

Technische Universität Dresden

Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik

Institut für Regelungs- und Steuerungstheorie

Studienarbeit

Semantikbasierte Entwurfsautomatisierung gebäudetechnischer Anlagen

vorgelegt von: Nils Leimbach
geboren am: 9. Oktober 1997 in Braunschweig

Betreuer: Dr.-Ing. C. Knoll
Dipl.-Ing. E. Eckstädt
Verantwortlicher Hochschullehrer: Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Math. K. Röbenack
Tag der Einreichung: 17. März 2022

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die von mir am heutigen Tage an der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik eingereichte Studienarbeit zum Thema

Semantikbasierte Entwurfsautomatisierung gebäudetechnischer Anlagen

selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Schriften entnommen sind, wurden als solche kenntlich gemacht.

Dresden, 17. März 2022

Nils Leimbach

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird mit Hilfe von durch BIM zur Verfügung gestellten Gebäudedaten ein Reglerentwurfverfahren für eine Heizkesselregelung eines Gebäudes mittels P-Regler entwickelt. Das verwendete Gebäude wird durch eine IFC-Datei beschrieben. Für den Entwurf werden für die Teile des Heizkreislaufs und die Gebäudeteile thermodynamische Modelle entwickelt, welche zusammen ein System gewöhnlicher partieller Differentialgleichungen bilden. Die physikalischen Größen, welche hierfür benötigt werden, werden, wenn vorhanden, aus der IFC-Datei extrahiert. Außerdem werden Scharen an Gebäudevarianten als IFC-Dateien generiert, um das Reglerentwurfverfahren später zu testen. Das gebildete Modell wird zur Überprüfung der Stabilität in einer Ruhelage mit vorgegebener Raumlufttemperatur linearisiert. Die Stabilität wird dann anhand des linearisierten Systems für verschiedene Reglerverstärkungen überprüft. Außerhalb des Arbeitspunkts wird die Stabilität mit Simulationsstudien untersucht. Das Reglerentwurfverfahren erzeugt für das Beispielgebäude und die Gebäudevarianten zufriedenstellende Reglerparameter, die für stabiles Systemverhalten mit leichten stationären Regelabweichungen sorgen.

Abstract

In this thesis, a controller design procedure for a P-controller to be used as a heating controller of a building is developed with the help of building data provided by BIM. The building used is described by an IFC file. For the design, thermodynamic models are developed for the parts of the heating circuit and the building, which together form a system of ordinary partial differential equations. The physical quantities needed for this are extracted from the IFC file, if available. In addition, families of building variants are generated in the form of IFC files to test the controller design procedure later. The model formed is linearized to check stability at an equilibrium point with a given room air temperature. The stability is then checked using the linearized system for different controller gains. Outside the operating point, stability is also tested with simulation studies. The controller design procedure produces satisfactory controller parameters for the example building and building variants, providing stable system behavior with slight steady-state control deviations.

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Formelzeichen	VII
Abbildungsverzeichnis	XI
Tabellenverzeichnis	XIV
1 Einleitung	1
2 Grundlagen	3
2.1 Thermodynamik	3
2.1.1 Wärmeleitung	3
2.1.2 Wärmekapazität	5
2.1.3 Wärmeübergang	7
2.2 Gebäudetechnik	8
2.2.1 Heizkessel	8
2.2.2 Rohre	9
2.2.3 Pumpe	10
2.2.4 Heizkörper	10
2.3 Bauwerksdatenmodellierung	12
2.3.1 IFC	13
2.3.2 shapely Python Paket	15
3 Modellbildung	16
3.1 Ziele der Modellbildung	16
3.2 Modellgrenzen	16
3.3 Beispielgebäude	17
3.4 Modellbildungsstrategie	18
3.5 Allgemeine thermische Modelle	19
3.6 Modellteile	19
3.6.1 Heizwasser	19
3.6.2 Heizkessel	20
3.6.3 Heizkörper	22
3.6.4 Rohre	27
3.6.5 Raum	27
3.6.6 Heizkesselregler	34
3.6.7 Umwelt	35

3.7	Zusammenführung der Teilmodelle	36
4	Verarbeitung der IFC-Datei	38
4.1	Extraktion der Gebäudedaten	38
4.1.1	Building-Klasse	40
4.1.2	Storey-Klasse	40
4.1.3	Space-Klasse	40
4.1.4	Wall-Klasse	41
4.1.5	Window-Klasse	42
4.1.6	Material-Klasse	43
4.2	Erzeugung von Gebäudescharen	43
4.2.1	Innenwand aus Gipswandbauplatten verschiedener Stärken	44
4.2.2	Verschiedene Dämmschichtstärken	45
4.2.3	Außenwand aus Sandstein verschiedener Stärken	45
5	Reglerentwurf	46
5.1	Kleinsignalverhalten	46
5.1.1	Bestimmung der Ruhelage	47
5.1.2	Linearisierung des Systems	49
5.1.3	Stabilitätsbetrachtung	51
5.1.4	Eingrenzung des Verstärkungsfaktors	55
5.2	Untersuchung des Großsignalverhaltens	56
6	Simulation	58
6.1	Simulationsszenarien	58
6.1.1	Nominalbetrieb	58
6.1.2	„Abkühlen“	59
6.1.3	„Kaltstart“	60
6.2	Unverändertes Beispielgebäude	60
6.2.1	Stabilitätsbetrachtung	60
6.2.2	Allgemeine Betrachtungen	63
6.3	Generierte Gebäudescharen	63
6.3.1	Nominalbetrieb	63
6.3.2	„Abkühl“-Szenario	66
6.3.3	„Kaltstart“-Szenario	68
6.3.4	Bewertung der Stabilität	70
6.4	Diskussion der Ergebnisse	70
7	Ausblick	73
	Literatur	76

Verzeichnis der Formelzeichen

Im Folgenden werden die in dieser Arbeit verwendeten Formelzeichen aufgelistet. Da viele physikalische Größen für verschiedene Materialien oder Vorgänge verwendet werden, werden außerdem die Indizes erklärt, welche mit den Formelzeichen kombiniert werden können. Diese Kombinationen werden hier nicht immer explizit angegeben. Symbole, die mit verschiedenen Indizes versehen werden können, werden in der Arbeit wie folgt geschrieben: Symbol_□.

