des Optimierungsproblems. Des Weiteren können bei Parametern, bei denen eine geringe Unsicherheit bzgl.

des Startwertes vorliegt, engere Parametergrenzen gewählt werden, was sich wiederum positiv auf die Effizienz und Eindeutigkeit der Lösung des Optimierungsproblems auswirkt, wie in BLUM et al. [12] gezeigt werden konnte. Ein Grund hierfür ist, dass die Parameteridentifikation als nicht-konvexes Optimierungsproblem angesehen werden muss.

Neben den geometrischen und konstruktiven Daten (siehe Anhang A.2) der einzelnen Bauteile werden hierbei Standardwerte aus den hierfür relevanten Normen herangezogen. Einige Parameterwerte müssen jedoch empirisch ermittelt werden. In Tabelle 4.2 sind die Startwerte der Modellparameter dargestellt. Die folgenden Annahmen werden für die Ermittlung der initialen Modellparameter getroffen:

- Alle Parameter werden auf die jeweils relevante Bauteilfläche bezogen. Diese sind die Grundfläche A_Z , die Fensterfläche A_F , die Fläche der Außenwand (ohne Fenster) $A_{W,a}$ und die Flächen aller Innenwände $A_{W,i}$.
- Nach [49] wird für das Fenster ein Wärmedurchgangswiderstand von $r_{th,F} = 1,43 \text{ (m}^2\text{K)/W}$ und für die Außenwand $r_{th,W1} + r_{th,W2} = 1,12 \text{ (m}^2\text{K)/W}$ angenommen. Konstruktiv bedingt wird der Hauptteil des Außenwandwiderstands innenseitig $r_{th,W1}$ zugeordnet. Die Kapazität der Außenwand $c_{th,W}$ ergibt sich aus der innenseitigen Außenwandschicht bis zur Mitte der ersten Schicht Mineralwolle.
- Für den kombinierten Wärmeübergangswiderstand (Konvektion und Strahlung) für vertikale Wände werden nach DIN EN 6946 [29] folgende Werte angenommen: $r_{th,i} = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$ (innen) und $r_{th,a} = 0,04 \text{ (m}^2\text{K)/W}$ (außen).
- Die Kapazität der internen Massen $c_{th,int}$ umfasst die in Trockenbauweise ausgeführten Bürotrennwänden und den Fußboden bis zum Hohlraum.
- Für die wärmeschutztechnischen Materialeigenschaften werden typische Werte nach DIN EN ISO 10456 [24] und DIN 4108-4 [28] verwendet.
- Für die internen Wärmegewinne werden nach DIN EN 18599-10 [30] für ein Einzelbüro ein Wert von 12 W/m^2 angenommen.
- Der Anteil der für Solarstrahlung effektiven Fensterfläche f_{sol} orientiert sich an dem ähnlich definierten g-Wert (Gesamtenergiedurchlassgrad nach VDI 6007 Blatt 2 [101]) des Fensters von 45 %.

4.3 Parameteridentifikation

Die Parameteridentifikation hat zum Ziel, aus gemessenen Eingangs- und Ausgangsgrößen die Modellparameter der im vorherigen Abschnitt vorgestellten Zonenmodelle mittels geeigneter Methoden zu ermitteln. Hierdurch sollen Modelle erstellt werden, die hinsichtlich ihrer Genauigkeit und Übertragbarkeit einer Anwendung als Prozessmodell bei einer

4.3 Parameteridentifikation

Tabelle 4.2: Startwerte, Beschreibung und relevante Flächen der Modellparameter für die Zonenmodelle.

Parameter	Beschreibung	Fläche	Startwert	Einheit
Widerstände				
$r_{th,F}$	Wärmedurchgangswiderstand Fenster	A_F	1,43	$(m^2K)/W$
$r_{th,W1}$	Wärmedurchgangswiderstand Außenwand (innenseitig)	$A_{W,a}$	1,07	$(m^2K)/W$
$r_{th,W2}$	Wärmedurchgangswiderstand Außenwand (außenseitig), nur bei R6C3- und R7C4-Modell	$A_{W,a}$	0,05	$(m^2K)/W$
$r_{th,int}$	Wärmedurchgangswiderstand Innenwände zu Raumluft, nur bei R6C3- und R7C4-Modell	$A_{W,i}$	0,18	$(m^2K)/W$
Kapazitäten				
$c_{th,int}$	Thermische Kapazität der inneren Massen, nur bei R6C3- und R7C4-Modell	A_Z	$182 \cdot 10^3$	$J/(m^2K)$
$c_{th,Z}$	Thermische Kapazität der Zone, nur bei R5C2-Modell	A_Z	$c_L + c_{int}$	$J/(m^2K)$
$c_{th,W}$	Thermische Kapazität der Außenwand	$A_{W,a}$	$8,5 \cdot 10^3$	$J/(m^2K)$
Interne und externe Wärmegewinne				
\dot{q}_{int}	Interne Wärmegewinne durch Personen und Geräte	A_Z	12	W/m^2
f_{sol}	Anteil der für Solarstrahlung effektiven Fensterfläche	A_F	0,5	-
Konstante Parameter				
$a_{int,kon}$	Konvektiver Anteil der internen Wärmegewinne	-	0,3	-
$a_{sol,kon}$	Konvektiver Anteil der Wärmegewinne durch Solarstrahlung	-	0,09	-
$a_{TAD,kon}$	Konvektiver Anteil des Wärmestroms der TAD	-	0,2	-
b	Faktor für die scheinbare Erhöhung thermischen Kapazität einer Zone	-	5	-
$a_{abs,W,a}$	Absorptionskoeffizient für kurzwellige Strahlung der Außenfassade	-	0,5	-
α_a	Äußerer Wärmeübergangskoeffizient der Außenfassade	$A_{W,a}$	25	$W/(m^2K)$
ρ_l	Dichte von Luft	-	1,23	kg/m^3
$c_{p,l}$	Wärmekapazität von Luft	-	1008	$J/(kgK)$

MPC-Regelung genügen. Das hier vorgestellte Vorgehen bei der Parameteridentifikation ist ähnlich einer Systemidentifikation, dessen Hauptbestandteile sind [59]

1. die erhobenen Eingangs- und Ausgangsdaten,
2. ein Satz von möglichen Modellen,
3. ein Gütekriterium,
4. die Validierung.

Als Eingangs- und Ausgangsdaten werden Messdaten aus dem laufenden Gebäudebetrieb verwendet. Eine Erhebung von Messdaten aus Experimenten am realen System ist hier nicht möglich, da sich das Gebäude stets im Vollbetrieb und damit im geschlossenen Regelkreis befindet. Theoretisch können jedoch auch Datensätze zur Identifikation aus einem detaillierten physikalischen Simulationsmodell gewonnen werden.

Ein Satz von möglichen Modellen wurde bereits im vorangegangenen Abschnitt vorgestellt. In Abschnitt 4.3.2 soll die Frage beantwortet werden, welches der drei vorgeschlagenen Zonenmodelle am geeignetsten ist.

Als Gütekriterium wird hier der Mittlere Absolute Fehler (engl. *Mean Absolute Error*, *MAE*) zwischen der gemessenen und simulierten Zonentemperatur über den gesamten Identifikationszeitraum gewählt:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |T_Z(k) - \hat{T}_Z(k)| \quad (4.22)$$

Dabei ist $T_Z(k)$ die gemessene und $\hat{T}_Z(k)$ die simulierte Zonentemperatur zum Zeitpunkt k . In der Literatur wird häufig die Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (engl. *Root Mean Square Error*, *RMSE*) als Gütekriterium verwendet. Der *RMSE* wird hier nicht genutzt, da er deutlich sensitiver auf kurzzeitige Ausreißer reagiert [16, 110]. Ein konkretes, hier relevantes Beispiel für diese Ausreißer ist das kurzzeitige Stoßlüften und der damit verbundene temporäre Abfall der Raumtemperatur. Da das Öffnen von Fenstern oder Nachlüftungsklappen in den Modellen nicht berücksichtigt wird, hat sich der *MAE* als geeigneteres Gütekriterium für die Parameteridentifikation erwiesen. Die Lüftungsverluste haben zudem meist keinen großen Einfluss auf die Raumtemperatur im Tagesverlauf, was für die MPC-Anwendung die relevante Dynamik darstellt. Eine Konsequenz bei der Verwendung des *MAE* ist, dass das Gütekriterium als Zielfunktion nicht allgemein differenzierbar ist. Da jedoch die Gradienten, d. h. die 1. und 2. Ableitungen der Zielfunktion, vom Solver in MATLAB[®] numerisch ermittelt werden, führt diese Einschränkung zu keinen Problemen beim Lösungsprozess.

Die Validierung der Modelle mit identifizierten Parametern steht im Zusammenhang mit der Übertragbarkeit auf andere Zeiträume und der Generalisierbarkeit der Modelle. Hierbei wird überprüft, ob das Modell mit identifizierten Modellparametern auch mit Eingangsdaten, die nicht Teil der Identifikationsdaten sind, eine ausreichende Vorhersagege-

nauigkeit aufweist. Ist dies nicht der Fall, müssen das Modell oder der Identifikationsprozess angepasst werden [59].

Im Zuge der Parameteridentifikation muss zunächst die Frage beantwortet werden, wie eine „ausreichende Genauigkeit“ der Zonenmodelle definiert ist. In der Literatur gibt es dazu keine einheitliche Definition. In BLUM et al. [12] wurde der Einfluss der Modellgenauigkeit auf die Performance eines MPC-Reglers im Hinblick auf die erzielte Energieeinsparung im Vergleich zur konventionellen Regelung untersucht. Es zeigt sich, dass mit Prozessmodellen mit einem *RMSE* von 0,5 °C bis 2 °C die beste Performance erzielt werden kann. In BRASTEIN et al. [13] wird ein *RMSE* im Bereich von 1 °C als ausreichend für den Einsatz in MPC bezeichnet. Die in den Referenzräumen installierten Raumtemperaturfühler weisen eine Messunsicherheit von $\pm 0,5$ °C auf (vgl. Tabelle 3.1). Dies stellt somit die Grenze der Modellgenauigkeit dar. Auf Basis dessen wird im Folgenden die Modellgenauigkeit als ausreichend gewertet, wenn der *MAE* sowohl für den Identifikationszeitraum als auch für alle gewählten Validierungszeiträume kleiner als 1,0 °C ist.

Parameteridentifikation als Optimierungsproblem

Bei der Parameteridentifikation handelt es sich um ein beschränktes, nichtlineares Optimierungsproblem, dass sich wie folgt formulieren lässt:

$$\Theta^* = \arg \min_{\Theta \in \mathbb{R}^n} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |T_Z(k) - \hat{T}_Z(k)| \quad (4.23)$$

mit den Nebenbedingungen:

$$\mathbf{F}(\dot{\mathbf{x}}(k), \mathbf{x}(k), \mathbf{y}(k), \mathbf{u}(k), \Theta) = 0 \quad (4.24)$$

$$\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 \quad (4.25)$$

$$\Theta_{i,\min} \leq \Theta_i \leq \Theta_{i,\max} \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (4.26)$$

Ziel des Optimierungsproblems ist es, den MAE zwischen simulierter (\hat{T}_Z) und gemessener Zonentemperatur (T_Z), unter Variation der freien Parameter in einem zulässigen Bereich (Gleichung 4.26) und bei vorgegebenen Anfangsbedingungen der Zustandsgrößen (Gleichung 4.25) über einen vorgegebenen Zeithorizont N zu minimieren. Die Systemdynamik wird mit Gleichung (4.24) beschrieben.

Das Optimierungsproblem wird in MATLAB® mithilfe der Global Optimization Toolbox [90] gelöst. Als Optimierungsalgorithmus wird das gradientenbasierte SQP-Verfahren (engl. *Sequential Quadratic Program*, Details siehe [47]) verwendet. Da zu erwarten ist, dass es sich bei dem Optimierungsproblem um ein nicht-konvexes Problem handelt, d. h. dass eine Vielzahl von lokalen Minima existieren kann, wird zusätzlich ein Multi-start-Ansatz gewählt. Mittels Latin Hypercube Sampling wird eine Anzahl an zufälligen

Startwerten innerhalb des zulässigen Parameterraums generiert, von denen jeweils der lokale Optimierungsalgorithmus startet. Als „optimales“ Parameterset wird schließlich das ausgewählt, das global den minimalen Wert der Zielfunktion (hier: MAE) aufweist. Die Anzahl an zufälligen Startwerten wird hier mit $5 \cdot n$ gewählt, wobei n die Anzahl an freien Parametern (d. h. Anzahl der Optimierungsvariablen) angibt.

Datensatz zur Identifikation

Bei der hier durchgeführten Untersuchung zur Parameteridentifikation werden Messdaten aus dem Gebäudemonitoring in dem Zeitraum vom 14. Februar bis 14. März 2018 genutzt. Abbildung 4.6 zeigt exemplarisch die gemessenen Ein- und Ausgangsdaten zur Identifikation für die Referenzzone A2 (Haus A, Heizkreis Süd-West). Außentemperatur und Solarstrahlung werden an Wetterstationen am Gebäude gemessen. Die Außentemperatur befindet sich zwischen -11°C bis $+12^\circ\text{C}$ und umfasst damit einen weiten Bereich der im Winterhalbjahr am Gebäudestandort auftretenden Außenlufttemperaturen. Die globale Solarstrahlung (hier gemessen auf die nach Südwesten ausgerichtete Fassade) variiert sehr stark tagesabhängig und erreicht Spitzen von bis zu 700 W/m^2 . Die TAD-Vorlauftemperatur wird zentral für den jeweiligen Heizkreis aufgezeichnet, d. h. das bei der Zone ankommende Heizungswasser kann durch Leitungsverluste eine andere Temperatur aufweisen. Entsprechend der außentemperaturgeführten Heizkurve befindet sich diese in einem Bereich von 22°C bis 32°C . Die RLT-Zulufttemperatur schwankt bei aktiver RLT-Anlage leicht um den Sollwert von 22°C .

Zur Bestimmung des Eingangssignals $occ(t)$ für interne Wärmegewinne wird ein tageszeitabhängiges Belegungsprofil mit den in einer Zone gemessenen Signal des Präsenzsensors kombiniert. Es wird nicht direkt das gemessene Signal des Präsenzsensors verwendet, da dieses aufgrund der Ausführung des Sensors als Pyroelektrischer Sensor ein stark fluktuierendes, binäres Ausgangssignal liefert, siehe Abbildung 4.7a. Da das Messprinzip auf der Detektion von Bewegungen basiert, wird so häufig ein falscher Belegungszustand gemessen. Der Tagesverlauf wird auf Basis des gemessenen Strombedarfs für Bürobeleuchtung ermittelt (Abbildung 4.7b), wobei dieser über mehrere Tage gemittelt und normiert wird. Das daraus resultierende Eingangssignal $occ(t)$ ist in Abbildung 4.7c und 4.6e gezeigt.

Die Raumtemperatur stellt die gemessene Ausgangsgröße dar und befindet sich für die betrachtete Zone in einem Bereich von etwa 22°C bis 27°C . Ausgeprägt zu erkennen ist ein Tagesgang der Temperatur, hervorgerufen durch interne und externe Wärmegewinne während der Arbeitszeit.

Für die Parameteridentifikation werden die Rohdaten wie folgt aufbereitet:

- Downsampling der Messdaten auf eine zeitliche Auflösung von 30 min.
- Glättung der Messdaten durch Tiefpassfilter (gleitender Mittelwert) um Messrauschen, Quantisierungsfehler oder Ausreißer zu eliminieren.

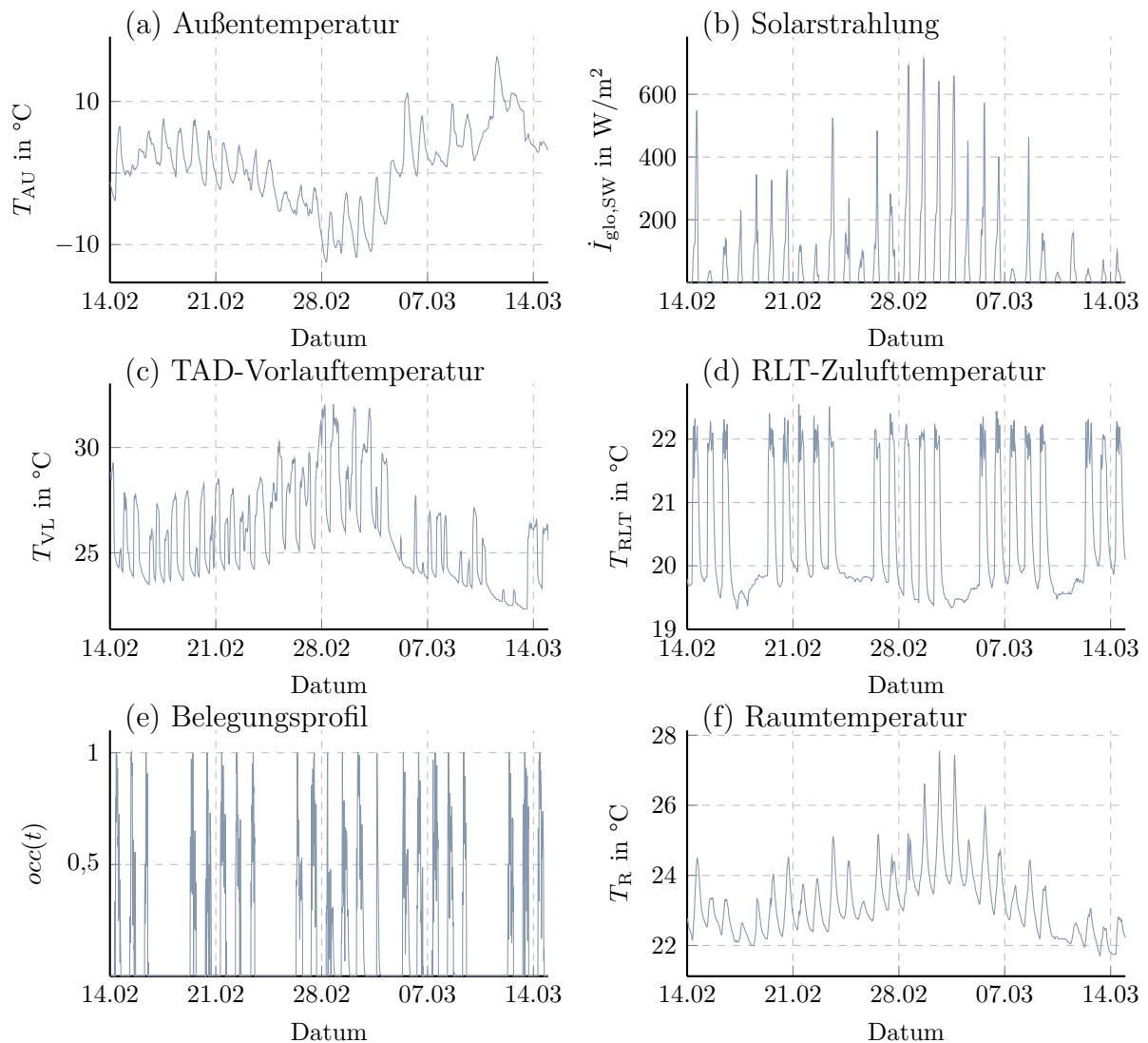


Abbildung 4.6: Gemessene Eingangs- und Ausgangsdaten im zur Parameteridentifikation genutzten Zeitraum vom 14. Februar bis 14. März 2018 für die Referenzzone A2.

- Aufbereitung der gemessenen Präsenzsignale.
- Gegebenenfalls visuelle Inspektion der Daten auf Qualität (z. B. länger anhaltender Ausfall der Messdatenaufzeichnung).

Betrachtete Zonen

Insgesamt stehen im Gebäude 32 Referenzbüro Räume zur Verfügung (siehe Abbildung 3.5). Die folgende Untersuchung zur Parameteridentifikation wird anhand einer Auswahl an Referenzzonen durchgeführt. Es werden jeweils drei Referenzzonen in Haus A, Haus C

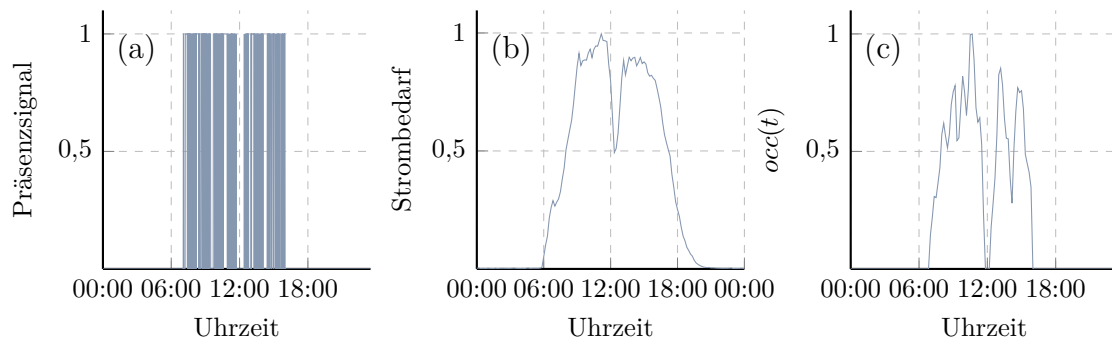


Abbildung 4.7: Ermittlung des normierten Belegungsprofils für interne Wärmege- winne (c) aus dem gemessenen Signal des Präsenzsensors (a) und des normierten Verlaufs des Strombedarfs für Bürobeleuchtung (b).

und Haus G entsprechend der drei Hauptorientierungen der Außenfassade untersucht, so- dass die Ergebnisse auf alle Referenzzonen übertragen werden können. Die geometrischen Daten sowie der initiale MAE im betrachteten Identifikationszeitraum (vgl. Abbildung 4.6) unter Verwendung der Startwerte (vgl. Tabelle 4.2) MAE_{init} sind in Tabelle 4.3 dar- gestellt. Für die Berechnung des dargestellten MAE wurde das R7C4-Modell verwendet.

Tabelle 4.3: Geometrische Daten und initialer MAE der betrachteten Referenzzo- nen.

Bezeichnung	Ausrichtung	A_Z in m^2	$A_{W,a}$ in m^2	A_F in m^2	MAE_{init} in $^\circ C$
A1	Südost	25,81	14,50	5,252	1,06
A2	Südwest	25,27	18,64	7,878	0,681
A3	Nordost	12,72	7,25	2,626	0,339
C1	Südwest	25,13	22,78	10,504	0,438
C2	West	12,65	7,25	2,626	0,313
C3	Nordost	12,86	7,25	2,626	0,707
G1	Südwest	10,22	7,25	2,626	1,35
G2	Nordwest	12,72	7,25	2,626	0,436
G3	Ost	26,11	14,50	5,252	0,370

Wie in Tabelle 4.2 zu erkennen ist, stellen bereits die Startwerte bei einigen Zonen eine sehr gute Abschätzung dar. Teilweise wird die vorgegebene Genauigkeit im Identifika- tionszeitraum schon erreicht. Dies kann als Hinweis darauf betrachtet werden, dass die Zonenmodelle mit den auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten abgeleiteten Startwerten das thermische Verhalten eines Büroraums bereits plausibel abbilden können.

4.3.1 Sensitivitätsanalyse

Vor Beginn des eigentlichen der Parameteridentifikation wird eine globale Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Diese hat zum Ziel, die „Relevanz“ bzw. Sensitivität der einzelnen Modellparameter im Hinblick auf die Modellgüte zu ermitteln. Parameter, die keinen oder nur einen geringen Einfluss auf die Modellgüte haben, werden im Identifikationsprozess als feste Parameter mit den entsprechenden Startwerten behandelt. Diese Reduktion der Anzahl von freien Parametern hat zwei positive Effekte auf den Identifikationsprozess:

1. Der Identifikationsprozess bzw. das Lösen des Optimierungsproblems läuft effizienter und schneller ab, da die Anzahl an Optimierungsvariablen reduziert wird.
2. Wie in BRASTEIN et al. [13] und VIOT et al. [106] gezeigt wurde, kann durch die Reduktion der Anzahl an freien Parametern ein Overfitting des Modells vermieden werden. Die Modelle mit identifizierten Parametern weisen damit eine bessere Vorhersagegenauigkeit bei anderen Zeiträumen als dem Identifikationszeitraum auf und sind damit übertragbarer auf andere Zeiträume.

Der erste Punkt ist vor allem dann von Bedeutung, wenn die Parameter „online“, also im laufenden Betrieb eines MPC-Reglers/einer Anlage ermittelt werden. Der zweite Punkt ist im hier vorliegenden Anwendungsfall von größerer Bedeutung, da die Parameteridentifikation „offline“, also entkoppelt vom Betrieb des MPC-Reglers stattfindet und die Parameter über einen längeren Betriebszeitraum konstant gehalten werden.

Zur Bestimmung der Sensitivität wird die Methode nach MORRIS [63] (häufig auch Morris-Screening genannt) verwendet. Diese stellt eine effiziente Methode der Sensitivitätsanalyse in Bezug auf die benötigte Anzahl an Simulationsdurchläufen dar. Details zu dieser Methode sind in [75] gegeben. Das Morris-Screening beruht auf der Berechnung von Elementareffekten (engl. *Elementary Effects*) $EE_{i,j}$. Der Parameterraum wird dabei durch ein statistisches Verfahren in ein diskretes Gitter unterteilt und die Gitterpunkte dem Simulationsmodell übergeben. Als Bewertungsmaß für die Sensitivität werden dann Mittelwert μ_i und Varianz (oder Standardabweichung) σ_i der Elementareffekte betrachtet:

$$\mu_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n EE_{i,j} \quad (4.27)$$

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (EE_{i,j} - \mu_i)^2 \quad (4.28)$$

Der Mittelwert beschreibt dabei die Veränderung der Ausgangsgröße y bei Variation des Parameters Θ_i . Je größer der Mittelwert eines Parameters ist, desto größer ist der Einfluss und damit die Relevanz des Parameters im Hinblick auf die Ausgangsgröße. Die Standardabweichung stellt allgemein ein Maß für Kopplungseffekte dar, hervorgerufen durch Nichtlinearität und/oder durch Wechselwirkung mit anderen Parametern. Ist σ_i klein, so ist der Einfluss von Θ_i nahezu unabhängig von den anderen Parametern, die konstant gehalten werden.

Als Ausgangsgröße wird der im Identifikationsprozess verwendete mittlere absolute Fehler MAE zwischen simulierter und gemessener Raumtemperatur verwendet. Der Parameterraum wird mittels Latin Hypercube Sampling und $n = 100$ diskretisiert. Somit können für jeden Parameter 100 Elementareffekte berechnet werden. Die Startwerte der Parameter können um den Faktor fünf um den Startwert variiert werden, d. h. $\Theta_{\min} = \frac{1}{5} \cdot \Theta_{\text{start}} \leq \Theta \leq 5 \cdot \Theta_{\text{start}} = \Theta_{\max}$, wobei für Parameter, die Anteile darstellen (z. B. $a_{\text{int,konv}}$) die obere Grenze auf $\Theta_{i,\max} = 1$ gesetzt wird. Als Auswertungszeitraum werden die 28 Tage (14.02.2018 bis 14.03.2018) des in Abbildung 4.6 dargestellten Zeitraums gewählt. Durchgeführt wird die Sensitivitätsanalyse am R7C4-Modell, da dieses die größte Anzahl an Modellparametern besitzt.

In Abbildung 4.8 sind die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für die neun hier untersuchten Referenzzonen dargestellt. Auf Basis dieser Ergebnisse lassen sich Aussagen ableiten, die auch auf alle anderen Referenzzonen zutreffen und beim nachfolgenden Identifikationsprozess berücksichtigt werden können. Die Parameter, die als relevant eingestuft werden, sind in rot und mit entsprechenden Namen gekennzeichnet. Ein Parameter wird als relevant identifiziert, wenn eine der beiden Bedingungen $\mu_i \geq 0,2 \cdot \mu_{\max}$ oder $\sigma_i \geq 0,2 \cdot \sigma_{\max}$ erfüllt ist.

Es zeigt sich, dass die Widerstände des Fensters R_F und der Außenwand R_{W1} in fast allen Referenzzonen die mit Abstand relevantesten Parameter sind. Sowohl der Mittelwert als auch die Standardabweichung der Elementareffekte sind für beide Parameter hoch. Dies ist plausibel, da durch sie der gesamte Transmissionswärmeverlust einer Zone bestimmt wird. Für den Parameter R_{W1} ergeben sich meist deutlichere Kopplungseffekte, ersichtlich an einer größeren Standardabweichung.

Für den Parameter f_{sol} zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit von der jeweiligen Ausrichtung der Zonen. Dieser hat insbesondere bei der nach Süden und Osten ausgerichteten Zone einen sehr großen Einfluss, wohingegen die Relevanz bei nördlicher Ausrichtung (Zone A3, C3 und G2) nur schwach ausgeprägt ist. Dies ist erwartbar, da in den Wintermonaten kaum Solarstrahlung auf nach Norden ausgerichtete Fassaden auftritt und damit kaum Wärmegewinne verbunden sind.

Die beiden Parameter des TAD-Modells R_{TAD1} und R_{TAD2} sind ebenfalls bei allen Referenzzonen als relevant zu kennzeichnen. Da diese hauptsächlich für den Ausgleich der Transmissionswärmeverlust zuständig sind, ist auch dies plausibel.

Der Parameter R_{int} ist nur bei fünf der neun Zonen relevant. Auch der Parameter zur Bestimmung der internen Wärmegewinne \dot{q}_{int} ist nur bei den Zonen C1, C2 und G2 als relevant zu bezeichnen. Es ist anzunehmen, dass die Sensitivität stark davon abhängig ist, wie die Belegung der Zone im betrachteten Zeitraum ausgeprägt ist, da dieser Parameter nur bei vorhandener Belegung durch die Eingangsdaten angeregt wird.

Auffällig ist, dass keiner der vorhandenen thermischen Kapazitäten in den Zonen als relevant eingestuft wird. Dies kann ein Hinweis darauf sein, dass diese durch die Eingangsdaten nicht ausreichend angeregt werden. Wie bereits erläutert, stellt dies bei Datensätzen,

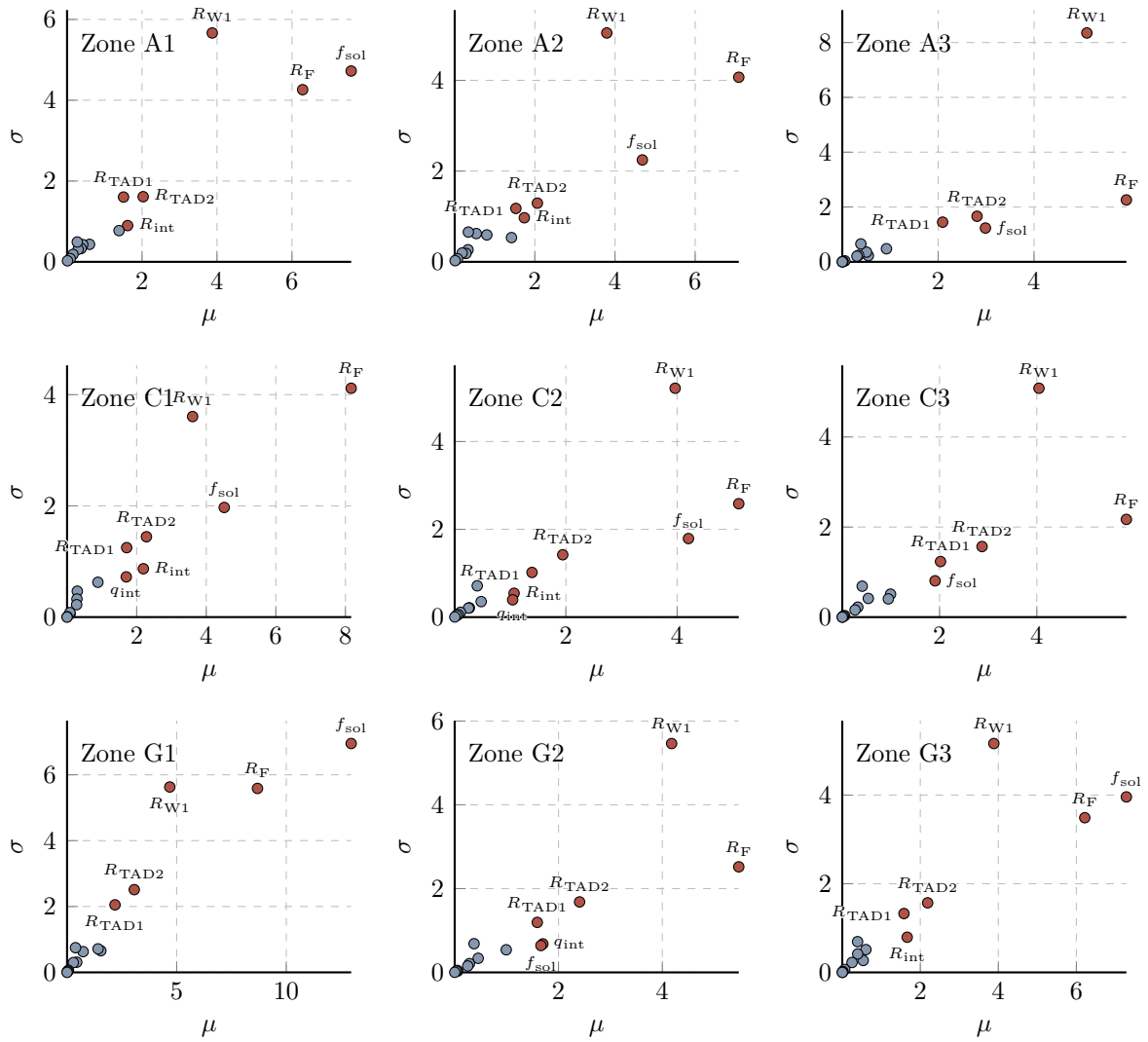


Abbildung 4.8: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für die neun untersuchten Zonen. Parameter, die als relevant identifiziert werden, sind in rot dargestellt und mit Namen gekennzeichnet.

die im laufenden Gebäudebetrieb und damit im geschlossenen Regelkreis ermittelt werden, eine Herausforderung dar und kann dazu führen, dass die Parameterwerte nicht eindeutig aus Messdaten bestimmbar sind [13, 106]. Auch wenn die exakten Zahlenwerte der thermischen Kapazitäten nicht von großer Relevanz sind, so sind diese für die Dynamik des Modells dennoch von Bedeutung, da diese das dynamische Verhalten einer Zone beschreiben.

Auf Basis der Sensitivitätsanalyse lassen sich damit sieben prinzipiell relevanten Parameter im Vektor $\Theta_{\text{rel}} = [R_F, R_{W1}, f_{\text{sol}}, R_{\text{TAD2}}, R_{\text{TAD1}}, R_{\text{int}}, \dot{q}_{\text{int}}]$ zusammenfassen, wobei die Parameter f_{sol} und \dot{q}_{int} nur bei einigen der untersuchten Zonen als relevant identifiziert werden. In den folgenden Abschnitten werden nur diese relevanten Parameter als freie

Modellparameter betrachtet. Alle anderen Parameter werden als feste Parameter mit den entsprechenden Startwerten (vgl. Tabelle 4.1 und 4.2) behandelt.

4.3.2 Einfluss der Modellordnung

Um die Frage zu beantworten, welches der drei Zonenmodelle hinsichtlich der Genauigkeit am geeignetsten ist, werden diese für die in Tabelle 4.3 aufgeführten Referenzzonen mit dem Identifikationsdatensatz der letzten 21 Tage (21.02.2018 bis 14.03.2018) des in Abbildung 4.6 dargestellten Zeitraums nach dem im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Vorgehen identifiziert. Dabei werden nur die Parameter als freie Parameter gesetzt, die nach der Sensitivitätsanalyse (vgl. Abschnitt 4.3.1) als relevant eingestuft werden. Zur Validierung werden insgesamt fünf Datensätze verwendet, die in Tabelle 4.4 aufgeführt sind. Diese umfassen die dem Identifikationszeitraum unmittelbar folgenden bzw. vorangegangenen 21 Tage (VD+21T bzw. VD-21T) und den daraus zusammengesetzten 9-wöchigen Zeitraum im Folgejahr (VD+1J) sowie der vorangegangenen zwei Jahre (VD-1J und VD-2J).

Tabelle 4.4: Validierungszeiträume zur Untersuchung des Einflusses der Modellordnung.

Bezeichnung	Zeitraum	Anzahl Tage
VD+21T	14.03.2018 - 04.04.2018	21
VD-21T	31.01.2018 - 21.02.2018	21
VD+1J	31.01.2019 - 04.04.2019	63
VD-1J	31.01.2017 - 04.04.2017	63
VD-2J	31.01.2016 - 04.04.2016	63

In Abbildung 4.9 ist die Verteilung der MAE aller betrachteten Zonenmodelle in den Validierungszeiträumen als Box-Plot¹ dargestellt.

Wie zu erkennen ist, kann das thermische Verhalten einer Referenzzone mit allen drei Zonenmodellen mit ausreichender Genauigkeit abgebildet werden. Die MAE in den Validierungszeiträumen sind stets kleiner als 1,0 °C und der Medianwert ist kleiner als 0,5 °C. Ausreißer nach oben oder unten gibt es keine. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Modellen sind dabei nur gering. Das R6C3- und R7C4-Modell weisen im Vergleich zum R5C2-Modell einen etwas geringeren Medianwert auf und eine insgesamt schmalere Verteilung. Die Aufteilung der inneren Kapazität einer Zone in Raumluft und innere Masse

¹Sofern nicht anders angegeben, werden die Box-Plots wie folgt definiert: Die Box entspricht dem Interquartilsabstand (engl. *interquartile range*, IQR) in dem 50 % der Daten liegen. Der Strich innerhalb der Box entspricht dem Median der Verteilung. Die Länge der Antennen (Whisker) sind auf das 1,5-fache des Interquartilsabstands ($1,5 \times \text{IQR}$, entspricht etwa 99,3 % der Daten) beschränkt. Daten außerhalb dieses Bereichs werden als Ausreißer markiert.

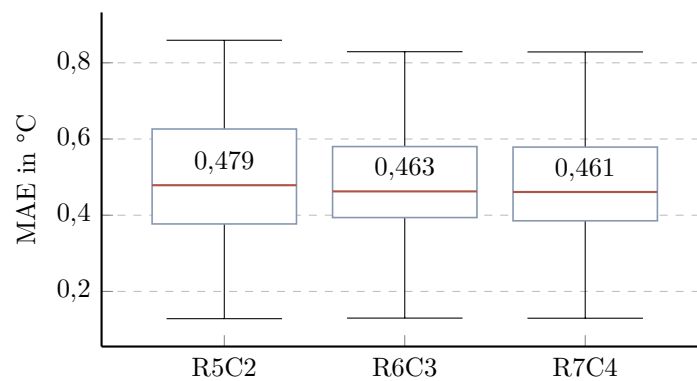


Abbildung 4.9: Verteilung der MAE in den Validierungszeiträumen für die drei untersuchten Zonenmodelle.

sowie die damit einhergehende Aufteilung der Wärmegewinne in Strahlung und Konvektion resultiert in einer leichten Verbesserung der Modellgenauigkeit. Zwischen dem R6C3- und dem R7C4-Modell ist kaum ein Unterschied feststellbar. Die Modellierung der Außenwand mit einer zusätzlichen Kapazität bringt keine Verbesserung der Genauigkeit. Der Grund hierfür kann in dem konstruktiven Aufbau der Außenwand gefunden werden. Die vorgehängte Elementfassade als Verbundsystem aus Aluminium und Mineralwolle bietet keine nennenswerte thermische Speicherfähigkeit.