Formelzeichen

α	Wärmeübergangskoeffizient	W/(m ² K)
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/(m K)
ϕ_{iW}	Volumen-bezogener Luftanteil der Innenwand	
ρ	Dichte	kg/m ³
σ	Spreizung	K
ϑ	Temperatur	°C oder K
$\vartheta_{aL,0}$	Auslegungsaußentemperatur	°C
$\bar{\vartheta}_{aL}$	Durchschnittliche Außenlufttemperatur	°C oder K
$\vartheta_{H_2O,Schm}$	Schmelztemperatur des Heizwassers	°C oder K
$\vartheta_{H_2O,Sdp}$	Siedetemperatur des Heizwassers	°C oder K
$\bar{\vartheta}_{H_2O}$	Mittlere Heizwassertemperatur	°C oder K
ϑ_{ln}	Logarithmische Übertemperatur	K
$\bar{\vartheta}_{ln}$	Angepasste logarithmische Übertemperatur	K
ϑ_R	Rücklauftemperatur	°C oder K
ϑ_V	Vorlauftemperatur	°C oder K
A	Flächeninhalt	m ²
A	Systemmatrix des Zustandsraummodells	
A_{aW}	Außenwandfläche ohne Fensterfläche	m ²
A_P	Systemmatrix des geschlossenen Regelkreises mit P-Regler	

$A_{\Sigma iW}$	Summe der Innenwandflächen mitsamt der Deckenfläche	m^2
B	Eingangsmatrix des Zustandsraummodells	
C	Wärmekapazität	J/K
c	Spezifische Wärmekapazität	J/(kg K)
c^T	Transponierter Ausgangsvektor des Zustandsraummodells	
d	Dicke	m
e	Regelfehler	
e_∞	Stationärer Regelfehler	
f	Systemfunktion des Zustandsraummodells	
f_{an}	Funktion des analytisch lösbaren Teilsystems	
f_{num}	Funktion des numerisch zu lösendes Teilsystem	
g	Optimierungsfunktion	
g_R	Glättungsterm für kritische Rücklauftemperaturen	
g_V	Glättungsterm für kritische Vorlauftemperaturen	
k_G	Glättungskoeffizient für die angepasste logarithmische Übertemperatur	K^2
$K_{P,min}$	Minimale Verstärkung mit einer Einschwingzeit unter 5 min	W/K
$K_{P,oscmax}$	Reglerverstärkung mit maximalem Schwingungsverhalten	W/K
K_P	Reglerverstärkung	W/K
M	Molare Masse	kg/mol
m	Masse	kg
m_B	Heizwassermasse im Heizkessel	kg
\dot{m}_{H_2O}	Massenstrom des Heizwassers	kg/s
n	Heizkörperexponent	
n_{inf}	Luftwechselzahl/-rate	1/h
p	Druck	Pa oder bar
$P_{B,offset}$	Konstantanteil des erweiterten P-Reglers	W
$P_{B,P}$	Regelgesetz für den P-Regler zur Heizkesselreglung	W
$P_{B,P}^+$	Erweitertes Regelgesetz für den P-Regler zur Heizkesselreglung mit Konstantanteil	W
P_B	Heizkesselleistung	W
\dot{Q}	Wärmestrom oder zeitliche Änderung des Wärmegehalts eines Stoffes	W

\dot{q}	Wärmestromdichte	W/m ²
\dot{Q}_0	Heizkörpernennleistung	W
\dot{Q}_B	Wärmeänderung des Heizwassers im Heizkessel	W
\dot{Q}_{inf}	Infiltrationswärmefluss	W
\dot{Q}_R	Wärmefluss aus dem Heizwasserrücklauf in den Heizkessel	W
\dot{Q}_V	Wärmefluss aus dem Heizkessel in den Heizwasservorlauf	W
R	Universelle Gaskonstante	8,314 462 618 153 24 J/(mol K)
$R_{s,\text{Luft(trocken)}}$	Spezifische Gaskonstante für trockene Luft	J/(kg K)
R_{th}	Wärmewiderstand	K/W
s	Wärmespeicherzahl	J/(m ³ K)
T_S	Einschwingzeit	s
u	Systemeingangsvektor	
\tilde{u}	Kleinsignaländerung des Systemeingangsvektors	
U_F	Wärmedurchgangskoeffizient des Fensters	W/(m ² K)
ΔU_{TB}	Wärmebrückenzuschlag	W/(m ² K)
V_B	Heizwasservolumen im Heizkessel	m ³
x	Systemzustandsvektor	
\tilde{x}	Kleinsignaländerung des Systemzustands	
x_{an}	Analytisch lösbarer Teilzustand des Systems	
x_{num}	Numerisch zu lösender Teilzustand des Systems	
y	Systemausgang des Zustandsraummodells	
z	Lösungsvektor des Optimierungsverfahren	
z_{init}	Initialwert für den Lösungsvektor des Optimierungsverfahren	

Indizes

∞	Stationärer Endwert
H ₂ O	Heizwasser sowohl des Vorlaufs als auch des Rücklaufs
H ₂ O → K	Übergang bzw. Fluss vom Heizwasser an den Heizkörper
0	Nenn- bzw. Auslegungsgröße
aL	Außenluft
aW→aL	Übergang bzw. Fluss von der letzten Schicht der Außenwand (Putzschicht) zur Außenluft

aW,Btn	Betonschicht der Außenwand
aW,Iso	Isolierungsschicht der Außenwand
aW,Putz	Putzschicht der Außenwand
B	Heizkessel bzw. Brenner
F	Fenster
Gips	Gips-Wandbauplatten als alternatives Innenwandmaterial
iW	Innenwand
iW,Btn	Betonanteil der Hohlblocksteine der Innenwand
iW,L	Luftanteil der Hohlblocksteine der Innenwand
K	Heizkörper
K→L	Übergang bzw. Fluss vom Heizkörper an die Raumluft
L	Raumluft
L→aW	Übergang bzw. Fluss von der Raumluft zur ersten Schicht der Außenwand (Betonschicht)
L→F→aL	Übergang bzw. Fluss von der Raumluft über das Fenster an die Außenluft
L→iW	Übergang bzw. Fluss von der Raumluft zur Innenwand
RL	Ruhelage
soll	Sollwert
Ss	Sandstein als alternatives Außenwandmaterial

Abbildungsverzeichnis

1	Schematischer Aufbau von zwei Schichten mit physikalischen und thermischen Größen zur Betrachtung der Wärmeleitung.	6
2	Schematische Wandanordnung zur Erläuterung der veränderten Modellierung vom Wärmeübergang zwischen Luft und Wand.	7
3	Schematische Darstellung des der Arbeit zugrunde liegenden Heizkreislaufs mit ausgewählten physikalischen Größen.	8
4	Beispiel einer Thermostatkenlinie, entnommen aus Recknagel et al. [24, Bild 2.5.1-5].	12
5	Teil des IFC-Datenmodells mit wichtigen Klassen in Vererbungshierarchie dargestellt, übernommen aus Borrmann et al. [3, Abbildung 6.5]	14
6	Demonstration des Verhaltens der <code>is_a()</code> -Funktion bei Typenprüfung mit <code>parent</code> - und <code>child</code> -Typen.	15
7	Ansicht des Beispielraums, dargestellt mit FZKViewer [20].	18
8	Prinzipieller Systemaufbau mit Flussrichtung der Wärmeenergie im Heizbetrieb.	20
9	Logarithmische Übertemperatur mit der Singularität für $\vartheta_V = \vartheta_R$	24
10	Angepasste Funktion $\bar{\vartheta}_{ln}$ zur Berechnung der logarithmischen Übertemperatur ϑ_{ln} mit einem Glättungskoeffizienten von $k_G = 1$	26
11	Angepasste Funktion $\bar{\vartheta}_{ln}$ zur Berechnung der logarithmischen Übertemperatur ϑ_{ln} mit einem Glättungskoeffizienten von $k_G = 100$	26
12	Thermostatkenlinie für $\vartheta_{L,soll} = 21\text{ °C}$	27
13	Schematischer Innenwandaufbau mit zugehörigen physikalischen und thermischen Größen.	30
14	Schematischer Außenwandaufbau mit zugehörigen physikalischen und thermischen Größen.	32
15	Interpolierte stündliche Außentemperatur der Wetterstation Dresden Strehlen (ID: 1051) für den Januar 2015 aus Daten des Deutschen Wetterdienstes [6].	36
16	Klassendiagramm der in Python erstellten Klassen zur Extraktion der Gebäudedaten [21]	39
17	Grundriss eines beliebigen Raums zur Darstellung der durch die Modellierung vernachlässigten Wandvolumina.	42