Aus den hier dargestellten Ergebnissen folgt, dass hinsichtlich der Genauigkeit kein eindeutiger Zusammenhang mit der Modellkomplexität besteht und alle drei untersuchten Modelle eine ausreichende Vorhersagegenauigkeit für die MPC-Anwendung aufweisen. Gleiches gilt auch für den rechnerischen Aufwand, d. h. eine Erhöhung der Simulationszeit des komplexesten R7C4-Modells gegenüber dem einfachsten R5C2-Modell ist nicht gegeben. Ein Unterschied ergibt sich hinsichtlich der Anzahl an Zustandsgrößen, die im geschlossenen Regelkreis mithilfe der Zustandsschätzung (vgl. Abschnitt 5.4) abgeschätzt werden müssen. Es wird vermutet, dass das R7C4-Modell hier einen Vorteil gegenüber den anderen Modellen aufweist, da die hier zusätzlich vorhandene Zustandsgröße der Außenwand (T_W) eng mit der messbaren Außenlufttemperatur verknüpft ist. Hierdurch können im geschlossenen Regelkreis Vorteile hinsichtlich der Korrektur der Modellunsicherheit mittels Zustandsschätzung entstehen. Hierzu bedarf es jedoch noch weiterer Untersuchungen. Aufgrund der Tatsache, dass weder im Bezug auf die Vorhersagegenauigkeit, noch auf die Simulationszeit ein signifikanter Unterschied zwischen den drei Modellen besteht, wird im Folgenden für alle weitere Untersuchungen das R7C4-Modell verwendet. Darüber hinaus wird dieses als Prozessmodell für den in Kapitel 5 entwickelten MPC-Regler eingesetzt.

4.3.3 Einfluss der Anzahl freier Parameter

Mit steigender Anzahl an freien Parametern steigt sowohl der rechnerische Aufwand des Identifikationsprozess als auch das Risiko für eine Überanpassung. Mittels der Sensitivitätsanalyse konnte bereits eine deutliche Reduktion der freien Parameter erwirkt werden. Im Folgenden wird der Einfluss der Anzahl an freien Parametern auf die Genauigkeit und Übertragbarkeit der Modelle noch weitergehend untersucht. Dazu wird die Anzahl an freien Parametern sukzessive entlang der in Abschnitt 4.3.1 ermittelten Parametersensitivität erhöht. Als Identifikationszeitraum werden wie zuvor die letzten 21 Tage des Untersuchungszeitraums gewählt und als Validierungsdatensätze die in Tabelle 4.4 angegebenen Zeiträume verwendet. Identifiziert werden die Parameter des R7C4-Modells mit den Daten aller neun hier untersuchten Referenzzonen (vgl. Tabelle 4.3).

In Abbildung 4.10 ist die Verteilung der MAE in den Validierungszeiträumen in Abhängigkeit der Anzahl an freien Parametern dargestellt. Dabei wird die Anzahl von $n = 0$ (initiale Modellparameter, vgl. Tabelle 4.2) bis $n = 12$ (alle Modellparameter) variiert. Es

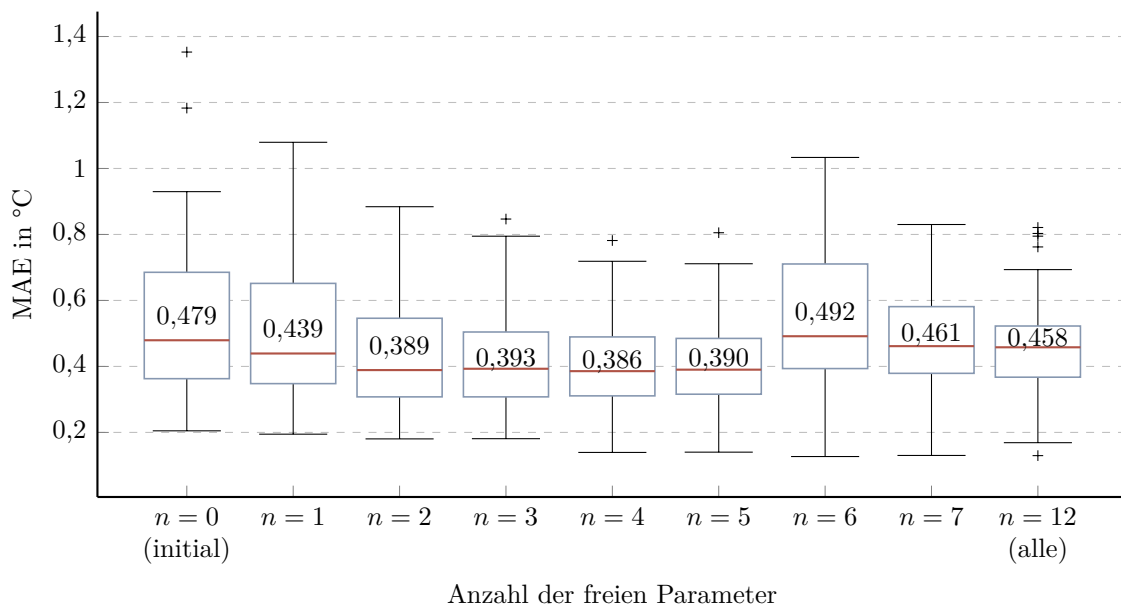


Abbildung 4.10: Einfluss der Anzahl an freien Parameter auf die Verteilung der MAE in den Validierungszeiträumen.

ist zu erkennen, dass bereits mit den initialen Modellparametern eine gute Genauigkeit erreicht wird. Bis auf zwei Ausreißer liegen alle MAE unterhalb der erforderlichen Grenze von $< 1^\circ\text{C}$. Mit zunehmender Anzahl an freien Parametern wird die Verteilung zunächst schmäler und es sinken sowohl der Median als auch der minimale und maximale MAE. Dies trifft bis zu einer Anzahl an freien Parametern von $n = 5$ zu. Bei einer Anzahl an freien Parametern von $n = 6$ wird die MAE-Verteilung deutlich breiter und der Median steigt sprunghaft. Hier treten erste Erscheinungen einer Überanpassung der Modellparameter auf. Auch wenn die Genauigkeit anschließend mit steigender Anzahl an freien Parametern

wieder zunimmt, so erreicht diese, auch wenn alle Parameter identifiziert werden, nicht die Genauigkeit bei $n = 4$ bzw. $n = 5$.

Eine Überanpassung der Modelle tritt damit bereits bei einer sehr geringen Anzahl an freien Parametern auf. Zurückzuführen ist dies vermutlich darauf, dass die Identifikationsdatensätze aus dem laufenden Gebäudebetrieb entstammen und somit nur ein begrenztes Spektrum an Eingangs- und Ausgangsdaten enthalten können. Sowohl für die Modellgenauigkeit als auch für die Verkürzung der Rechenzeit für die Identifikation ist es damit zielführend, eine geringe Anzahl freier Parameter zu wählen. Bei der Auswahl der freien Parameter sollte sich entlang der Parametersensitivität orientiert werden.

4.3.4 Einfluss der Länge des Identifikationsdatensatzes

Zur Untersuchung des Einflusses der Länge des Identifikationsdatensatzes ist in Abbildung 4.11 der Medianwert des MAE sowohl im Identifikationszeitraum als auch für vier Validierungszeiträume in Abhängigkeit der der Länge des Identifikationsdatensatzes dargestellt. Die Parameteridentifikation wird am R7C4-Modell mit Datensätzen durchgeführt, die jeweils die ersten 7, 14, 21 oder 28 Tage der in Abbildung 4.6 dargestellten Daten umfassen. Das so identifizierte Modell wird anschließend mit Daten der darauffolgenden 7, 14, 21 und 28 Tagen validiert.

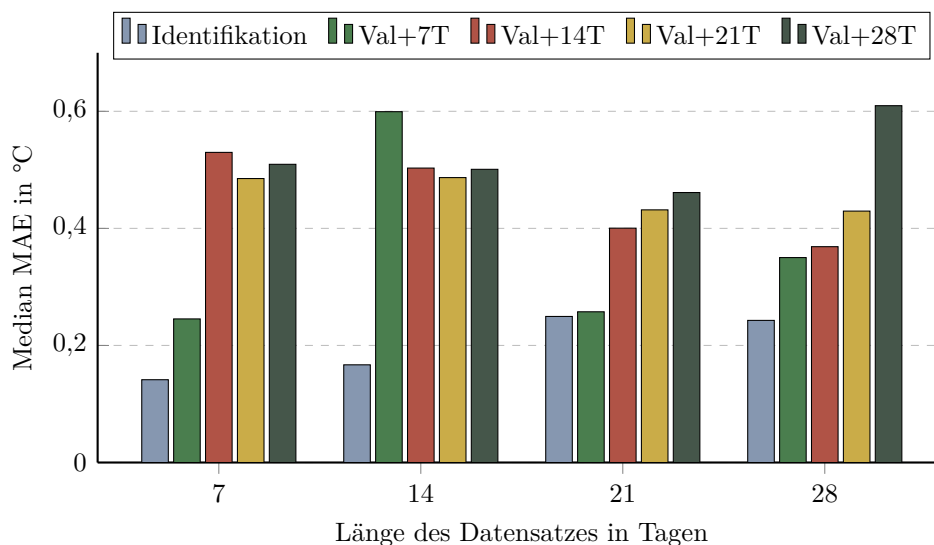


Abbildung 4.11: Einfluss der Länge des Identifikationsdatensatzes auf den Medianwert des MAE bei unterschiedlich langen Validierungszeiträumen.

Wie zu erkennen ist, steigt der Medianwert des MAE im Identifikationszeitraum mit der Länge des Identifikationsdatensatzes. Dies ist damit zu erklären, dass die Parameter mit zunehmender Länge des Datensatzes insgesamt mit einem breiteren Spektrum an

Eingangsdaten angeregt werden und damit auch einen größeren Bereich an Ausgangsdaten abbilden können. Insgesamt steigt der MAE im Identifikationszeitraum bei Zunahme der Länge des Identifikationsdatensatzes damit an.

Grundsätzlich zeigt sich, dass die Länge des Identifikationsdatensatzes um eine gute Vorhersagegenauigkeit zu erreichen abhängig von der Länge des betrachteten Validierungszeitraums ist. Beträgt die Länge des Datensatzes 7 Tage, so ist der MAE in den darauffolgenden 7 Tagen noch niedrig, steigt aber für längere Validierungszeiträume deutlich an. Das lässt darauf schließen, dass das Spektrum der Eingangsdaten in den ersten 14 Tagen ähnlich ist, während sich nach 14 Tagen deutlich abweichende Außen- und Betriebsbedingungen einstellen (vgl. Abbildung 4.6). Ähnlich verhält es sich bei einem Identifikationszeitraum von 14 Tagen, wobei hier der MAE des 7-Tage Validierungszeitraums bereits sprunghaft ansteigt. Umfasst der Identifikationszeitraum 21 Tage, sinkt der Medianwert des MAE in allen Validierungszeiträumen im Vergleich zu kürzeren Identifikationszeiträumen. Hier beinhalten die Eingangs- und Ausgangsdaten ein ausreichend breites Spektrum, um die Übertragbarkeit auf andere Zeiträume zu gewährleisten. Bei einem 28-Tage umfassenden Identifikationsdatensatz verhält es sich ähnlich, mit Ausnahme des 28-tägigen Validierungszeitraums, wo ein Anstieg des MAE zu beobachten ist.

Auf Basis der Ergebnisse lässt sich schließen, dass ein rekursives Parameteridentifikation, welches unter Verwendung der vorangegangenen 21 Tage als Identifikationsdatensatz ausgeführt wird, als eine zielführende Identifikationsmethode verwendet werden sollte. Als zeitliches Intervall zwischen den Identifikationsdurchläufen bietet sich hier beispielsweise 7 Tage an. Da hierdurch die möglichen zeitlichen Änderungen von Parametern der Prozessmodelle erfasst werden können, ist eine bessere Vorhersagegenauigkeit und damit Reglerperformance zu erwarten. Mögliche zeitliche Änderungen der thermischen Eigenschaften einer Zone oder des Gebäudes ergeben sich z. B. durch Nutzungsänderung und das Hinzufügen oder Entfernen von Mobiliar. Ein solches Vorgehen wird u. a. auch von ROCKETT und HATHWAY [74] als sinnvoll erachtet.

4.4 Fazit

Mit der hier dargestellten Methode und den entwickelten Grey-Box-Modellen lassen sich Zonenmodelle erstellen, die einen sehr breiten Bereich der auftretenden Betriebs- und Außenbedingungen mit einer ausreichenden Genauigkeit abbilden können und daher grundlegend als Prozessmodelle für MPC-Regelungsanwendungen geeignet sind. Dies zeigt sich an einer sehr guten Übertragbarkeit der identifizierten Modellparameter auf andere Zeiträume, beispielsweise auf andere Betriebsjahre.

Ein wichtiges Tool ist die Sensitivitätsanalyse, mit der sich die relevanten Modellparameter hinsichtlich der Vorhersagegenauigkeit der Zonentemperatur ermitteln lassen. Da die Daten zur Identifikation im realen Gebäudebetrieb erhoben werden, ist nur ein beschränktes Spektrum an Eingangs- und Ausgangsdaten vorhanden und eine Überanpassung der

Modelle tritt daher bereits bei einer geringen Anzahl an freien Modellparametern auf. Es ist daher zielführender, nur einen kleinen Satz an Parametern mittels Parameteridentifikation abzuschätzen. Da zudem nicht erwartet wird, dass sich die Betriebsbedingungen im MPC-Betrieb deutlich von denen in der Vergangenheit unterscheiden, kann dieses Vorgehen als ausreichend bewertet werden.

Die Komplexität der Grey-Box-Modelle hat nur eine untergeordnete Bedeutung auf die Vorhersage-Performance. Mit allen drei untersuchten Modellstrukturen lassen sich ausreichend genaue Zonenmodelle erstellen. In den folgenden Abschnitten wird daher ausschließlich das komplexeste R7C4-Modell als Prozessmodell verwendet.

Hinsichtlich der Dauer des Identifikationszeitraums wird mit einem Datensatz mit einer Länge von 21 Tagen die beste Performance erzielt. Eine rekursive, wöchentliche Ausführung der Parameteridentifikation ist als sinnvoll zu erachten, da hiermit auch eventuelle zeitliche Änderungen der Gebäudeeigenschaften erfasst werden.

Wichtig zu beachten ist, dass in diesem Abschnitt nur die Vorhersagegenauigkeit in Open-Loop-Konfiguration betrachtet wurde. Im realen Reglerbetrieb befinden sich die Modelle in Closed-Loop-Konfiguration, d. h. in jedem Regelungsschritt werden die Werte der Zustandsgrößen mittels Zustandsschätzung aus den aktuellen Messdaten rekursiv abgeschätzt. Ob die Modelle auch im Realbetrieb eine ausreichende Vorhersagegenauigkeit aufweisen, um eine stabile und effiziente MPC-Regelung des Gebäudes zu ermöglichen, wird in der praktischen Umsetzung in Kapitel 6 untersucht.

Im folgenden Kapitel wird zunächst der MPC-Regler für das untersuchte Gebäude unter Verwendung der R7C4-Zonenmodelle als interne Prozessmodelle entwickelt.

5 Entwicklung einer modellbasierten prädiktiven Regelungsstrategie

In diesem Kapitel wird auf die Entwicklung des Reglers eingegangen, der nach dem Prinzip der Modellbasierten Prädiktiven Regelung zur Erhöhung der Energieeffizienz und des thermischen Komforts im Gebäude im Rahmen dieser Arbeit implementiert wird. Zunächst wird hierfür die grundlegende Konfiguration als übergeordneter Regler und die konkrete Regelungsaufgabe beschrieben. Die im Kern von MPC stehende und zu minimierende Kostenfunktion wird im darauffolgenden Abschnitt 5.2 entwickelt. Weitere wichtige Bestandteile sind die Prädiktion von Störgrößen und die Zustandsschätzung, mit der der Regelkreis geschlossen wird. Abschließend erfolgt in diesem Kapitel die Beschreibung der technischen Umsetzung des gesamten MPC-Frameworks im Verwaltungsgebäude Neuenfelder Straße.

5.1 Grundlegende Konfiguration des MPC-Reglers

Die grundlegende Konfiguration eines MPC-Reglers zur Regelung eines TAD-Heizkreises zeigt Abbildung 5.1. Der MPC-Regler ist hierbei als übergeordneter Regler angeordnet und übernimmt die Rolle als Sollwertgeber für die darunterliegende, unveränderte Regelung. Ein hier betrachteter TAD-Regelkreis besteht aus einer Umwälzpumpe, einem Dreiwege-Mischventil mit dazugehörigem PI-Regler und dem Verteilungssystem. Ein solcher Regelkreis versorgt in den Flachbauten bis zu 170 Büroräume mit einer beheizten Nutzungsfläche von bis zu 1400 m^2 . Insgesamt gibt es im gesamten Gebäude 16 verschiedene TAD-Regelkreise, je zwei pro Bauteil, die jeweils mit einem eigenen MPC-Regler geregelt werden können. Da die einzelnen Regler untereinander nicht kommunizieren, wird dies auch als hierarchische MPC-Regelung bezeichnet [36].

Grundsätzlich gibt es für den übergeordneten MPC-Regler zwei mögliche Steuergrößen. Zum einen kann der Sollwert für die Vorlauftemperatur u_{VL} vorgegeben werden. Dieser wird dann durch den PI-Regler und das Mischventil durch Beimischung des Rücklaufs entsprechend eingestellt. Zum anderen kann auch der Betrieb der Umwälzpumpen durch die MPC-Regelung übernommen und optimiert werden. Hierbei werden jedoch nur die Ein- und Ausschaltzeiten der Umwälzpumpen betrachtet und es wird nicht in die interne Regelung der Pumpen, z. B. zur Drehzahlregelung eingegriffen. Das Freigabesignale u_P ist daher binär und kann nur die Werte 0 (Aus) oder 1 (An) annehmen. Als Rückführungsgrößen stehen dem Regler jeweils die gemessene Vorlauf- und Rücklauftemperatur, T_{VL} und T_{RL} , sowie die gemessene Zonentemperatur $T_{Z,i}$ der im jeweiligen Bauteil vorhandenen Referenzräume zur Verfügung.

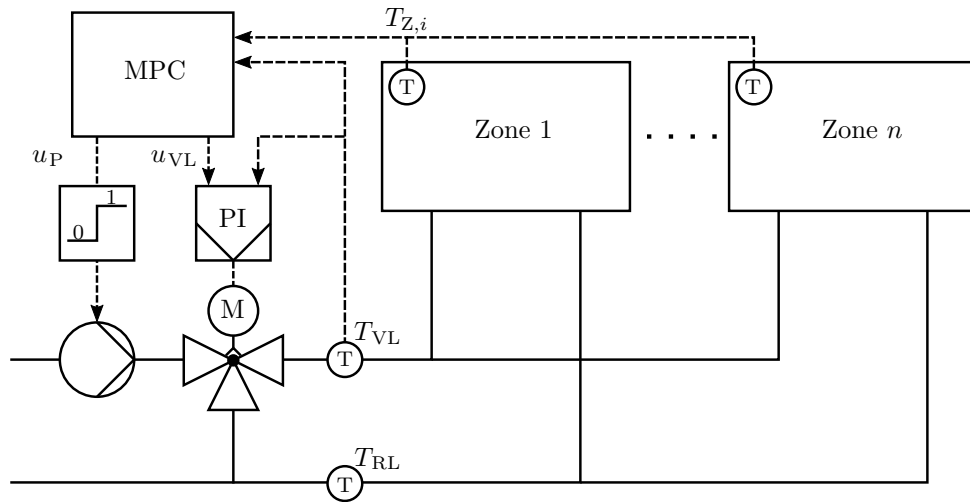


Abbildung 5.1: Schematische Darstellung der Anordnung des MPC-Reglers als übergeordneter Regler in einem TAD-Regelkreis.

Wie in Abschnitt 3.1 erläutert, werden die TAD sowohl zur Beheizung der Büroflächen als auch zur passiven Kühlung im Sommer verwendet. Der hier entwickelte MPC-Regler kann beide Betriebsmodi optimieren und als übergeordneter Regler verwendet werden. Die Umschaltung zwischen den Betriebsmodi wird jedoch weiterhin zentral von der GLT gesteuert. Die grundsätzliche Anforderung an den Regler ist, die Raumtemperaturen in allen Büroräumen während der gesamten Gebäudenutzungszeiten in einem vorgegebenen Temperaturbereich zu halten und dafür so wenig Energie wie möglich aufzuwenden. Die aufzuwendenden Energiemengen können unterteilt werden in Heizenergie, Kühlenergie und Strombedarf der Pumpen. Die Kühlenergie, als die über die TAD abzuführende thermische Energie, wird in dieser Arbeit als „aufwandslos“ betrachtet, da die Kühlung passiv über die Nutzung des Erdreichs als natürliche Wärmesenke erfolgt. Die Heizenergie, als thermische Energie mit einem höheren Temperaturniveau als die Umgebung, setzt sich nach dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik aus Exergie und Anergie zusammen. Bereitgestellt wird die Heizenergie durch das Heizungssystem, d. h. durch die Wärmepumpen und teilweise über Nahwärme. Der Strombedarf der Umwälzpumpen als elektrische Energie ist reine Exergie.

In Abbildung 5.2 ist das grundlegende Funktionsschema des hier genutzten MPC-Reglers dargestellt. Der Kern des MPC-Reglers besteht aus zwei Teilen: der Optimierung einer Kostenfunktion und der Prädiktion des dynamischen Systemverhaltens einzelner Referenzzonen mithilfe der im vorangegangenen Kapitel entwickelten Referenzzonenmodelle. Bei der Optimierung werden Nebenbedingungen für die Steuer- und Regelgrößen berücksichtigt. Für die Kostenfunktion ist eine Definition der Komfortkriterien nötig sowie das Festlegen weiterer Reglerparameter wie z. B. Gewichtungsfaktoren, worauf in den folgenden Abschnitten genauer eingegangen wird. Für eine gute Reglerperformance ist bei der Prädiktion zudem eine möglichst genaue Vorhersage der Störgrößen notwendig. Ein weiterer, wichtiger Bestandteil von MPC ist eine Zustandsschätzung, bei der mithilfe von

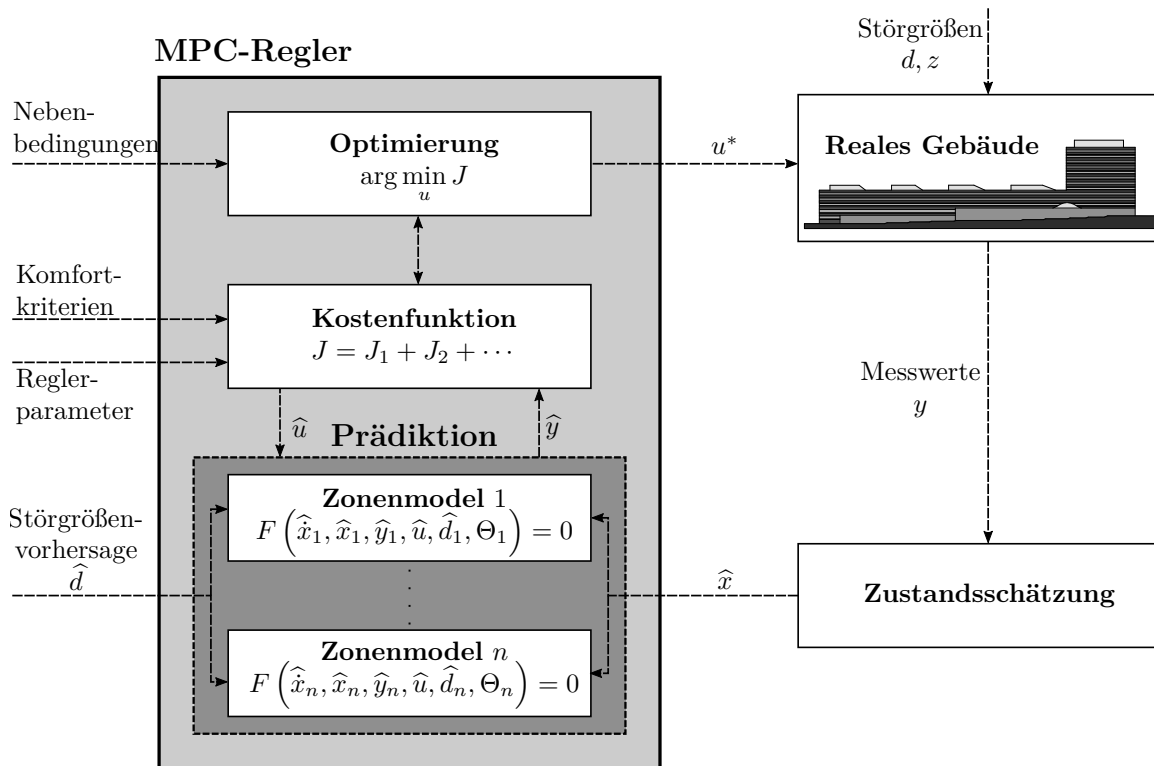


Abbildung 5.2: Schematische Darstellung der Funktionsweise des entwickelten MPC-Reglers zur Regelung eines TAD-Regelkreises.

Messdaten der aktuelle Systemzustand rückgekoppelt wird und der Regelkreis somit geschlossen wird. Auf die einzelnen Bestandteile des MPC-Reglers sowie deren konkrete Umsetzung wird in den folgenden Abschnitten eingegangen.

Tabelle 5.1 stellt die Notation der in diesem Kapitel verwendeten Variablen dar. Die im vorherigen Abschnitt allgemein als Eingangsgrößen \mathbf{u} bezeichnete Größen werden hier unterteilt in manipulierbare Steuergrößen \mathbf{u} und nicht-manipulierbare Störgrößen, wobei letztere nochmals in messbare (bzw. vorhersagbare) Störgrößen \mathbf{d} und nicht-messbare (bzw. nicht-vorhersagbare) Störgrößen \mathbf{z} unterteilt werden. Das Dach-Symbol wird hier verwendet, um vorhergesagte Größen zu kennzeichnen, z. B. $\hat{\mathbf{y}}$ als vorhergesagte Ausgangsgrößen der Zonenmodelle.

Aufgrund der zeitdiskreten Arbeitsweise des Reglers werden die Systemgleichungen der Zonenmodelle zeitlich diskretisiert. Die kontinuierliche Zeit $t \in [t_0, t_p]$ mit t_p als Prädiktionzeitraum wird dabei in die diskrete Zeit $k \in [0, 1, \dots, N_p - 1]$ bei einer vorgegebenen festen Abtastzeit t_s überführt, wobei für den Prädiktionshorizont gilt $N_p = \frac{t_p}{t_s}$. Alle Gleichungen werden im Folgenden daher in zeitdiskreter Form angegeben. Der Steuerhorizont N_c wird in dieser Arbeit gleichgesetzt mit dem Prädiktionshorizont ($N_c = N_p$)

Tabelle 5.1: Beschreibung der in diesem Kapitel verwendeten Notation mit Beispielen.

Notation	Beschreibung	Beispiele
\mathbf{x}	Zustandsgrößen	Wandtemperaturen, TAD-Kerntemperaturen
\mathbf{y}	Ausgangsgrößen	Zonentemperaturen, Heizenergien
\mathbf{u}	Steuergrößen	Soll-Vorlauftemperatur, Freigabesignal der Pumpen
\mathbf{d}	messbare Störgrößen	Außentemperatur, Solarstrahlung
\mathbf{z}	nicht-messbare Störgrößen	allg. Verhalten von Personen, z. B. Fens- teröffnung
Θ	Modellparameter	Werte der thermische Widerstände und Kapazitäten

5.2 Kostenfunktion

Die zu minimierende Kostenfunktion besteht aus drei (zeitabhängigen) Bestandteilen: den Energiekosten $J_{\text{EK}}(k)$, den Unbehaglichkeitskosten $J_{\text{UK}}(k)$ und den Kosten für die Steuergrößenänderung $J_{\Delta u}(k)$. Bei der Formulierung der Kostenfunktion wird sich an Empfehlungen von CIGLER et al. [17] orientiert. Ziel der Optimierung ist die Minimierung der Energiekosten bei gleichzeitiger Maximierung des thermischen Komforts. Es handelt sich bei diesem Optimierungsproblem daher um ein mehrkriterielles Optimierungsproblem [68], das auf Basis der gewichteten Summe der einzelnen Zielfunktion in ein skalares Problem überführt wird. Das dynamische Optimierungsproblem lässt sich damit allgemein wie folgt formulieren:

$$\mathbf{u}^*(k) = \arg \min_{\hat{\mathbf{u}}(k)} \beta_{\text{EK}} J_{\text{EK}}(k) + \beta_{\text{UK}} J_{\text{UK}}(k) + \beta_{\Delta u} J_{\Delta u}(k) \quad (5.1)$$

mit den Nebenbedingungen:

$$F(\hat{\mathbf{x}}_i(k), \hat{\mathbf{x}}_i(k), \hat{\mathbf{y}}_i(k), \hat{\mathbf{u}}(k), \hat{\mathbf{d}}_i(k), \Theta_i) = 0 \quad (5.2)$$

$$\mathbf{u}_{\min} \leq \hat{\mathbf{u}}(k) \leq \mathbf{u}_{\max} \quad (5.3)$$

Das dynamische Systemverhalten einer Zone $i = (1, \dots, n_Z)$ wird durch das im vorherigen Abschnitt 4 entwickelte R7C4-Modell beschrieben, welches wiederum in der Form eines impliziten, zeitdiskreten DAE-Systems (5.2) dargestellt werden kann. Die Ungleichungsnebenbedingungen (5.3) für die Steuergröße $\hat{\mathbf{u}}(k)$ sind als harte Nebenbedingungen formuliert. Untere und obere Grenzen der Steuergrößen \mathbf{u}_{\min} und \mathbf{u}_{\max} ergeben sich aus Anforderungen aus dem betrachteten Heizungs-/Kühlsystem und sind zu jeder Zeit einzuhalten. Das Ergebnis der Minimierung der Kostenfunktion ist die optimierte Folge der Steuergröße $\mathbf{u}^*(k)$ über den Prädiktionshorizont N_p .

Die einzelnen Bestandteile der Kostenfunktion können über die Gewichtungsfaktoren β_{EK} , β_{UK} und $\beta_{\Delta u}$ gewichtet werden und damit deren Wichtigkeit festgelegt werden. Des Weiteren dienen die Gewichtungsfaktoren der Skalierung der Kostenbestandteile, da sich diese untereinander um Größenordnungen unterscheiden können. Diese Gewichtungsfaktoren stellen damit wichtige Reglerparameter dar, die in der Entwurfsphase (Abschnitt 6.1) mittels Simulation ermittelt werden.

5.2.1 Energiekosten

Die Energiekosten setzen sich aus der Summe der aufgewendeten Heizenergien der TAD für alle betrachteten Zonen sowie dem aufgewendeten Strombedarf der Umwälzpumpen zusammen. Die TAD-Heizenergie wird nur im Heizbetrieb als Aufwand betrachtet, da die über die TAD abgeführte Energiemenge im Kühlbetrieb keinen energetischen Aufwand erfordert. Dies wird mit dem Gewichtungsfaktor β_{TAD} berücksichtigt. Für die Berechnung der gesamten Heizenergie wird die TAD-Heizleistung einer einzelnen Zone über den Prädiktionshorizont summiert und mit dem Zonen-Gewichtungsfaktor $\beta_{\text{Z},i}$ gewichtet. Bei der Pumpenergie wird nicht die tatsächliche Leistungsaufnahme der Pumpen betrachtet, sondern der Verlauf der Steuergröße u_{P} als Freigabesignale über den Prädiktionshorizont summiert. Hierdurch werden lediglich die Betriebszeiten der Pumpen optimiert. Zur Gewichtung der Betriebszeiten wird der Faktor β_{P} verwendet. Die Energiekosten sind damit wie folgt definiert:

$$J_{\text{EK}} = \beta_{\text{TAD}} \sum_{k=0}^{N_{\text{P}}-1} \hat{Q}_{\text{TAD},\text{zm}}(k) + \beta_{\text{P}} \sum_{k=0}^{N_{\text{P}}-1} \hat{u}_{\text{P}}(k) \quad (5.4)$$

mit

$$\hat{Q}_{\text{TAD},\text{zm}}(k) = \sum_{i=1}^{n_{\text{Z}}} \beta_{\text{Z},i}(k) \cdot \hat{Q}_{\text{TAD},i}(k) \quad (5.5)$$

Die Zonen-Gewichtungsfaktoren $\beta_{\text{Z},i}$ sind im Allgemeinen zeitlich veränderlich, d. h. in jedem Abtastschritt kann ein neuer Wert zugewiesen werden. Dies wird bei der Erkennung von Fensteröffnung genutzt, worauf im Abschnitt 5.3 eingegangen wird. Theoretisch ließen sich die Gewichtungsfaktoren β_{TAD} und $\beta_{\text{Z},i}$ für jede Zone zu einem gemeinsamen Faktor zusammenfassen. Um jedoch hier deren unterschiedliche Bedeutung zu verdeutlichen (β_{TAD} gewichtet die TAD-Heizenergie innerhalb der Energiekosten und $\beta_{\text{Z},i}$ gewichtet die Zone i innerhalb der TAD-Heizenergie) werden die Gewichtungsfaktoren hier getrennt aufgeführt.

5.2.2 Unbehaglichkeitskosten

Für die Berechnung der Unbehaglichkeitskosten werden sogenannte weiche Nebenbedingungen für die Regelgröße Zonentemperatur $T_{Z,i}$ verwendet. Hierfür werden Schlupfvariablen \hat{s} eingeführt. Diese Schlupfvariablen können auch als Maß für die Verletzung eines durch T_{\min} und T_{\max} definierten Temperaturbereichs interpretiert werden. Die Schlupfvariablen der betrachteten Zonen \hat{s}_i werden mit den bereits zuvor eingeführten Zonen-Gewichtungsfaktoren $\beta_{Z,i}$ zu einer zonengewichteten Schlupfvariable \hat{s}_{zm} berechnet. Dies ermöglicht es u. a. die Komfortverletzung verschiedener Zonen unterschiedlich stark zu gewichten und so beispielsweise ungleichmäßige Zonentemperaturen zwischen den Zonen auszugleichen. Des Weiteren ist es mit den Zonen-Gewichtungsfaktoren möglich, die Komfortverletzung durch den kurzzeitigen Temperaturabfall bei Fensteröffnung in den Unbehaglichkeitskosten zu ignorieren, um so unerwünschtes Reglerverhalten zu vermeiden. Die Unbehaglichkeitskosten sind daher definiert als:

$$J_{\text{UK}} = \sum_{k=0}^{N_p-1} \|\hat{s}_{zm}(k)\|^2 \quad (5.6)$$

mit

$$\hat{s}_{zm}(k) = \sum_{i=1}^{nz} \beta_{Z,i}(k) \cdot \hat{s}_i(k) \quad (5.7)$$

$$T_{\min}(k) - \hat{s}_{i,k} \leq T_{Z,i}(k) \leq T_{\max}(k) + \hat{s}_i(k) \quad (5.8)$$

$$\hat{s}_i(k) \geq 0 \quad (5.9)$$

Die oberen und unteren Komfortgrenzen $T_{\min}(k)$ und $T_{\max}(k)$ können im Allgemeinen zeitabhängig sein. Ein Beispiel für die Verwendung von zeitlich veränderlichen Komfortgrenzen ist die außentemperaturabhängige operative Raumtemperatur nach DIN EN 15251 [25].

5.2.3 Kosten der Steuergrößenänderung

Der dritte Bestandteil der Kostenfunktion sind die Kosten für die Steuergrößenänderung. Damit wird verhindert, dass sich die optimierte Steuergröße übermäßig schnell oder häufig ändert. Dies ist vor allem dort von Relevanz, wo das Stellglied des realen Systems (in diesem Fall z. B. das Mischventil) eine gewisse Trägheit aufweist und damit sprunghaften Steuergrößenänderung nicht folgen kann. Außerdem kann damit auch ein übermäßiges An- und Ausschalten der Umwälzpumpen verhindert werden. Die Kosten für eine Steuergrößenänderung sind definiert als:

$$J_{\Delta u} = \sum_{k=0}^{N_p-1} \|\Delta \hat{u}(k)\|^2 \quad (5.10)$$

mit

$$\Delta \hat{\mathbf{u}}(k) = \hat{\mathbf{u}}(k) - \hat{\mathbf{u}}(k-1) \quad (5.11)$$

5.2.4 Unterschiede zwischen Heiz- und Kühlbetrieb

Die in Gleichung 5.1 definierte Kostenfunktion kann sowohl für den Heiz- als auch für den Kühlbetrieb verwendet werden. Es gibt jedoch grundlegende Unterschiede hinsichtlich der zu optimierenden Steuergröße, auf die im Folgenden eingegangen wird. In Tabelle 5.2 sind Steuergrößen, Nebenbedingungen, Reglerparameter und Komfortkriterien jeweils für den Heiz- und Kühlbetrieb aufgelistet. Hier sei zu bemerken, dass in dieser Arbeit der Heiz-

Tabelle 5.2: Übersicht über die Steuergrößen, Nebenbedingungen, Reglerparameter und Komfortkriterien des MPC-Reglers im Heiz- und Kühlbetrieb.

	Heizbetrieb	Kühlbetrieb
Steuergröße		
u_{VL}	Optimierungsvariable	aus Kühlkurve
u_P	Zweipunktregler	Optimierungsvariable
Nebenbedingungen		
u_{\min}	22 °C	0 (Aus)
u_{\max}	32 °C	1 (An)
Reglerparameter		
β_{TAD}	= 1	= 0
β_P	> 0	= 1
β_{EK}	> 0	> 0
β_{UK}	> 0	> 0
$\beta_{\Delta u}$	> 0	> 0
Komfortkriterien		
T_{\min}	konstant, 20 °C bis 22 °C	außentemperaturabhängig nach (5.14)
T_{\max}	konstant, 23 °C bis 24 °C	außentemperaturabhängig nach (5.15)

und Kühlbetrieb getrennt voneinander betrachtet werden und die Umschaltung zwischen den beiden Betriebsmodi nicht berücksichtigt wird. Diese Umschaltung in den MPC-Regelungsalgorithmus zu integrieren ist nicht trivial und kann bei ungünstigen gewählten Einstellungen zu suboptimalen Regelverhalten führen [72].

Heizbetrieb

Im Heizbetrieb entspricht die Steuergröße des MPC-Reglers u_{VL} der Soll-Vorlauftemperatur des TAD-Regelkreises $T_{VL,soll}$. Die Lösung dieses dynamischen Optimierungsproblems liefert damit einen zeitlichen Verlauf der Soll-Vorlauftemperatur über den gesamten Prädiktionshorizont. Ziel ist es, so wenig Heizenergie wie möglich aufzuwenden und dabei gleichzeitig die Einhaltung des definierten Komfortbereichs in allen Zonen zu gewährleisten. Die Heizleistung und Vorlauftemperatur sind über

$$\dot{Q}_{TAD} = u_P \cdot \dot{m} \cdot c_w \cdot (T_{VL} - T_{RL}) \quad (5.12)$$

miteinander verknüpft. Die Soll-Vorlauftemperatur ist dabei beschränkt durch die minimale und maximale Vorlauftemperatur entsprechend der Standard-Heizkurve, siehe Tabelle 5.2. Geheizt wird zudem nur, wenn die Umwälzpumpe aktiviert ist ($u_P = 1$).

Auch die Steuerung der Umwälzpumpen wird im Heizbetrieb durch die MPC-Regelung übernommen. Der Grund hierfür ist, dass die Standard-Steuerung die Start- und Stopzeiten der Pumpenfreigabe durch eine interne Berechnung der GLT-Software basierend auf dem dynamischen Mittelwert der vergangenen Außentemperatur ermittelt. Da zum einen nicht auf diese internen Berechnungswerte zugegriffen werden kann und zum anderen dies für eine prädiktive Regelung keine sinnvolle Strategie darstellt, muss eine alternative Pumpensteuerung entwickelt werden.