18	Wurzelortskurve des linearisierten Systems für logarithmisch verteilte Verstärkungswerte von $K_P = 1$ bis 10000.	53
19	Vergrößerter Ausschnitt der Wurzelortskurve aus Abbildung 18 um den Koordinatenursprung.	54
20	Sprungantwort des linearisierten Systems bei maximaler Schwingung durch $K_P = K_{P,oscmax}$ mit stationärem Regelwert $\tilde{\vartheta}_{V,\infty}$	54
21	Sprungantworten und Stellgrößenverläufe des linearisierten Systems für eine Auswahl an logarithmisch verteilten Verstärkungswerten von $K_P = 1$ bis 10000.	56
22	Sprungantwort mit Einschwingzeit T_S und Stellgröße des linearisierten Systems für Verstärkungswerte $K_P = K_{P,min}$ und $2K_{P,min}$	57
23	Sprungantwort des linearisierten Systems mit stationären Regelwerten $\tilde{\vartheta}_{V,\infty}$ für Verstärkungswerte $K_P = K_{P,min}$ und $2K_{P,min}$	57
24	Schematische, nicht maßstabgetreue Darstellung der verschiedenen im Modell als Zustandskomponenten vorkommenden Temperaturen. Zustandskomponenten ϑ_V und ϑ_R sind nicht dargestellt und können Abbildung 3 entnommen werden.	59
25	Simulationsergebnis des unveränderten Gebäudes im Nominalbetrieb mit allen Zustandskomponenten aus x und der Außenlufttemperatur ϑ_{aL}	61
26	Simulationsergebnis des unveränderten Gebäudes im „Abkühl“-Szenario mit allen Zustandskomponenten aus x und der Außenlufttemperatur ϑ_{aL}	62
27	Simulationsergebnis des unveränderten Gebäudes im „Kaltstart“-Szenario mit allen Zustandskomponenten aus x und der Außenlufttemperatur ϑ_{aL}	62
28	Simulationsergebnis des unveränderten Gebäudes im Nominalbetrieb mit Zustandskomponenten ϑ_V, ϑ_R und ϑ_L und durch das Thermostat geregelter Massenstrom des Heizwassers \dot{m}_{H_2O}	64
29	Simulationsergebnis des unveränderten Gebäudes im „Kaltstart“-Szenario mit Zustandskomponenten ϑ_V, ϑ_R und ϑ_L und durch das Thermostat geregelter Massenstrom \dot{m}_{H_2O}	64
30	Simulationsergebnisse für verschiedene Wandaufbauten im Nominalbetrieb mit Zustandskomponenten ϑ_V, ϑ_R und ϑ_L und der Außenlufttemperatur ϑ_{aL}	65
31	Vergleich der Raumlufttemperaturen ϑ_L für verschiedene Wandaufbauten im Nominalbetrieb.	66
32	Simulationsergebnisse für verschiedene Wandaufbauten im „Abkühl“-Szenario mit Zustandskomponenten ϑ_V, ϑ_R und ϑ_L und der Außenlufttemperatur ϑ_{aL}	67
33	Vergleich der Raumlufttemperaturen ϑ_L für verschiedene Wandaufbauten im „Abkühl“-Szenario.	68
34	Simulationsergebnisse für verschiedene Wandaufbauten im „Kaltstart“-Szenario mit Zustandskomponenten ϑ_V, ϑ_R und ϑ_L und der Außenlufttemperatur ϑ_{aL}	69

35	Vergleich der Zustandskomponenten ϑ_V , ϑ_R und ϑ_L für das unveränderte Gebäude und das Gebäude mit Gipswandbauplatten als Innenwandmaterial im „Kaltstart“-Szenario.	71
36	Vergleich der Raumlufthtemperaturen ϑ_L für verschiedenen Wandaufbauten im „Kaltstart“-Szenario.	71

Tabellenverzeichnis

1	Indizes, Schicht- und Materialnamen sowie Materialwerte der einzelnen Außenwandschichten von innen nach außen.	32
2	Variablenamen der <code>Material</code> -Klassenattribute.	43
3	Ergebnisse des Reglerentwurfs für die verschiedenen Gebäudekonfigurationen.	70

Kapitel 1

Einleitung

Die Planung und der Bau eines Gebäudes, unabhängig von dessen Größe, ist ein planungsaufwändiger, zeitintensiver und interdisziplinärer Prozess. Auch in dieser Branche macht die Digitalisierung keinen Halt. Es beginnt sich das *Building Information Modeling* (BIM) zu etablieren, welches ein Gebäude von Planung bis Bau und darüber hinaus begleitet. BIM ermöglicht Gebäudedaten zentral zu sammeln und für alle Beteiligten zugänglich zu machen. Es liegt nun an den am Prozess beteiligten Akteuren, diese Daten möglichst effizient in bestehende Arbeitsabläufe zu integrieren oder neue Arbeitsabläufe zu entwickeln.

Je nach Größe eines Gebäudes gibt es verschiedene Lösungen zur Heizung, Belüftung und Kühlung der verschiedenen Gebäudeteile. Gemeinsamkeit ist, dass diese Systeme speziell für das Gebäude entworfen werden müssen. Das erfordert viel Expertise und birgt einen nicht zu unterschätzenden Arbeitsaufwand. Dementsprechend ist es wünschenswert, die im Rahmen des BIM zugänglich gemachten Daten zu nutzen, um diesen Entwurfsprozess zu unterstützen oder gar vollständig zu automatisieren.

Vorstöße in diese Richtung wurden bereits von verschiedenen Gruppen unternommen. Zahho et al. [31] untersuchten beispielsweise den energieeffizienten Entwurf einer Heizungs-, Belüftungs- und Kühlungslösung für ein zu errichtendes Laborgebäude. Sie benutzen für die Simulationen die Software *Ecotect*.¹ Eine Untersuchung der vorhandenen und benötigten Daten zur Ermittlung des Gebäudekomforts anhand von BIM wurde von Alshehri et al. [1] durchgeführt. Ein automatisiertes Entwurfsverfahren einer Regelstrategie für ein Gebäude mit verschiedenen Wärmeerzeugern haben Sporr et al. [25] entwickelt.

In dieser Arbeit soll ein automatisiertes Reglerentwurfsverfahren für ein Beispielgebäude, welches mit BIM modelliert wurde, entwickelt werden. Die durch BIM zur Verfügung stehenden Gebäudedaten sollen, wenn benötigt, soweit wie möglich in diesem Verfahren verwendet werden. Das Entwurfsverfahren soll dann anhand einer generierten Schar von durch BIM beschriebenen Gebäuden validiert werden. Die im Rahmen der Arbeit

¹Die Entwicklung dieser Software wurde mittlerweile eingestellt. Ihre Funktionen wurden in *Autodesk Revit* integriert.

entstehenden Programme werden in einem begleitenden Gitlab Repository hinterlegt. [\[21\]](#)

Für die Entwicklungen in dieser Arbeit wird die Programmiersprache *Python* verwendet. Sie ist quelloffen, bietet eine Vielzahl an relevanten Paketen und wird am betreuenden Institut bevorzugt verwendet.

Im Rahmen der Bearbeitung wird ein thermodynamisches Gebäudemodell erstellt, an welchem dann ein Reglerentwurf durchgeführt werden kann. Das Beispielgebäude, welches als Grundlage dient, wird dabei über die Kombination aus Heizkessel und Heizkörper beheizt, welche dementsprechend im Rahmen der Arbeit verwendet wird. Hierfür werden zunächst in Kapitel 2 die notwendigen Grundlagen zu den vorkommenden thermodynamischen Prozessen und den verwendeten BIM-Technologien beschrieben. Anschließend werden die Komponenten des Beispielgebäudes in Kapitel 3 thermodynamisch modelliert. In Kapitel 4 wird die Extraktion der Gebäudedaten aus dem BIM-Modell behandelt. Die Herleitung des Reglerentwurfsverfahren in Kapitel 5 bildet das Ende des theoretischen Teils dieser Arbeit. Anschließend werden in Kapitel 6 die Ergebnisse des Entwurfsverfahrens anhand von Simulationsstudien untersucht und in Kapitel 7 Ansätze für weiteres Vorgehen auf Basis dieser Arbeit vorgestellt.

Kapitel 2

Grundlagen

In diesem Kapitel werden die notwendigen Grundlagen aus den Bereichen der Thermodynamik, der Gebäudetechnik und der Bauwerksdatenmodellierung beschrieben. Auf weiterführende Literatur wird jeweils am Ende eines Abschnitts verwiesen.

2.1 Thermodynamik

Die Darlegungen zu den thermodynamischen Grundlagen orientieren sich an den Erklärungen in „Raumklimatechnik“ von Horst Esdorn [14, Abschnitt G].

2.1.1 Wärmeleitung

Wärmeleitung ist der Energietransport in festen und fluiden Medien, bei dem die Energie nicht durch Bewegung des Mediums, sondern durch die Eigenbewegung der Atome oder Moleküle des Mediums übertragen wird. Das Medium selbst befindet sich bei der Wärmeleitung in Ruhe, es finden also keine relevanten translatorischen Prozesse statt. Die Wärmestromdichte \dot{q} , welche die Wärmeleitung charakterisiert, wird durch das Fourier'sche Gesetz

$$\dot{q} = -\lambda \frac{d\vartheta}{dz} \quad (2.1)$$

beschrieben und ist proportional zum Temperaturgefälle in Richtung des Wärmestroms $\frac{d\vartheta}{dz}$ und der Wärmeleitfähigkeit des Mediums λ . Für eine endliche Fläche mit Flächeninhalt A und homogener Wärmestromdichte gilt für den gesamten Wärmestrom \dot{Q}

$$\dot{Q} = A\dot{q}. \quad (2.2)$$

Weiterhin gilt für stationäre und quasi-stationäre Fälle

$$\dot{Q} = -\frac{\lambda}{d} A (\vartheta_2 - \vartheta_1) \quad (2.3)$$

mit den Oberflächentemperaturen ϑ_1 und ϑ_2 und der Schichtdicke d . Der Ausdruck $\frac{\lambda}{d}A$ wird auch Wärmeleitwert genannt und ist der Kehrwert des Wärmewiderstands $R_{\text{th}} = \frac{d}{\lambda A}$. Die stationäre Gleichung ergibt sich aus den vorherigen beiden Gleichungen, wenn diese zur Betrachtung einer Schicht integriert werden. Die Schichtdicke d ergibt sich somit aus dem Differential dz , die Differenzen der Temperaturen aus dem Differential $d\vartheta$.

Streng genommen kann nur bei homogenen Medien von Wärmeleitung gesprochen werden. Die Flüssigkeiten und Feststoffe, die in dieser Arbeit betrachtet werden, und für die von Wärmeleitung ausgegangen wird, sind heterogene Stoffe. Eine Betonwand besteht beispielsweise aus Zement und einer Gesteinskörnung. Durch die heterogene Zusammensetzung kommen weitere Effekte wie Wärmestrahlung oder Energietransport durch Wasserdampfdiffusion hinzu. Diese Effekte werden allerdings bei der experimentellen Bestimmung der Wärmeleitfähigkeiten der verschiedenen Medien miteingeschlossen, weshalb man die kumulierten Wärmetransporteffekte wiederum mit dem Modell der Wärmeleitung abbilden kann.

Bei zeitlich veränderlichen Temperaturen ändert sich die im Medium gespeicherte Energie bzw. Wärme. Dieses Verhalten wird vom zweiten Fourier'schen Gesetz beschrieben (hier ohne Wärmequelle oder -senke im Medium und mit homogener Wärmeleitfähigkeit), welches zusätzlich die spezifische Wärmekapazität c und die Dichte ρ des Mediums beinhaltet:

$$\nabla^2\vartheta = \frac{\partial^2\vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\vartheta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\vartheta}{\partial z^2} = \frac{c\rho}{\lambda}\dot{\vartheta}. \quad (2.4)$$

Das zweite Fourier'sche Gesetz betrachtet alle drei Raumrichtungen x , y und z . Geht man von einer Wärmeleitung in eine einzige Richtung z aus, gilt vereinfacht

$$\frac{\partial^2\vartheta}{\partial z^2} = \frac{c\rho}{\lambda}\dot{\vartheta}. \quad (2.5)$$

Es ist anzumerken, dass die spezifische Wärmekapazität grundsätzlich eine Funktion der Temperatur und des Drucks ist. Zur Vereinfachung sind die Größen der spezifischen Wärmekapazität bei konstantem Druck, der sogenannten *isobaren* spezifischen Wärmekapazität, c_p und bei konstantem Volumen, der sogenannten *isochoren* spezifischen Wärmekapazität, c_V definiert. Für diese Arbeit wird grundsätzlich von konstantem Druck ausgegangen. Auf den Index p wird im weiteren Verlauf verzichtet.

Wärmeleitung bei mehreren Schichten

Grundsätzlich kann jede quasi-homogene Schicht¹ einzeln betrachtet werden. Liegen mehrere dieser Schichten hintereinander, können diese also getrennt voneinander betrachtet werden. Die Grenzflächentemperatur zwischen zwei aneinander liegenden Schichten

¹Homogen in dem Sinne, dass die Schicht mit einer experimentell ermittelten Wärmeleitfähigkeit λ beschrieben werden kann.

ist dann gleich. In Abbildung 1 wird ein beispielhafter zweischichtiger Aufbau dargestellt.

Für die stationäre Wärmeleitung gilt bei gleichen Flächeninhalten A

$$\dot{Q}_{S1} = -\frac{\lambda_{S1}}{d_{S1}} A (\vartheta_2 - \vartheta_1) \quad (2.6)$$

und

$$\dot{Q}_{S2} = -\frac{\lambda_{S2}}{d_{S2}} A (\vartheta_3 - \vartheta_2). \quad (2.7)$$

Für stationäre Wärmeleitung durch mehrere Schichten gilt außerdem $\dot{Q}_{S1} = \dot{Q}_{S2}$, weshalb sich die gesamte Wärmeleitung durch die Schicht mit

$$\dot{Q} = -\frac{1}{\frac{d_{S1}}{\lambda_{S1}} + \frac{d_{S2}}{\lambda_{S2}}} A (\vartheta_3 - \vartheta_1) \quad (2.8)$$

beschreiben lässt. In dieser Arbeit werden dynamische Wärmeleitprozesse betrachtet, weshalb der Ansatz in dieser Form keine Verwendung findet. Stattdessen wird er verwendet, um die Wärmeleitung zwischen zwei Wärmeknoten, die konzeptionell jeweils in der Mitte ihrer Schicht liegen, zu beschreiben. In diesem Fall wird eine Wärmeleitung durch zwei verschiedene Schichten betrachtet.