Theoretisch ist es möglich, das Freigabesignal u_P als zusätzliche Optimierungsvariable mit zu berücksichtigen. Dies würde jedoch zu einem gemischt-ganzzahligen nichtlinearen Optimierungsproblem (MINLP) führen, für das es in der Praxis kaum geeignete Lösungsverfahren zur Echtzeitanwendung gibt [76]. Es wird daher ein Zweipunktregler mit Hysterese verwendet, bei dem die Differenz zwischen der Soll-Vorlauftemperatur und vorhergesagter TAD-Betonkerntemperatur $\hat{T}_{VL} - \hat{T}_{TAD,m}$ als Regelgröße verwendet wird. Die vorhergesagte Betonkerntemperatur wird hierbei als Abschätzung der Rücklauftemperatur verwendet, da diese keine Ausgangsgröße der Referenzzonenmodelle ist. Des Weiteren wird für die vorhergesagte Betonkerntemperatur $\hat{T}_{TAD,m}$ der flächengewichtete Mittelwert der Betonkerntemperaturen der einzelnen Referenzzonenmodelle verwendet:

$$\hat{T}_{TAD,m} = \frac{\sum_i^{n_z} A_{Z,i} \cdot \hat{T}_{TAD,i}}{\sum_i^{n_z} A_{Z,i}} \quad (5.13)$$

In Abbildung 5.3 ist das Ablaufdiagramm zur Steuerung der Umwälzpumpen dargestellt. Um die Pumpen zu aktivieren, muss die Soll-Vorlauftemperatur zunächst 0,75 K oberhalb der vorhergesagten Betonkerntemperatur liegen. Des Weiteren können die Pumpen nur aktiviert werden, wenn der standardmäßig hinterlegte Heizplan aktiv ist. Zum Deaktivieren der Pumpen muss die Soll-Vorlauftemperatur unterhalb von $\hat{T}_{TAD} + 0,5$ K gesenkt oder der Heizplan deaktiviert werden.

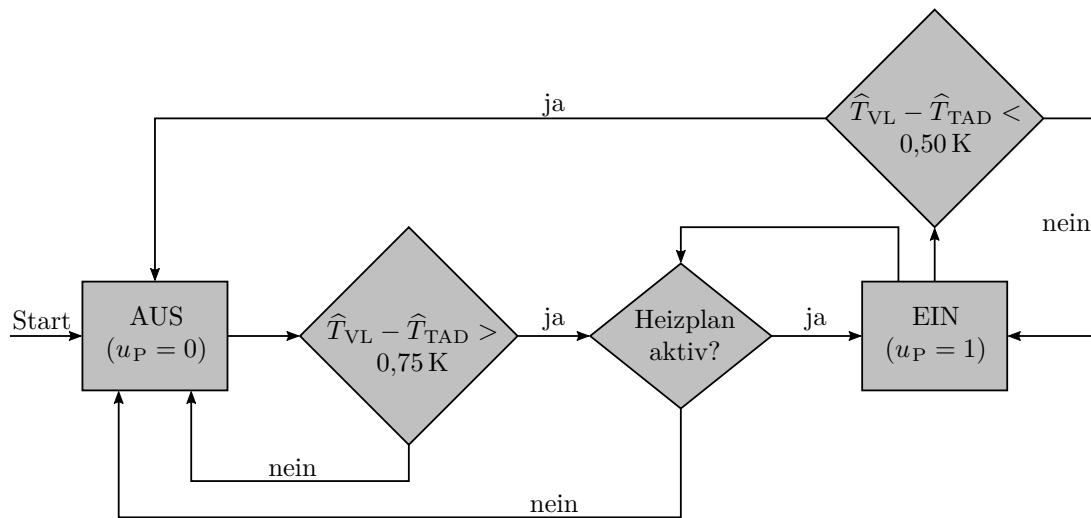


Abbildung 5.3: Ablaufdiagramm zur Steuerung der Umwälzpumpen im Heizbetrieb.

Alle Gewichtungsfaktoren sind im Heizbetrieb größer null und müssen in der Entwurfsphase durch Simulationen bestimmt werden. Für die Komfortgrenzen werden konstante obere und untere Grenzen definiert, die sich an den empfohlenen Auslegungswerten für die operative Innenraumtemperatur nach DIN EN 15251 [25] orientieren. Die Wahl geeigneter Temperaturgrenzen um ein entsprechendes Temperaturniveau in den Büros zu erhalten, kann durch Simulationen (siehe Abschnitt 6.1) ermittelt werden und können darüber hinaus im laufenden Betrieb angepasst werden.

Bei dem im Heizbetrieb resultierenden Optimierungsproblem (Gleichung 5.1) handelt es sich um ein kontinuierliches nicht-lineares Optimierungsproblem, da die Soll-Vorlauftemperatur des TAD-Heizkreises als Optimierungsvariable beliebige reelle Werte annehmen kann. Das Optimierungsproblem wird daher mit dem von MATLAB[®] bereitgestellten gradientenbasierten NLP-Solver `fmincon` unter Verwendung des SQP-Algorithmus gelöst. Die hierfür notwendigen Ableitungen werden vom Algorithmus numerisch über Finite-Differenzen-Methoden approximiert [92].

Kühlbetrieb

Im Kühlbetrieb ist die über die TAD aus den Büroräumen abgeführte Energie nicht von energetischer Relevanz. Da es sich hierbei um passive Kühlung über das Erdreich handelt, gibt es keinen energetischen Aufwand für die Bereitstellung der Kühlenergie. Dementsprechend wird der Gewichtungsfaktor β_{TAD} im Kühlfall zu null gesetzt. Einen energetischen Aufwand gibt es lediglich für die Verteilung des Kühlwassers mittels der Umwälzpumpen.

Im Kühlbetrieb wird daher der Betrieb der Umwälzpumpen über den MPC-Regler optimiert. Steuergröße und damit auch Optimierungsvariable ist das Freigabesignal (An/Aus)

der Umwälzpumpen u_P . Ziel ist es, so wenig elektrische Energie wie möglich für die Umwälzpumpen aufzuwenden und dabei gleichzeitig den thermischen Komfort im Gebäude zu steigern. Der elektrische Energiebedarf und die Steuergröße stehen im direkten Zusammenhang, da eine Energieeinsparung durch die Verringerung der Laufzeit der Pumpen erreicht wird. Da es sich bei der Steuergröße nun um eine diskrete Steuergröße handelt, ist diese durch 0 (Aus) und 1 (An) nach unten und oben beschränkt. Dadurch ist das Optimierungsproblem in ein rein-ganzzahliges nichtlineares Optimierungsproblem. Die Soll-Vorlauftemperatur bleibt unverändert und ergibt sich aus der linearen, außentemperaturabhängigen Standard-Kühlkurve (vgl. Abbildung 3.4c). Bis auf β_{TAD} sind alle anderen Gewichtungsfaktoren aktiv. Die Werte der Gewichtungsfaktoren unterscheiden sich jedoch vom Heizbetrieb und müssen in der Entwurfsphase ermittelt werden.

Im Gegensatz zum Heizbetrieb werden im Kühlbetrieb außentemperaturabhängige Komfortgrenzen gewählt. Als Grundlage dient der Zusammenhang für die operative Raumtemperatur nach DIN EN 15251 [25], wobei die untere Komfortgrenze auf die Komfortkategorie I angehoben wird. Für die unteren und oberen Komfortgrenzen ergeben sich damit folgende Zusammenhänge:

$$T_{\min}(t) = \begin{cases} 21\text{ °C} & \text{für } T_{AU}(t) < 16\text{ °C} \\ 19\text{ °C} + \frac{1}{8} \cdot T_{AU}(t) & \text{für } 16\text{ °C} \leq T_{AU}(t) \leq 32\text{ °C} \\ 23\text{ °C} & \text{für } T_{AU}(t) > 32\text{ °C} \end{cases} \quad (5.14)$$

$$T_{\max}(t) = \begin{cases} 23\text{ °C} & \text{für } T_{AU}(t) < 16\text{ °C} \\ 20\text{ °C} + \frac{3}{16} \cdot T_{AU}(t) & \text{für } 16\text{ °C} \leq T_{AU}(t) \leq 32\text{ °C} \\ 26\text{ °C} & \text{für } T_{AU}(t) > 32\text{ °C} \end{cases} \quad (5.15)$$

Das rein-ganzzahlige Optimierungsproblem kann nicht wie zuvor mit einem gradientenbasierten Verfahren gelöst werden. Für (rein-)ganzzahlige Optimierungsprobleme bietet MATLAB® zwei Algorithmen: Genetic Algorithm und Surrogate Optimization Algorithm [90]. Da beim Surrogate Optimization Algorithm der Rechenaufwand gegenüber dem Genetic Algorithm, bedingt durch weniger erforderliche Auswertungen der Kostenfunktion geringer ist, wird im Folgenden dieser Algorithmus zur Lösung des Optimierungsproblems verwendet.

5.3 Vorhersage der Störgrößen

Ein weiterer Bestandteil von MPC ist die Vorhersage des zeitlichen Verlaufs der Störgrößen, die das thermische Verhalten der Referenzzonen beeinflussen. Die äußeren, vorhersagbaren Störgrößen bestehen aus der Außenlufttemperatur und der auf die jeweilige

Orientierung der Außenfassade gerichteten Globalstrahlung. Zu den inneren Störgrößen gehören die internen Wärmegewinne durch Personen und Geräte sowie die Zulufttemperatur und der Zuluftvolumenstrom der RLT-Anlage. Die letzteren beiden Störgrößen werden über einfache Zeitpläne zur Aktivierung der RLT-Anlagen (werktags zwischen 07:30 Uhr und 17:30 Uhr) und einer konstanten Zulufttemperatur von 22 °C bestimmt.

5.3.1 Wettervorhersage

Für die Vorhersage der Außenlufttemperatur und der gerichteten Globalstrahlung wird die frei verfügbare MOSMIX-Vorhersage des Deutschen Wetterdienstes (DWD) verwendet [22]. Dabei handelt es sich um statistisch optimierte Punkt-Termin-Vorhersagen für weltweit ca. 5400 Standorte. Zur Verfügung gestellt werden die MOSMIX-Vorhersagen mit einem Vorhersageintervall von einer Stunde und einem maximalen Vorhersagezeitraum von zehn Tagen. Die Vorhersagedaten werden stündlich auf Basis der neusten Beobachtungsdaten aktualisiert und können vom Open Data Server heruntergeladen werden. Aufgrund der geografischen Lage und Nähe zum Gebäude werden die Vorhersagedaten der Wetterstation Hamburg-Neuwiedenthal verwendet.

Die MOSMIX-Vorhersage stellt für die Solarstrahlung eine Vorhersage der stündlichen horizontalen globalen Einstrahlung (in kJ/m^2) zur Verfügung. Daraus wird zunächst die stundenweise gemittelte globale Strahlungstärke (auch horizontale Globalstrahlung, $I_{\text{glo,hor}}$ in W/m^2) berechnet und diese auf das gewählte Abtastintervall interpoliert. Auf Basis des in VDI 6007 Blatt 3 [104] definierten Verfahrens, wird mit der horizontalen Globalstrahlung die gerichtete Strahlung auf die unterschiedlichen vertikalen Orientierungen der Außenfassade berechnet.

5.3.2 Interne Wärmegewinne

Für die Vorhersage der internen Wärmegewinne durch Personen und Geräte wird der in Abschnitt 4.3 bereits vorgestellte normierte Verlauf des Strombedarfs für Bürobeleuchtung verwendet, siehe Abbildung 5.4 für Haus G. Dieser Verlauf wird für jedes Haus individuell ermittelt und für alle im jeweiligen Haus vorhandenen Referenzzonen angewandt. Die Verläufe für die Häuser A und C sind im Anhang B.1 gegeben.

Zu erkennen ist, dass der Beschäftigungszeitraum um 6 Uhr morgens beginnt und etwa gegen 19 Uhr abends endet. Deutlich ausgeprägt ist ein charakteristischer Einbruch der Belegung zur Mittagszeit von 12 bis 13 Uhr. Der hier gezeigte Verlauf wird für alle Werktage angenommen. An Wochenenden sowie Feiertagen wird angenommen, dass keine internen Wärmegewinne vorhanden sind.

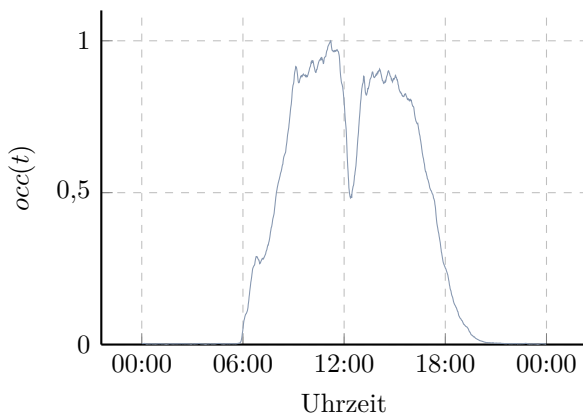


Abbildung 5.4: Verlauf des Belegungsprofils zur Bestimmung der internen Wärmegewinne durch Personen und Geräte am Beispiel von Haus G.

5.3.3 Nicht-messbare Störgrößen

Zu den nicht-messbaren und damit auch nicht-vorhersagbaren Störgrößen zählt vor allem das individuelle Verhalten von Personen. Besonders das Öffnen von Fenstern oder Nachtlüftungsklappen hat einen Einfluss auf das thermische Verhalten einer Referenzzone und tritt dabei größtenteils stochastisch und damit nicht vorhersagbar auf. Auch das Öffnen bzw. Auflassen der Bürotüren oder die temporäre Anwesenheit von mehreren Personen in einem Büro sind Einflussfaktoren, die bei der Prädiktion mit den Zonenmodellen nicht berücksichtigt werden können. Ein Teil des Einflusses von nicht-messbaren Störgrößen kann mithilfe einer Zustandsschätzung korrigiert werden, auf die im folgenden Abschnitt näher eingegangen wird.

Der Einfluss durch die Öffnung von Fenstern erfordert in den Referenzzonen eine gesonderte Behandlung. Vor allem im Winter ist das Öffnen der Fenster zum Stoßlüften mit einem kurzzeitigen Abfall der Raumtemperatur verbunden, siehe Abbildung 5.5. Nach dem Schließen des Fensters nähert sich die Raumtemperatur wieder schnell dem vorherigen Temperaturniveau an. Der Einfluss auf die Dynamik der Raumtemperatur im Tagesverlauf ist also gering. In einigen Fällen wird jedoch der Lüftungsvorgang auf mehrere Stunden oder sogar Tage ausgedehnt. In diesem Fall kann die Raumtemperatur der betroffenen Zone über längere Zeit stark abfallen und damit eine massive Verletzung des vorgegebenen Komfortbereichs bewirken. Durch die Rückkopplung der Zonentemperaturen der Referenzzonen versucht der Regler diese Komfortverletzung durch eine Erhöhung der Heizleistung, respektive der Vorlauftemperatur, auszugleichen was im vorliegenden Fall jedoch eine „Verschwendung“ von Heizenergie bedeuten würde, da der Temperaturabfall nur auf die entsprechende Referenzzone beschränkt sein kann. In den anderen Büroräumen würde eine Erhöhung der Heizleistung ggf. zu hohe Raumtemperaturen hervorrufen.

Aus diesem Grund wird auf Basis der aktuellen Raumtemperatur und des dynamischen Mittelwertes der Raumtemperatur der vergangenen 48 Stunden eine Erkennung der Fensteröffnung durchgeführt. Wird eine Öffnung des Fensters in einer Referenzzone detektiert, so wird der Zonen-Gewichtungsfaktor $\beta_{z,i}$ der betroffenen Zone auf null gesetzt und die Zone damit aus der Berechnung der Kostenfunktion sowohl für die Energiekosten (Gleichung

5.5) als auch die Unbehaglichkeitskosten (Gleichung 5.7) temporär entfernt. In Abbildung 5.5 ist exemplarisch der Verlauf der Raumtemperatur eines Referenzraums bei Öffnung des Fensters sowie der Verlauf des Zonen-Gewichtungsfaktors dargestellt.

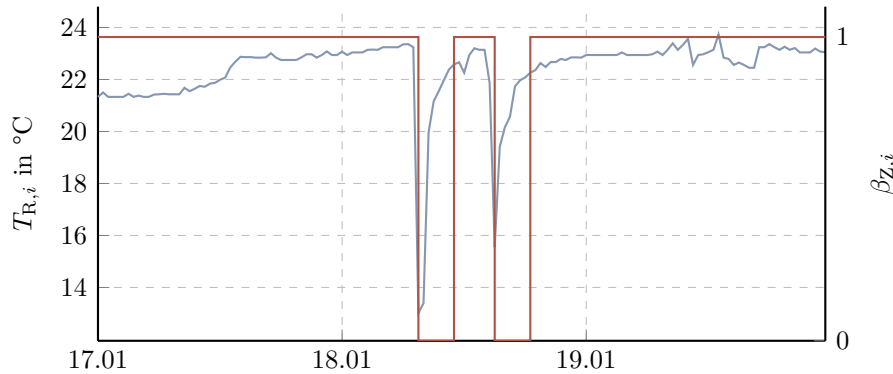


Abbildung 5.5: Einfluss der Fensterlüftung auf die Raumtemperatur und Verlauf des zugehörigen Zonen-Gewichtungsfaktors.

Dieses Vorgehen kann grundsätzlich auch angewendet werden, wenn Magnetkontakte zur Ermittlung des Öffnungszustands von Fenstern und/oder Nachtlüftungsklappen in den Referenzzonen installiert sind.

5.4 Zustandsschätzung

Für eine erfolgreiche Anwendung von MPC werden in jedem Regelungsschritt möglichst genaue Informationen über die Zustandsgrößen benötigt, da diese von den Prozessmodellen als Startwerte für die Prädiktion benötigt werden. In den meisten (gebäudetechnischen) Anwendungsfällen sind jedoch nicht alle Zustandsgrößen messtechnisch erfassbar. Ein konkretes Beispiel ist hierfür die Kerntemperatur der TAD, vgl. Abbildung 4.5, für die kein Temperatursensor vorhanden ist. Aufgabe einer Zustandsschätzung ist es, alle Zustandsgrößen aus verfügbaren Messwerten für die Ein- und Ausgangsgrößen zu schätzen. Gleichzeitig kann damit die Vorhersagegenauigkeit verbessert werden, da durch die Zustandsschätzung ein Teil der initialen Modellunsicherheit sowie der Einfluss von nicht-messbaren Störgrößen korrigiert werden kann. An diesem Punkt wird der MPC-Regelkreis also geschlossen und unter anderem der aktuelle gemessene Wert der Regelgröße in den Regler rückgekoppelt.

Je nach Art des vorliegenden Systems und der verwendeten Prozessmodelle (z. B. linear oder nicht-linear) steht eine Vielzahl von verschiedenen Algorithmen zur Zustandsschätzung (auch Filter genannt) zur Verfügung. Für eine Übersicht sei auf MOHD ALI et al. [61] verwiesen. Der bekannteste und weit verbreitetste Beobachter-Algorithmus ist der

Kalman-Filter, erstmals im Jahr 1960 von KALMAN [52] vorgestellt. Dieses ursprünglich nur für lineare Systeme anwendbare Filterverfahren wurde später zum Extended-Kalman-Filter (EKF) weiterentwickelt, wobei dieser auf einer Linearisierung der nicht-linearen Systemgleichungen um den aktuellen Systemzustand basiert. Hierfür ist die Berechnung der Jacobi-Matrix der zugrundeliegenden Systemgleichung nötig, die bei in Modelica implementierten, ggf. hybriden Systemen nicht ohne weiteren Aufwand bestimmbar ist.

Dieses Problem umgeht der Unscented-Kalman-Filter (UKF), der von JULIER und UHLMANN [50] entwickelt wurde. Die Arbeitsweise des Filters besteht aus zwei Schritten: dem Prädiktions- und dem Korrekturschritt, wie in Abbildung 5.6 dargestellt. Nach der

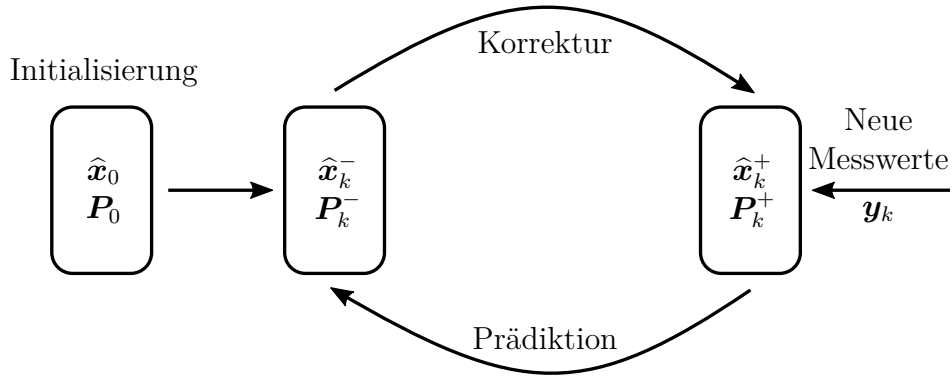


Abbildung 5.6: Prädiktor-Korrektor-Struktur des Kalman-Filters.

einmaligen Initialisierung erfolgt eine Vorhersage der Zustände $\hat{\mathbf{x}}_k^-$ und der Fehlerkovarianzmatrix \mathbf{P}_k^- auf Basis des vorhandenen Prozessmodells. Die Prädiktion der beiden Größen wird als *A-priori*-Schätzung bezeichnet. Beim Eintreffen neuer Messwerte \mathbf{y}_k vom realen System wird mithilfe des UKF-Algorithmus eine Korrektur durchgeführt, die als *A-posteriori*-Schätzung $\hat{\mathbf{x}}_k^+$ bzw. \mathbf{P}_k^+ bezeichnet wird. Für Details zum UKF-Algorithmus sei hier auf [83] verwiesen.

Die (nicht-lineare) Systemgleichung des Modells in zeitdiskreter Form kann dabei in folgender Form vorliegen:

$$\hat{\mathbf{x}}_k = f(\mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{u}_{k-1}) + \boldsymbol{\omega}_{k-1}, \quad (5.16)$$

$$\hat{\mathbf{y}}_k = h(\hat{\mathbf{x}}_k) + \boldsymbol{\nu}_k. \quad (5.17)$$

Dabei beschreibt $\boldsymbol{\omega}$ das *Systemrauschen* und $\boldsymbol{\nu}$ das *Messrauschen*. Beide werden als mittelwertfrei und normalverteilt angenommen und können mit den beiden diagonalen Kovarianzmatrizen \mathbf{Q} und \mathbf{R} beschrieben werden:

$$\boldsymbol{\omega} \sim \mathcal{N}(0, \mathbf{Q}), \quad (5.18)$$

$$\boldsymbol{\nu} \sim \mathcal{N}(0, \mathbf{R}). \quad (5.19)$$

Die Kovarianzmatrizen stellen damit anpassbare Parameter dar, die das Filterverhalten beeinflussen. Die Werte der Elemente auf den Diagonalen wurden heuristisch ermittelt. Wie bereits erwähnt, besteht der Vorteil des UKF darin, dass die Systemgleichungen weder analytisch z. B. in Zustandsraumdarstellung vorliegen müssen noch die Berechnung von Ableitungen für Jacobi-Matrizen notwendig ist. Es können daher beliebige dynamische Modelle verwendet werden.

Der UKF-Algorithmus wurde ebenfalls in MATLAB[®] implementiert [95]. Für weitere Details zum Algorithmus sei an dieser Stelle auf [51] verwiesen. In jedem Regelungsschritt werden die vier Zustandsgrößen der R7C4-Zonenmodelle

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} T_Z \\ T_{\text{int}} \\ T_W \\ T_{\text{TAD}} \end{bmatrix}$$

rekursiv unter Verwendung der aktuellen gemessenen Raumtemperatur $y = T_R$ abgeschätzt.

Der UKF-Algorithmus kann auch dahingehend erweitert werden, dass neben den Zustandsgrößen auch zusätzliche Modellparameter rekursiv abgeschätzt werden können. Dies ermöglicht eine ständige Adaption der Modellparameter im laufenden MPC-Betrieb und kann damit als eine „Online“-Parameteridentifikation angesehen werden. Für das hier untersuchte Gebäude und den verwendeten Zonenmodellen wurde die simultane Zustands- und Parameterschätzung auf Basis des UKF in [41] untersucht. Da dies jedoch nicht im laufenden MPC-Betrieb implementiert wurde, wird an dieser Stelle nicht weiter darauf eingegangen.

5.5 Technische Umsetzung im Gebäude

Abbildung 5.7 zeigt die Umsetzung der Kommunikationsstruktur des gesamten MPC-Frameworks im Verwaltungsgebäude Neuenfelder Straße. Bei der Integration des Frameworks soll der Eingriff in die bestehende Gebäudeautomation so gering wie möglich ausfallen. Der gesamte Framework ist größtenteils in MATLAB[®] implementiert und wird auf dem in der Leitzentrale befindlichen Monitoring-Messrechner ausgeführt. Der Austausch von Messdaten und Sollwerten zwischen dem übergeordneten MPC-Regler und der GLT-Software erfolgt über den OPC-Standard unter Einbindung eines Trend OPC-Servers und mehreren MATLAB[®] OPC-Clients. Die Kommunikation zwischen der GLT-Software bzw. dem OPC-Server und der Automationsebene (DDC-Stationen) erfolgt über das BACnet-Protokoll. Für die Kommunikation auf der Feldebene (Sensoren, Aktuatoren) werden die Protokolle LonWorks¹ und Modbus genutzt.

¹Local Operating Network

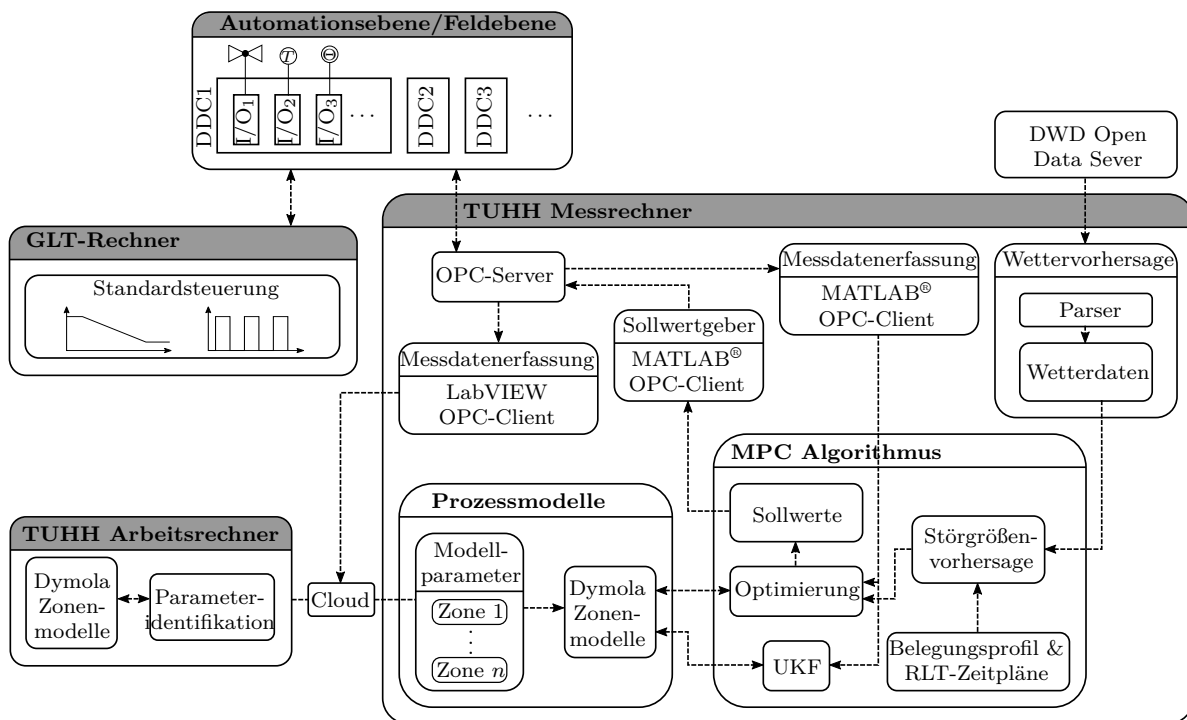


Abbildung 5.7: Technische Umsetzung und Integration des gesamten MPC-Frameworks in die Gebäudeautomation des Verwaltungsgebäudes Neuenfelder Straße.

Zu Beginn jedes Regelungsschrittes wird zunächst die neuste Wettervorhersage via Internetverbindung vom Open Data Server des Deutschen Wetterdienstes heruntergeladen und mittels eines Parsers in eine csv-Datei umgewandelt. Des Weiteren werden die aktuellen relevanten Messwerte vom OPC-Server gelesen und abgespeichert. Der Unscented-Kalman-Filter führt auf Basis der aktuellen gemessenen Raumtemperatur die Zustandsschätzung durch. Unter Verwendung der Zonenmodelle und der vorhergesagten Störgrößen wird das Optimierungsproblem mit den von MATLAB® bereitgestellten Solvern gelöst. Ein Sollwertgeber mit einer Abtastzeit von 1 min liest und interpoliert die optimierten Sollwerte und schreibt diese auf den OPC-Server. Die von der GLT-Software vorgegebenen Sollwerte der Standardregelung werden dabei überschrieben, sodass es faktisch keine Änderungen an der bestehenden Struktur der Gebäudeautomation gibt.

Dieses Vorgehen wird auch bei der Fehlerbehandlung genutzt. Um einen stabilen und sicheren Betrieb der MPC-Regelung zu gewährleisten ist eine Fallback-Strategie implementiert. Im Falle eines Fehlers beim Ablauf des MPC-Algorithmus (z. B. bei der Messdatenerfassung, beim Herunterladen der Wettervorhersage) wird zunächst versucht, die Daten vom vorangegangenen Regelungszeitschritt wiederzuverwenden und es wird eine E-Mail-Benachrichtigung generiert. Falls ein Fehler an drei aufeinander folgenden Regelungszeitschritten auftritt, wird die Fallback-Strategie ausgelöst und der Sollwertgeber stoppt das Überschreiben der Sollwerte der Standard-Steuerung. So kann ein sicherer Betrieb des MPC-Reglers ermöglicht werden, der beim Auftreten von kritischen Fehlern stets zur ursprünglichen, unveränderten Regelungsstrategie zurückkehrt.

Die periodisch, alle sieben Tage ausgeführte Parameteridentifikation der Zonenmodelle wird auf einem externen Arbeitsrechner ausgeführt. Hierfür werden die Messdaten der vergangenen 21 Tage aus dem LabVIEW-Monitoringsystem umgewandelt und bei der Parameteridentifikation als Identifikationsdaten verwendet. Hier kann eine manuelle Kontrolle der Ergebnisse der Parameteridentifikation durchgeführt werden um ggf. Fehler, beispielsweise hervorgerufen durch fehlende Messdaten, zu erkennen. Dieses Vorgehen ermöglicht grundsätzlich eine Parameteradaption der Zonenmodelle an sich zeitlich ändernde thermische Eigenschaften einer Zone, wie sie beispielsweise durch Umschaltung zwischen Heiz- und Kühlbetrieb hervorgerufen werden können. Eine vollständige Automatisierung dieses Vorgehen wurde im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht implementiert, d. h. die Modellparameter der einzelnen Zonen können nur manuell aktualisiert werden. Des Weiteren wurde die Umschaltung zwischen Heiz- und Kühlbetrieb experimentell nicht untersucht, sodass auch keine Auswertung der Parameteradaption erfolgt.

6 Simulation und experimentelle Untersuchung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der praktischen Implementierung des entwickelten MPC-Reglers im Demonstrationsgebäude dargestellt. Zunächst wird hierfür in Abschnitt 6.1 die Funktionsfähigkeit und das Potenzial des Reglers auf Basis von Simulationen evaluiert und durch Variation von Reglerparametern diese festgelegt. Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchung in Abschnitt 6.2 sind auf zwei Zeiträume bzw. Heizperioden aufgeteilt. Es wird jeweils die erzielte Einsparung an Heizenergie sowie der thermische Komfort analysiert, wobei ein Vergleich mit der Standard-Regelstrategie in den vergangenen Betriebsjahren durchgeführt wird.

6.1 Reglerentwurf und Simulation

Bei der Simulation mittels Model-in-the-Loop Methode (MiL) stehen Regelungsalgorithmus und Regelstrecke als Modell zur Verfügung [69]. Das Verfahren wird insbesondere in der Automobilindustrie eingesetzt, aber auch in der Gebäudetechnik kommt diese Methode vor allem als Testverfahren für Regler bzw. Regelstrategien zum Einsatz [77]. Die Methode hat zum einen den Zweck, die Funktionsfähigkeit und das Potenzial der Regelungsstrategie unter kontrollierten Randbedingungen zu evaluieren und zum anderen, durch Variation der Reglerparameter die bestmöglichen Einstellungen hinsichtlich der Reglerperformance zu ermitteln.

Wie im vorherigen Kapitel beschrieben, ist der Regelungsalgorithmus in MATLAB[®] implementiert und kann später durch Anpassungen an das reale Gebäude adaptiert werden. Als Modell der Regelstrecke werden die in Kapitel 4 entwickelten Zonenmodelle verwendet. Dies stellt damit ein Best-Case Szenario dar, da die Prozessmodelle des MPC-Reglers und die Regelstrecke identisch sind und es damit keine Modellfehler gibt. Die Vorhersage von Außentemperatur und Solarstrahlung kann als „perfekte Vorhersage“ angesehen werden, da hierfür die aufgezeichneten Messwerte verwendet werden. Eine Ausnahme bildet die Vorhersage der internen Wärmegewinne durch die Vorhersage der Zonenbelegung. Der Regelungsalgorithmus nutzt für die Prädiktion das auf Basis des Strombedarfs für Bürobeleuchtung ermittelte Belegungsprofil, siehe Abbildung 5.4, während für die Eingangsdaten des Modells der Regelstrecke zusätzlich die gemessenen Präsenzsignale eingebunden werden. Hierdurch besteht ein Vorhersagefehler hinsichtlich der internen Wärmegewinne.

In diesem Unterkapitel wird mithilfe der MiL Methode die im vorherigen Kapitel entwickelte MPC-Regelung mit der in Abschnitt 3.2 vorgestellten Standard-Regelungsstrategie auf Basis der Heizkurven (RBC-Regelung) verglichen. Die Ergebnisse der Simulationen

werden hinsichtlich des Heizenergiebedarfs, der Pumpenlaufzeit und des thermischen Komforts bewertet. Der durch die Variation von Reglerparametern festgelegte Reglerentwurf wird anschließend in die bestehende Gebäudeautomation integriert.

6.1.1 Heizbetrieb

Für den Reglerentwurf und die Simulation des Heizbetriebs wird der Zeitraum vom 1. Januar bis 31. März 2018 gewählt. Die Umgebungsbedingungen als Außentemperatur und horizontale Globalstrahlung sind im Anhang in Abbildung C.1 dargestellt. Es werden nur die Gebäudeteile A, C und G betrachtet, da dort Referenzzonen vorhanden sind. Die Zonenmodelle wurden entsprechend der in Abschnitt 4.3 vorgestellten Parameteridentifikation aus Messdaten identifiziert, sodass der mittlere absolute Fehler zwischen Simulation und Messung über den gesamten Zeitraum kleiner als $1,0^\circ\text{C}$ ist.

In Tabelle 6.1 sind die Gewichtungsfaktoren für den Heizbetrieb aufgeführt. Die Werte für die Gewichtungsfaktoren wurden auf Basis der zu erwartenden Größenordnungen des jeweils zugehörigen Bestandteils der Kostenfunktion festgelegt.

Tabelle 6.1: Werte der Gewichtungsfaktoren im Heizbetrieb.

Parameter	Symbol	Wert
Gewichtungsfaktor TAD	β_{TAD}	1
Gewichtungsfaktor Pumpen	β_{P}	10^4
Gewichtungsfaktor Steuergrößenänderung	$\beta_{\Delta u}$	1
Gewichtungsfaktor Energiekosten	β_{EK}	10^{-6}
Gewichtungsfaktor Unbehaglichkeitskosten	β_{UK}	10

Im Folgenden wird der Einfluss des Prädiktionsintervalls t_p , des Regler-Abtastintervalls t_s , der Gewichtungsfaktoren β_{UK} und β_{EK} sowie der Temperaturgrenzen auf die Regler-Performance untersucht. Dazu werden die Reglerparameter innerhalb der in Tabelle 6.2 gegebenen Parameterbereiche variiert, wobei immer nur ein Parameter zurzeit verändert wird. Die Standardwerte der nicht-variierten, konstanten Parameter sind in Tabelle 6.2 fett dargestellt.

Tabelle 6.2: Parameterbereiche der variierten MPC-Reglerparameter im Heizbetrieb.

Parameter	Symbol	Einheit	Bereich
Prädiktionsintervall	t_p	h	24; 48 ; 72; 96
Abtastintervall	t_s	min	15; 30 ; 60; 120
Gewichtungsverhältnis	$\beta_{\text{UK}}/\beta_{\text{EK}}$	-	10^6 ; 10^7 ; 10^8 ; 10^9
Temperaturgrenzen	$[T_{\min}, T_{\max}]$	$^\circ\text{C}$	[20, 24]; [21, 23]; [21,5 , 24]; [22, 24]

Die Wahl des Prädiktions- und Abtastintervalls orientiert sich an üblichen Werten aus der Literatur [2, 82]. Bei den Gewichtungsfaktoren wird das Verhältnis $\beta_{\text{UK}}/\beta_{\text{EK}}$ variiert, d. h. je größer dieser Wert, desto stärker werden Verletzungen des Komfortbereichs in der Kostenfunktionen gewichtet. Die Wahl der unteren und oberen Temperaturgrenzen orientiert sich zunächst an den Kategorien I und II nach DIN EN 15251. Da erwartet wird, dass der MPC-Regler die Raumtemperaturen der Referenzzonen im Heizbetrieb nahe der unteren Temperaturgrenze einregelt, werden zudem zwei angepasste Temperaturbereiche mit unteren Temperaturgrenzen oberhalb der Kategorie I (21,5 °C und 22 °C) betrachtet.

Die Ergebnisse der Parametervariation werden als relative Heizenergieeinsparung $\Delta e(Q_{\text{H}})$ und Komfortverbesserung $\Delta e(Gh_{\text{I}})$ der MPC-Regelung gegenüber der RBC-Regelung summiert über alle Referenzzonen n_z dargestellt:

$$\Delta e(Q_{\text{H}}) = \left(1 - \frac{\sum_1^{n_z} Q_{\text{H,MPC},i}}{\sum_1^{n_z} Q_{\text{H,RBC},i}} \right) \cdot 100 \% \quad (6.1)$$

$$\Delta e(Gh_{\text{I}}) = \left(1 - \frac{\sum_1^{n_z} Gh_{\text{I,MPC},i}}{\sum_1^{n_z} Gh_{\text{I,RBC},i}} \right) \cdot 100 \% \quad (6.2)$$

Für die Bewertung des thermischen Komforts werden die Gradstunden Gh_{I} der Verletzung der konstanten Temperaturgrenzen nach Kategorie I (21 °C und 23 °C) berechnet. Die Anhebung des thermischen Komforts auf die Kategorie I ist damit begründet, dass es sich bei den Simulationen um eine ideale Anordnung handelt, bei denen keine Modell- und Vorhersagefehler auftreten. Es ist daher zu erwarten, dass die Fähigkeit des MPC-Reglers, die Raumtemperaturen innerhalb der Temperaturgrenzen zu halten, im MiL-Betrieb deutlich besser als im realen Betrieb ist. Eine relative Komfortverbesserung von 100 % bedeutet demnach, dass im MPC-Betrieb während des gesamten Zeitraums in keiner Referenzzone Verletzungen der Temperaturgrenzen aufgetreten sind. Entsprechend ist eine negative relative Komfortverbesserung gleichzusetzen mit einer Erhöhung der Komfortverletzung bei MPC-Regelung.