Für tiefere Informationen zur Wärmeleitung wird auf Esdorn [14, Abschnitt G 1.3] verwiesen.

2.1.2 Wärmekapazität

Für die Modellrechnungen in dieser Arbeit wird eine vereinfachte Modellierung des Wärmetransports und der Wärmespeicherung verwendet. Eine Berechnung der Wärmeverteilung der im Modell vorkommenden Schichten nach Gleichung (2.4) ist nicht nötig bzw. wird in vereinfachter Form durchgeführt.

Es reicht, für eine Schicht aus einem bestimmten Material die gesamte in dieser Schicht gespeicherte Wärme zu ermitteln. Hierfür werden sogenannte Wärmeknoten verwendet, und der Wärmetransport zwischen diesen Knoten betrachtet. Jeder dieser Knoten hat die Fähigkeit, Wärme zu speichern.

Die Wärmemenge, welche für eine bestimmte Temperaturänderung eines Stoffes notwendig ist, wird durch die Gleichung

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta\vartheta = m \cdot c \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_0) \quad (2.9)$$

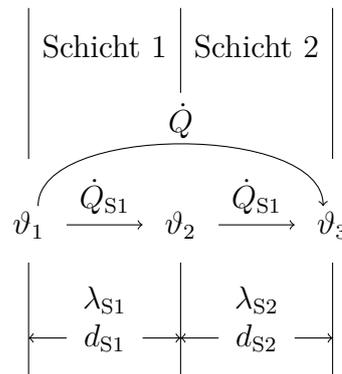


Abbildung 1 – Schematischer Aufbau von zwei Schichten mit physikalischen und thermischen Größen zur Betrachtung der Wärmeleitung.

beschrieben (vgl. Windisch [30, Gleichung 3.3]). Sie beinhaltet

- m Stoffmasse,
- c Spezifische Wärmekapazität des Stoffes,
- ϑ_0 Stofftemperatur vor der Wärmeänderung

und

- ϑ_0 Stofftemperatur nach der Wärmeänderung

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird die Anfangstemperatur ϑ_0 auf den absoluten Temperaturnullpunkt 0 K und die Endtemperatur ϑ_1 auf die momentane Stofftemperatur ϑ gesetzt. So kann die Wärme als Zustandsgröße verwendet werden. Es ergibt sich die Gleichung

$$Q = m \cdot c \cdot \vartheta. \quad (2.10)$$

Der Faktor $m \cdot c$ wird Wärmekapazität des Stoffes genannt und mit dem Formelzeichen $C = m \cdot c$ beschrieben. Für die Angabe der Wärmekapazität relativ zum Stoffvolumen V wird die Wärmespeicherzahl $s = \frac{C}{V}$ verwendet.

Um die Änderung der Wärme zu betrachten kann Gleichung (2.10) nach der Zeit abgeleitet werden. Mit einer zeitlich konstanten spezifischen Wärmekapazität c gilt

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c \cdot \vartheta + m \cdot c \cdot \dot{\vartheta}. \quad (2.11)$$

Es ergeben sich die Spezialfälle für konstante Stoffmasse m

$$\dot{Q} = m \cdot c \cdot \dot{\vartheta} \quad (2.12)$$

und für konstante Temperatur ϑ

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c \cdot \vartheta. \quad (2.13)$$

Im weiteren Verlauf wird für die betrachteten Feststoffe eine konstante Masse angenommen, weshalb größtenteils Gleichung (2.12) Anwendung findet.

2.1.3 Wärmeübergang

Ein Wärmeübergang ist die Übertragung von Wärme von einem fluiden (also flüssigen oder gasförmigen) an ein festes Medium. Für diese Art von Wärmetransport kann grundsätzlich auch die stationäre Fourier-Gleichung (2.3) verwendet werden, allerdings wird statt dem Quotienten $\frac{\lambda}{d}$ der Wärmeübergangskoeffizient α verwendet:

$$\dot{Q} = -A\alpha (\vartheta_2 - \vartheta_1). \tag{2.14}$$

Die Temperatur ϑ_1 beschreibt die Temperatur des fluiden Mediums, ϑ_2 die des festen.

Wärmeübergang zwischen Luft und Wand

Für den Wärmeübergang zwischen Luft und einer Wand wird für gewöhnlich die Wandoberflächentemperatur berechnet. Da in dieser Arbeit die betrachteten Wandtemperaturen die der Wärmeknoten in der Wand- bzw. Schichtmitte sind, muss dieser Ansatz angepasst werden.

Als Vereinfachung werden Gleichungen (2.3) und (2.14) zu einer Gleichung ähnlich (2.8) kombiniert. Dabei wird die erste Wandschicht mit der wärmeübertragenden Luftschicht an der Wandoberfläche ersetzt. Statt des Wärmeleitwerts $\frac{\lambda}{d}A$ wird für diese Schicht der für den Wärmeübergang äquivalente Faktor $\alpha_{\text{Luft} \rightarrow \text{Wand}} \cdot A$ verwendet. Die Fläche A ist die Berührungsfläche von Luft und Wand und ist für beide Schichten gleich. Der Aufbau ist in Abbildung 2 dargestellt. Um zu kennzeichnen, dass der Wärmeknoten in der Mitte der Wand liegt, wird die Temperatur in der Abbildung auf die gestrichelte Mittellinie der Schicht gesetzt. Im Gegensatz dazu, sind die Temperaturen in Abbildung 1 auf den Wandgrenzen platziert.

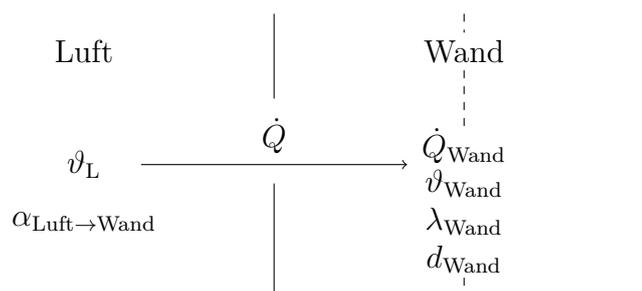


Abbildung 2 – Schematische Wandanordnung zur Erläuterung der veränderten Modellierung vom Wärmeübergang zwischen Luft und Wand.

Es resultiert die Gleichung:

$$\dot{Q} = - \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{Luft} \rightarrow \text{Wand}}} + \frac{d_{\text{Wand}}}{\lambda_{\text{Wand}}}} A (\vartheta_{\text{Wand}} - \vartheta_{\text{Luft}}). \quad (2.15)$$

Weitere Ausführungen, insbesondere zur Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten, können bei Esdorn [14, Abschnitt G 1.4] gefunden werden.