Für die zwei in einem Haus vorhandenen Heizkreise wird jeweils ein eigener MPC-Regelungsalgorithmus ausgeführt. Die Auswertung erfolgt jedoch für beide Heizkreise zusammen und damit lediglich getrennt nach den Gebäudeabschnitten. Dies ist erforderlich, um eine Vergleichbarkeit mit der experimentellen Untersuchung herzustellen, da im realen Betrieb nur ein Wärmemengenzähler pro Haus zur Verfügung steht.

Variation des Prädiktionsintervalls

In Abbildung 6.1 ist die relative Veränderung des Heizenergiebedarfs und der Komfortverletzung bei einem Prädiktionsintervall von 24 h, 48 h, 72 h und 96 h für die drei Häuser A, C und G dargestellt. Zunächst ist zu erkennen, dass die MPC-Regelung für alle gewählten Prädiktionsintervalle sowohl eine Reduktion der Heizenergie als auch der Komfortverletzung gegenüber der RBC-Regelung bewirkt. Auf Basis der Simulationen kann damit

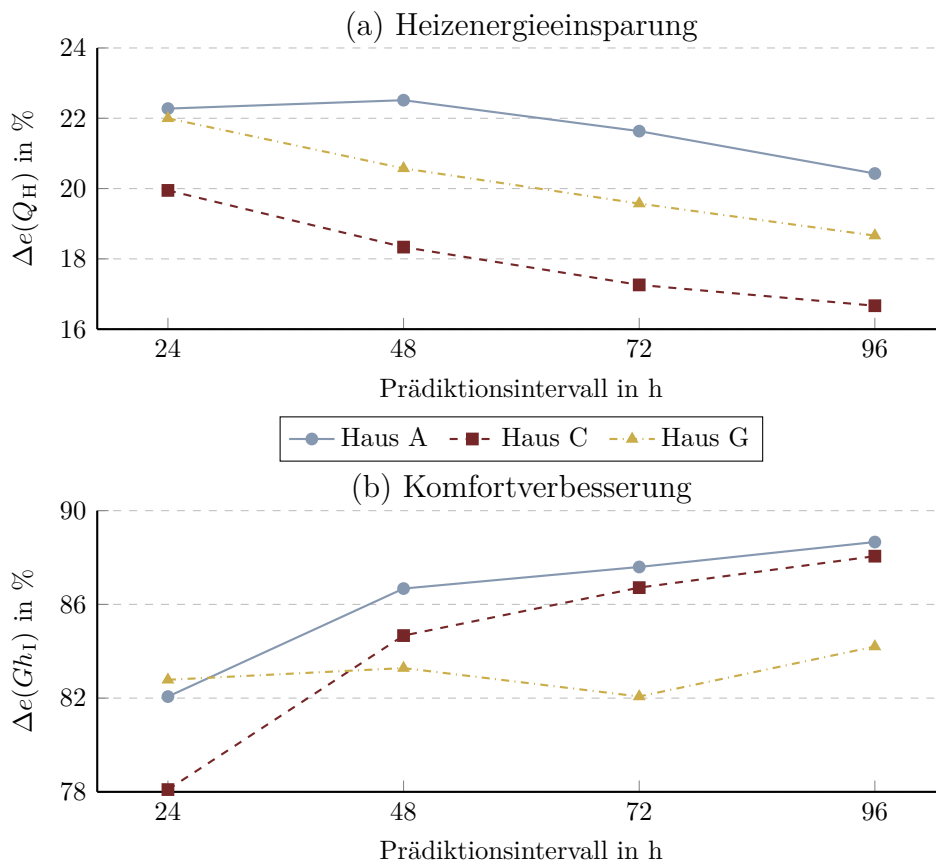


Abbildung 6.1: Relative Veränderung des Heizenergiebedarfs (a) und der Komfortverletzung (b) bei MPC-Regelung im Vergleich zur RBC-Regelung in Abhängigkeit des Prädiktionsintervalls.

gezeigt werden, dass das grundlegende Ziel der MPC-Regelungsstrategie erreicht wird und der herkömmlichen, heizkurvenbasierten Steuerung deutlich überlegen ist. Die erzielte relative Heizenergieeinsparung liegt im Bereich von 16,5 % bis 22,5 % und damit innerhalb der typischen Literaturwerte [82]. Auffällig ist, dass es deutliche Unterschiede von bis zu 4 % zwischen den drei Häusern gibt. So ist die erzielte Heizenergieeinsparung in Haus A am höchsten und in Haus C am niedrigsten.

Wie in Abbildung 6.1b zu erkennen ist, wird in allen Häusern eine deutliche Reduktion der Verletzung der Komfortkategorie I erzielt. Die Verringerung der Gradstunden beträgt hier 78 % bis 88 %. Zur Verdeutlichung ist in Abbildung 6.2 der Raumtemperaturbereich der Referenzzonen sowie die flächenbezogene Heizleistung für Haus A in der Zeit vom 21. Februar bis 28. Februar bei RBC- und bei MPC-Regelung mit einem Prädiktionsintervall von 24 h und 96 h dargestellt. Die hieraus folgenden grundlegenden Erkenntnisse lassen sich auf die Häuser C und G übertragen.

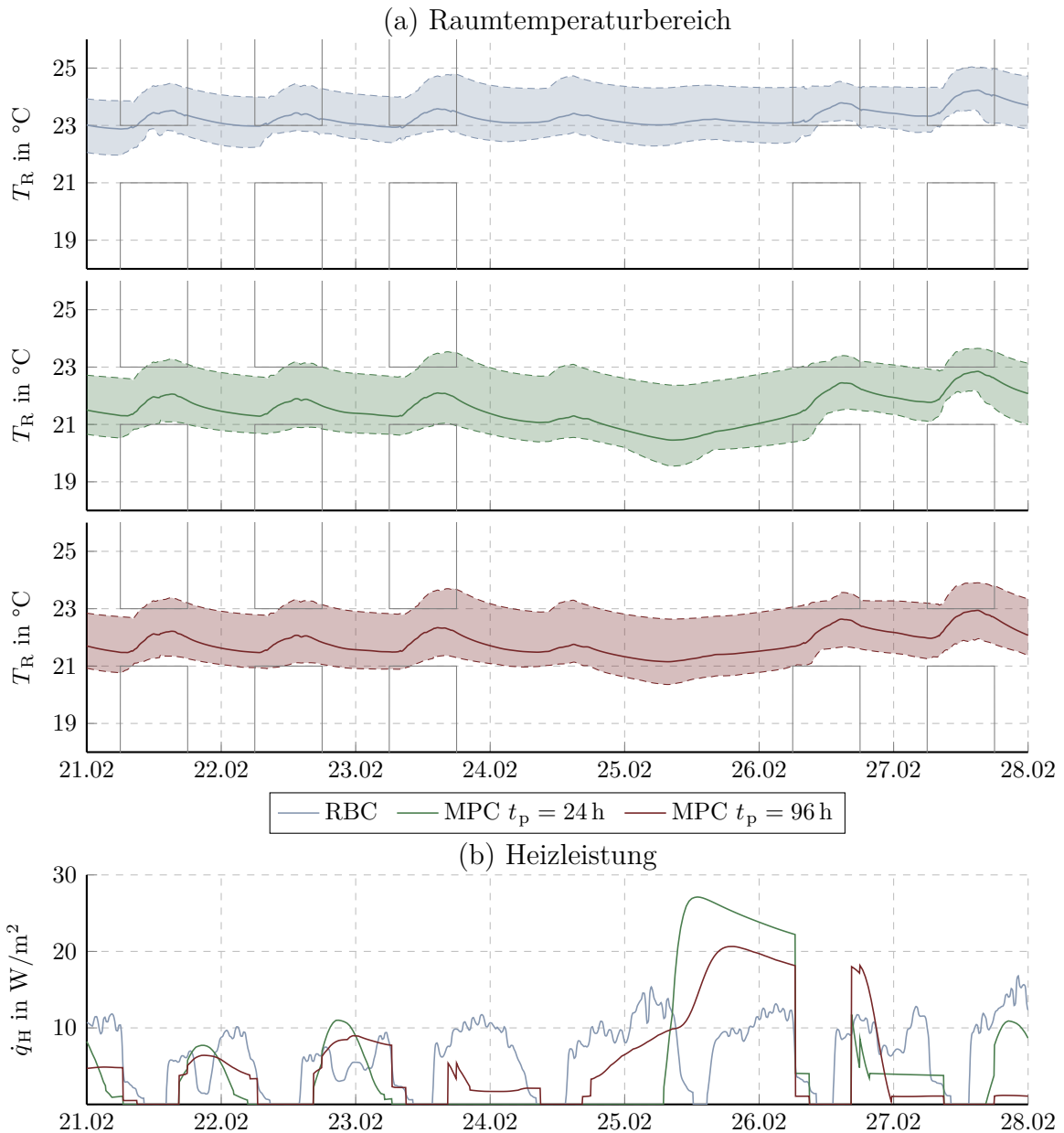


Abbildung 6.2: Bereich der Raumtemperaturen in den Referenzonen von Haus A bei RBC-Regelung (a) und bei MPC-Regelung mit Prädiktionsintervallen von 24 h und 96 h sowie die flächenbezogene Heizleistung (b). Die durchgezogenen Linien entsprechen dem Mittelwert, die gestichelten Linien der minimalen und maximalen Raumtemperatur über alle Referenzonen.

Wie zu erkennen ist, befindet sich die mittlere Raumtemperatur bei RBC-Regelung stets oberhalb von 22°C und es findet damit eine signifikante Verletzung der oberen Temperaturgrenze statt. Bei MPC-Regelung hingegen sind die Raumtemperaturen insgesamt deutlich niedriger und werden während der Nutzungszeiten wesentlich häufiger in einem Bereich von 21°C bis 23°C gehalten. Deutlich ausgeprägt ist ein Temperaturabfall am

Wochenende (24. und 25. Februar), der auf die Einbeziehung des Belegungsplans (keine Belegung an Wochenenden und damit auch keine einzuhaltenen Temperaturgrenzen) in die MPC-Regelung zurückzuführen ist. Sowohl die Verringerung der Komfortverletzung als auch die Reduktion des Heizenergiebedarfs ist damit größtenteils auf das niedrigere Raumtemperaturniveau zurückzuführen.

Hinsichtlich des Einflusses des Prädiktionsintervalls kann bei allen Häusern ein ähnliches Verhalten identifiziert werden, wie in Abbildung 6.1 zu erkennen ist. Mit steigendem Prädiktionsintervall sinkt die Heizenergieeinsparung, während die Verbesserung des thermischen Komforts zunimmt. Eine Ausnahme bildet das Haus A, wo bei einem Prädiktionsintervall von 48 h die maximale Heizenergieeinsparung erreicht wird. Die Abnahme der relativen Heizenergieeinsparung bei einer Erhöhung von 24 h auf 96 h beträgt 2 % bis 3 % absolut. Der gegensätzliche Zusammenhang zwischen Heizenergiebedarf und thermischen Komfort ist grundsätzlich erwartbar. Wie in Abbildung 6.2a zu erkennen ist, ist das Raumtemperaturniveau bei kürzeren Prädiktionsintervallen etwas niedriger, sodass die untere Temperaturgrenze in einigen Zonen zeitweise unterschritten wird. Diese Unterschreitungen der unteren Temperaturgrenze treten dabei besonders zu Beginn eines Arbeitstages auf. Im Gegenzug wird bei längeren Prädiktionsintervallen die untere Temperaturgrenze zu keiner Zeit in einer der Referenzzonen von Haus A unterschritten.

Im Hinblick auf die TAD-Heizleistung (Abbildung 6.2b) lassen sich zwei charakteristische Unterschiede zwischen RBC und MPC identifizieren. Zum einen wird vor Beginn eines Wochenendes (hier: 23. bis 24. Februar) kaum geheizt, wodurch der zuvor genannte Abfall der Raumtemperaturen hervorgerufen wird. Zum anderen kann eine ausgeprägte Heizphase zum Ende des Wochenendes (25. bis 26. Februar) festgestellt werden, bei der die maximale Heizleistung bei MPC-Regelung deutlich oberhalb der maximalen Heizleistung bei RBC-Regelung liegt. Bedingt durch den hinterlegten Belegungsplan, beginnt diese Heizphase bei einem Prädiktionsintervall von $t_p = 24$ h später und erreicht entsprechend eine höhere maximale Heizleistung. Hierdurch wird jedoch am Montagmorgen (26. Februar) in einigen Zonen die untere Temperaturgrenze von 21 °C nicht erreicht. Ein Prädiktionsintervall von 24 h ist damit nicht ausreichend um die Dynamik der TAD vollständig zu berücksichtigen. Bei einem Prädiktionsintervall von $t_p = 96$ h wird hingegen schon in der Nacht von Samstag auf Sonntag geheizt, wodurch die minimale Zonentemperatur am Montagmorgen 21 °C beträgt, wie im oberen Abschnitt bereits erläutert. Hierdurch wird jedoch insgesamt mehr Heizenergie aufgewandt als bei kürzeren Prädiktionsintervallen, was sich auch in Abbildung 6.1 widerspiegelt.

Des Weiteren ist zu beachten, dass bei den hier dargestellten Simulationsergebnissen „perfekte“ Vorhersagen für Außentemperatur und Solarstrahlung angenommen werden. Tendenziell ist zu erwarten, dass der Fehler der Wettervorhersage mit fortschreitender Vorhersagezeit zunimmt und damit die Vorhersagegenauigkeit der Prozessmodelle abnimmt. Darüber hinaus nimmt der Rechenaufwand der Optimierung bei längeren Prädiktionsintervallen zu, da die Anzahl an Optimierungsvariablen zunimmt. Ein möglichst kurzes Prädiktionsintervall von 48 h, bei dem ein Kompromiss zwischen der Reduktion des Hei-

zenergiebedarfs und einer Verbesserung des thermischen Komforts erreicht wird, stellt damit eine geeignete Wahl dar.

Variation des Abtastintervalls

In Abbildung 6.3 ist die relative Veränderung des Heizenergiebedarfs und der Komfortverletzung für Abtastintervalle von 15 min, 30 min, 60 min und 120 min dargestellt. Für alle Häuser zeigt sich auch hier der bereits zuvor dargelegte gegensätzliche Zusammenhang zwischen Heizenergieeinsparung und Komfortverbesserung. Mit zunehmendem Abtastintervall steigt die Heizenergieeinsparung, während die Reduktion der Komfortverletzung abnimmt. Die Zunahme der Heizenergieeinsparung zwischen dem kürzesten und längstem Abtastintervall beträgt etwa 6 %, während die Komfortverbesserung um 9 % bis 16 % abnimmt. Auch diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Raumtemperaturen bei längeren Abtastintervallen im Mittel niedriger sind als bei langen Abtastintervallen. Einerseits bewirkt dies eine Reduktion des Heizenergiebedarfs, aber andererseits führt dies auch zu einer stärkeren Verletzung der unteren Temperaturgrenze.

Begründet werden kann dieses Verhalten damit, dass bei kürzeren Abtastintervallen die Momentanwerte der Raumtemperaturen in kürzeren zeitlichen Abständen zum Regler zurückgeführt werden. Der Regler kann daher schneller auf mögliche Vorhersagefehler reagieren und die Raumtemperaturen besser im geforderten Temperaturbereich halten. Wird das Abtastintervall zu lang gewählt, kann durch die Vorhersagefehler eine Verletzung der Temperaturgrenzen hervorgerufen werden. Die Vorhersagefehler bei den Simulationen sind ausschließlich auf die Vorhersage der Belegung einer Zone bzw. der internen Wärmegewinne zurückzuführen. Für den Realbetrieb wird erwartet, dass die Vorhersagefehler der Prozessmodelle im Vergleich zu den hier dargestellten Simulationen deutlich zunehmen. Hinsichtlich des thermischen Komforts profitiert der Regler von einem möglichst kurzen Abtastintervall.

Bei der Wahl des Abtastintervalls ist zusätzlich zu beachten, dass das Abtastintervall stets größer ist als die benötigte Zeit zur Ausführung eines kompletten Regelungsschritts. Aus diesem Grund wird ein Abtastintervall von 30 min als geeignete Wahl betrachtet, da hierbei eine gute Regler-Performance hinsichtlich der Heizenergieeinsparung und Komfortverbesserung erzielt wird und der zeitliche Puffer zur Ausführung eines Regelungsschritts als groß genug erachtet wird.

Variation der Gewichtungsfaktoren

In Abbildung 6.4 ist die relative Veränderung des Heizenergiebedarfs und der Komfortverletzung bei einem Verhältnis der Gewichtungsfaktoren für Unbehaglichkeits- und Energiekosten β_{UK}/β_{EK} von 10^6 , 10^7 , 10^8 und 10^9 für die drei Häuser dargestellt. Mit Zunahme des Verhältnisses der beiden Gewichtungsfaktoren wird eine Verletzung der Temperaturgrenzen innerhalb der Kostenfunktion stärker gewichtet. Die Abbildung zeigt damit zunächst

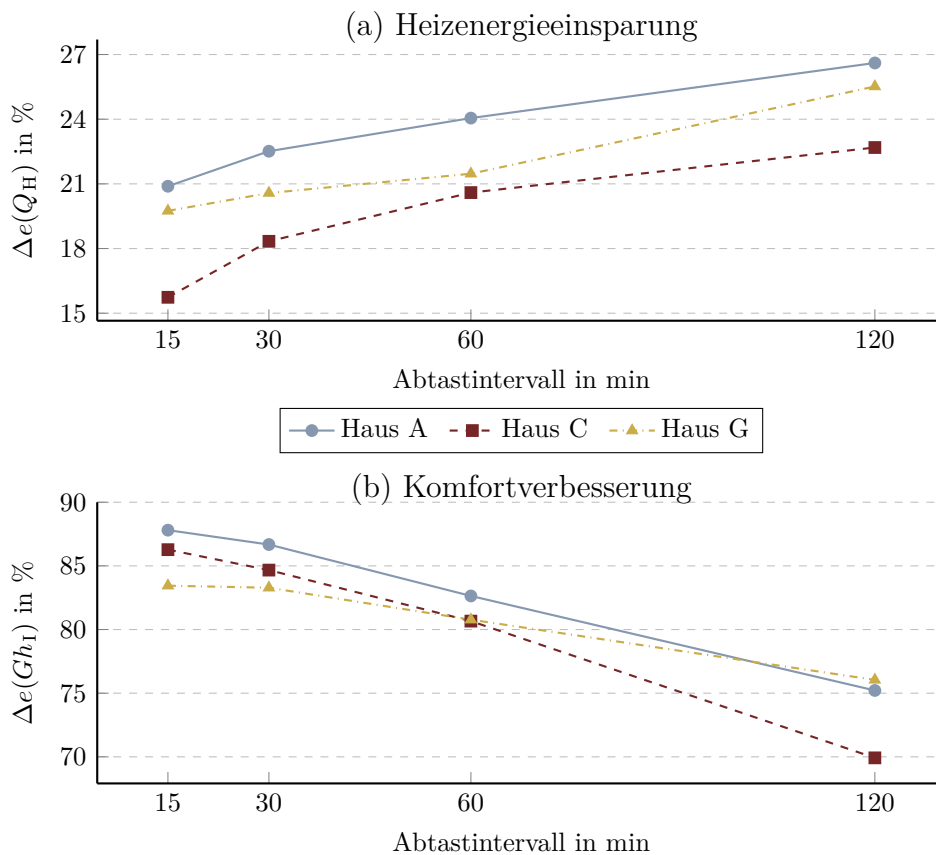


Abbildung 6.3: Relative Veränderung des Heizenergiebedarfs (a) und der Komfortverletzung (b) bei MPC-Regelung im Vergleich zur RBC-Regelung in Abhängigkeit des Abtastintervalls.

das erwartbare Verhalten, dass mit Zunahme des Gewichtungsverhältnisses insgesamt die Komfortverbesserung zunimmt, während die relative Heizenergieeinsparung abnimmt.

Bei einem Verhältnis von 10^6 führt die MPC-Regelung zu einer relativen Komfortverbesserung von 33% (Haus A) bis 63% (Haus G). Ab einem Verhältnis von 10^7 wird in allen Häusern eine relative Komfortverbesserung von etwa 85% erreicht. Bei einer weiteren Erhöhung ergeben sich in den Häusern A und C keine signifikanten Steigerungen der relativen Komfortverbesserung, während diese in Haus G bei einem Verhältnis von 10^9 auf bis zu 97% ansteigt.

Bei der sukzessiven Erhöhung des Gewichtungsverhältnisses von 10^6 auf 10^9 nimmt die relative Heizenergieeinsparung stetig um bis zu 13% bis 18% ab, wobei die Abnahme mit zunehmendem Verhältnis abflacht. Die Ergebnisse lassen wieder darauf schließen, dass das Raumtemperaturniveau bei einem kleinen Gewichtungsverhältnis insgesamt niedriger ist, wodurch weniger Heizenergie benötigt wird aber die unteren Temperaturgrenzen vermehrt verletzt werden.

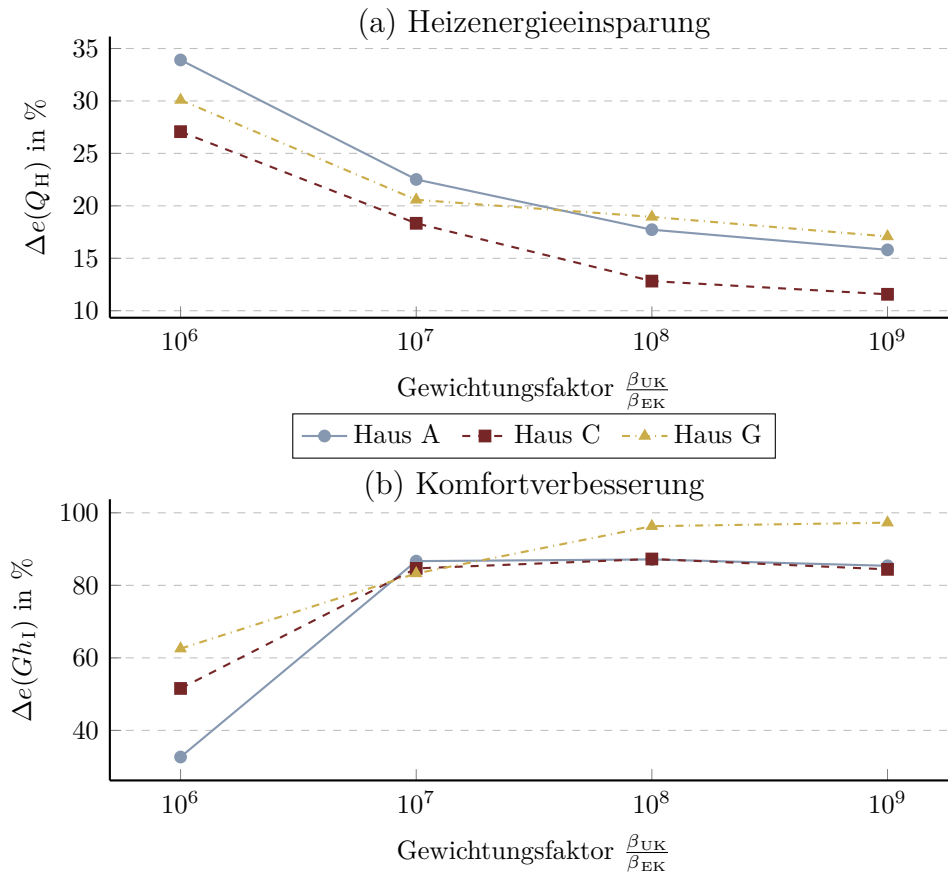


Abbildung 6.4: Relative Veränderung des Heizenergiebedarfs (a) und der Komfortverletzung (b) bei MPC-Regelung im Vergleich zur RBC-Regelung in Abhängigkeit des Verhältnisses der Gewichtungsfaktoren β_{UK} und β_{EK} .

Insgesamt ist der Einfluss des Verhältnisses der Gewichtungsfaktoren β_{UK}/β_{EK} sowohl auf die Heizenergieeinsparung als auch auf die Komfortverbesserung deutlich ausgeprägter als bei den zuvor betrachteten Reglerparametern Prädiktionsintervall und Abtastintervall. Eine geeignete Wahl des Verhältnisses ist damit von essenzieller Bedeutung für die Performance des MPC-Reglers. Auf Basis der Simulationsergebnisse kann ein Verhältnis von 10^7 als geeignet betrachtet werden. Damit wird ein geeigneter Kompromiss zwischen der Einhaltung der Komfortgrenzen in allen Referenzzonen und der Einsparung an Heizenergie erzielt. Das Gewichtungsverhältnis eignet sich auch zum späteren Feintuning des MPC-Reglers im laufenden Realbetrieb.

Variation der Temperaturgrenzen

Als weiterer Reglerparameter werden die Temperaturgrenzen T_{\min} und T_{\max} zur Bestimmung der Unbehaglichkeitskosten variiert. Dabei werden die Temperaturgrenzen der Ka-

tegorie I und II nach DIN EN 15251 (21 °C bis 23 °C bzw. 20 °C bis 24 °C), sowie zwei angepasste Temperaturbereiche betrachtet. Da erwartet wird, dass der Regler die Raumtemperaturen im Sinne einer möglichst geringen Aufwendung von Heizenergie nahe an der gewählten unteren Temperaturgrenze einregelt, liegen diese zwei angepassten Temperaturbereiche oberhalb der Kategorie I (22 °C bis 24 °C und 21,5 °C bis 24 °C). Des Weiteren wird erwartet, dass die Wahl der oberen Temperaturgrenze im Heizfall nur eine untergeordnete Rolle spielt und damit ein höherer Wert gewählt werden kann, um so den „neutralen“ Temperaturbereich zu vergrößern und damit die Regelungsaufgabe zu vereinfachen. In Abbildung 6.5 ist die relative Veränderung des Heizenergiebedarfs und der Komfortverletzung in Abhängigkeit der Temperaturgrenzen dargestellt.

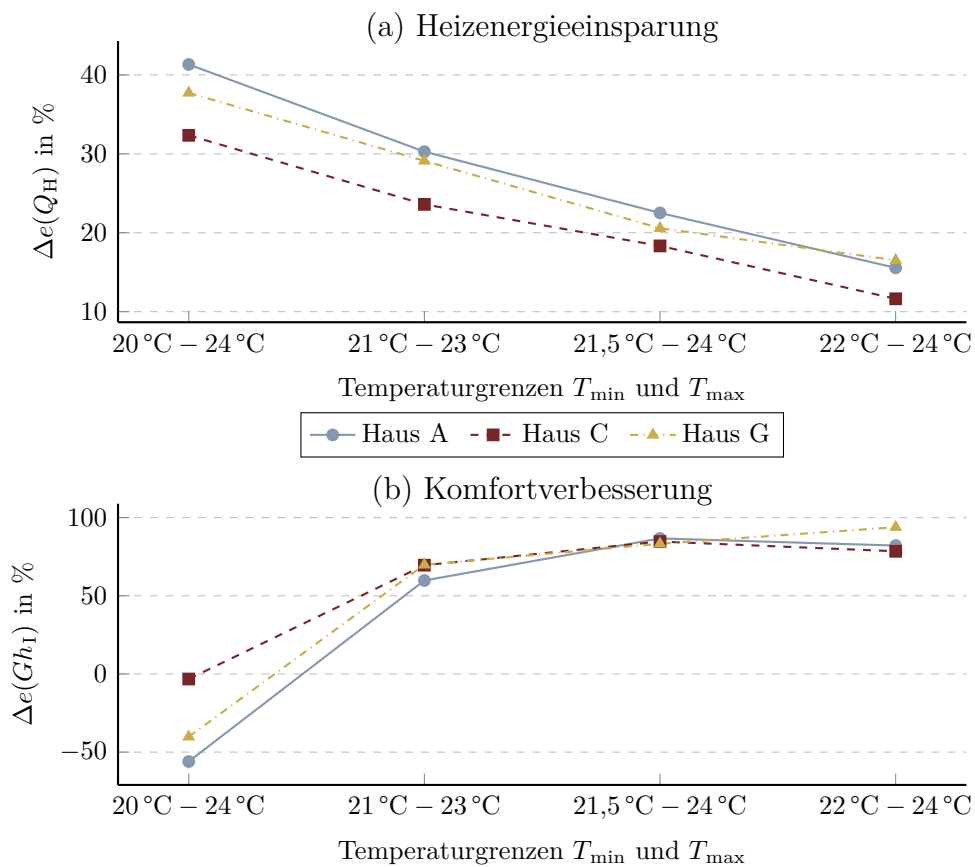


Abbildung 6.5: Relative Veränderung des Heizenergiebedarfs (a) und der Komfortverletzung (b) bei MPC-Regelung im Vergleich zur RBC-Regelung in Abhängigkeit der gewählten Temperaturgrenzen T_{\min} und T_{\max} .

Wie zu erkennen ist, hat die Wahl der Temperaturgrenzen einen signifikanten Einfluss sowohl auf die Heizenergieeinsparung als auch auf die relative Komfortverbesserung. Wird die untere Temperaturgrenze von 20 °C sukzessive auf 22 °C angehoben, so sinkt die Heizenergieeinsparung absolut gesehen um 21 % bis 26 %. Gleichzeitig nimmt die relative Kom-

fortverbesserung bis zu einer unteren Temperaturgrenze von $21,5\text{ }^\circ\text{C}$ bei allen Häusern zu. Werden die Temperaturgrenzen nach Kategorie II angewandt, so ist die relative Komfortverbesserung bei allen Häusern negativ, d. h. die Komfortverletzung der Kategorie I nehmen insgesamt zu. Da, wie eingangs erwähnt, die relative Komfortverbesserung auf Basis der Temperaturgrenzen nach Kategorie I ermittelt wird, ist dies plausibel und spiegelt das Verhalten des MPC-Reglers wider, die Raumtemperaturen nahe an der unteren Temperaturgrenze zu halten. Bei einem Temperaturbereich von $22\text{ }^\circ\text{C}$ bis $24\text{ }^\circ\text{C}$ nimmt die relative Komfortverbesserung in den Häusern A und C wieder ab, was darauf hindeutet, dass dort die obere Temperaturgrenze von $23\text{ }^\circ\text{C}$ aufgrund des insgesamt höheren Temperaturniveaus vermehrt überschritten wird.

Die Wahl der Temperaturgrenzen hat damit einen bedeutenden Einfluss auf die Performance des MPC-Reglers. Um die im realen Anwendungsfall auftretenden Unsicherheiten bei der Vorhersage der Prozessmodelle und Störgrößen zu berücksichtigen, sollte eine untere Temperaturgrenze von mindestens $21\text{ }^\circ\text{C}$ gewählt werden um sicherzustellen, dass die Raumtemperaturen möglichst zu jeder Zeit oberhalb von $20\text{ }^\circ\text{C}$ liegen. Da, wie im späteren Verlauf gezeigt wird, die Referenzzonen im 3. Obergeschoss ein insgesamt etwas höheres Temperaturniveau als die Büroräume in den darunterliegenden Etagen aufweisen, wird im Realbetrieb eine untere Temperaturgrenze von $21,5\text{ }^\circ\text{C}$ festgelegt.

6.1.2 Kühlbetrieb

Für die Auswertung der Regler-Performance im Kühlbetrieb zur Optimierung der Laufzeiten der TAD-Umwälzpumpen und des thermischen Komforts wird der Zeitraum 12.07.2019 bis 05.09.2019 gewählt. Der Verlauf der Außentemperatur und horizontalen Globalstrahlung sind im Anhang C.2 gegeben. Auf eine Parametervariation wird hier verzichtet, es werden stattdessen die Erkenntnisse aus den Simulationen des Heizbetriebs übernommen.

In Tabelle 6.3 sind die MPC-Reglerparameter für den Kühlbetrieb angegeben. Es wird ein Prädiktionsintervall von 48 h und ein Abtastintervall von 30 min gewählt. Wie bereits in Abschnitt 5.2.4 erwähnt, werden für die unteren und oberen Komfortgrenzen außentemperaturabhängige Werte gewählt, die sich an der empfohlenen operativen Raumtemperatur nach DIN EN 15251 orientieren. Für das Gewichtungsverhältnis zwischen Unbehaglichkeits- und Energiekosten $\beta_{\text{UK}}/\beta_{\text{EK}}$ wird ein Wert von 10^8 gewählt.

Als Bewertungskriterien werden die Laufzeiten der Umwälzpumpen t_{P} und die Komfortverletzung der Kategorie I (außentemperaturabhängig, siehe Abbildung 2.2) als Summe der Gradstunden über alle Referenzzonen Gh_{I} verwendet. Tabelle 6.4 zeigt diese Bewertungskriterien sowie deren relative Änderung bei MPC-Regelung gegenüber RBC-Regelung. Wie zu erkennen ist, wird die Pumpenlaufzeit in allen drei Häusern bei MPC-Regelung reduziert. Die Reduktion beläuft sich dabei von 13 % in den Häusern A und G bis etwa 41 % im Haus C. In den Häusern C und G wird ebenfalls eine Verringerung

Tabelle 6.3: MPC-Reglerparameter im Kühlbetrieb.

Parameter	Symbol	Einheit	Wert
Prädiktionsintervall	t_p	h	48
Abtastintervall	t_s	min	30
Temperaturgrenzen	$[T_{\min}, T_{\max}]$	°C	$f(T_{AU})$
Gewichtungsfaktor TAD	β_{TAD}	-	0
Gewichtungsfaktor Pumpen	β_P	-	10^4
Gewichtungsfaktor Steuergrößenänderung	$\beta_{\Delta u}$	-	1
Gewichtungsfaktor Energiekosten	β_{EK}	-	10^{-7}
Gewichtungsfaktor Unbehaglichkeitskosten	β_{UK}	-	10

Tabelle 6.4: Änderung der Pumpenlaufzeit und Gradstunden für Haus A, C und G für die MPC-Regelung im Vergleich zur RBC-Regelung.

Regelung	Haus A		Haus C		Haus G	
	t_p in h	Gh_I in Kh	t_p in h	Gh_I in Kh	t_p in h	Gh_I in Kh
RBC	887,6	25,3	896,1	51,4	870,3	40,3
MPC	769,2	30,2	528,5	41,5	751,9	36,6
Änderung in %	-13,3	14,0	-41,0	-21,7	-13,6	-10,6

der Komfortverletzung erzielt, d. h. der MPC-Regler erfüllt hier beide Regelungsziele. In Haus A ist jedoch eine leichte Erhöhung der Gradstunden um 5 Kh (14 %) festzustellen.

In Abbildung 6.6 ist exemplarisch der Raumtemperaturbereich in den Referenzzonen von Haus C in der Woche vom 24. bis 31. Juli 2019 dargestellt. Wie im Vergleich der Abbildungen 6.6a zu erkennen ist, ist der Raumtemperaturbereich bei MPC-Regelung etwas höher als bei RBC-Regelung. Bis auf den 29.07. (Montag) wird die obere Temperaturgrenze dabei kaum überschritten, während bei RBC-Regelung hingegen häufiger die untere Temperaturgrenze verletzt wird. Beim Betrieb der Umwälzpumpen (Abbildung 6.6c) zeigt sich, dass die Betriebszeiten nur am 26.07. (Freitag) erkennbar reduziert werden. Wie bereits bei den Ergebnissen zum Heizbetrieb erläutert, ist dies auf das vorausschauende Verhalten und die Integration des Belegungsplan bei der MPC-Regelung zurückzuführen. Da jedoch die Pumpen aufgrund des unveränderten Zeitplans (vgl. Abbildung 3.4d) erst in der Nacht von Sonntag auf Montag wieder aktiviert werden können, ergeben sich insgesamt höhere Raumtemperaturen am Montag, die in einer Verletzung der oberen Temperaturgrenze resultieren. Dem entgegenwirken könnte eine Ausweitung des Zeitplans, sodass längere Kühlphasen an Wochenenden ermöglicht werden.

Insgesamt ist das Optimierungspotenzial im Kühlbetrieb geringer einzuschätzen als im Heizfall. Dies kann vor allem auf den sehr kleinen Vorlauftemperaturbereich der Kühlkurve von 18 °C bis 20 °C (siehe Abbildung 3.4c) zurückgeführt werden. Der Spielraum des

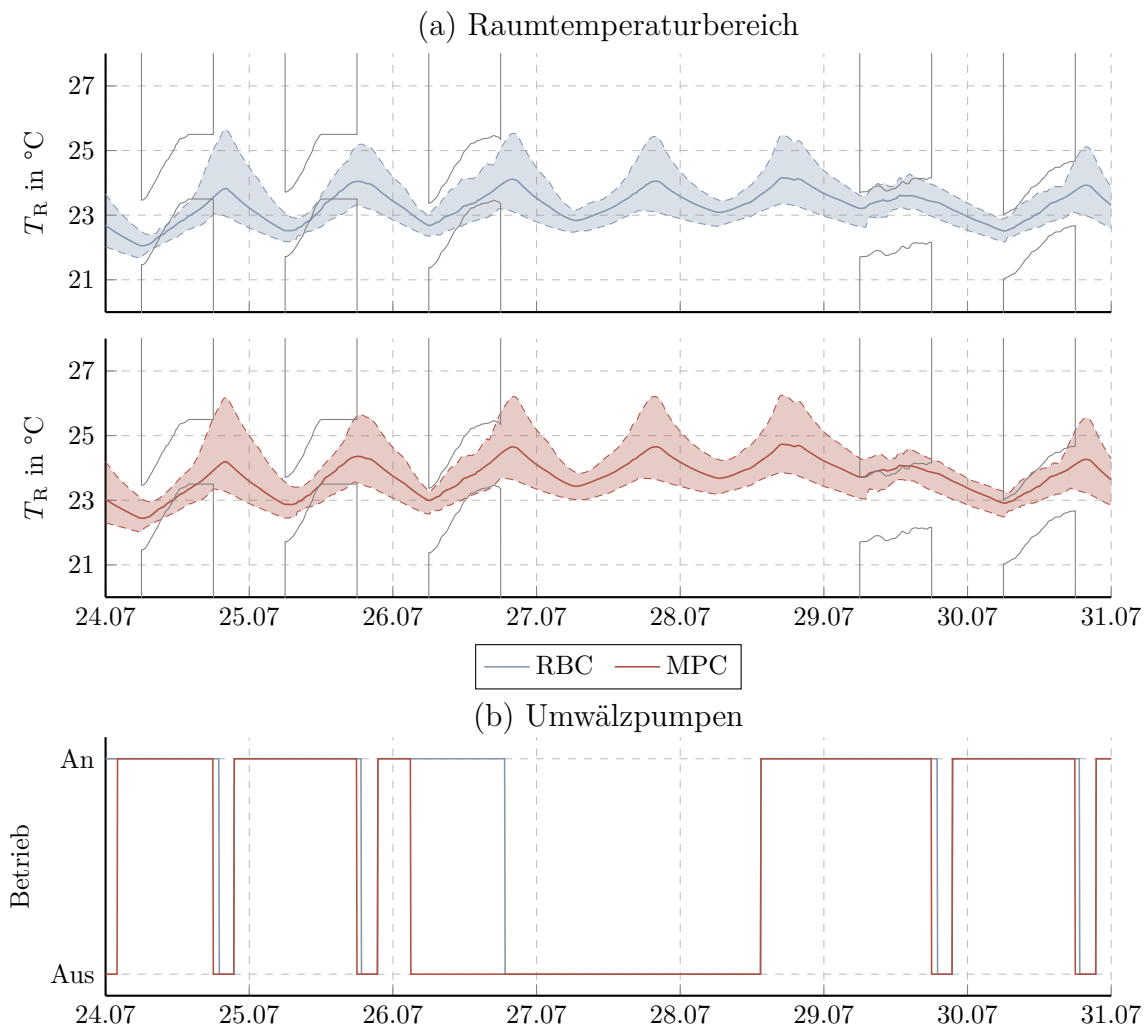


Abbildung 6.6: Vergleich der Raumtemperaturbereiche in den Referenzzonen von Haus C bei RBC- und bei MPC-Regelung (a) im Kühlbetrieb sowie Betrieb der TAD-Umwälzpumpen (b).

MPC-Reglers, die Umwälzpumpen in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur nach Bedarf zu aktivieren oder deaktivieren, ist damit gering. Entsprechend begrenzt ist der Einfluss der Pumpenlaufzeiten auf den thermischen Komfort und damit die erzielte relative Komfortverbesserung im Vergleich zum Heizfall. Eine MPC-Regelung kann im Kühlbetrieb dennoch eine deutliche Reduktion der Pumpenlaufzeit und damit des Strombedarfs der Umwälzpumpen bewirken.

6.1.3 Zusammenfassung der Simulationsergebnisse

Auf Basis der Simulation kann gezeigt werden, dass der entwickelte MPC-Regler sowohl im Heiz- als auch im Kühlbetrieb eine Erhöhung der Energieeffizienz durch Reduktion

des Heizenergiebedarfs und der Laufzeit der Umwälzpumpen sowie eine Verbesserung des thermischen Komforts im Vergleich zur herkömmlichen Regelungsstrategie bewirkt. Dabei ist das Optimierungspotenzial im Heizbetrieb höher als im Kühlbetrieb, da durch die Anpassung der TAD-Vorlauftemperaturen ein größerer Einfluss auf den Verlauf der Raumtemperaturen genommen werden kann als durch die reine Anpassung der Pumpenlaufzeiten.

Durch die Variation von Reglerparametern kann der Einfluss dieser auf die erzielte Heizenergieeinsparung und Komfortverbesserung im Heizfall untersucht werden. Die relevantesten Parameter sind dabei die untere und obere Temperaturgrenze sowie das Verhältnis der Gewichtungsfaktoren für die Energie- und Unbehaglichkeitskosten. Auf Basis der Parametervariation lässt sich die Kombination an Reglerparametern ermitteln, bei der ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Heizenergieeinsparung und Komfortverbesserung erreicht wird. Das Potenzial zur Reduktion des Heizenergiebedarfs lässt sich im dreimonatigen Betrachtungszeitraum mit 18 % bis 23 % abschätzen. Die Gradstunden der Verletzung der Komfortkategorie I werden dabei um 83 % bis 87 % reduziert.

Im Kühlbetrieb beträgt die Verringerung der Pumpenlaufzeit im ca. zweimonatigen Betrachtungszeitraum je nach Haus zwischen 13 % bis 41 %, während eine Reduktion der Gradstunden bei nur zwei der drei betrachteten Häuser um 11 % bis 22 % nachgewiesen werden kann.

6.2 Experimentelle Untersuchungsergebnisse

Die experimentelle Untersuchung des MPC-Reglers im Verwaltungsgebäude Neuenfelder Straße teilt sich in zwei Zeiträume auf, die in Abbildung 6.7 dargestellt sind und im Folgenden getrennt voneinander betrachtet werden. Der erste Untersuchungszeitraum um-

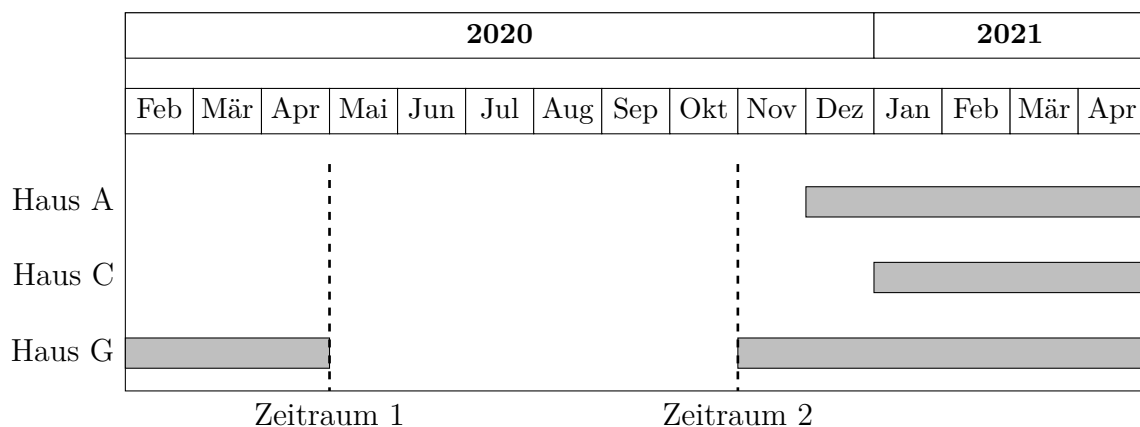


Abbildung 6.7: Übersicht über die Untersuchungszeiträume und Gebäudeteile, in denen der MPC-Regler eingesetzt wurde.

fasst die Monate Februar bis April 2020. In diesem Zeitraum wurde der MPC-Regler

zur Regelung der Vorlauftemperatur der beiden TAD-Heizkreise ausschließlich in Haus G eingesetzt. Der zweite Untersuchungszeitraum umfasst die Monate November 2020 bis April 2021, wobei der MPC-Regler in Haus G im gesamten Zeitraum zum Einsatz kam, während der Regler in Haus A bzw. Haus C erst im Dezember bzw. Januar implementiert wurde. Beide Untersuchungszeiträume liegen damit überwiegend in der Heizperiode, wobei der Monat April je nach Witterungsverhältnis auch als Übergangszeit betrachtet werden kann.

Tabelle 6.5 zeigt eine Übersicht über die Nutzungsflächen, die Anzahl an Büros und die Anzahl an vorhandenen Referenzzonen in den betrachteten Häusern A, C und G. Jedes Haus besitzt zwei TAD-Heizkreise, die unabhängig voneinander geregelt werden. Die Auswertung des Heizenergiebedarfs und thermischen Komforts erfolgt jeweils für ein gesamtes Haus, da nur ein Wärmemengenzähler pro Haus verfügbar ist.

Tabelle 6.5: Übersicht über die geometrischen Daten, Anzahl der Büros und der Referenzzonen in den betrachteten Häusern A, C und G.

Gebäudeteil und Heizkreis	Beheizte Fläche	Anzahl Büros	Anzahl Referenzzonen
Haus A Nord-Ost	681 m ²	39	2
Haus A Süd-West	1339 m ²	62	3
Haus C Nord-Ost	692 m ²	41	2
Haus C Süd-West	1001 m ²	55	3
Haus G Ost	890 m ²	67	2
Haus G West	1380 m ²	107	5

Im Folgenden wird zunächst das methodische Vorgehen zum Vergleich der Regler-Performance von MPC und RBC im Hinblick auf den Heizenergiebedarf und Komfort beschrieben. Anschließend werden die Ergebnisse in den beiden Untersuchungszeiträumen dargestellt und analysiert.

6.2.1 Methodisches Vorgehen

Korrektur des Heizenergiebedarfs

Zur Ermittlung der erzielten Heizenergieeinsparung wird eine zweistufige Korrektur des gemessenen TAD-Heizenergiebedarfs durchgeführt. Alle Heizenergiebedarfe werden auf die beheizte Nutzungsfläche des jeweiligen Gebäudeteils (siehe Tabelle 6.5 bzw. A.6) bezogen. Die Auswertung und Darstellung erfolgt monatsweise. Zunächst wird eine Außentemperaturbereinigung nach VDI 3807 [102] unter Anwendung der Gradtage durchgeführt. Die Gradtage in einem Betrachtungszeitraum (hier: jeweils ein Monat) bei einer mittleren

Raumtemperatur von 20 °C und einer Heizgrenztemperatur von 15 °C ($G_{20/15}$) berechnen sich über:

$$G_{20/15} = 1 \text{ d} \cdot \sum_{i=1}^n (20 \text{ °C} - T_{\text{AU},m,i}) \quad (6.3)$$

Dabei sind:

- $G_{20/15}$: Gradtage in Kd im Betrachtungsmonat
- $T_{\text{AU},m,i}$: Tagesmittel der Außentemperatur des Heiztages $i = 1, \dots, n \in \mathbb{N}$ mit $T_{\text{AU},m,i} < 15 \text{ °C}$
- n : Anzahl der Heiztage mit $T_{\text{AU},m,i} < 15 \text{ °C}$ im Betrachtungsmonat

Die Bereinigung des gemessenen, monatlichen Heizenergiebedarfs q_{H} erfolgt dann über

$$q_{\text{H,ber}} = q_{\text{H}} \cdot \frac{G_{20/15,\text{LZM}}}{G_{20/15}} \quad (6.4)$$

mit $q_{\text{H,ber}}$ als witterungsbereinigter Heizenergiebedarf und $G_{20/15,\text{LZM}}$ als Langzeitmittel der Gradtage im jeweiligen Betrachtungsmonat. Zur Bildung des Langzeitmittels werden die Werte für die Gradtage der vergangenen 20 Jahre (2001 bis 2020) verwendet. Tagesmittelwerte der Außentemperatur sowie monatliche und langjährige Mittelwerte der Gradtage können vom Open Data Server des Deutschen Wetterdienstes [21] für die nächstgelegene Wetterstation (Hamburg-Neuwiedenthal) kostenfrei bezogen werden.

Die zweite Korrektur des Heizenergiebedarfs erfolgt für die MPC-geregelten Gebäudeteile. Da der MPC-Regler in maximal drei der acht Gebäudeteile gleichzeitig implementiert wird, können die anderen Gebäudeteile mit unveränderter RBC-Regelung als Vergleich herangezogen werden. Auf Basis des über alle RBC-geregelten Gebäudeteile gemittelten Heizenergiebedarfs $q_{\text{H,ber,RBC}}$ im Betrachtungsmonat und dessen Mittelwert über die vergangenen fünf (2015 bis 2019 im Zeitraum 1) bzw. sechs (2015 bis 2020 im Zeitraum 2) Betriebsjahre $q_{\text{H,ber,RBC,m}}$ wird ein Korrekturfaktor $f_{\text{H,kor}}$ gebildet:

$$f_{\text{H,kor}} = \frac{q_{\text{H,ber,RBC}}}{q_{\text{H,ber,RBC,m}}} \quad (6.5)$$

Hiermit kann dann ein erwarteter Heizenergiebedarf $q_{\text{H,erw}}$ für ein MPC-geregeltes Gebäudeteil ermittelt werden, der sich aus dem Korrekturfaktor und dem mittleren Heizenergiebedarf des entsprechenden Gebäudeteils über die vergangenen Betriebsjahre mit RBC-Regelung ergibt:

$$q_{\text{H,erw}} = f_{\text{H,kor}} \cdot q_{\text{H,ber,m}} \quad (6.6)$$

Dieser erwartete Heizenergiebedarf stellt damit den Bedarf für ein MPC-geregeltes Gebäudeteil dar, der mit RBC-Regelung im Betrachtungsmonat erwartet wird. Durch die Korrektur wird berücksichtigt, dass es neben der Außentemperatur weitere Einflussfaktoren gibt, die den Heizenergiebedarf des gesamten Gebäudes bzw. des Gebäudeteils beeinflussen können. Beispiele hierfür sind eine geänderte Betriebsführung und Anpassungen an

der Gesamtanlage, Änderung des Nutzungsverhaltens und innerer Wärmegewinne aber auch der Einfluss von Solarstrahlung und den damit verbundenen Wärmegewinnen. Diese Faktoren werden bei der Außentemperaturbereinigung unter Verwendung der Gradtage nicht berücksichtigt. Der Korrekturfaktor ist nicht gebäudeteilspezifisch sondern bezieht sich auf alle RBC-geregelten Gebäudeteile. Es wird daher angenommen, dass sich alle Änderungen bei den RBC-geregelten Gebäudeteilen auch auf die MPC-geregelten Gebäudeteile übertragen lassen. Die erzielte relative Einsparung an Heizenergie $\Delta e(q_H)$ wird anschließend ermittelt, in dem der tatsächlich gemessene Heizenergiebedarf $q_{H,ber}$ auf den erwarteten Heizenergiebedarf $q_{H,erw}$ des MPC-geregelten Gebäudeteils im Betrachtungsmonat bezogen wird:

$$\Delta e(q_H) = \left(1 - \frac{q_{H,ber}}{q_{H,erw}} \right) \cdot 100 \% \quad (6.7)$$

Bewertung des thermischen Komforts

Im Gegensatz zum Heizenergiebedarf ist ein Vergleich des erzielten thermischen Komforts mit dem der vorangegangenen Betriebsjahre schwieriger, da dieser teils deutlich durch Nutzungsverhalten beeinflusst wird [65]. Auch gibt es keine standardisierte Methode zur Bereinigung externer Einflüsse auf den thermischen Komfort. Darüber hinaus ist die messtechnische Erfassung des thermischen Komforts in den vorhandenen Referenzzonen im 3. Obergeschoss ggf. nicht auf die restlichen Büroräume eines Gebäudeteils übertragbar. Um die Aussagekraft der messtechnischen Erfassung zu erhöhen, wurden in den Untersuchungszeiträumen zusätzliche Temperatur/Feuchte-Datenlogger in allen Geschossebenen der Gebäudeteile A, C und G verteilt. Die Anzahl der Datenlogger sowie der prozentuale Anteil an messtechnisch erfassten Büroräumen inkl. der Referenzzonen sind in Tabelle 6.6 dargestellt.

Tabelle 6.6: Anzahl der Datenlogger und prozentualer Anteil der messtechnisch erfassten Büroräume inkl. Referenzzonen in den Häusern A, C und G.

Zeitraum	Haus A		Haus C		Haus G	
	Anzahl	Anteil	Anzahl	Anteil	Anzahl	Anteil
01.02.2020 bis 20.03.2020	-	-	-	-	17	14 %
20.12.2020 bis 30.04.2021	19	24 %	18	26 %	24	19 %

Im Untersuchungszeitraum 1 erfolgt ein Vergleich des thermischen Komforts im MPC-geregeltem Haus G mit den beiden RBC-geregelten Häusern A und C auf Basis der gemessenen Raumtemperaturen in den Referenzzonen. Im zweiten Untersuchungszeitraum wird der in den Häusern A, C und G erreichte thermische Komfort mit den vergangenen Betriebsjahren verglichen. In beiden Zeiträumen werden die Messdaten der Datenlogger verwendet, um eine Gesamtauswertung des thermischen Komforts in den jeweiligen Häusern vorzunehmen und um die Frage zu beantworten, ob die MPC-Regelungsstrategie

auf Basis der Prozessmodelle der Referenzzonen im 3. Obergeschoss den thermischen Komfort in den Büroräumen auf den anderen Geschosebenen ebenfalls erreichen kann.

Zur Auswertung des thermischen Komforts werden hier jeweils die prozentualen Anteile der Raumluftzustände an den nach DIN EN 15251 definierten Komfortkategorien sowie das Gradstunden-Kriterium, getrennt nach Über- und Unterschreitung der Temperaturgrenzen, dargestellt (vgl. Abschnitt 2.2). Da es sich bei dem betrachteten Gebäude um einen Neubau handelt, gelten die Anforderung an die Kategorie II. Es werden nur Raumluftzustände berücksichtigt, die sich innerhalb der Nutzungszeit des Gebäudes (Montag bis Freitag von 06:00 Uhr bis 18:00 Uhr) befinden.

6.2.2 Untersuchungszeitraum 1

In Abbildung 6.8 sind die Witterungsbedingungen im Untersuchungszeitraum 1 von Februar bis April 2020 in Form von Gradtagen nach VDI 3807 und die Monatssumme der horizontalen Globalstrahlung sowie das Langzeitmittel der vergangenen 20 Jahre dargestellt.

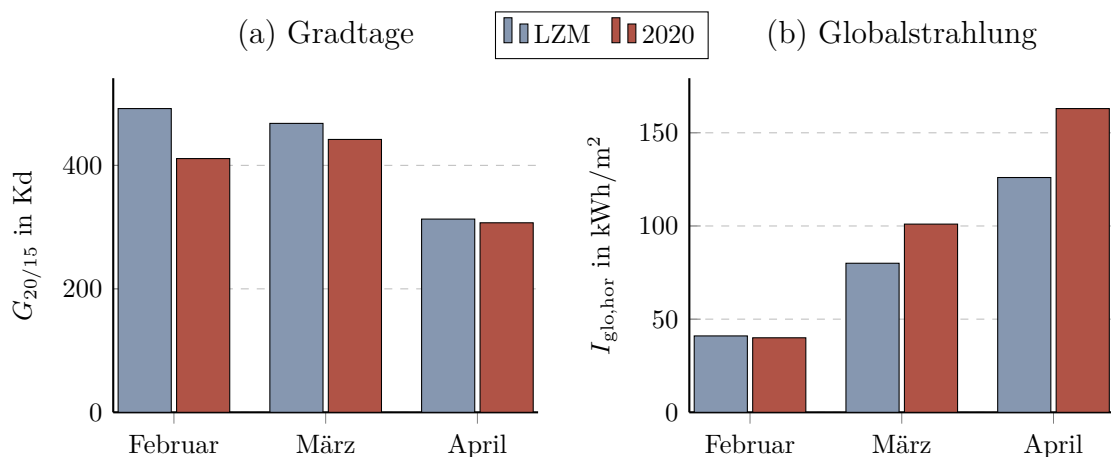


Abbildung 6.8: Witterungsbedingungen im Untersuchungszeitraum 1 mit (a) Gradtagen nach VDI 3807 und (b) Monatssumme der horizontalen Globalstrahlung. LZM ist das Langzeitmittel (2000-2019).

In Bezug auf die Gradtage ist zu erkennen, dass diese im Februar im Vergleich zum Langzeitmittel etwa 16 % niedriger sind, was auf überdurchschnittlich warme Witterungsverhältnisse zurückzuführen ist. Auch der März und April weisen leicht unterdurchschnittliche Gradtage auf, der Unterschied ist jedoch nicht so ausgeprägt wie im Februar. Die Globalstrahlung ist im Februar durchschnittlich, während diese in den Monaten März und April mehr als 25 % über dem langjährigen Mittel liegt. In Abbildung C.3 im Anhang sind die Verläufe der Außentemperatur und horizontalen Globalstrahlung für den gesamten Zeitraum dargestellt. Zusammengefasst können die drei untersuchten Monate

als etwas wärmer und deutlich sonnenscheinreicher als im langjährigen Durchschnitt bezeichnet werden.

Heizenergie

In Abbildung 6.9 ist der mittlere flächenbezogene TAD-Heizenergiebedarf der RBC-geregelten Gebäudeteile (alle außer Haus G) im Untersuchungszeitraum 1 sowie der über die vergangenen fünf Betriebsjahre gemittelte Wert dargestellt. Die daraus gebildeten Korrekturfaktoren zur Berechnung des erwarteten Heizenergiebedarfs des MPC-geregelten Haus G (siehe Gleichung 6.6) sind in Tabelle 6.7 aufgeführt. Der Hei-

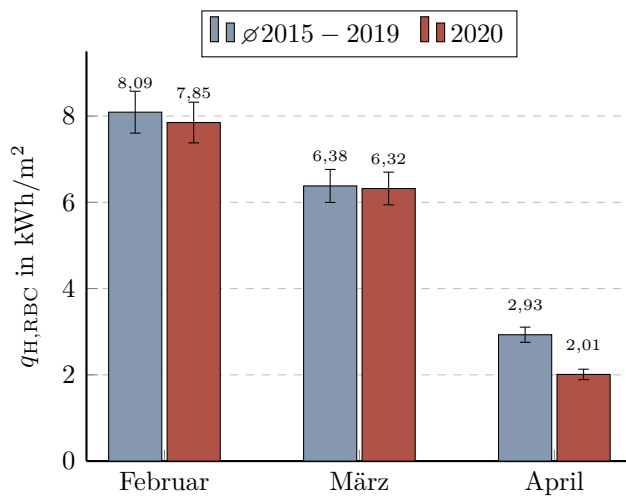


Tabelle 6.7: Korrekturfaktoren $f_{H,kor}$ im Zeitraum 1.

Monat	Korrekturfaktor $f_{H,kor}$
Februar	0,9712
März	0,9912
April	0,6853

Abbildung 6.9: Gemessener TAD-Heizenergiebedarf der RBC-geregelten Häuser (alle außer Haus G) im Zeitraum 1 sowie Mittelwert über die vergangenen Jahre 2015 bis 2019.

zenergiebedarf in den Monaten Februar und März 2020 liegt nur sehr leicht unterhalb des Durchschnitts der Jahre 2015 bis 2019. Im April hingegen liegt der Heizenergiebedarf etwa 31 % unterhalb des Mittelwertes, woraus sich ein Korrekturfaktor von 0,6853 ergibt.

Abbildung 6.10 zeigt den mit den Korrekturfaktoren aus Tabelle 6.7 berechneten erwarteten TAD-Heizenergiebedarf von Haus G sowie den gemessenen TAD-Heizenergiebedarf im Zeitraum 1. Die daraus ermittelten absoluten und relativen Einsparungen an Heizenergie sind in Tabelle 6.8 gegeben.

Es ist zu erkennen, dass der Heizenergiebedarf in allen drei Monaten durch die MPC-Regelungsstrategie deutlich gesenkt werden konnte. Insgesamt beläuft sich die relative Einsparung über alle drei Monate auf 39 % oder 9998 kWh absolut. Besonders im April ist die MPC-Strategie der Standard-Regelungsstrategie überlegen, mit der

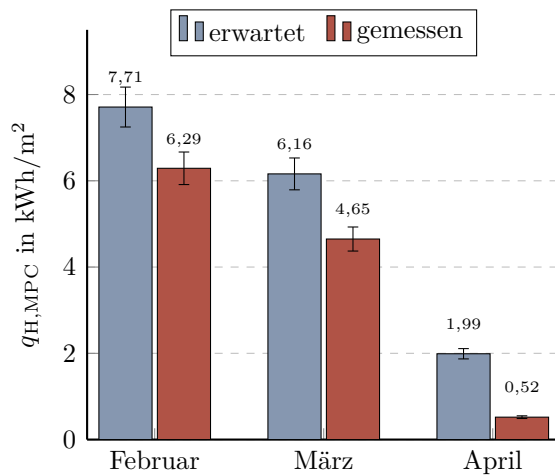


Abbildung 6.10: Erwarteter und gemessener TAD-Heizenergiebedarf von Haus G im Zeitraum 1.

Tabelle 6.8: Absolute und relative Einsparung an Heizenergie von Haus G im Zeitraum 1.

Monat	Einsparung	
	Relativ in %	Absolut in kWh
Februar	18,4	3226
März	24,6	3436
April	73,8	3336

höchsten erzielten relativen Heizenergieeinsparung von 74 %. Ein Grund hierfür kann in den dort vorliegenden Witterungsverhältnissen gefunden werden. Zur Verdeutlichung und Analyse der Unterschiede zwischen den beiden Regelungsstrategien ist in Abbildung 6.11 der Bereich der Raumtemperaturen in den Referenzzonen, die resultierenden TAD-Vorlauftemperaturen beider Regelungsstrategien mit Heizzeiten (d. h. Zeiten, in denen die Umwälzpumpen aktiviert sind) sowie die Außentemperatur exemplarisch in der Zeit vom 1. bis 14. April dargestellt. Als Vergleich werden die Raumtemperaturen, die Vorlauftemperatur und die Heizzeiten von Haus A herangezogen.

Wie bereits erläutert, war der April überdurchschnittlich sonnig und gekennzeichnet durch eine hohe Schwankung der Außentemperatur zwischen Tag und Nacht, wie am Verlauf in Abbildung 6.11c zu erkennen ist. Da mit der RBC-Strategie aufgrund des hinterlegten Zeitplans vorwiegend nachts geheizt wird und die Vorlauftemperatur außentemperaturgeführt ist, ergeben sich maximale Vorlauftemperaturen von bis zu 27 °C, wie in Abbildung 6.11b zu erkennen ist. Das Vorlauftemperaturniveau mit MPC-Regelung ist im Vergleich dazu überwiegend niedriger, eine Ausnahme bildet eine Heizphase zu Beginn des Aprils mit einer maximalen Vorlauftemperatur von 28 °C. Die Raumtemperaturen in den Referenzzonen von Haus G sind in der ersten Aprilwoche niedriger als in Haus A und steigen in der zweiten Woche merklich an. Bedingt ist dieser Anstieg durch die höheren Außentemperaturen und Solarstrahlung (siehe auch Abbildung C.3 im Anhang). Die untere Temperaturgrenze wird zu keinem Zeitpunkt unterschritten.

Der Vorteil der MPC-Strategie lässt damit zum einen auf die Integration der Vorhersage von Außentemperatur und Solarstrahlung zurückführen, zum anderen auf die Rückkopplung der Zonentemperaturen durch die Temperaturmessung in den Referenzzonen. Durch die Prädiktion kann der Regler die täglichen Wärmegewinne durch Solarstrahlung und

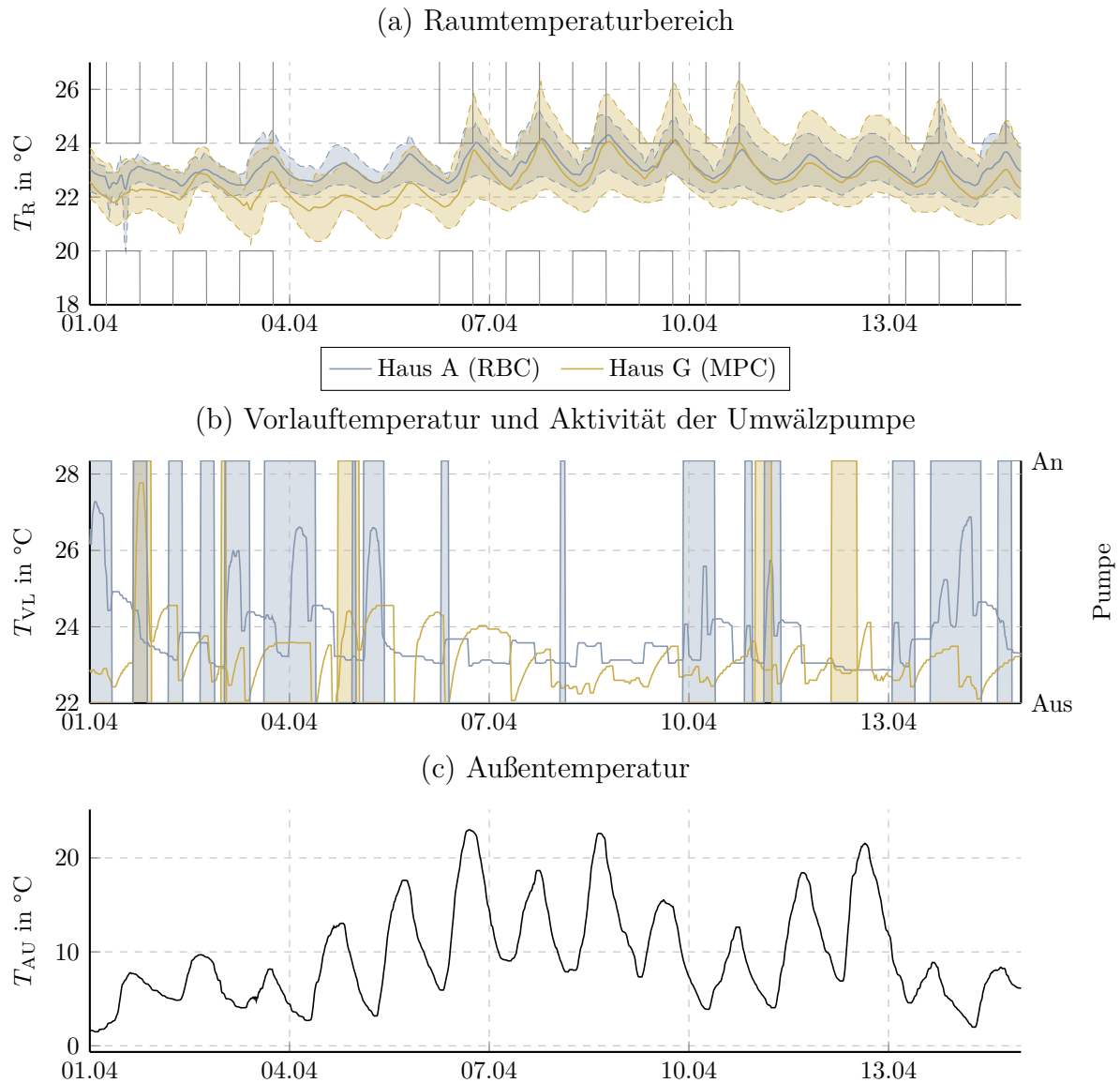


Abbildung 6.11: Verlauf von Raumtemperaturen (a), Vorlauftemperatur (b) mit aktiven Heizzeiten (farblich hinterlegte Flächen) und Außentemperatur (c) in der Woche vom 01.04.2020 bis 14.04.2020. Bei den Raumtemperaturen ist der Mittelwert als durchgezogene Linie dargestellt, die minimalen und maximalen Raumtemperatur als gestrichelte Linie.

interne Lasten sowie die nächtlichen Transmissionswärmeverluste für die nächsten 48 h vorhersagen. Zusammen mit der Rückkopplung der Zonentemperaturen führt dies zum antizipierten Reglerverhalten und resultiert in niedrigen Vorlauftemperaturen sowie geringer Heizaktivität, wie in [Abbildung 6.11b](#) zu erkennen ist. Der MPC-Regler reduziert die Heizzeiten signifikant, da ein Beheizen des Gebäudes im Hinblick auf die vorherrschenden Raumtemperaturen nicht nötig ist.

In Abbildung 6.12 ist die Verteilung der Vorlauftemperaturen während aktiver Heizzeiten als Boxplot dargestellt. Im Februar und März ist der Median der Vorlauftemperatur bei MPC-Regelung etwas höher als bei RBC-Regelung und die Verteilung wird insgesamt deutlich breiter, sodass höhere maximale Vorlauftemperaturen erreicht werden. Der MPC-Regler nutzt damit den vorgegebenen Bereich der Vorlauftemperaturen von 22 °C bis 32 °C variabler aus. Im April wird der Median der Vorlauftemperatur mit MPC-Regelung deutlich reduziert, wie auch in Abbildung 6.11b bereits erkennbar ist.

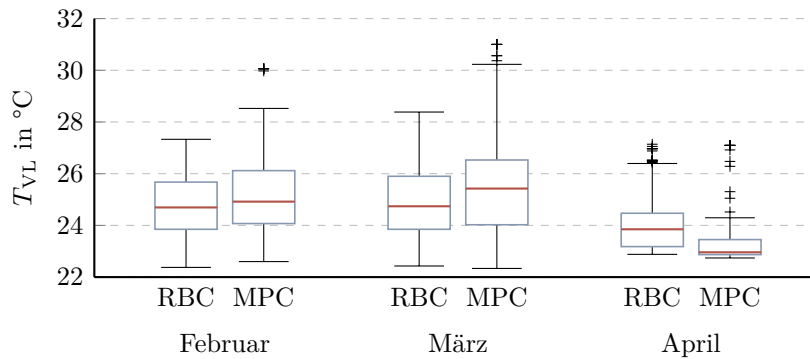


Abbildung 6.12: Verteilung der Vorlauftemperaturen während aktiver Heizzeiten in Haus A (RBC) und Haus G (MPC).

In Tabelle 6.9 sind die Heizzeiten in Stunden (Zeiten, in denen die Umwälzpumpen aktiv sind) für Haus A (Heizkreis Süd-West) und Haus G (Heizkreis West) abgebildet. Die Heizzeiten in Haus G wurden im Vergleich zu Haus A im gesamten Zeitraum von etwa 1067 h auf 552 h und damit um gut 48 % reduziert. Da die Heizzeiten direkt mit den Laufzeiten der Umwälzpumpen und damit mit deren Strombedarf in Verbindung stehen, erzielt die MPC-Regelung neben der Einsparung an Heizenergie auch eine deutliche Einsparung an elektrischer Energie. Bei einer Nennleistungsaufnahme der beiden Umwälzpumpen (eine pro Heizkreis) von je 250 W ergibt sich im gesamten Untersuchungszeitraum eine absolute Einsparung an elektrischer Energie von etwa 260 kWh.

Tabelle 6.9: Vergleich der aktiven Heizzeiten für Haus A (RBC) und Haus G (MPC).

Monat	Heizzeiten in h		Reduktion in %
	Haus A (RBC)	Haus G (MPC)	
Februar	476,0	271,5	42,96
März	408,0	201,0	50,74
April	182,5	79,5	56,44

Zusammenfassend lässt sich auf Basis dieser ersten experimentellen Untersuchung die Energieeinsparung durch MPC-Regelung im Vergleich zur RBC-Regelung vor allem auf

die deutliche Reduktion der Heizzeiten zurückführen. Die Zeit, in der das Haus G aktiv beheizt wird, halbiert sich im betrachteten Zeitraum im Vergleich zu Haus A. Eine MPC-Regelung resultiert daher in kürzeren Heizphasen mit zeitweisen höheren Vorlauftemperaturen als durch die Heizkurve der RBC-Regelung vorgegeben. Gerade in den Übergangsmo­naten wie April, die durch teilweise große Außentemperaturschwankungen und hohe Sonneneinstrahlung gekennzeichnet sind, ist die Regelungsstrategie überlegen und kann eine signifikante Einsparung an Heizenergie und elektrische Energie für die Pumpen erzielen.

Thermischer Komfort

Zunächst wird der thermische Komfort auf Basis der gemessenen Raumtemperaturen in den Referenzzonen ausgewertet. Dabei wird der erzielte thermische Komfort in Haus G mit dem in den Häusern A und C verglichen. Bis auf die Vorlauftemperaturregelung kann davon ausgegangen werden, dass Betriebs- und Umgebungsbedingungen in allen Häusern ähnlich sind. Das individuelle Nutzungsverhalten, das den thermischen Komfort erheblich beeinflussen kann, kann sich jedoch teils deutlich unterscheiden.

In Abbildung 6.13 sind die Verläufe der Raumtemperaturen in den sieben Referenzzonen von Haus G im gesamten dreimonatigen Untersuchungszeitraum abgebildet. Zusätzlich sind die Komfortgrenzen der Kategorie II nach DIN EN 15251 während der Nutzungszeiten dargestellt. Wie zu erkennen ist, befinden sich die Raumtemperatur aller Zonen im Februar und in den ersten drei Märzwochen fast ausschließlich im vorgegebenen Komfortbereich von 20 °C bis 24 °C. Erkennbar ist auch ein Tages- und Wochengang. Die niedrigsten Raumtemperaturen treten meist zu Beginn eines Arbeitstages auf, steigen dann durch innere und äußere Wärmegewinne über den Tagesverlauf an und erreichen am Ende eines Arbeitstages ein Maximum. Durch Transmissionswärmeverluste fallen die Temperaturen über Nacht wieder ab. Dies entspricht grundsätzlich dem erwarteten Verhalten von Gebäuden mit einer Beheizung über TABS [43, 96]. An Wochenenden ist ein deutlicher Temperaturabfall teils unterhalb der Komfortgrenztemperatur von 20 °C zu erkennen. Dies beruht auf dem vorausschauenden Verhalten des MPC-Reglers und dem hinterlegten Belegungsplan, wonach die Komfortgrenzen für die Raumtemperatur nur während der Gebäudenutzungszeiten (Montag bis Freitag von 06:00 bis 18:00 Uhr) eingehalten werden müssen.

Wie zu erkennen ist, wird die untere Temperaturgrenze von 20 °C während der Nutzungszeiten zu keiner Zeit unterschritten. In der letzten Märzwoche und im April steigen die Raumtemperaturen signifikant an und überschreiten vor allem in drei der sieben Referenzzonen die obere Temperaturgrenze von 24 °C. Zurückzuführen ist dies auf hohe Wärmegewinne durch Solarstrahlung in diesem Zeitraum, vgl. Abbildung C.3 im Anhang. Die drei betroffenen Büros sind in südwestlicher Richtung ausgerichtet, wodurch sich gegen Nachmittag eine hohe Einstrahlung ergibt und die Raumtemperaturen stark ansteigen. Diese kurzzeitige, temporäre Überschreitung der oberen Komforttemperatur lässt sich

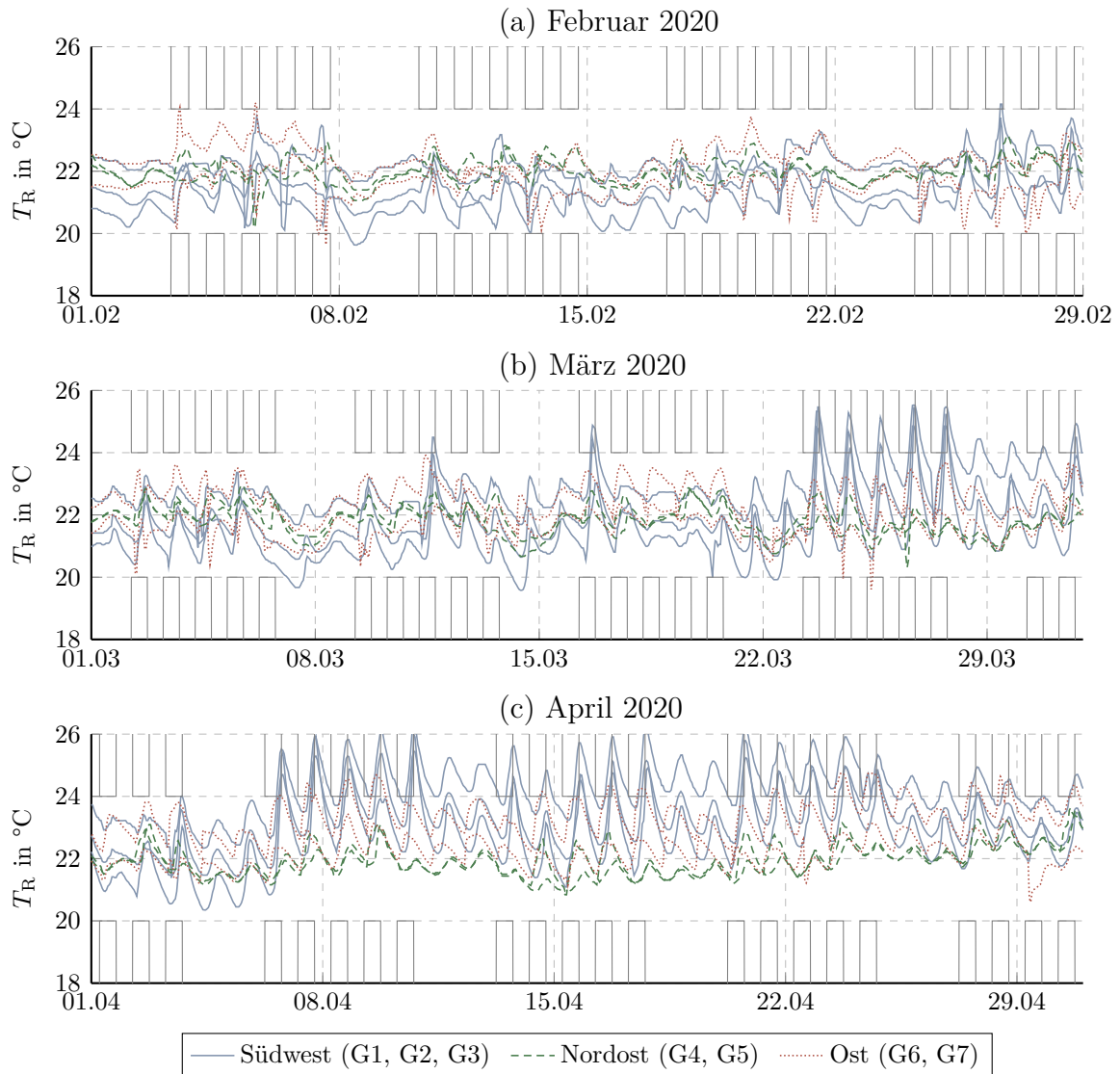


Abbildung 6.13: Verlauf der Raumtemperaturen in den sieben Referenzzonen von Haus G im Untersuchungszeitraum 1. Für die Lage der Zonen sei auf Abbildung 3.5 verwiesen.

auch durch die MPC-Regelung der TAD nicht vermeiden, da diese eine zu große Trägheit aufweisen. Eine Möglichkeit zur Vermeidung wäre die aktive Einbindung des vorhandenen Sonnenschutzes in die Regelungsstrategie. Wie jedoch im vorherigen Abschnitt beschrieben, resultiert die MPC-Regelung in einer deutlichen Reduzierung der Heizaktivität im April. Das zentrale Ziel des Reglers in der Heizperiode, die unterer Komfortgrenztemperatur nicht zu unterschreiten und dabei gleichzeitig möglichst wenig Heizenergie aufzuwenden, wird daher in allen Monaten erfüllt.