2.2 Gebäudetechnik

Die Erklärungen zu den relevanten Teilen der Gebäudetechnik sind auf Basis des „Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik“ von Recknagel et al. [24] verfasst.

Zentraler Teil der Arbeit ist der Heizkreislauf des Gebäudes. Dieser ist in Abbildung 3 schematisch dargestellt. Die Teile des Heizkreislaufs werden im Folgenden erläutert.

2.2.1 Heizkessel

Ein Heizkessel ist ein Wärmeerzeuger, in dem durch Verbrennung von fossilen, synthetischen oder biogenen Brennstoffen Wärme zur Übergabe an das Heizungssystem erzeugt wird. Das Heizwasser, welches die Wärmeenergie zum Verbraucher überträgt, wird auf die sogenannte Vorlauftemperatur ϑ_V erhitzt. Das vom Verbraucher zurückkommende Wasser hat die Rücklauftemperatur ϑ_R . Die Differenz zwischen Vor- und Rücklauftemperatur wird Spreizung σ genannt:

$$\sigma = \vartheta_V - \vartheta_R. \quad (2.16)$$

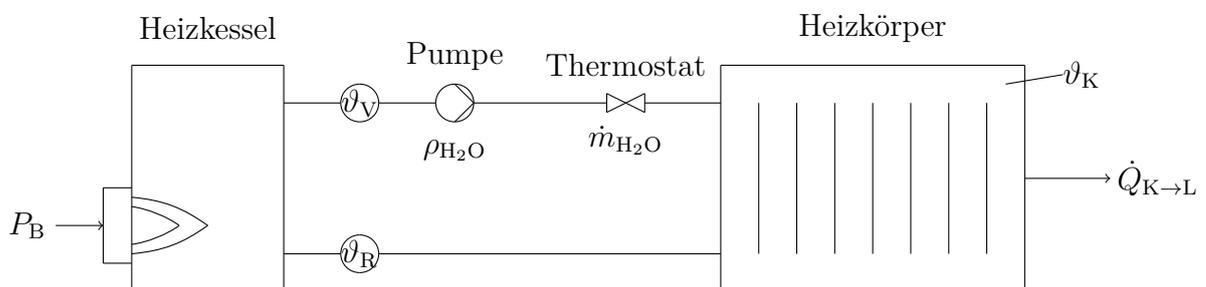


Abbildung 3 – Schematische Darstellung des der Arbeit zugrunde liegenden Heizkreislaufs mit ausgewählten physikalischen Größen.

Es gibt viele verschiedene Arten von Heizkesseln, die sich unter anderem durch ihre Brennstoffart, das Brennerprinzip und die Nennleistung unterscheiden. Die für diese Arbeit interessanten Aspekte sind die Nennleistung und die Betriebsweise. Es gibt neben dem Standardheizkessel auch Niedertemperatur- und Brennwertheizkessel, welche beide die Kondensation des in den Abgasen enthaltenen Wasserdampfs erlauben. Für eine möglichst einfache Modellierung wird in dieser Arbeit ein Standardheizkessel verwendet, da hier die Wärme lediglich aus der Verbrennung gewonnen wird.

Weiterhin können Heizkessel anhand ihrer internen Steuerung unterschieden werden. Man unterscheidet zwischen einstufigen, mehrstufigen und stufenlosen Brennern. Ein- und mehrstufige Brenner erlauben nur den Betrieb bei bestimmten vordefinierten Leistungen, während ein stufenloser Brenner eine kontinuierliche Einstellung der Leistung ermöglicht. Für diese Arbeit wird von einem stufenlosen Brenner ausgegangen, um die Modellierung zu vereinfachen.

Weiter Informationen zu den üblichen Heizkessel-Arten können bei Recknagel et al. [24, Abschnitt 2.2.5-2] gefunden werden.

2.2.2 Rohre

Um das Heizmedium vom Wärmeerzeuger zum Verbraucher zu befördern werden Rohrleitungen verwendet. Diese sind isoliert um Wärmeverluste zu minimieren. Die Wärmeverluste können durch die Gleichung

$$\dot{Q}_R = k_R \cdot (\vartheta_{\text{H}_2\text{O}} - \vartheta_L) \cdot l_R \quad (2.17)$$

mit

k_R	Wärmedurchgangskoeffizient des Rohrs mit Dämmung,
$\vartheta_{\text{H}_2\text{O}}$	Heizwassertemperatur,
ϑ_L	Lufttemperatur um das Rohr

und

l_R	Rohrlänge.
-------	------------

Der Wärmedurchgangskoeffizient kann mit anderen Gleichungen genähert werden oder aus Diagrammen wie in Recknagel et al. [24, Bild 2.2.3-31] abgelesen werden.

Weiterhin ist zu beachten, dass eine Änderung der Heizwassertemperatur durch den Heizkessel erst vom Heizmedium an den Wärmeverbraucher geleitet werden muss. Die Dauer, bis die Temperaturänderung am Verbraucher angekommen ist, hängt von der Fließgeschwindigkeit des Heizwassers ab, welche wiederum aus Rohrdurchmesser und Volumen- oder Massenstrom berechnet werden kann.

Nähere Erläuterungen zur Verlustrechnung von Rohren kann bei Recknagel et al. [24, Abschnitt 2.2.3-3.6] gefunden werden.

2.2.3 Pumpe

Die Pumpe im Heizkreislauf sorgt für einen Druck, der oberhalb des im Gebäude herrschenden Luftdrucks p_L liegen muss. Je nach Komplexität und Größe werden verschieden starke Pumpen und eine unterschiedliche Anzahl an Pumpen benötigt. Für diese Arbeit wird auf die Eigenschaften der Pumpe nicht weiter eingegangen.

2.2.4 Heizkörper

Heizkörper übertragen die Wärme des Heizwassers an die Raumluft. Der allgemein bekannte Heizkörper ist ein sogenannter Flach- oder Plattenheizkörper aus Stahl. Es gibt allerdings noch viele andere Möglichkeiten der Wärmeübertragung an die Raumluft, wie beispielsweise Fußbodenheizungen, Deckenheizungen oder Luftheizgeräte. In dieser Arbeit wird die Wärmeübertragung mittels Flachheizkörper betrachtet.

Ein Flachheizkörper hat einen Eingang und Ausgang für das als Heizmedium verwendete Heizwasser. Beim Eingang spricht man vom Vorlauf und beim Ausgang vom Rücklauf. Die Temperaturen des Heizwassers am Eingang und Ausgang des Heizkörpers sind die Vorlauftemperatur ϑ_V und die Rücklauftemperatur ϑ_R .

Die Beschreibung des Verhaltens eines Heizkörpers im Arbeitsbereich erfolgt durch die Heizkörpergleichungen (siehe Recknagel et al. [24, Abschnitt 2.6.4-1.2]), für welche zunächst die logarithmische Übertemperatur ϑ_{\ln} definiert wird:

$$\vartheta_{\ln} := \frac{\vartheta_V - \vartheta_R}{\ln \frac{\vartheta_V - \vartheta_L}{\vartheta_R - \vartheta_L}}. \quad (2.18)$$

Sie bildet den logarithmischen Mittelwert der Übertemperatur zwischen Vorlauf und Raumluft $\vartheta_V - \vartheta_L$ und der Übertemperatur zwischen Rücklauf und Raumluft $\vartheta_R - \vartheta_L$. Die Raumlufttemperatur wird hierfür mit ϑ_L bezeichnet.