In Abbildung 6.14 ist der Anteil der erreichten Komfortkategorien nach DIN EN 15251 in den Häusern A, C und G dargestellt. Im Februar wird die Kategorie II in allen Häusern in über 98 % der Nutzungszeiten eingehalten, im März sind es in allen Häusern über 95 %. Die

Anforderung der DIN EN 15251 werden damit in beiden Monaten erfüllt. Im April steigt der Anteil an Raumluftzustände außerhalb der Kategorie II auf 7 % bis 11 %. Signifikante Unterschiede zwischen den drei betrachteten Häusern gibt es nicht. Die MPC-Regelung von Haus G führt damit weder zu einer deutlichen Verbesserung, noch zu einer Verschlechterung des thermischen Komforts im Vergleich zu den RBC-geregelten Gebäudeteilen A und C.

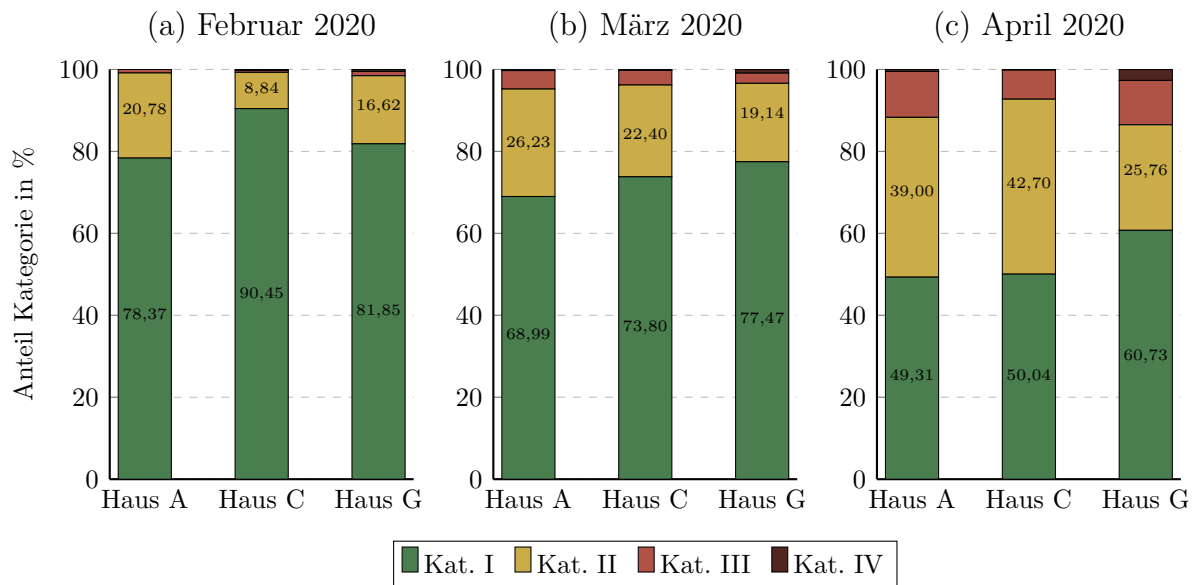


Abbildung 6.14: Anteile der Raumluftzustände an den Komfortkategorien in den Referenzräumen der Häuser A, C und G im Untersuchungszeitraum 1.

In Abbildung 6.15 sind die Gradstunden als mittlere tägliche Komfortverletzung der Kategorie II bezogen auf die Anzahl an vorhandenen Referenzzonen in den Häusern A, C und G dargestellt. Im Februar ergibt sich in Haus G eine mittlere Komfortverletzung von 0,11 Kh/d pro Zone, die hauptsächlich auf Raumtemperaturen $< 20^\circ\text{C}$ zurückzuführen ist. Im Vergleich zu den Häusern A und C ist dieser Wert deutlich höher, liegt jedoch unterhalb des Grenzwertes von 1 % der Nutzungszeit (0,24 Kh/d) und kann damit als unkritisch eingeschätzt werden. Vielmehr wird das vom MPC-Regler erwartete Verhalten widergespiegelt, wonach die Raumtemperaturen im Sinne eines möglichst geringen Einsatzes an Heizenergie an der unteren Komforttemperatur eingeregelt werden. Die Unterschreitung der Temperaturgrenze ist auf den kurzzeitigen Abfall der Raumtemperaturen durch Stoßlüften siehe Abbildung 6.13 zurückzuführen. In den Monaten März und April ist eine Verletzung der Kategorie II in allen Häusern ausschließlich auf die Überschreitung der oberen Temperaturgrenze von 24°C zurückzuführen. Induziert wird dies durch die bereits zuvor genannten hohen Wärmegewinne durch Solarstrahlung, vor allem in südlich bzw. südwestlich ausgerichteten Büroräumen. Im März wird der Grenzwert von 0,24 Kh/d in allen Häusern eingehalten, während im April dieser in Haus A und Haus G erheblich überschritten wird. Durch die manuelle Verwendung des Sonnenschutzes oder der Fenster und

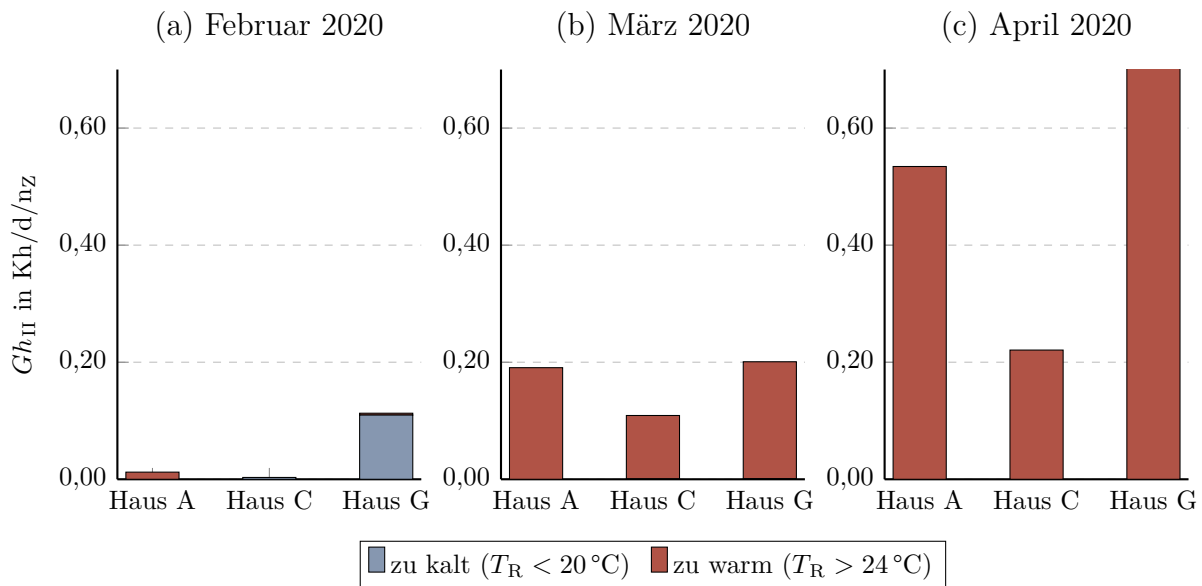


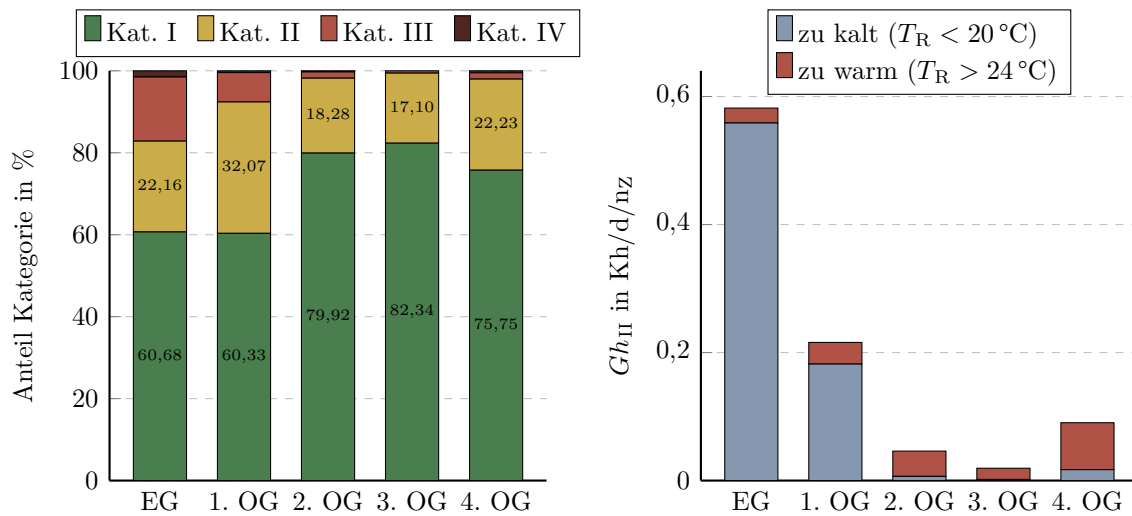
Abbildung 6.15: Verletzung der Komfortkategorie II als mittlere Gradstunden in den Referenzräumen der Häuser A, C und G im Untersuchungszeitraum 1.

Nachlüftungsklappen kann es darüber hinaus eine starke Abhängigkeit des thermischen Komforts vom Nutzungsverhalten geben.

Im Folgenden werden die Messdaten der 17 Datenlogger im Zeitraum vom 1. Februar bis 20. März 2020 in die Auswertung mit einbezogen. In [Abbildung 6.16a](#) ist hierfür der Anteil der Komfortkategorien in Haus G, unterteilt nach Stockwerken, dargestellt. [Abbildung 6.16b](#) zeigt darüber hinaus die mittlere tägliche Komfortverletzung der Kategorie II bezogen auf die Anzahl an messtechnisch erfassten Zonen (Datenlogger und Referenzzonen).

Im 2. bis 4. Obergeschoss wird die Kategorie II in mindestens 98 % der Nutzungszeit eingehalten. Die verbleibenden Komfortverletzungen gehen fast ausschließlich auf zu warme Raumluftzustände von $> 24\text{ °C}$ zurück. Raumtemperaturen von $< 20\text{ °C}$ treten hingegen kaum auf. Ein anderes Bild zeigt sich im Erdgeschoss und 1. Obergeschoss. Hier wird die Kategorie II nur in etwa 82 % (EG) bzw. 92 % (1. OG) eingehalten. Die Ursachen hierfür sind fast ausschließlich zu niedrige Raumtemperaturen. Im Erdgeschoss beläuft sich die tägliche mittlere Komfortverletzung pro Zone auf 0,6 Kh/d und liegt damit deutlich über dem geforderten Grenzwert.

Das Auftreten einer ausgeprägten vertikalen Temperaturdifferenz im Gebäude, die sich während des Heizbetriebs einstellt, wurde bereits frühzeitig im Grundmonitoring festgestellt [64]. Wie an dieser Stelle nachgewiesen wird, konnte dieses Problem bisher nicht nachhaltig behoben werden. Als Ursache für die niedrigen Raumtemperaturen in den untersten Etagen konnte zum einen ein erhöhter Wärmeverlust über den Fußboden gegenüber den größtenteils unbeheizten Untergeschossen sowie über die Außenfassade, bedingt



(a) Anteile der Raumlufzustände an den Komfortkategorien. (b) Verletzung der Komfortkategorie II.

Abbildung 6.16: Anteile der Komfortkategorien (a) und Verletzung der Komfortkategorie II als mittlere Gradstunden (b) in Haus G unter Einbeziehung der Datenlogger. Untersuchungszeitraum ist der 1. Februar bis 20. März 2020.

durch bauliche Undichtigkeiten, ausgemacht werden. Zum anderen ist die Energiezufuhr durch die teilweise vorhandenen Fußbodenheizungen konstruktiv bedingt beeinträchtigt, sodass ein Teil der Energiemengen zur Beheizung der Büroräume fehlt [37].

Die Mängel hinsichtlich einer Untertemperierung der untersten beiden Geschossebenen sind daher nicht auf die Änderung der Regelungsstrategie der TAD-Vorlauftemperatur zurückzuführen. Dennoch muss dies bei der Auslegung des Reglers berücksichtigt werden und hindert die volle Ausschöpfung des Potenzials der Regelungsstrategie. Infolgedessen müssen die Büroräume in den oberen Etagen gezielt übertempert werden, um annehmbare Raumtemperaturen in den unteren Etagen zu gewährleisten, was wiederum eine Erhöhung des Heizwärmebedarfs zur Folge hat. Theoretisch würde die etagenweise Regelung der TAD eine zielführende Maßnahme darstellen, dies ist jedoch baulich und systembedingt nicht realisierbar. Die „thermische Instandsetzung/Ertüchtigung“ der untersten Etagen stellt daher auch im Hinblick auf eine Optimierung der Regelungsstrategie eine entscheidende Voraussetzung für weitere Verbesserungen dar. Dennoch lässt sich aus den hier erzielten Ergebnissen ableiten, dass das grundlegende Konzept der MPC-Regelung, die Vorlauftemperatur und Umwälzpumpen der beiden TAD-Heizkreise eines gesamten Gebäudeteils auf Basis der sieben Referenzonen im 3. Obergeschoss zu regeln, einen zielführenden Ansatz darstellt. Die Voraussetzung, dass sich für diese Referenzonen sowohl das Verhalten der Nutzenden als auch das thermische Verhalten auf alle anderen Zonen eines TAD-Heizkreises übertragen lässt, ist demnach im ausreichende Maße erfüllt.

6.2.3 Untersuchungszeitraum 2

In Abbildung 6.17 sind zunächst die Witterungsbedingungen als Gradtage und als Monatssumme der horizontalen Globalstrahlung im Vergleich zum Langzeitmittel in den sechs untersuchten Monaten von November 2020 bis April 2021 dargestellt. Für den Verlauf der Außentemperatur und horizontalen Globalstrahlung sei auf die Abbildung C.4 und C.5 im Anhang verwiesen. Zu erkennen ist, dass die Monate November, Dezember, Januar

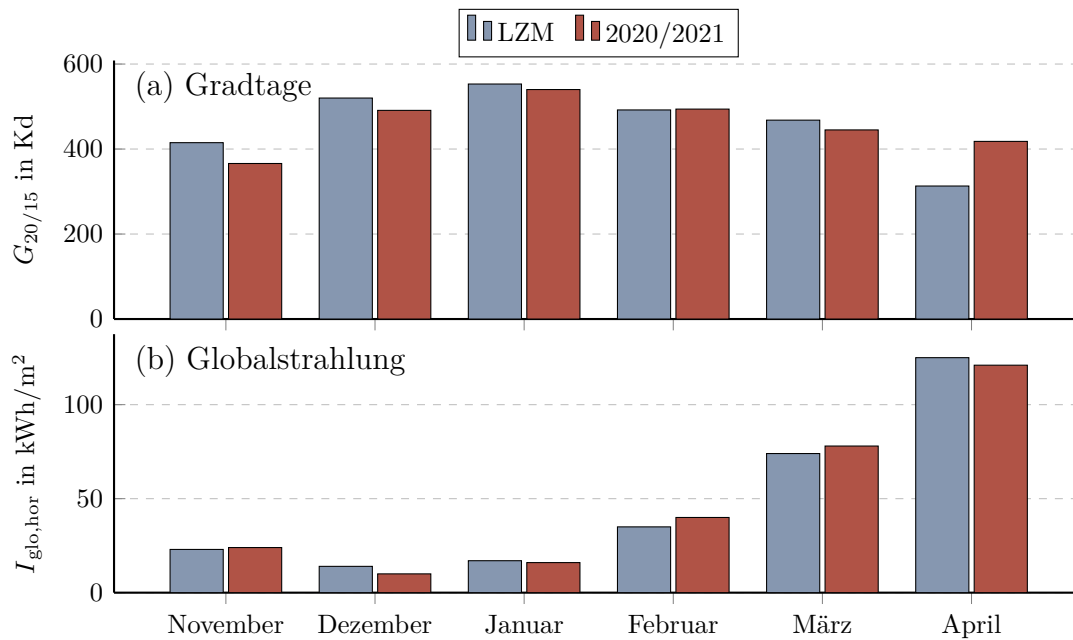


Abbildung 6.17: Witterungsbedingungen im Untersuchungszeitraum 2 mit (a) Gradtagen nach VDI 3807 und (b) Monatssumme der horizontalen Globalstrahlung. LZM ist das Langzeitmittel (2000-2019).

und März im Schnitt etwas geringere Gradtage aufweisen und damit etwas wärmer waren als im Langzeitmittel, während der Februar als durchschnittlich bezeichnet werden kann. Der April hingegen kann als deutlich kälter eingeordnet werden und die Gradtage liegen etwa 30 % über dem Langzeitmittel.

Hinsichtlich der solaren Einstrahlung gibt es keine besonderen Auffälligkeiten in den betrachteten Monaten, wie in Abbildung 6.17b zu erkennen ist. Der höchste Wert der horizontalen Globalstrahlung wird erwartungsgemäß im April erreicht, der niedrigste Wert im Dezember. Mit Ausnahme des Aprils kann der gesamte Untersuchungszeitraum 2 im Vergleich zum Langzeitmittel als etwas zu warm hinsichtlich der Gradtage und durchschnittlich bezüglich der solaren Einstrahlung bezeichnet werden.

Heizenergie

In Abbildung 6.18 ist der mittlere flächenbezogene Heizenergiebedarf der RBC-geregelten Gebäudeteile (B, D, E, F und H) von November 2020 bis April 2021 sowie der Mittelwert der vergangenen fünf bzw. sechs Betriebsjahre dargestellt. Die daraus ermittelten Korrekturfaktoren sind in Tabelle 6.10 aufgeführt. In allen sechs betrachteten Monaten

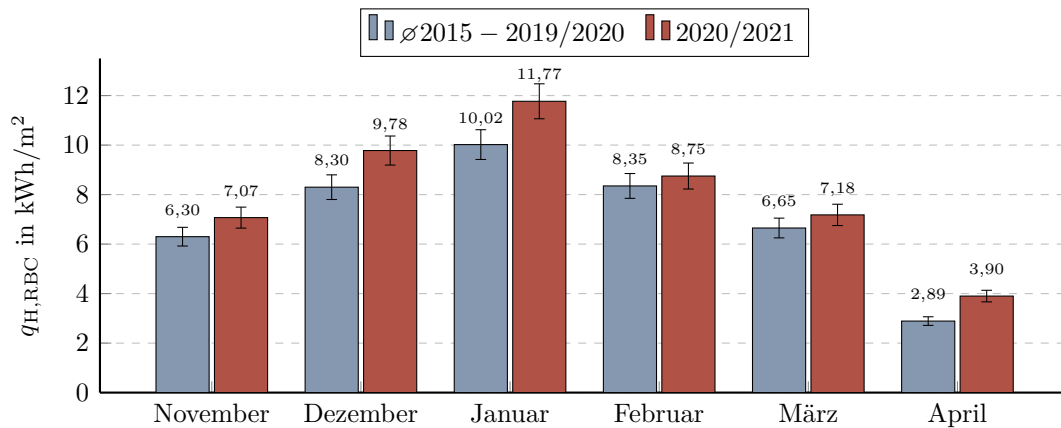


Abbildung 6.18: Gemessener TAD-Heizenergiebedarf der RBC-geregelten Häuser (B, D, E, F und H) und Mittelwert über die Jahre 2015 bis 2019 bzw. 2020 im Zeitraum 2.

liegt der Heizenergiebedarf oberhalb des Durchschnittswertes der letzten fünf Jahre. Der prozentuale Anstieg liegt zwischen 5 % (Februar) und 35 % (April), wie anhand der Korrekturfaktoren zu erkennen ist. Da eine Witterungsreinigung der Heizenergiebedarfe auf

Tabelle 6.10: Korrekturfaktoren $f_{H,kor}$ im Zeitraum 2.

Monat	Korrekturfaktor $f_{H,kor}$
November	1,122
Dezember	1,178
Januar	1,175
Februar	1,048
März	1,080
April	1,349

Basis der Gradtage durchgeführt wird und, wie zuvor gezeigt, der betrachtete Zeitraum eher als zu warm charakterisiert werden kann (bis auf den April), ist dieses Verhalten nicht auf den Einfluss von Witterungsbedingungen zurückzuführen. Vielmehr lassen sich zwei Einflussfaktoren identifizieren, die im Zusammenhang mit der COVID19-Pandemie stehen:

1. Durch die vermehrte Arbeit im Homeoffice ist die Belegung im gesamten Gebäude erheblich reduziert. Dies geht einher mit einer Reduktion der inneren Wärmegewinne durch Personen und Geräte, die unter normalen Umständen eine Erhöhung der Raumtemperaturen über den Tagesverlauf bewirken. Ein Teil dieser fehlenden Wärmegewinne wird durch eine erhöhte Wärmezufuhr über die TAD ausgeglichen, da das Gebäude trotz reduzierter Belegung vollständig beheizt werden muss.
2. Um eine Übertragung des Virus über Aerosole in Innenräumen zu verringern, werden geeignete Lüftungsmaßnahmen empfohlen [99]. Es ist daher davon auszugehen, dass insbesondere in mehrfach belegten Büroräumen eine Zunahme der Häufigkeit und Intensität von freier Fensterlüftung auftritt. Insgesamt ist daher von einer Erhöhung der Lüftungsverluste auszugehen, was einen erhöhten Heizenergiebedarf zur Folge hat.

Damit hat sowohl die Abwesenheit als auch die Anwesenheit von Personen einen Einfluss auf den Heizenergiebedarf. Welcher der beiden genannten Effekte überwiegt, kann nicht eindeutig festgestellt werden. Es bleibt jedoch die Erkenntnis, dass in der Heizperiode 2020/2021 ein überdurchschnittlich hoher Heizenergiebedarf vorliegt, der vor allem auf die Auswirkungen der COVID19-Pandemie zurückzuführen ist. Entsprechend der vorgestellten Methode zur Berechnung des erwarteten Heizenergiebedarfs, wird der gemittelte Heizenergiebedarf der MPC-geregelten Gebäudeteile über die vergangenen Betriebsjahre stets um den Korrekturfaktor erhöht.

Abbildung 6.19 zeigt den erwarteten und gemessenen Heizenergiebedarf der drei MPC-geregelten Gebäudeteile A, C und G. Zu bemerken ist, dass die MPC-Regelung in Haus A erst im Dezember und in Haus C erst im Januar aktiviert wurde. Mit Ausnahme des Novembers in Haus G ist der gemessene Heizenergiebedarf in der Heizperiode 2020/2021 stets niedriger als der erwartete Heizenergiebedarf. Die daraus resultierenden relativen und absoluten Einsparungen an Heizenergie sind in Tabelle 6.11 aufgeführt. In

Tabelle 6.11: Absolute und relative Einsparung an Heizenergie für Haus A, C und G. In Haus A wurde die MPC-Regelung erst im Dezember aktiviert, in Haus C erst im Januar (grau hinterlegte Felder zeigen RBC-Regelung).

Monat	Haus A		Haus C		Haus G	
	Abs. in kWh	Rel. in %	Abs. in kWh	Rel. in %	Abs. in kWh	Rel. in %
November	340	2,59	-580	-5,07	-15	-0,10
Dezember	1864	10,17	-336	-2,15	1844	8,79
Januar	3561	16,13	1060	5,79	2546	10,30
Februar	3611	22,65	827	6,19	2443	12,93
März	654	5,14	459	4,25	1412	9,13
April	1215	17,75	936	16,45	3717	41,73
Insgesamt	10 906	14,36	3282	6,81	11 946	11,42

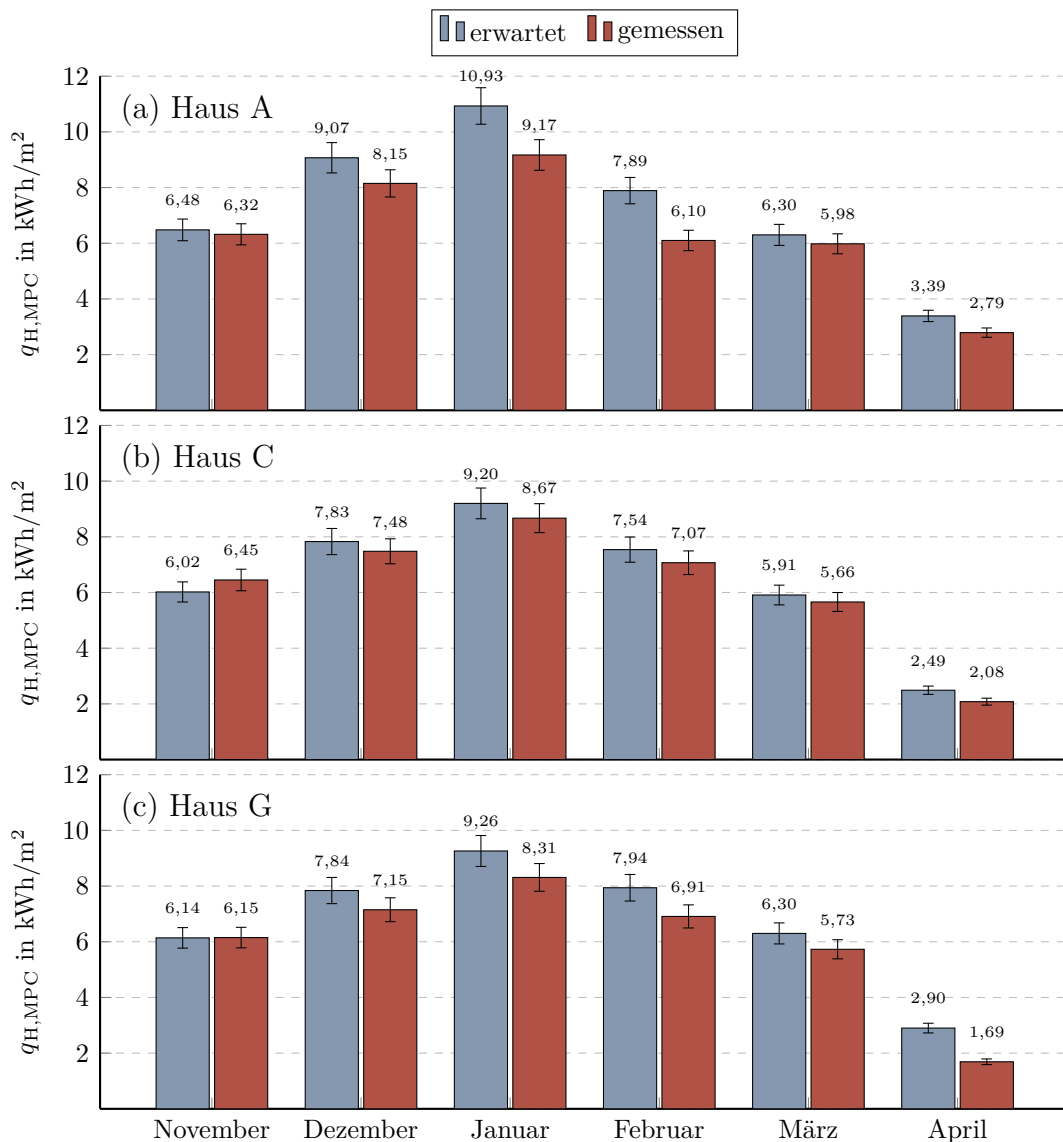


Abbildung 6.19: Erwarteter und gemessener TAD-Heizenergiebedarf der MPC-geregelten Häuser A, C und G im Zeitraum 2.

Haus A werden Einsparungen von 5 % (März) bis zu 22 % (Februar) erreicht. Für Haus C werden im Vergleich die niedrigsten Einsparungen von 4 % bis 16 % erzielt. Im November ist für Haus G ein sehr leichter Anstieg des Heizenergiebedarfs um 0,1 % festzustellen. Im April wird für Haus G die höchste Einsparung von 41 % erreicht. Insgesamt beläuft sich die Heizenergieeinsparung in den gesamten sechs Monaten auf 11,24 % relativ bzw. 26 134 kWh absolut. Im Vergleich zum Untersuchungszeitraum 1 konnte damit relativ betrachtet weniger Heizenergie eingespart werden.

Im Vergleich zum Untersuchungszeitraum 1 ist der Einfluss des Korrekturfaktors auf die erzielten Einsparungen deutlich ausgeprägter. Wird der Korrekturfaktor bei der Auswer-

tung vernachlässigt, d. h. die gemessenen Heizenergiebedarfe auf den Mittelwert über die vergangenen fünf bzw. sechs Betriebsjahre bezogenen, so ergibt sich für den gesamten Zeitraum für Haus A eine relative Einsparung von 2,1 %, für Haus C eine Erhöhung um +5,5 % und für Haus G eine Erhöhung um +1 %. Die MPC-Regelung der Gebäudeteile würde demnach kaum in einer Reduktion des Heizenergiebedarfs resultieren bzw. sogar eine leichte Erhöhung bewirken. Wie zuvor erwähnt, gibt es besonders in den hier betrachteten Zeiträumen eindeutige Effekte, die den Heizenergiebedarf des gesamten Gebäudes signifikant erhöhen und nicht durch eine reine Witterungsbereinigung berücksichtigt werden. Die hier verwendete Methode zur Korrektur des Heizenergiebedarfs auf Basis der vergangenen Betriebsjahre ist daher sinnvoll, da die hier erzielten Ergebnisse sonst durch die anderen genannten Effekte deutlich überlagert und verfälscht werden würden.

Sowohl zwischen den einzelnen Häusern als auch zwischen den einzelnen Monaten besteht ein teils signifikanter Unterschied hinsichtlich der Regler-Performance, was im Folgenden weiter analysiert wird. Bereits auf Basis der Simulationsergebnisse in Abschnitt 6.1.1 konnte gezeigt werden, dass das Potenzial zur Heizenergieeinsparung in Haus A am größten und in Haus C am geringsten ist. Dies spiegelt sich auch in den experimentellen Ergebnissen wider, wie aus Tabelle 6.11 zu entnehmen ist. Eine Ursache hierfür kann in der inhomogenen Verteilung der Raumtemperaturen in den Referenzzonen von Haus C gefunden werden. Abbildung 6.20 zeigt hierfür exemplarisch den Verlauf des Raumtemperaturbereichs, d. h. der minimalen, maximalen und mittleren Raumtemperatur über alle Referenzzonen des jeweiligen Hauses im Zeitraum vom 1. bis 14. Februar 2021. Es zeigt sich, dass der Bereich der Raumtemperaturen in Haus C sehr breit ist, während in Haus A nur ein sehr geringer Unterschied zwischen der minimalen und maximalen auftretenden Raumtemperatur vorliegt. Da der Regler bestrebt ist, die Raumtemperaturen aller Referenzzonen oberhalb der unteren Temperaturgrenze zu regeln, hat eine breite, inhomogene Raumtemperaturverteilung zur Folge, dass das Optimierungspotenzial zur Heizenergieeinsparung geringer ist. Die jeweilige Referenzzone mit der niedrigsten Raumtemperatur bestimmt damit für den gesamten Gebäudeteil, wie viel Heizenergie zur Einhaltung des Komfortbereichs nötig ist.

Eine weitere mögliche Ursache ist, dass besonders in den beiden zum Nordost-Heizkreis zugehörigen Referenzzonen C6 und C7* (vgl. Abbildung 3.5) durch den teils massiven Einfluss von Personen in Form von langanhaltender, teilweise über mehrere Tage andauernde Fensteröffnung keine ausreichend genauen und zuverlässigen Prozessmodelle mittels der in Kapitel 4 vorgestellten Parameteridentifikation erstellt werden konnten. In Abbildung 6.20 ist dies durch den ausgeprägten Temperaturabfall am Wochenende vom 05.02. bis 08.02. zu erkennen. Dadurch, dass Fensteröffnungen nicht explizit in den Zonenmodellen berücksichtigt werden, können erhebliche Modellfehler auftreten und die Vorhersagegenauigkeit nimmt hierdurch deutlich ab. Auch die implementierte Fensteröffnungserkennung versagt, wenn die Raumtemperatur durch Fensterlüftung über mehrere Tage abfällt. Insofern ist die MPC-Regelung sensitiv gegenüber Nutzungsverhalten, das über das normal erwartbare Verhalten hinausgeht. Dies ist jedoch kein alleiniger Nachteil von MPC, sondern tritt

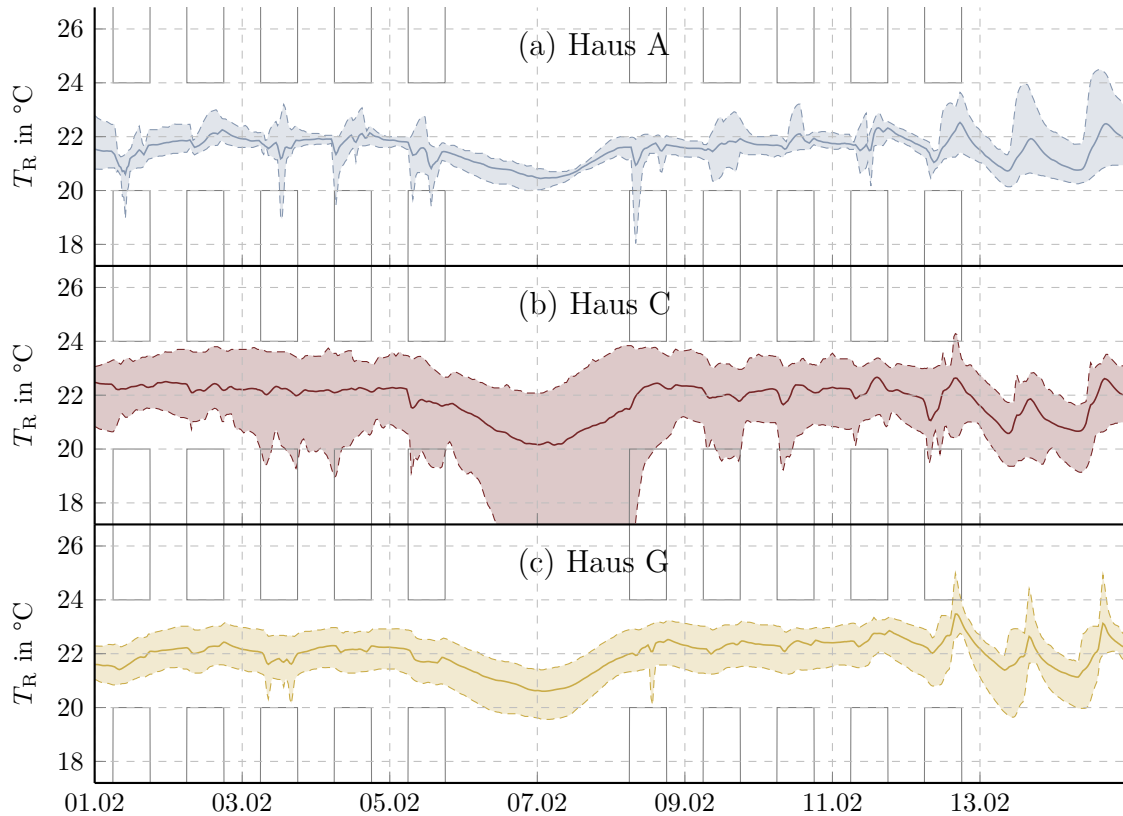


Abbildung 6.20: Verlauf der Raumtemperaturen in den Referenzzonen vom 1. bis 14. Februar 2021 in den Häusern A, C und G. Die durchgezogenen Linien entsprechen der mittleren Raumtemperatur, die gestrichelten Linien der minimalen und maximalen Raumtemperatur.

bei jeglicher Regelungsstrategie mit Rückführung der Regelgröße auf. Eine Sensibilisierung der Personen in den betroffenen Referenzzonen kann hier ggf. Abhilfe schaffen.

Wie auf Basis der Ergebnisse des Untersuchungszeitraums 1 herausgearbeitet werden konnte, ist der Nutzen und die Performance eines MPC-Reglers bei stark variierenden Witterungsverhältnissen, d. h. hohe Tag/Nacht-Unterschiede bzgl. der Außentemperatur, hohe solare Einstrahlung oder allgemein bei Witterungswechsel besonders ausgeprägt. Diese Witterungsverhältnisse treten vermehrt in Übergangsmonaten wie April auf, wo in beiden Untersuchungszeiträumen insgesamt die höchsten Einsparungen erzielt werden konnten. Auch der Februar war geprägt von einem Wechsel aus sehr kalten und außergewöhnlich warmen Perioden mit einem breiten Temperaturbereich von -10 °C bis 20 °C , wie in Abbildung C.5 zu erkennen ist. Hier konnte absolut betrachtet am meisten Heizenergie eingespart werden. Bei „statischen“ Witterungsverhältnissen hingegen nimmt der Nutzen des prädiktiven Reglerverhaltens im Allgemeinen ab, da es weniger Optimierungspotenzial im Sinne einer dynamischen Anpassung der Vorlauftemperaturen gibt. Solche Verhältnisse treten im November, Dezember und in Teilen des Januars auf. In Kombination mit geringen solaren Wärmegewinnen resultiert dies in den geringen Heizenergieeinsparungen.

Auffällig ist der Monat März, in dem trotz vergleichsweise hoher solarer Einstrahlung und moderaten Außentemperaturen nur eine geringe Einsparung erzielt werden konnte.

Abbildung 6.21 zeigt die Abhängigkeit des täglichen TAD-Heizenergiebedarfs vom Tagesmittlere Wert der Außentemperatur für die Häuser A, C und G im Zeitraum 1. Januar bis 30. April. Dargestellt ist der RBC-Betrieb für den Zeitraum in den Jahren 2015 bis 2020 (bzw. 2015 bis 2019 für Haus G) und der MPC-Betrieb im Jahr 2021. Für die RBC-Regelung zeigt sich für alle Häuser ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen Außentemperatur und TAD-Heizenergie. Gut zu erkennen ist die Heizgrenztemperatur (Schnittpunkt der Geraden mit der x-Achse), die bei allen Häusern bei etwa 13 °C bis 14 °C liegt. Der MPC-Betrieb weist für Haus A und C eine sehr ähnliche Charakteristik auf. Im Vergleich zum RBC-Betrieb ist der Heizenergiebedarf sowohl bei sehr niedrigen als auch bei hohen Außentemperaturen verringert. In einem Bereich von ca. 4 °C bis 9 °C mittlerer Außentemperatur liegen beide Kurven übereinander, d. h. das Einsparungspotenzial der MPC-Regelung ist in diesem Außentemperaturbereich am geringsten, woraus sich eine mögliche Erklärung für die niedrigeren Heizenergieeinsparungen im März ergibt. Die Heizgrenztemperatur verschiebt sich für beide Häuser auf etwa 12 °C. Eine etwas andere Charakteristik zeigt sich bei Haus G. Hier nimmt die Differenz des Heizenergiebedarfs zwischen RBC- und MPC-Betrieb mit abnehmender Außentemperatur kontinuierlich zu. Die Heizgrenztemperatur verschiebt sich hingegen nicht. Die abweichende Verhaltensweise der MPC-Regelung können auf die unterschiedlichen Ausrichtungen der Häuser zurückgeführt werden. Die Häuser A und C sind im Westflügel des Gebäudes angeordnet, während sich Haus G im Nordflügel befindet (siehe Abbildung 3.1a). Dadurch ergeben sich unterschiedliche Verhältnisse hinsichtlich der solaren Einstrahlung auf die Fassade bzw. Fenster und damit hinsichtlich der hierdurch erzielten Wärmegegewinne.

Thermischer Komfort

Zunächst werden zur Bewertung des thermischen Komforts die Messdaten für die Raumtemperaturen in den Referenzzonen im 3. Obergeschoss der Häuser A, C und G betrachtet. Abbildung 6.22 zeigt die Anteile an den Komfortkategorien nach DIN EN 15251 in den vergangenen sieben Betriebsjahren. Auswertungszeitraum ist jeweils der Zeitraum mit aktiver MPC-Regelung in den Jahren 2020 bis 2021 (vgl. Abbildung 6.7). Hierdurch kann der erzielte thermische Komfort mit MPC- und RBC-Regelung direkt verglichen werden.

In den Häusern A und G wird in der Heizperiode 2020/2021 mit 86 % der im Vergleich zu allen Betriebsjahren höchste Anteil von Kategorie I erreicht. Die für das Gebäude anzuwendende Kategorie II wird hier in 99 % der Nutzungszeit eingehalten. Für Haus G ist zu beachten, dass die Heizperiode 2019/2020 bereits einen Zeitraum mit aktiver MPC-Regelung (1. Februar bis 30. April) enthält. Hier konnte mit 80 % der zweithöchste Wert für Kategorie I erreicht werden. Es lässt sich damit für die Häuser A und G eine eindeutige Verbesserung des thermischen Komforts hinsichtlich eines höheren Anteils an

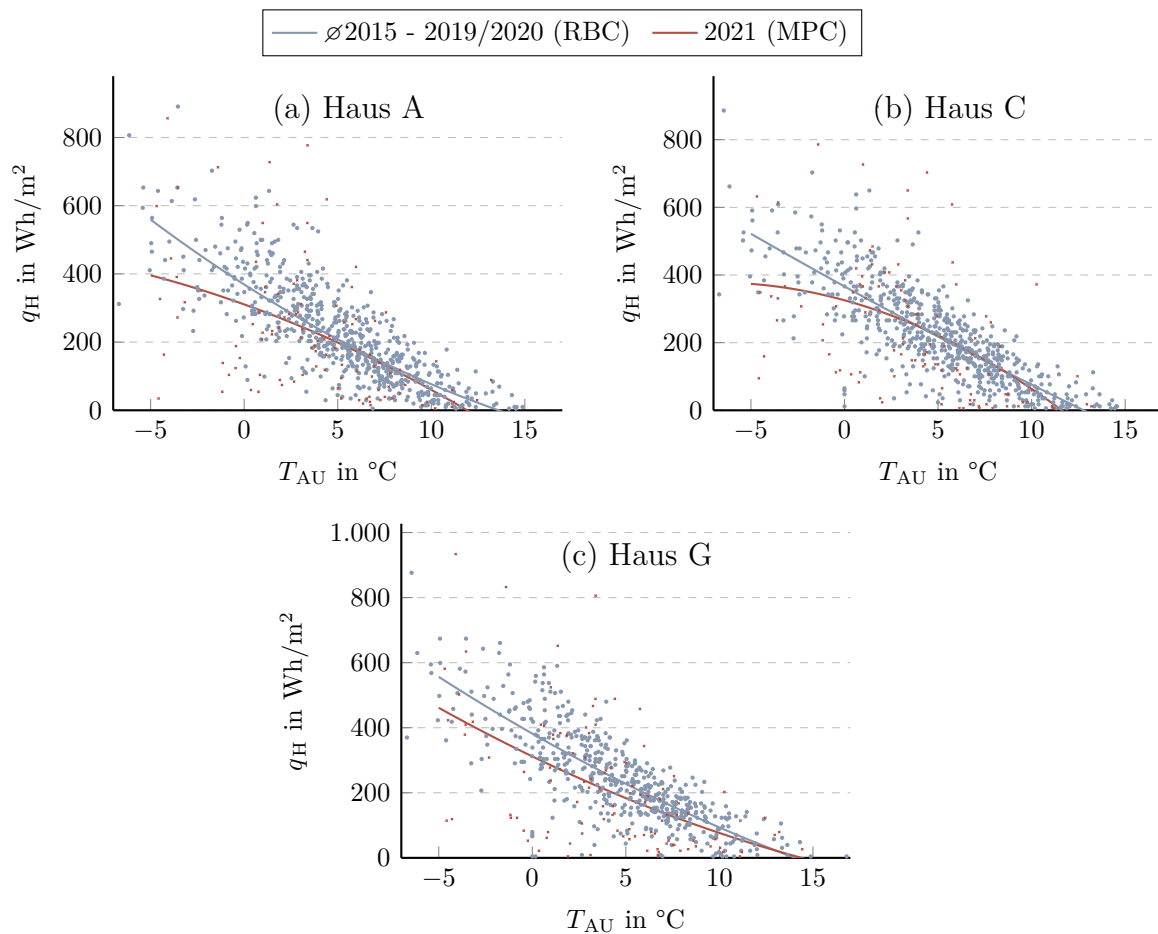


Abbildung 6.21: Tagesmittelwerte der Außentemperatur und des TAD-Heizenergiebedarfs der MPC-geregelten Häuser im Zeitraum 1. Januar bis 30. April 2021 im Vergleich zu den Vorjahren 2015 bis 2019 bzw. 2020.

Raumluftzuständen der Kategorie I mit dem Einsatz der MPC-Regelungsstrategie nachweisen.

Ein anderes Bild zeigt sich hingegen in Haus C. Hier wird mit 64 % keine eindeutige Erhöhung des Anteils von Kategorie I im Vergleich zu den Vorjahren erzielt. Die Kategorie II wird jedoch in etwa 97 % der Nutzungszeit erreicht, was vergleichbar mit den Werten der vergangenen Betriebsjahre ist. Wie bereits bei der Analyse der Heizenergieeinsparung erläutert, ist dies auf die inhomogene Temperaturverteilung in den Referenzzonen und ggf. einer schlechteren Vorhersagegenauigkeit einiger Referenzzonenmodelle, bedingt durch den Einfluss von Personen, zurückzuführen. Neben einer geringeren Heizenergieeinsparung führt dies damit zu Einschränkungen hinsichtlich der Einhaltung der Komfortgrenzen in den Referenzzonen. Dennoch ist der thermische Komfort für Haus C in der Heizperiode 2020/2021 nicht erkennbar schlechter als in den Vorjahren.

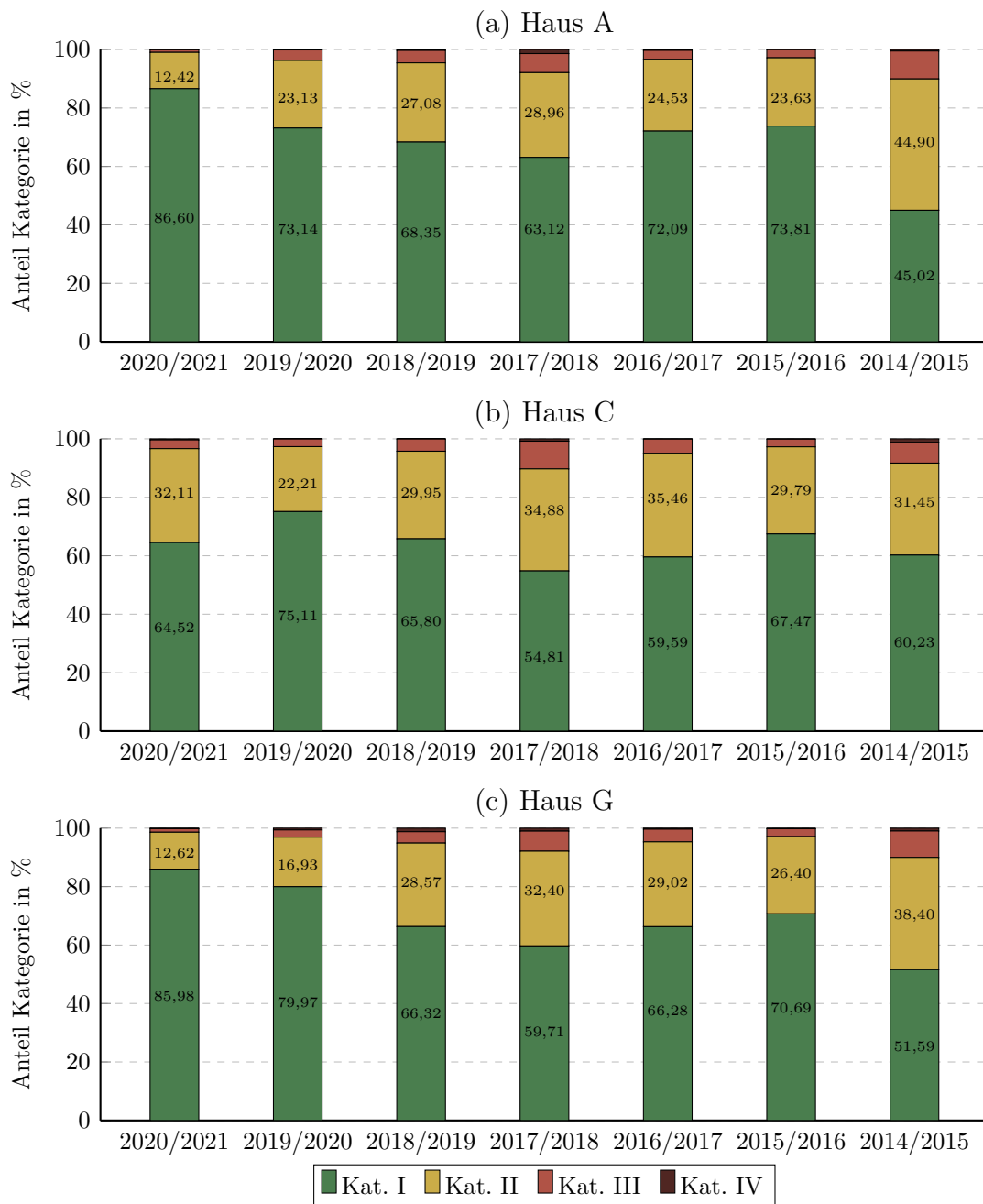
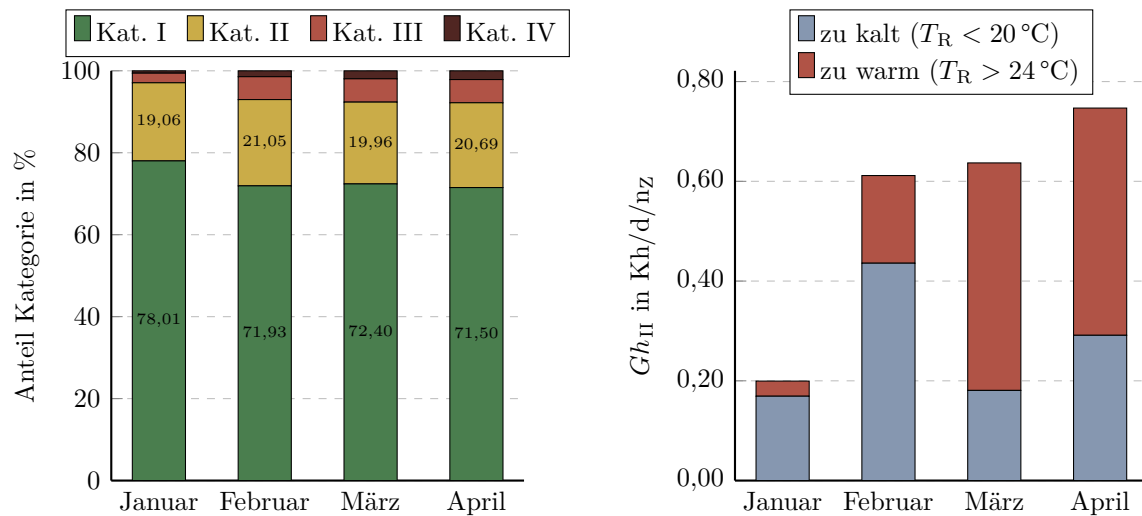


Abbildung 6.22: Vergleich der Anteile der Raumluftzustände an den Komfortkategorien in den Betriebsjahren 2014 bis 2021 auf Basis der Raumtemperaturen in den Referenzzonen. Auswertungszeitraum ist jeweils der Zeitraum mit aktiver MPC-Regelung, siehe Abbildung 6.7.

Die Gesamtauswertung des Komforts für die Häuser A, C und G im Zeitraum 1. Januar bis 30. April unter Einbeziehung der Messdaten der Datenlogger und der Referenzräume ist in Abbildung 6.23 abgebildet. Im Januar konnte mit über 97% der höchste Anteil an Kategorie II erreicht werden, siehe Abbildung 6.23a. Die mittlere Komfortverletzung

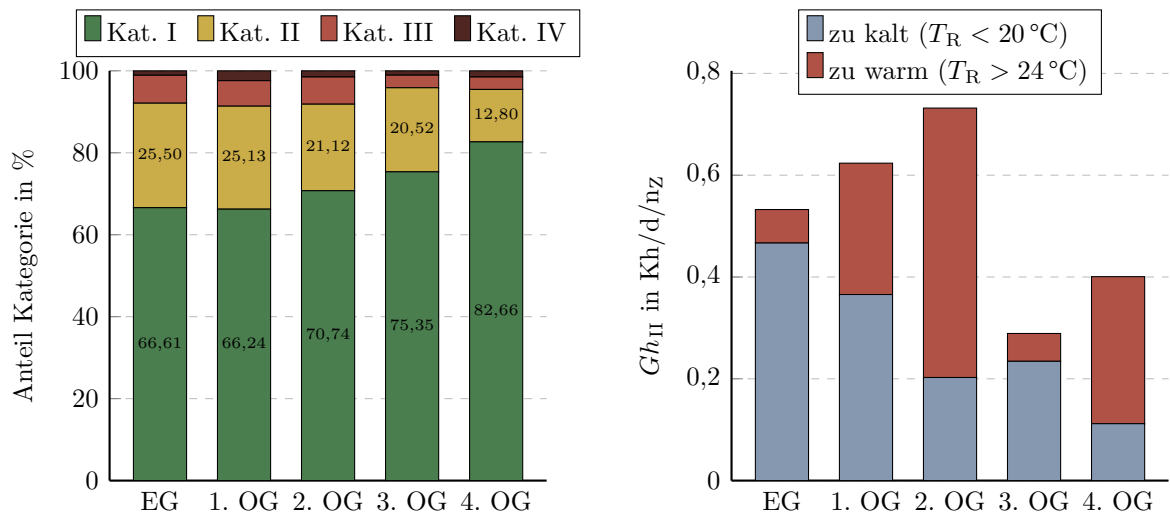


(a) Anteile der Raumluftzustände an den Komfortkategorien. (b) Verletzung der Komfortkategorie II.

Abbildung 6.23: Anteile der Raumluftzustände an den Komfortkategorien und Verletzung der Komfortkategorie II als mittlere Gradstunden in den Häusern A, C und G unter Einbeziehung der Datenlogger. Auswertungszeitraum ist der 1. Januar bis 30. April 2021.

pro Zone dieser Kategorie beläuft sich auf 0,2 Kh/d, wobei diese größtenteils auf zu kalte Raumluftzustände zurückzuführen ist, siehe Abbildung 6.23b. In den übrigen Monaten wird die Kategorie II in etwa 93 % der Nutzungszeit eingehalten und liegt damit leicht unterhalb des von der DIN EN 15251 geforderten Wertes von 95 %. Der Anteil an zu warmen Raumluftzuständen nimmt von Januar bis April sukzessive zu, was auf die Zunahme der kurzzeitig auftretenden Wärmegewinne durch Solarstrahlung zurückzuführen ist. Insgesamt zeigt sich jedoch in allen Häusern auf Basis der 80 messtechnisch erfassten Büroräume (entspricht etwa 21 % der insgesamt vorhandenen Büroräume) ein sehr gutes thermisches Komfortniveau.

In Abbildung 6.24 ist die Gesamtauswertung des thermischen Komforts in den Häusern A, C und G nach Stockwerk dargestellt. Wie bereits zuvor festgestellt, treten im Erdgeschoss und im 1. Obergeschoss vermehrt zu kalte Raumluftzustände auf. Die Kategorie II wird jedoch in allen Stockwerken zu mindestens 91 % eingehalten. Im 2. und 4. Obergeschoss ist die Komfortverletzung hauptsächlich auf zu warme Raumluftzustände zurückzuführen. Es ist daher ein vertikaler Temperaturgradient im Gebäude festzustellen, bedingt durch die bereits genannten konstruktiven und baulichen Mängel. Der Unterschied zwischen den einzelnen Stockwerken ist jedoch insgesamt nicht so ausgeprägt wie im ersten Untersuchungszeitraum. Die geringste Komfortverletzung tritt im 3. Obergeschoss auf, in dem sich auch die Referenzzonen befinden. Auch diese Ergebnisse zeigen, dass, unter Berücksichtigung der vertikalen Temperaturverteilung, eine MPC-Regelung der einzelnen



(a) Anteile der Raumluftzustände an den Komfortkategorien.

(b) Verletzung der Komfortkategorie II.

Abbildung 6.24: Anteile der Raumluftzustände an den Komfortkategorien (a) und Verletzung der Komfortkategorie II als mittlere Gradstunden (b) in den Häusern A, C und G nach Stockwerk unter Einbeziehung der Datenlogger. Auswertungszeitraum ist der 1. Januar bis 30. April 2021.

Gebäudeteile auf alleiniger Basis der vorhandenen Referenzzonen einen praktikablen Ansatz darstellt.

6.2.4 Ausweitung der MPC-Regelung auf das Gesamtgebäude

In diesen Abschnitt soll kurz darauf eingegangen werden, welche konkreten Schritte nötig sind, um eine Ausweitung der in dieser Arbeit entwickelten Regelungsstrategie auf das Gesamtgebäude zu realisieren. Bisher wurde der Regler nur zur Regelung der zwei vorhandenen TAD-Heizkreise in den Häusern A, C und G implementiert. Es stellt sich daher die Frage, wie die TAD-Heizkreise in allen anderen Gebäudeteilen mit einer MPC-Regelungsstrategie ausgestattet werden können.

Für das zentrale Hochhaus (Haus E) ist die Umsetzung und Übertragung der Regelungsstrategie sehr einfach möglich, da dort insgesamt 13 Referenzzonen (im 5. und 10. Obergeschoss) vorhanden sind, die vom Regler als Prozessmodelle genutzt werden können. Dies erfordert die Erstellung und Durchführung der Parameteridentifikation für die entsprechenden Zonenmodelle. Eine zusätzliche Schwierigkeit ergibt sich in Haus E dadurch, dass die vertikale Temperaturverteilung durch die größere Anzahl an Stockwerken noch ausgeprägter ist. Die Implementierung muss daher auch hier durch eine zusätzliche Messkampagne begleitet werden, um sicherzustellen, dass auch in den unteren Etagen ein akzeptables Niveau an thermischem Komfort eingehalten wird.

Für die übrigen Häuser B, D, F und H besteht die Herausforderung, dass dort keine Referenzzonen vorhanden sind. Es besteht daher zum einen keine Möglichkeit, Prozessmodelle unter Verwendung von Messdaten mittels Parameteridentifikation zu erstellen, zum anderen gibt es auch keine Rückkopplung der Raumtemperaturen. Ein zielführender Ansatz wäre die Kombination und Integration von mehreren Zonenmodellen derjenigen Referenzzonen, die in den jeweiligen angrenzenden Gebäudeteilen vorhanden sind. Für Haus B können die Zonenmodelle der Häuser A und C kombiniert werden, für Haus D die aus den Häusern C und E und für Haus F die aus den Häusern E und G. Das Haus H als abschließendes Gebäudeteil des Nordflügels kann identisch zu Haus G geregelt werden. Diesem Vorgehen liegt die Annahme zugrunde, dass alle Gebäudeteile untereinander ein ähnliches thermisches Verhalten aufweisen. Diese Annahme ist jedoch auch bei der Standard-Regelungsstrategie impliziert, da dort alle TAD-Heizkreise mit identischen Heizkurven gesteuert werden. Eine Implementierung der MPC-Regelungsstrategie sollte durch zusätzliche Messtechnik, z. B. in Form von Temperatur/Feuchte-Datenloggern begleitet werden.

6.2.5 Zusammenfassung der experimentellen Untersuchungsergebnisse

In diesem Abschnitt wird gezeigt, dass die MPC-Regelungsstrategie im realen Gebäudebetrieb des Demonstrators eine signifikante Einsparung an Heizenergie sowie eine Erhöhung des thermischen Komforts im Vergleich zur herkömmlichen RBC-Regelung erzielt. In den zwei Untersuchungszeiträumen mit einer Gesamtdauer von neun Monaten liegt die monatlich erzielte Heizenergieeinsparung in einem Bereich von 4 % bis 74 % . Die über alle Untersuchungszeiträume und betrachteten Gebäudeteile summierte absolute Heizenergieeinsparung beträgt 36 132 kWh und damit 13,7 % relativ. Es zeigt sich dabei eine deutliche Abhängigkeit von den vorliegenden Witterungsverhältnissen. Der Nutzen der MPC-Regelungsstrategie ist besonders ausgeprägt bei markanten Witterungswechseln oder stark variierenden Witterungsverhältnissen, wie sie vor allem in Übergangsmonaten wie April auftreten. Dort kann eine Verringerung des Heizenergiebedarfs im Bereich von 42 % bis 74 % nachgewiesen werden. Zurückzuführen ist dies vor allem auf die Reduktion der Zeiten, in der das Gebäude aktiv beheizt wird. Die Laufzeiten der Umwälzpumpen der MPC-geregelten Heizkreise werden um bis zu 50 % im Vergleich zur RBC-Regelung reduziert, während das Vorlauftemperaturniveau während der Heizzeiten teilweise leicht zunimmt.

Hinsichtlich des thermischen Komforts kann vor allem im zweiten Untersuchungszeitraum eine Erhöhung des Anteils an Raumluftzuständen innerhalb der Komfortkategorie I in den Gebäudeteilen A und G im Vergleich zu den vorangegangenen Betriebsjahren festgestellt werden. Die Kategorie I wird dort in 86 % der Nutzungszeit eingehalten. Im Gebäudeteil C kann hingegen keine eindeutige Verbesserung des thermischen Komforts erzielt

werden. Dies kann auf eine inhomogene Verteilung der Raumtemperaturen in den Referenzzonen zurückgeführt werden, die in Gebäudeteil C besonders ausgeprägt ist. Des Weiteren beeinflusst das nonkonforme Nutzungsverhalten in einigen Referenzzonen die Regler-Performance negativ. Durch die zusätzliche messtechnische Erfassung von bis zu 61 weiteren Büroräumen mittels Temperatur/Feuchte-Datenloggern kann gezeigt werden, dass es eine vertikale Temperaturverteilung innerhalb des Gebäudes gibt, die eine vollständige Ausschöpfung des Potenzials der Regelungsstrategie mindert. Dadurch, dass in den unteren Stockwerken allgemein zu niedrige Raumtemperaturen vorherrschen, müssen die Büroräume in den oberen Etagen leicht übertemperierte werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wird eine Regelungsstrategie auf Basis des Prinzips der Modellbasierten Prädiktiven Regelung (MPC) entwickelt und in einem großen Verwaltungsgebäude implementiert. Ziel des Reglers ist die Optimierung des thermischen Komforts und der Energieeffizienz des Gebäudes. Zunächst werden hierfür die grundlegenden Anforderungen an die Steuerung und Regelung von Gebäuden definiert und das Prinzip der Modellbasierten Prädiktiven Regelung eingeführt. Darüber hinaus erfolgt eine Beschreibung des Gebäude-, Energie- und Messkonzeptes des in dieser Arbeit betrachteten Gebäudes. Besondere Bedeutung für die Regelungsstrategie haben dabei die insgesamt 32 Referenzzonen des Gebäudes.

Anschließend wird das im Kern von MPC stehende Prozessmodell entwickelt, welches das thermische und dynamische Verhalten von Referenzzonen im Gebäude beschreibt. Dieses ist als Grey-Box-Modell ausgeführt, das eine vereinfachte physikalische Struktur basierend auf einem thermischen Widerstands-Kapazitätsnetzwerk und ein Parametertraining unter Verwendung von Messdaten aus dem Gebäudebetrieb kombiniert. Dabei kann gezeigt werden, dass es zielführender ist, nur einen kleinen Satz an Parametern mittels Parametertraining abzuschätzen, da hierdurch eine Überanpassung der Modellparameter verhindert werden kann. Mittels einer globalen Sensitivitätsanalyse werden dabei die relevantesten Modellparameter identifiziert. Des Weiteren wird gezeigt, dass eine rekursive Ausführung des Parametertrainings im zeitlichen Abstand von etwa sieben Tagen und einem Trainingszeitraum von 21 Tagen die beste Vorhersageperformance erzielt. Mit der dargestellten Methode können damit Zonenmodelle mit einer ausreichenden Vorhersagegenauigkeit und sehr guten Übertragbarkeit erstellt werden, sodass diese als Regler-Prozessmodelle geeignet sind.

Darauffolgend wird die Modellbasierte Prädiktive Regelungsstrategie unter Verwendung der zuvor erstellten Zonenmodelle entwickelt. Die zu minimierende Kostenfunktion ist so formuliert, dass diese für sowohl den Heiz- als auch für den Kühlbetrieb gültig ist, wobei sich durch die unterschiedlichen Steuergrößen zwei verschiedene Arten von Optimierungsproblemen ergeben. Des Weiteren wird eine Störgrößenvorhersage und Zustandsschätzung auf Basis eines Unscented Kalman Filter entwickelt. Bei der Integration der MPC-Regelungsstrategie wird der Eingriff in das bestehende Gebäudeautomationssystem so gering wie möglich gehalten, sodass eine robuste Betriebsweise ermöglicht wird.

Anschließend wird die Performance des MPC-Reglers zunächst mittels Simulationen untersucht und mit der Standard-Steuerungsstrategie verglichen. Ziel ist es, die Funktionsfähigkeit und das Potenzial des Reglers nachzuweisen sowie die grundlegenden Reglerparameter einzustellen. Dabei zeigt sich, dass im Heizfall durch Regelung der Vorlauftemperatur und Umwälzpumpe sowohl eine signifikante Einsparung an Heizenergie als auch eine Verbesserung der Raumtemperaturregelung erreicht wird. Dies ist vor allem auf eine Verringerung

des gesamten Raumtemperaturniveaus zurückzuführen, sodass der Anteil an Raumluftzuständen innerhalb der Komfortkategorie I nach DIN EN 15251 deutlich gesteigert wird. Das Potenzial zur Heizenergieeinsparung lässt sich mit 18 % bis 23 % abschätzen. Im Kühlbetrieb ist das Optimierungspotenzial der MPC-Regelung geringer, da durch die alleinige Regelung der Umwälzpumpen der Einfluss auf das Raumtemperaturniveau geringer ist. Dennoch kann hierdurch eine Reduktion der Laufzeit der Umwälzpumpen und eine leichte Verbesserung des thermischen Komforts erzielt werden.

Abschließend erfolgt die experimentelle Untersuchung des MPC-Reglers in drei Gebäudeabschnitten während zweier Heizperioden mit einem zeitlichen Umfang von insgesamt neun Monaten. Im Vergleich zur herkömmlichen, heizkurvenbasierten Steuerungsstrategie kann in den Untersuchungszeiträumen im Monatsmittel eine Einsparung an Heizenergie von 8 % bis 22 % messtechnisch nachgewiesen werden. Das Einsparungspotenzial ist jedoch stark abhängig von den vorherrschenden Witterungsverhältnissen. So kann vor allem in Übergangsmonaten wie April, charakterisiert durch große Außentemperaturschwankungen und hohe solare Einstrahlung, eine Einsparung an Heizenergie von bis zu 75 % erzielt werden. Es zeigt sich, dass die MPC-Regelungsstrategie die Zeiten, in denen das Gebäude aktiv beheizt wird um etwa die Hälfte reduziert, während das Vorlauftemperaturniveau in den Heizzeiten leicht ansteigt. Damit einhergehend ist daher auch eine Verringerung der Laufzeit der Umwälzpumpe und damit des Strombedarfs der Pumpen. Hinsichtlich des thermischen Komforts zeigt sich in den Gebäudeteilen A und G eine deutliche Verbesserung im Vergleich zu den vorangegangenen sechs Betriebsjahren. Es wird ein deutlich höherer Anteil an Raumluftzuständen innerhalb der Komfortkategorie I nach DIN EN 15251 erreicht. In Gebäudeteil C zeigt sich hingegen keine deutliche Verbesserung des Komforts, was auf eine inhomogene Verteilung der Raumtemperaturen innerhalb der Referenzzonen und auf nonkonformes Verhalten der Nutzenden zurückzuführen ist. Durch den Einsatz zusätzlicher Temperatur/Feuchte-Datenlogger in etwa 21 % der vorhandenen Büroräume konnte zudem die Ausprägung eines vertikalen Temperaturunterschieds im Gebäude nachgewiesen werden. Durch diesen Temperaturunterschied wird die Ausschöpfung des vollen Potenzials der Regelungsstrategie verhindert, da hierdurch Büroräume in den oberen Stockwerken übertemperiert werden müssen, um in den unteren Stockwerken ein angenehmes Temperaturniveau zu erreichen.

Für weitergehende Betrachtungen bietet sich zum einen die experimentelle Untersuchung des MPC-Reglers im Kühlbetrieb an, da dies in dieser Arbeit nur auf Basis von Simulationen erfolgt ist. Zum anderen sollte auch die Umschaltung zwischen Heiz- und Kühlbetrieb in den MPC-Regelungsalgorithmus mit einbezogen werden. Darauf basierend kann eine ganzjährige Analyse der Reglerperformance durchgeführt werden. Die bisherigen experimentellen Ergebnisse legen nahe, dass es einen breiten Bereich an Außenbedingungen gibt, in denen das Gebäude weder aktiv beheizt, noch gekühlt werden muss und daher ein signifikantes Einsparpotenzial bieten. Des Weiteren sollte eine Ausweitung der MPC-Regelungsstrategie auf alle Gebäudeteile erfolgen. Die dafür nötigen Schritte sind in dieser Arbeit bereits skizziert.

A Modellierung des Gebäudes

A.1 TAD-Modell

Tabelle A.1: Materialeigenschaft für die Materialien der TAD nach DIN EN ISO 10456 [24] und DIN 4108-4 [28].

Material	Spez. Wärmekapazität	Wärmeleitfähigkeit	Dichte
	c J/(kgK)	λ W/(mK)	ρ kg/m ³
Stahlbeton	2400	0,30	1000
Gipsfaserplatte	1000	0,38	1225
Gipsputz	1000	0,40	1000
Calciumsulfatestrich	1000	1,20	1000
Teppichfließen	300	0,06	1300
Wasser	4190	-	-

Tabelle A.2: Bauphysikalische Daten und Maße der TAD.

Material	Dicke	Wärmeleitwiderstand	Wärmekapazität
	d m	$r_{th,\lambda}$ (m ² K)/W	c_{th} J/(m ² K)
Untere Bauteilhälfte			
Stahlbeton	0,102	0,0408	244 800
Gipsputz	0,01	0,025	10 000
Obere Bauteilhälfte			
Stahlbeton	0,198	0,0792	475 200
Hohlraumboden	0,085	0,5130	105
Gipsfaserplatte	0,018	0,0474	22 050
Calciumsulfatestrich	0,0335	0,0292	73 500
Teppichfließen	0,006	0,1000	2340

Tabelle A.3: Rohreigenschaften der TAD.

Eigenschaft	Symbol	Wert
Rohraußendurchmesser	δ	0,02 m
Rohrwandstärke	d_r	0,002 m
Rohrverlegeabstand	d_x	0,15 m
Wärmeleitfähigkeit Rohrmaterial (PEX)	λ_r	0,41 W/(mK)

Tabelle A.4: Wärmeübergangswiderstände für die TAD.

Eigenschaft	Symbol	Wert in (m ² K)/W
Wärmeleitwiderstand (untere Bauteilhälfte)	$r_{th,\lambda,u}$	0,0658
Wärmeleitwiderstand (obere Bauteilhälfte)	$r_{th,\lambda,o}$	0,7687
Wärmeübergangswiderstand Strahlung	$r_{th,str}$	0,179
Wärmeübergangswiderstand Konvektion (abwärts)	$r_{th,kon,u}$	2,000
Wärmeübergangswiderstand Konvektion (aufwärts)	$r_{th,kon,o}$	0,400

A.1.1 EMPA-Modell nach [57]

Die Fläche der TAD A_{TAD} und der Auslegungswärmestrom \dot{Q}_{nom} sind abhängig von der betrachteten Zone. Die Flächen der TAD kann sind in Tabelle A.5 gegeben. Die Auslegungstemperaturdifferenz ΔT_{nom} beträgt 4 K.

Spezifischer Massenstrom:

$$\dot{m}_{sp} = \frac{\dot{Q}_{nom}}{A_{TAD} \cdot c_w \cdot 4 \text{ K}} \quad (\text{A.1})$$

Rohrlänge:

$$l = \frac{A_{TAD}}{d_x} \quad (\text{A.2})$$

Thermische Widerstände der Rohrleitung bis zum Betonkern:

$$r_{th,x} = \frac{d_x \ln\left(\frac{d_x}{\pi\delta}\right)}{2\pi\lambda_b} \quad (\text{A.3})$$

$$r_{th,w} = \frac{d_x^{0,13}}{8,0\pi} \left(\frac{\delta - 2d_r}{\dot{m}_{sp} \cdot l}\right)^{0,87} \quad (\text{A.4})$$

$$r_{th,z} = \frac{1}{2 \cdot \dot{m}_{sp} \cdot c_w} \quad (\text{A.5})$$

$$r_{th,r} = \frac{d_x \ln\left(\frac{\delta}{\delta - 2d_r}\right)}{2\lambda_r\pi} \quad (\text{A.6})$$

Thermische Widerstände von der Deckenoberflächen zur Raumluft (Parallelschaltung):

$$r_{\text{th,kon+str,u}} = \frac{r_{\text{th,str}} \cdot r_{\text{th,kon,u}}}{r_{\text{th,str}} + r_{\text{th,kon,u}}} = 0,164 \text{ (m}^2\text{K)/W} \quad (\text{A.7})$$

$$r_{\text{th,kon+str,o}} = \frac{r_{\text{th,str}} \cdot r_{\text{th,kon,o}}}{r_{\text{th,str}} + r_{\text{th,kon,o}}} = 0,123 \text{ (m}^2\text{K)/W} \quad (\text{A.8})$$

A.1.2 Vereinfachtes TAD-Modell

Die thermischen Widerstände für das vereinfachten R2C1-Modell der TAD ergeben sich wie folgt:

$$r_{\text{th,TAD1}} = r_{\text{th,x}} + r_{\text{th,w}} + r_{\text{th,z}} + r_{\text{th,r}} \quad (\text{A.9})$$

$$r_{\text{th,TAD2}} = \frac{(r_{\text{th,\lambda,u}} + r_{\text{th,kon+str,u}}) \cdot (r_{\text{th,\lambda,o}} + r_{\text{th,kon+str,o}})}{r_{\text{th,\lambda,u}} + r_{\text{th,kon+str,u}} + r_{\text{th,\lambda,o}} + r_{\text{th,kon+str,o}}} \quad (\text{A.10})$$

$$c_{\text{th,TAD}} = c_{\text{th,u}} + c_{\text{th,o}} \quad (\text{A.11})$$

Der Widerstand $r_{\text{th,TAD2}}$ entspricht einer Parallelschaltung der beiden Widerstände für die aufwärts und abwärts gerichteten Wärmeübertragungspfade.

Für die Wärmekapazität der oberen Bauteilhälfte $c_{\text{th,o}}$ wird nur der Stahlbeton bis zum Hohlraumboden berücksichtigt. Die Wärmekapazität vom Hohlraumboden bis zu den Teppichfließen wird dem Fußboden und damit der inneren Wärmekapazität $c_{\text{th,int}}$.

A.2 Zonenmodell

Die Tabelle A.5 zeigt die geometrischen Daten der Referenzzonen in den Häusern A, C und G sowie deren Ausrichtung (Außenfassade und Fenster). Dabei entspricht 0° einer Ausrichtung nach Norden und 180° einer Ausrichtung nach Süden.

In Tabelle A.6 ist die beheizte Fläche sowie die Anzahl der Büros und der vorhandenen Referenzzonen für alle Gebäudeteile dargestellt.

Tabelle A.5: Geometrische Daten der Referenzzonen in den Häusern A, C und G.

Zone	A_Z in m ²	A_{TAD} in m ²	$A_{W,a}$ in m ²	$A_{W,i}$ in m ²	A_F in m ²	Ausrichtung
Haus A						
A1	25,81	24,27	14,50	43,9	5,252	SO (155°)
A2	25,27	24,49	18,64	40,4	7,88	SW (247°)
A3	12,72	11,94	7,25	37,1	2,63	W (261°)
A4	12,72	11,15	7,25	37,3	2,63	NO (32°)
A5	12,73	11,16	7,25	37,4	2,63	NO (32°)
Haus C						
C1	25,52	24,74	14,50	45,0	5,25	SO (155°)
C2	25,83	23,47	14,50	44,2	5,25	SO (155°)
C3	25,13	24,35	22,78	36,2	10,50	SW (247°)
C4	12,65	12,65	7,25	36,4	2,63	W (276°)
C5	25,86	23,50	14,50	44,2	5,25	W (276°)
C6	25,99	24,42	14,50	45,0	5,25	NO (32°)
C7	12,86	12,86	7,25	37,1	5,25	NO (32°)
Haus G						
G1	12,69	11,20	7,25	37,5	2,63	SW (220°)
G2	10,22	9,44	7,25	31,3	2,63	SW (220°)
G3	11,17	10,39	11,39	28,6	5,25	SW (235°)
G4	10,25	10,25	7,25	31,0	2,63	NW (340°)
G5	12,72	11,94	14,50	37,1	2,63	NW (340°)
G6	12,61	12,61	14,50	36,5	2,63	O (95°)
G7	26,11	24,54	14,50	45,3	5,25	O (95°)

Tabelle A.6: Beheizte Fläche und Anzahl der Büros sowie der vorhandenen Referenzzonen in allen Gebäudeteilen.

Gebäudeteil und Heizkreis	Beheizte Fläche	Anzahl Büros	Anzahl Referenzzonen
Haus A Nord-Ost	681 m ²	39	2
Haus A Süd-West	1339 m ²	62	3
Haus B Nord-Ost	879 m ²	51	-
Haus B Süd-West	1068 m ²	51	-
Haus C Nord-Ost	692 m ²	41	2
Haus C Süd-West	1001 m ²	55	3
Haus D Nord-Ost	846 m ²	59	-
Haus D Süd-West	932 m ²	65	-
Haus E Nord-Ost	3501 m ²	229	5
Haus E Süd-West	2593 m ²	175	8
Haus F Ost	1002 m ²	62	-
Haus F West	1445 m ²	105	-
Haus G Ost	890 m ²	67	2
Haus G West	1380 m ²	107	5
Haus H Ost	832 m ²	56	-
Haus H West	1142 m ²	79	-

Tabelle A.7: Wärmeschutztechnische Bemessungswerte der verwendeten Materialien nach DIN EN ISO 10456 [24] und DIN 4108-4 [28].

Material	Spez. Wärmekapazität c J/kgK	Wärmeleitfähigkeit λ W/mK	Dichte ρ kg/m ³
Aluminiumblech	880	160	2800
Gipskartonplatten	1000	0,21	700
Luft	1008	0,025	1,23
Mineralwolle	1030	0,035	100
Stahlblech	500	17	7800

Außenfassade

Die Außenfassade besteht aus einem Paneelfeld, Rahmen und Fenster mit den folgenden Flächenanteilen:

- Paneelfeld: 47 %
- Rahmen: 25 %
- Fenster: 28 %

Aufbau und Materialien für das Paneelfeld und den Rahmen sind in den Tabellen A.8 und A.9 gegeben. Für das Fenster wird in Wärmedurchgangswiderstand von $r_{th,F} =$

Tabelle A.8: Materialien und Aufbau der Elementfassade (Paneelfeld) von Innen nach Außen.

Material	Dicke in mm
Aluminiumblech, pulverbeschichtet	2
Mineralwolle	80
Stahlblech, verzinkt	3
Mineralwolle	80

Tabelle A.9: Materialien und Aufbau der Elementfassade (Rahmen) von Innen nach Außen.