Die erste Heizkörpergleichung beschreibt die Wärmeabgabe des Heizwassers an den Heizkörper:

$$\dot{Q}_{\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{K}} = \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot c_{\text{H}_2\text{O}} \cdot (\vartheta_V - \vartheta_R), \quad (2.19a)$$

die zweite die Wärmeabgabe vom Heizkörper an die Raumluft

$$\frac{\dot{Q}_{\text{K} \rightarrow \text{L}}}{\dot{Q}_0} = \left(\frac{\vartheta_{\ln}}{\vartheta_{\ln,0}} \right)^n. \quad (2.19b)$$

Die Wärmeübertragung vom Heizwasser an den Heizkörper ist von der spezifischen Wärmekapazität $c_{\text{H}_2\text{O}}$ und dem Massenfluss des Heizwassers $\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}$, sowie der Vor- und

Rücklauftemperatur abhängig. Die vom Heizkörper an die Raumluft abgegebene Wärme hängt, neben den in der logarithmischen Übertemperatur auftretenden Größen, vom Heizkörperexponenten n und der logarithmischen Übertemperatur im Normfall $\vartheta_{\text{In},0}$ ab. Sie ist außerdem auf die Normheizkörperleistung \dot{Q}_0 normiert. Der Heizkörperexponent kann aus dem Datenblatt des verwendeten Heizkörpers ermittelt werden und liegt für Plattenheizkörper meistens zwischen 1,2 und 1,3. Die Normheizkörperleistung kann ebenfalls aus dem Datenblatt entnommen werden. Sie ist von der Heizkörpergröße abhängig. Für den Normfall gilt

$$\vartheta_{\text{V},0} = 75 \text{ °C}, \quad (2.20\text{a})$$

$$\vartheta_{\text{R},0} = 65 \text{ °C}, \quad (2.20\text{b})$$

$$\vartheta_{\text{L},0} = 20 \text{ °C} \quad (2.20\text{c})$$

und

$$\vartheta_{\text{In},0} = 49,8 \text{ K}. \quad (2.20\text{d})$$

Nähere Ausführungen zu verschiedenen Arten freier Heizflächen und insbesondere zu Flach- bzw. Plattenheizkörpern, können in Recknagel et al. [24, Abschnitt 2.2.2-2] gefunden werden. Weitere Möglichkeiten zur Wärmeübergabe an die Raumluft werden in Recknagel et al. [24, Abschnitt 2.2.2] vorgestellt.

Thermostatische Heizkörperventile

Für die Regelung der Wärmeabgabe von Heizkörpern werden oft thermostatische Heizkörperventile, auch Thermostate genannt, verwendet. Dabei ist die Raumlufttemperatur ϑ_{L} die Regelgröße und die vom Ventil beeinflussbare Stellgröße der Ventilhub des thermostatischen Heizkörperventils. Dieser steuert den Massenstrom des Heizwassers $\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}$, welcher wiederum die abgegebene Wärme des Heizkörpers $\dot{Q}_{\text{K} \rightarrow \text{L}}$ und letztendlich die Raumlufttemperatur beeinflusst. Die Regelung der Raumlufttemperatur wird dabei durch einen offenen Regelkreis beschrieben, es findet keine Ermittlung eines Regelfehlers statt.

Ein thermostatisches Heizkörperventil besteht aus einem Regler und einem Ventil. Das Ventil hat um den Arbeitspunkt, also die Soll-Raumlufttemperatur $\vartheta_{\text{L},\text{soll}}$, lineares Verhalten, bis die Grenzen des Ventils, also voller Durchfluss oder kein Durchfluss, erreicht sind. Der lineare Bereich des Ventils wird P-Band genannt, welches meist eine Breite von 1 K bis 2 K hat. Durch ihren mechanischen Aufbau haben Thermostate verschiedene Öffnungs- und Schließkennlinien, wodurch sich eine Hysterese ergibt. Dadurch wird das P-Band praktisch erweitert, man spricht vom effektiven P-Band. Ein Beispiel einer Kennlinie kann Abbildung 4 entnommen werden.

Der Arbeitspunkt eines Thermostats kann durch den Nutzer über den Regler eingestellt werden. Dabei wird die Soll-Raumlufttemperatur $\vartheta_{\text{L},\text{soll}}$ durch Drehen des Thermostatkop-

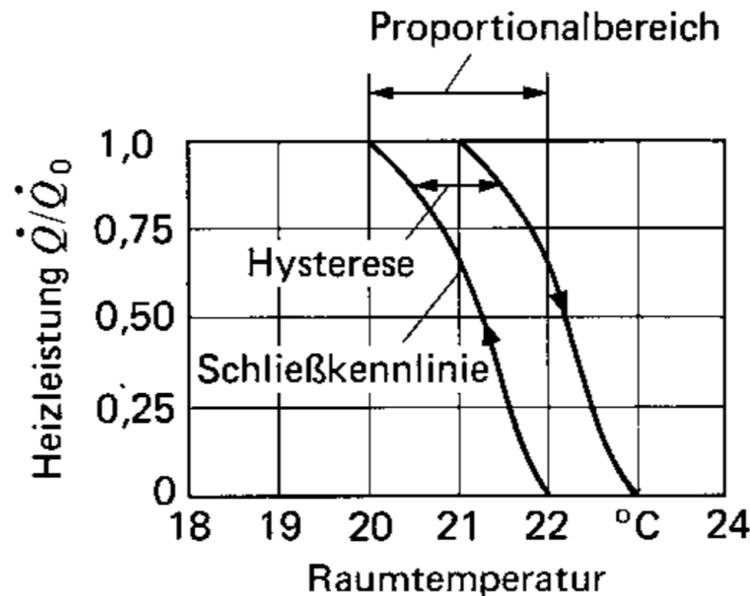


Abbildung 4 – Beispiel einer Thermostatkennlinie, entnommen aus Recknagel et al. [24, Bild 2.5.1-5].

fes festgelegt. Das effektive P-Band wird hierdurch verschoben, sodass die Solltemperatur mittig im Band liegt.

Weitere Informationen zu dem hier beschriebenen Thermostat ohne Hilfsenergie und zu weiteren Reglern mit Hilfsenergie können in [24, Abschnitt 2.5.1-1] gefunden werden.

2.3 Bauwerksdatenmodellierung

Die Grundlagen zur Bauwerksdatenmodellierung und dem IFC-Datenmodell orientieren sich an „BuildingInformationModelling“ von Borrman et al. [3].

Building Information Modelling (BIM), oder auf Deutsch: Bauwerksdatenmodellierung, ist die Planung von Gebäuden mit Hilfe digitaler Gebäudemodelle. Traditionell ist der Prozess der Planung und des Baus eines Gebäudes stark fragmentiert. Es werden gedruckte, zweidimensionale Pläne verwendet, in denen gegebenenfalls Änderungen auf Papier verzeichnet werden. Viele verschiedene Akteure sind beteiligt, die möglicherweise nicht alle anderen mitwirkenden Akteure kennen oder Kontakt zu diesen haben. Es resultiert ein Prozess, in dem viele Informationen erarbeitet werden und dann verloren gehen, wenn das Bauprojekt in eine neue Phase eintritt, und die beteiligten Unternehmen bzw. Akteure wechseln.