Material	Dicke in mm
2x Aluminiumblech	5
Luftschicht	80
2x Aluminiumblech	5

1,43 (m²K)/W angenommen. Nach [49] ist für das Paneelfeld ein Wärmedurchgangskoeffizient von $k_{D,Paneel} = 5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ anzusetzen und für den Rahmen (inkl. Wärmebrücken) ein Wert von $k_{D,Rahmen} = 2,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Für den opaken Teil der Außenfassade Fenster ergibt sich damit ein Wärmedurchgangswiderstand von:

$$r_{th,W} = \frac{1}{\frac{0.47}{0,47+0,25} \cdot k_{D,Paneel} + \frac{0.25}{0,47+0,25} \cdot k_{D,Rahmen}} = 1,12 \text{ (m}^2\text{K)/W} \quad (\text{A.12})$$

Tabelle A.10: Materialien und Aufbau der Trockenbauwand.

Material	Dicke in mm
2 x Gipskartonplatten	25
Stahlblech	1
Mineralwolle	40
Stahlblech	1
2 x Gipskartonplatten	25

B Entwicklung einer modellbasierten prädiktiven Regelungsstrategie

B.1 Verlauf der Belegungsprofile

Der Verlauf der Belegungsprofile ergeben sich aus dem gemessenen und normierten Tagesverlauf des Strombedarfs für Bürobeleuchtung für den jeweiligen Gebäudeabschnitt.

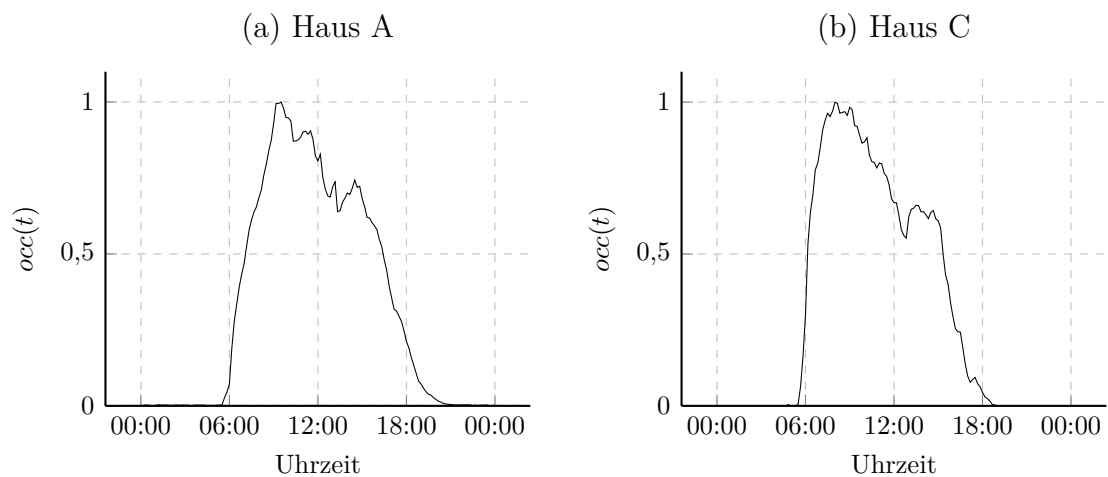


Abbildung B.1: Verlauf des Belegungsprofils zur Bestimmung der internen Wärmegewinne durch Personen und Geräte für Haus A (a) und Haus C (b).

C Simulation und experimentelle Untersuchung

Im Folgenden werden jeweils der Verlauf der am Gebäude gemessenen Außentemperatur und der horizontalen Globalstrahlung für die unterschiedlichen Betrachtungszeiträume dargestellt.

C.1 Simulation des Heizbetriebs

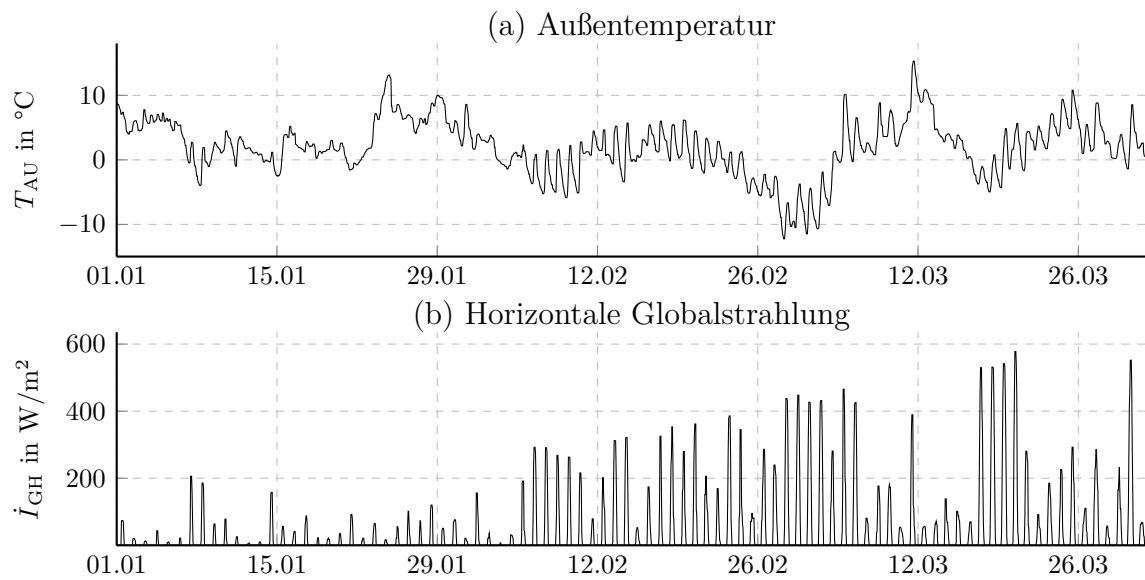


Abbildung C.1: Außentemperatur (a) und horizontale Globalstrahlung (b) in der Zeit vom 1. Januar bis 31. März 2018.

C.2 Simulation des Kühlbetriebs

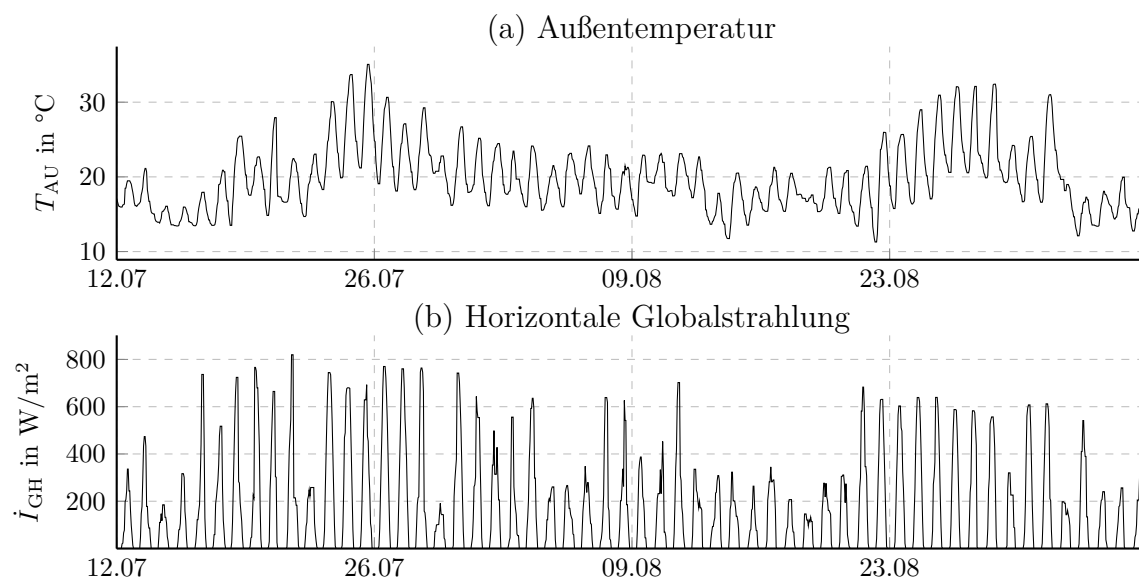


Abbildung C.2: Außentemperatur (a) und horizontale Globalstrahlung (b) in der Zeit vom 12. Juli bis 5. September 2019.

C.3 Experimenteller Untersuchungszeitraum 1

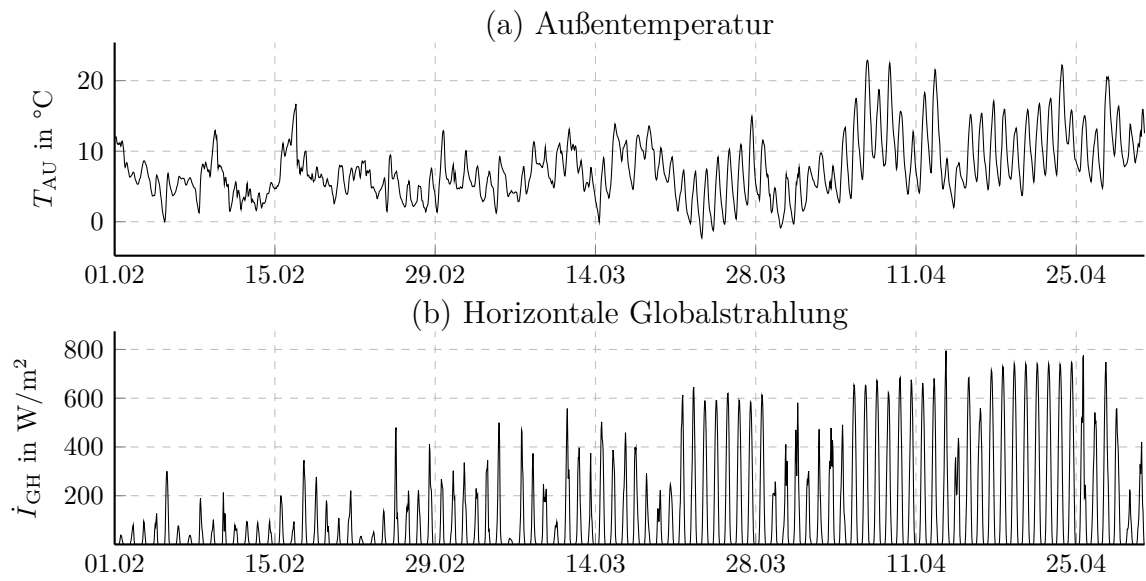


Abbildung C.3: Außentemperatur (a) und horizontale Globalstrahlung (b) in der Zeit vom 1. Februar 2020 bis 30. April 2020.

C.4 Experimenteller Untersuchungszeitraum 2

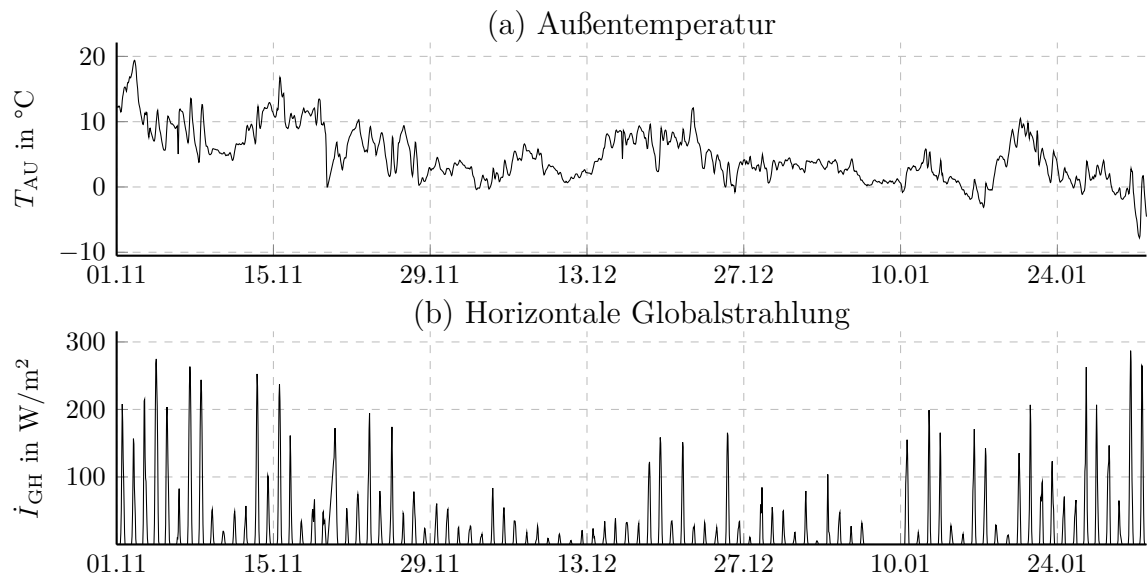


Abbildung C.4: Außentemperatur (a) und horizontale Globalstrahlung (b) in der Zeit vom 1. November 2020 bis 31. Januar 2021.

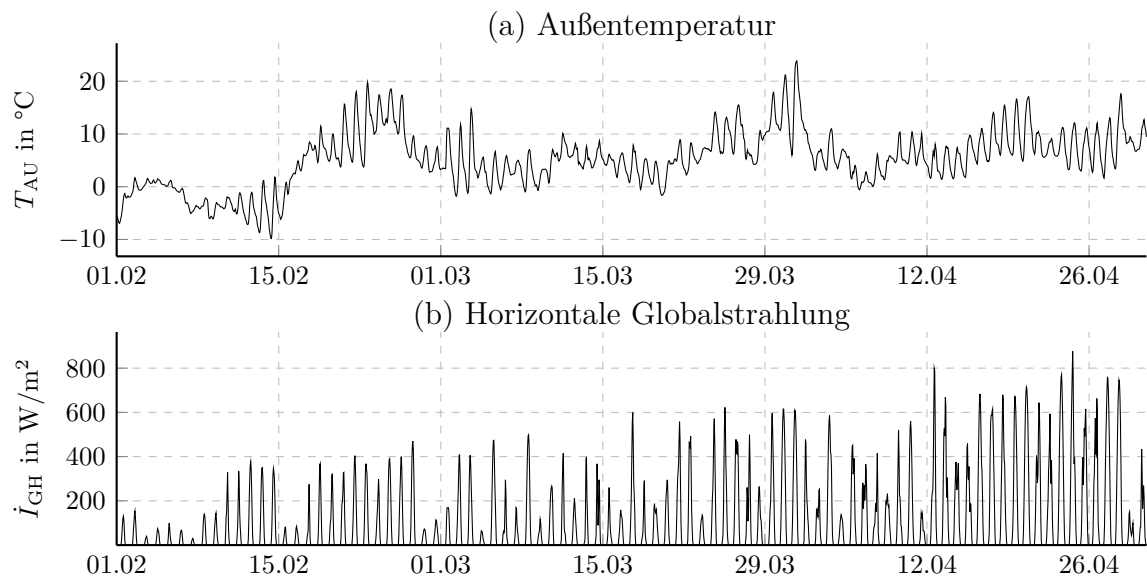


Abbildung C.5: Außentemperatur (a) und horizontale Globalstrahlung (b) in der Zeit vom 1. Februar bis 30. April 2021.

Literaturverzeichnis

- [1] ABEL, Dirk und BOLLIG, Alexander: *Rapid Control Prototyping. Methoden und Anwendungen; mit 16 Tabellen*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2006.
- [2] AFRAM, Abdul und JANABI-SHARIFI, Farrokh: „Theory and applications of HVAC control systems – A review of model predictive control (MPC)“. In: *Building and Environment* 72 (2014), Seiten 343–355.
- [3] AFRAM, Abdul und JANABI-SHARIFI, Farrokh: „Supervisory model predictive controller (MPC) for residential HVAC systems: Implementation and experimentation on archetype sustainable house in Toronto“. In: *Energy and Buildings* 154 (2017), Seiten 268–282.
- [4] ÅKESSON, Johan: „Optimica—An Extension of Modelica Supporting Dynamic Optimization“. In: *6th International Modelica Conference* (2008).
- [5] ALBERS, Karl-Josef, Herausgeber: *Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik. Einschließlich Trinkwasser- und Kältetechnik sowie Energiekonzepte*. 79. Auflage, 2019/2020. Recknagel Edition. Augsburg: ITM InnoTech Medien GmbH, 2018. 2 Bände.
- [6] ANDERSSON, Joel A. E.; GILLIS, Joris; HORN, Greg; RAWLINGS, James B. und DIEHL, Moritz: „CasADi: a software framework for nonlinear optimization and optimal control“. In: *Mathematical Programming Computation* 11.1 (2019), Seiten 1–36.
- [7] ARUNDEL, A. V.; STERLING, E. M.; BIGGIN, J. H. und STERLING, T. D.: „Indirect health effects of relative humidity in indoor environments“. In: *Environmental health perspectives* 65 (1986), Seiten 351–361.
- [8] ATAM, Ercan und HELSEN, Lieve: „Control-Oriented Thermal Modeling of Multi-zone Buildings: Methods and Issues: Intelligent Control of a Building System“. In: *IEEE Control Systems* 36.3 (2016), Seiten 86–111.
- [9] AWBI H. B. und HATTON A.: „Natural convection from heated room surfaces“. In: *Energy and Buildings* 30 (1999), Seiten 233–244.
- [10] BAEHR, Hans Dieter und STEPHAN, Karl: *Wärme- und Stoffübertragung*. 10. Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2019. 810 Seiten.
- [11] BENGEEA, Sorin C.; KELMAN, Anthony D.; BORRELLI, Francesco; TAYLOR, Russell und NARAYANAN, Satish: „Implementation of model predictive control for an HVAC system in a mid-size commercial building“. In: *HVAC&R Research* 20.1 (2014), Seiten 121–135.

- [12] BLUM, D. H.; ARENDT, K.; RIVALIN, L.; PIETTE, M. A.; WETTER, M. und VEJE, C. T.: „Practical factors of envelope model setup and their effects on the performance of model predictive control for building heating, ventilating, and air conditioning systems“. In: *Applied Energy* 236 (2019), Seiten 410–425.
- [13] BRASTEIN, O. M.; PERERA, D.W.U.; PFEIFER, C. und SKEIE, N.-O.: „Parameter estimation for grey-box models of building thermal behaviour“. In: *Energy and Buildings* 169 (2018), Seiten 58–68.
- [14] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE: *Energieeffizienzstrategie 2050*. Herausgegeben von BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE. Berlin, 2019.
- [15] CAUSONE, Francesco; CORGNATI, Stefano P.; FILIPPI, Marco und OLESEN, Bjarne W.: „Experimental evaluation of heat transfer coefficients between radiant ceiling and room“. In: *Energy and Buildings* 41.6 (2009), Seiten 622–628.
- [16] CHAI, T. und DRAXLER, R. R.: „Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?“ In: *Geoscientific Model Development Discussions* 7.1 (2014), Seiten 1525–1534.
- [17] CIGLER, Jiri; SIROKY, Jan; KORDA, Milan und JONES, Colin: „On the selection of the most appropriate MPC problem formulation for buildings“. In: *11th REHVA World Congress CLIMA 2013*. 2013.
- [18] CONINCK, Roel de und HELSEN, Lieve: „Practical implementation and evaluation of model predictive control for an office building in Brussels“. In: *Energy and Buildings* 111 (2016), Seiten 290–298.
- [19] DASSAULT SYSTÈMES®: *Dymola*. URL: <https://www.3ds.com/de/produkte-und-services/catia/produkte/dymola/> (besucht am 04.05.2021).
- [20] DEUTSCHE ENERGIE-AGENTUR: *dena-Gebäudereport 2021 – Fokusthemen zum Klimaschutz im Gebäudebereich*. Herausgegeben von DEUTSCHE ENERGIE-AGENTUR GMBH. 2021.
- [21] DEUTSCHER WETTERDIENST: *Open Data Server*. 2021. URL: <https://opendata.dwd.de/> (besucht am 22.06.2021).
- [22] DEUTSCHER WETTERDIENST: *Model Output Statistics-MIX (MOSMIX)*. URL: https://www.dwd.de/DE/leistungen/met_verfahren_mosmix/met_verfahren_mosmix.html (besucht am 20.05.2021).
- [23] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, Herausgeber: *Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit. DIN EN ISO 7730*. Berlin: Beuth Verlag, 2006.

- [24] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, Herausgeber: *Baustoffe und Bauprodukte – Wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften – Tabellierte Bemessungswerte und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte. DIN EN ISO 10456*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2010.
- [25] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, Herausgeber: *Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik. DIN EN 15251*. Berlin: Beuth Verlag, 2012.
- [26] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, Herausgeber: *Umweltgerechte Gebäudeplanung – Planung, Auslegung, Installation und Steuerung flächenintegrierter Strahlheizungs- und -kühlsysteme – Teil 2: Bestimmung der Auslegungs-Heiz- bzw. Kühlleistung. DIN EN ISO 11855-2*. Berlin: Beuth Verlag, 2016.
- [27] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, Herausgeber: *Energieeffizienz von Gebäuden. DIN EN 15232-1*. Berlin: Beuth Verlag, 2017.
- [28] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, Herausgeber: *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden. DIN 4108-4*. Berlin: Beuth Verlag, 2017.
- [29] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, Herausgeber: *Bauteile Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient - Berechnungsverfahren. DIN EN ISO 6946*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2018.
- [30] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, Herausgeber: *Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten. DIN V 18599-10*. Berlin: Beuth Verlag, 2018.
- [31] DITTMAR, Rainer und PFEIFFER, Bernd-Markus: *Modellbasierte prädiktive Regelung. Eine Einführung für Ingenieure*. München und Wien: Oldenbourg, 2009. 333 Seiten.
- [32] DIWEKAR, Urmila: *Introduction to applied optimization*. 2. Auflage. Band 22. Springer optimization and its applications. New York: Springer, 2008. 291 Seiten.
- [33] DONG, Bing und LAM, Khee Poh: „A real-time model predictive control for building heating and cooling systems based on the occupancy behavior pattern detection and local weather forecasting“. In: *Building Simulation 7.1* (2014), Seiten 89–106.
- [34] DRGOŇA, Ján: „Model Predictive Control with Applications in Building Thermal Comfort Control“. Dissertation. Bratislava: Slovak University of Technology, Institute of Information Engineering, 2017.
- [35] DRGOŇA, Ján; PICARD, Damien und HELSEN, Lieve: „Cloud-based implementation of white-box model predictive control for a GEOTABS office building: A field test demonstration“. In: *Journal of Process Control 88* (2020), Seiten 63–77.

- [36] DRGOŇA, Ján et al.: „All you need to know about model predictive control for buildings“. In: *Annual Reviews in Control* (2020).
- [37] DUUS, Kristian und SCHMITZ, Gerhard: *IMOBIS Energieoptimiertes Bauen: Intensivmonitoring des Neubaus der Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt in Hamburg. Abschlussbericht des Forschungsvorhabens*. Förderkennzeichen: 03ET1139A. Technische Universität Hamburg-Harburg, 2018.
- [38] DUUS, Kristian und SCHMITZ, Gerhard: „Experimental investigation of sustainable and energy efficient management of a geothermal field as a heat source and heat sink for a large office building“. In: *Energy and Buildings* 235 (2021).
- [39] EUROPEAN COMMISSION: *EU transport in figures. Statistical pocketbook 2020*. Directorate-General for Mobility and Transport, 2020.
- [40] FANGER, Poul O.: *Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering*. Copenhagen: Danish Technical Press, 1970. 244 Seiten.
- [41] FREUND, Svenne; SCHMITZ, Gerhard und TIEMANN, Claus Markus: „Adaptive Grey-Box Models for Model Predictive Building Control Using the Unscented Kalman Filter“. In: *International High Performance Buildings Conference* (2021).
- [42] FREY, Thomas und BOSSERT, Martin: *Signal- und Systemtheorie*. Band 2. Springer, 2008. 360 Seiten.
- [43] GWERDER, M.; LEHMANN, B.; TÖDTLI, J.; DORER, V. und RENGGLI, F.: „Control of thermally-activated building systems (TABS)“. In: *Applied Energy* 85 (2008), Seiten 565–581.
- [44] GYALISTRAS, Dimitrios; GWERDER, Markus; OLDEWURTEL, Frauke; JONES, Colin; MORARI, Manfred; LEHMAN, Beat; WIRTH, K. und STAUCH, Vanessa: „Analysis of Energy Savings Potentials for Integrated Room Automation“. In: *10. Climate-RHEVA World Congress* (Antalya). Herausgegeben von REHVA. 2010.
- [45] HAHN, N. von: „Trockene Luft und ihre Auswirkungen auf die Gesundheit. Ergebnisse einer Literaturstudie“. In: *Reinhaltung der Luft* 67.3 (2007), Seiten 103–107.
- [46] HUANG, Hao; CHEN, Lei und HU, Eric: „A hybrid model predictive control scheme for energy and cost savings in commercial buildings: simulation and experiment“. In: *2016 American Control Conference (ACC)* (Boston, MA, USA, 6.–8. Juli 2016). IEEE, 2016, Seiten 256–261.
- [47] JARRE, Florian und STOER, Josef: *Optimierung. Einführung in mathematische Theorie und Methoden*. 2. Auflage. Berlin und Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg und Imprint: Springer Spektrum, 2019. 520).
- [48] JOE, Jaewan und KARAVA, Panagiota: „A model predictive control strategy to optimize the performance of radiant floor heating and cooling systems in office buildings“. In: *Applied Energy* 245 (2019), Seiten 65–77.

- [49] JOSEF GARTNER GMBH, Herausgeber: *Wärmedurchgangskoeffizient Ucw und Bewertung Kondensatrisiko Elementfassae Naubau BSU Hamburg*. 2011.
- [50] JULIER, Simon J. und UHLMANN, Jeffrey K.: „New extension of the Kalman filter to nonlinear systems“. In: *Signal Processing, Sensor Fusion, and Target Recognition VI. AeroSense 97* (Orlando, FL, USA). Herausgegeben von KADAR, Ivan. 1997, Seite 182.
- [51] JULIER, Simon J. und UHLMANN, Jeffrey K.: „Unscented filtering and nonlinear estimation“. In: *Proceedings of the IEEE* 92.3 (2004), Seiten 401–422.
- [52] KALMAN, R. E.: „A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems“. In: *Journal of Basic Engineering* 82.1 (1960), Seiten 35–45.
- [53] KATHIRGAMANATHAN, Anjukan; ROSA, Mattia de; MANGINA, Eleni und FINN, Donal P.: „Data-driven predictive control for unlocking building energy flexibility: A review“. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 135 (2021), Seite 110120.
- [54] KELLY, Tim: *Thermal Network Modeling Handbook*. Herausgegeben von K&K ASSOCIATES. Version 97.003. Westminster, 2000.
- [55] KILLIAN, M. und KOZEK, M.: „Ten questions concerning model predictive control for energy efficient buildings“. In: *Building and Environment* 105 (2016), Seiten 403–412.
- [56] KILLIAN, M. und KOZEK, M.: „Implementation of cooperative Fuzzy model predictive control for an energy-efficient office building“. In: *Energy and Buildings* 158 (2018), Seiten 1404–1416.
- [57] KOSCHENZ, Markus und LEHMAN, Beat: *Thermoaktive Bauteilsysteme tabs*. 1. Auflage. Dübendorf: EMPA Energiesysteme/Haustechnik, 2000. 102 Seiten.
- [58] LEE, Jon und LEYFFER, Sven: *Mixed Integer Nonlinear Programming*. Band 154. The IMA Volumes in Mathematics and its Applications. New York, NY: Springer Science+Business Media LLC, 2012.
- [59] LJUNG, Lennart: „System Identification“. In: *Wiley encyclopedia of electrical and electronics engineering* (1999), Seiten 1–19.
- [60] MODELON: *OPTIMICA Compiler Toolkit*. Version 1.18. 2021. URL: <https://www.modelon.com/products-services/modelon-creator-suite/optimica-compiler-toolkit/> (besucht am 04.05.2021).
- [61] MOHD ALI, Jarinah; HA HOANG, N.; HUSSAIN, M. A. und DOCHAIN, Denis: „Review and classification of recent observers applied in chemical process systems“. In: *Computers & Chemical Engineering* 76 (2015), Seiten 27–41.
- [62] MORARI, Manfred und LEE, Jay H.: „Model predictive control: past, present and future“. In: *Computers and Chemical Engineering* 23 (1999), Seiten 667–682.
- [63] MORRIS, Max D.: „Factorial Sampling Plans for Preliminary Computational Experiments“. In: *Technometrics* 33 (1991), Seiten 161–174.

- [64] NIEMANN, Peter und SCHMITZ, Gerhard: *Abschlussbericht Grundmonitoring. Neubau Verwaltungsgebäude Neuenfelder Straße 19*. Herausgegeben von TECHNISCHE UNIVERSITÄT HAMBURG, INSTITUT FÜR TECHNISCHE THERMODYNAMIK. Hamburg, 2017.
- [65] NIEMANN, Peter und SCHMITZ, Gerhard: „Impacts of occupancy on energy demand and thermal comfort for a large-sized administration building“. In: *Building and Environment* 182 (2020), Seite 107027.
- [66] OPEN SOURCE MODELICA CONSORTIUM: *OpenModelica*. URL: [%7Bhttps://www.openmodelica.org/%7D](https://www.openmodelica.org/) (besucht am 04.05.2021).
- [67] PICARD, Damien; MAARTEN SOURBRON; JORISSEN, Filip; VÁŇA, Zdeněk; CIGLER, Jiří; FERKL, Lukáš und HELSEN, Lieve: „Comparison of Model Predictive Control Performance Using Grey-Box and White-Box Controller Models of a Multi-zone Office Building“. In: *International High Performance Buildings Conference* (Purdue, West Lafayette, IN, 11.–14. Juli 2016). 2016.
- [68] PIEPER, Martin: *Mathematische Optimierung. Eine Einführung in die kontinuierliche Optimierung mit Beispielen*. 2017. 59 Seiten.
- [69] PLUMMER, A. R.: „Model-in-the-Loop Testing“. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering* 220.3 (2006), Seiten 183–199.
- [70] PRÍVARA, Samuel; ŠIROKÝ, Jan; FERKL, Lukáš und CIGLER, Jiří: „Model predictive control of a building heating system: The first experience“. In: *Energy and Buildings* 43 (2011), Seiten 564–572.
- [71] RAWLINGS, James B.; MAYNE, David Q. und DIEHL, Moritz M.: *Model predictive control. Theory, computation, and design*. 2. Auflage. Madison, Wisconsin: Nob Hill Publishing, 2017. 623 Seiten.
- [72] RÉHAULT, Nicolas et al.: *OBSERVE - Optimierung und Betriebsführung komplexer Gebäudeenergieversorgungsanlagen : Abschlussbericht*. Technischer Bericht. Freiburg im Breisgau: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme , Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg , IngSoft GmbH , Plenum - Ingenieurgesellschaft für Planung Energie Umwelt mbH , Kieback & Peter GmbH & Co. KG, 2019.
- [73] REINHARDT, Rüdiger; HOFFMANN, Armin und GERLACH, Tobias: *Nichtlineare Optimierung. Theorie, Numerik und Experimente*. Berlin: Springer Spektrum, 2013. 383 Seiten.
- [74] ROCKETT, Peter und HATHWAY, Elizabeth Abigail: „Model-predictive control for non-domestic buildings: a critical review and prospects“. In: *Building Research & Information* 45 (2017), Seiten 556–571.

- [75] SALTELLI, Andrea; RATTO, Marco; ANDRE, Terry; CAMPOLONGO, Francesca; CARIBONI, Jessica; GATELLI, Debora; SAISANA, Michaela und TARANTOLA, Stefano: *Global sensitivity analysis. The primer*. Chichester England und Hoboken NJ: John Wiley, 2008. 292 Seiten.
- [76] SCHEWE, Lars und SCHMIDT, Martin: *Optimierung von Versorgungsnetzen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019. 205 Seiten.
- [77] SCHMELAS, Martin: „Entwicklung und Evaluierung eines adaptiv-prädiktiven Algorithmus für thermoaktive Bauteilsysteme“. Institut für Mikrosystemtechnik. Dissertation. Freiburg: Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau, 2017. 204 Seiten.
- [78] SCHMITZ, Gerhard: *Klimaanlagen. Skript zur Vorlesung*. Hamburg: Technische Universität Hamburg, Institut Für Technische Thermodynamik, 2019.
- [79] SCHMITZ, Gerhard: *Technische Thermodynamik. Grundlagen, Anwendungen, Prozesse*. 10. Auflage. Essen: Vulkan-Verlag GmbH, 2020. 239 Seiten.
- [80] SCHMITZ, Gerhard; NIEMANN, Peter und FREUND, Svenne: *Abschlussbericht - Komfortuntersuchungen im Verwaltungsgebäude der Behörden für Stadtentwicklung und Wohnen / Umwelt und Energie, Hamburg*. Hamburg: Institut für Technische Thermodynamik, 2018.
- [81] SCHWEIGER, G.; BLUM, David H. und WETTER, Michael: „Dynamische Optimierung von Modelica-basierten Modellen“. In: *15. Symposium Energieinnovation* (2018).
- [82] SERALE, Gianluca; FIORENTINI, Massimo; CAPOZZOLI, Alfonso; BERNARDINI, Daniele und BEMPORAD, Alberto: „Model Predictive Control (MPC) for Enhancing Building and HVAC System Energy Efficiency: Problem Formulation, Applications and Opportunities“. In: *Energies* 11.3 (2018), Seite 631.
- [83] SIMON, Dan: *Optimal state estimation. Kalman, H [infinity], and nonlinear approaches*. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 2006.
- [84] ŠIROKÝ, Jan; OLDEWURTEL, Frauke; CIGLER, Jiří und PRÍVARA, Samuel: „Experimental analysis of model predictive control for an energy efficient building heating system“. In: *Applied Energy* 88.9 (2011), Seiten 3079–3087.
- [85] SOFOS, Marina et al.: *Innovations in Sensors and Controls for Building Energy Management. Research and Development Opportunities Report for Emerging Technologies*. Herausgegeben von DOE BUILDING TECHNOLOGIES OFFICE. 2020.
- [86] SOURBRON, Maarten: „Dynamic thermal behaviour of buildings with concrete core activation“. Faculty of Engineering. Dissertation. Löwen: Katholieke Universiteit Leuven, 2012. 416 Seiten.
- [87] SOURBRON, Maarten; VERHELST, Clara und HELSEN, Lieve: „Building models for model predictive control of office buildings with concrete core activation“. In: *Journal of Building Performance Simulation* 6.3 (2013), Seiten 175–198.

- [88] SPEERFORCK, Arne: „Investigation of a desiccant assisted geothermal air conditioning system“. Institut für Technische Thermodynamik. Dissertation. Hamburg: Technische Universität Hamburg, 2018.
- [89] STURZENEGGER, David; GYALISTRAS, Dimitrios; MORARI, Manfred und SMITH, Roy S.: „Model Predictive Climate Control of a Swiss Office Building: Implementation, Results, and Cost–Benefit Analysis. Implementation, Results, and Cost–Benefit Analysis“. In: *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 24.1 (2016), Seiten 1–12.
- [90] THE MATHWORKS, Inc.: *Global Optimization Toolbox. User’s Guide*. Version R2021a. 2021.
- [91] THE MATHWORKS, Inc.: *OPC Toolbox™. User’s Guide*. Version R2021a. 2021.
- [92] THE MATHWORKS, Inc.: *Optimization Toolbox™. User’s Guide*. Version R2021a. 2021.
- [93] THE MODELICA ASSOCIATION: *Modelica*. Version 3.4. Modelica Association, 2021.
- [94] THIEBLEMONT, Hélène; HAGHIGHAT, Fariborz; OOKA, Ryoza und MOREAU, Alain: „Predictive control strategies based on weather forecast in buildings with energy storage system. A review of the state-of-the art“. In: *Energy and Buildings* 153 (2017), Seiten 485–500.
- [95] TIEMANN, Claus Markus: „Untersuchung von adaptiven Greybox-Modellen zur Beschreibung des thermischen Verhaltens von Gebäuden“. Masterarbeit. Hamburg: Technische Universität Hamburg, 2020.
- [96] TÖDTLI, Jürg; GWERDER, Markus; LEHMANN, Beat; RENGGLI, Franz und DORER, Viktor: *TABS Control. Steuerung und Regelung von thermoaktiven Bauteilsystemen ; Handbuch für Planung, Auslegung und Betrieb*. 1. Auflage. Schriftenreihe Technik. Zürich: FAKTOR Verlag AG, 2009. 190 Seiten.
- [97] TREADO, Stephen und CHEN, Yan: „Saving Building Energy through Advanced Control Strategies“. In: *Energies* 6.9 (2013), Seiten 4769–4785.
- [98] UMWELTBUNDESAMT: *13 Thesen für einen treibhausgasneutralen Gebäudebestand. Drängende Herausforderungen der Wärmewende*. 2020.
- [99] UMWELTBUNDESAMT: *Das Risiko einer Übertragung von SARS-CoV-2 in Innenräumen lässt sich durch geeignete Lüftungsmaßnahmen reduzieren. Stellungnahme der Kommission Innenraumlufthygiene am Umweltbundesamt*. 2020.
- [100] VDI-GESELLSCHAFT VERFAHRENSTECHNIK UND CHEMIEINGENIEURWESEN: *VDI-Wärmeatlas*. 11. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. 1786 Seiten.
- [101] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE, Herausgeber: *Berechnung des instationären thermischen Verhaltens von Räumen und Gebäuden. VDI 6007-2*. VDI-Richtlinie. Berlin: Beuth Verlag, 2012.

- [102] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE, Herausgeber: *Verbrauchskennwerte für Gebäude. VDI 3807*. VDI-Richtlinie. Berlin: Beuth Verlag, 2013.
- [103] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE, Herausgeber: *Berechnung des instationären thermischen Verhaltens von Räumen und Gebäuden. VDI 6007-1*. VDI-Richtlinie. Berlin: Beuth Verlag, 2015.
- [104] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE, Herausgeber: *Berechnung des instationären thermischen Verhaltens von Räumen und Gebäuden. VDI 6007-3*. VDI-Richtlinie. Berlin: Beuth Verlag, 2015.
- [105] VIOT, H.; SEMPEY, A.; MORA, L.; BATSALE, J. C. und MALVESTIO, J.: „Model predictive control of a thermally activated building system to improve energy management of an experimental building. Part II - Potential of predictive strategy“. In: *Energy and Buildings* 172 (2018), Seiten 385–396.
- [106] VIOT, H.; SEMPEY, A.; MORA, L.; BATSALE, J. C. und MALVESTIO, J.: „Model predictive control of a thermally activated building system to improve energy management of an experimental building. Part I - Modeling and measurements“. In: *Energy and Buildings* 172 (2018), Seiten 94–103.
- [107] WATSON, Richard D. und CHAPMAN, Kirby S.: *Radiant heating and cooling handbook. Coupling radiant heating with forced air heating, principles of radiant heating and cooling relating to thermal comfort, sample calculations*. McGraw-Hill Handbooks. New York: McGraw-Hill, 2009.
- [108] WETTER, Michael; BONVINI, Marco und NOUIDUI, Thierry S.: „Equation-based languages – A new paradigm for building energy modeling, simulation and optimization“. In: *Energy and Buildings* 117 (2016), Seiten 290–300.
- [109] WETTER, Michael; ZUO, Wangda; NOUIDUI, Thierry Stephane und PANG, Xiu-feng: „Modelica Buildings library“. In: *Journal of Building Performance Simulation* 7.4 (2014), Seiten 253–270.
- [110] WILLMOTT, Cort J. und MATSUURA, Kenji: „Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance“. In: *Climate research* 30.1 (2005), Seiten 79–82.
- [111] ZHAN, Sicheng und CHONG, Adrian: „Data requirements and performance evaluation of model predictive control in buildings: A modeling perspective“. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 142 (2021), Seite 110835.
- [112] ZHANG, Huiliang; SEAL, Sayani; DI WU; BOULET, Benoit; BOUFFARD, Francois und JOOS, Geza: *Data-driven Model Predictive and Reinforcement Learning Based Control for Building Energy Management: a Survey*. 2021.