Mit BIM hingegen können alle Daten zum Bauwerk gesammelt werden. Dabei ist BIM nicht nur auf dreidimensionale CAD-Modelle des Gebäudes beschränkt, sondern kann auch weitere Informationen, wie zum Beispiel am Bau beteiligte Unternehmen, beinhalten.

2.3.1 IFC

Ein mögliches Datenmodell zur Beschreibung von Gebäuden sind die *Industry Foundation Classes* (IFC). Das Modell wird vom Interessenverband „buildingSMART“² herausgegeben (siehe ISO 16739-1 [19]).

Es verwendet die Datenmodellierungssprache EXPRESS, welche eine objektorientierte Beschreibung ermöglicht. Das Modell enthält Klassen, die wiederum Attribute und Beziehungen zu anderen Klassen beinhalten können. Klassen werden im IFC-Datenmodell als `entity_types` bezeichnet. Die verfügbaren Attribute sind klassenabhängig und können nicht verändert werden. Da verschiedenste Gebäude und deren Teile mit der Sprache beschrieben werden, ist das Datenmodell sehr umfangreich. Es wird eine Vielzahl an Klassen zur Verfügung gestellt, welche zu großen Teilen in eine Vererbungshierarchie angeordnet sind. An der Spitze dieser Hierarchie steht die Klasse `IfcRoot`. In Abbildung 5 werden einige wichtige Klassen und deren hierarchische Anordnung dargestellt.

Eine Besonderheit des IFC Datenmodells ist, dass Beziehungen zwischen Objekten nicht durch direkte Assoziation beschrieben werden. Stattdessen gibt es gesonderte Objekte, welche diese Beziehungen beschreiben. Eine Beziehung hat immer ein `RelatingObject` und eine Menge an `RelatedObjects`, welche mindestens ein Element besitzt. Es gibt also 1-zu-1 und 1-zu- n Beziehungen.

Zum Beispiel hat eine Wand (`IfcWall`) keine direkte Zuordnung zu seinem Typ (`IfcWallType`), sondern beide Objekte sind Attribute eines `IfcRelDefinesByType`-Objekts, das die Beziehung beschreibt. Um trotzdem auf durch Beziehungen verbundene Objekte zugreifen zu können, werden sogenannte inverse Attribute definiert, welche jeweils auf die Beziehungen verweisen. Im Fall des Wandtyps ist das inverse Attribut des `IfcWall`-Objekts, das auf das `IfcRelDefinesByType`-Objekt verweist, das Attribut `IsDefinedBy`.

Um das Datenmodell nicht unnötig zu erweitern, jedoch trotzdem im Datenmodell nicht definierte Eigenschaften eines Gebäudeteils darstellen zu können, werden die `IfcProperty`-Klasse bzw. ihre Subklassen verwendet. Mit diesen ist es möglich, einem beliebigen IFC-Objekt eine beliebige Anzahl an Name-Wert-Datentyp-Einheit Tupeln hinzuzufügen, um verschiedene Eigenschaften des Objekts zu beschreiben. Diese `IfcProperty`-Objekte werden zu `IfcPropertySet`-Objekten aggregiert. Da diese Eigenschaften allerdings im Datenmodell nicht fest definiert sind, ist es denkbar,

²Siehe <https://www.buildingsmart.org/>.

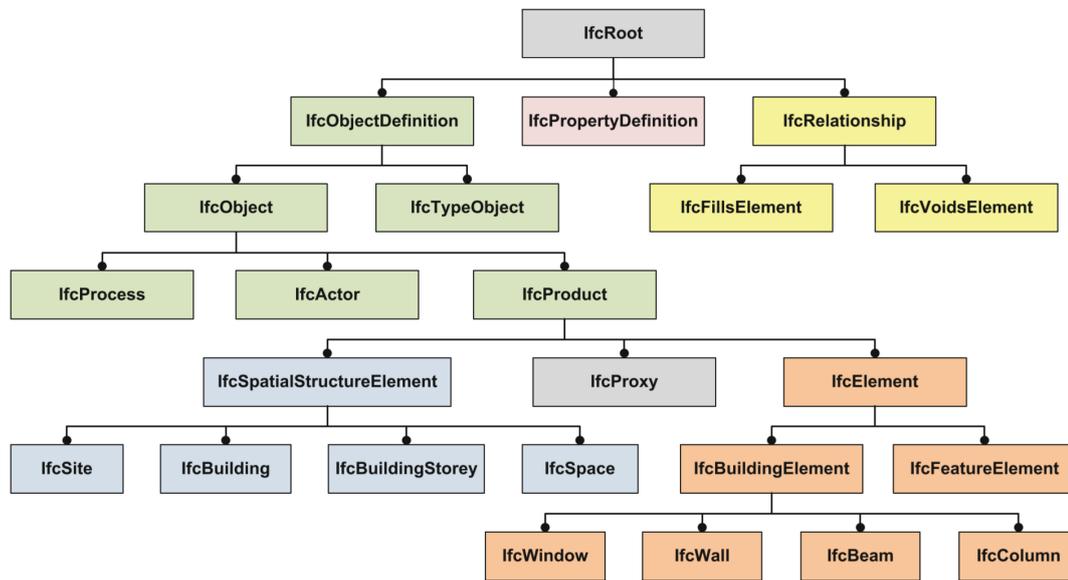


Abbildung 5 – Teil des IFC-Datenmodells mit wichtigen Klassen in Vererbungshierarchie dargestellt, übernommen aus Borrmann et al. [3, Abbildung 6.5]

dass eine bestimmte Eigenschaft auf verschiedene Arten beschrieben wird. Um dem entgegenzuwirken, werden gebräuchliche Eigenschaften standardisiert von buildingSMART zu Verfügung gestellt. Sie sind dabei nicht Teil des IFC-Datenmodells, sondern werden als XML-Dateien der Form `Pset_*.xml` (bspw. `Pset_DoorCommon.xml` oder `Pset_SpaceHeaterTypeCommon`) frei zugänglich³ bereitgestellt.

Weitere Informationen zum IFC-Datenmodell können bei Borrmann [3, Kapitel 6] gefunden werden.

IfcOpenShell

Die Programmierarbeiten in dieser Arbeit werden in der Programmiersprache Python umgesetzt. Um die Daten von IFC-Dateien in Python verwenden zu können, wird das Paket `ifcopenshell` [16] genutzt. Es stellt einige Klassen und Funktionen zur Verfügung, welche es erlauben, mit dem IFC-Datenmodell zu interagieren. Dabei können Daten aus dem IFC-Datenmodell ausgelesen, aber auch verändert, neu erzeugt und abgespeichert werden.

Zur direkten Interaktion mit IFC-Dateien wird die `file`-Klasse verwendet. Mit ihr ist es außerdem möglich, neue Dateien anzulegen. Soll eine bereits bestehende Datei geöffnet

³Siehe <https://github.com/buildingSMART/IFC4.3.x-output/tree/master/psd>

werden, kann dies mit dem Pfad der Datei und der `open()`-Funktion durchgeführt werden.

Alle weiteren Python Klassen, die IFC-Objekte darstellen, erben von der `entity_instance` Klasse. Sie stellt alle wichtigen Funktionen zum Umgang mit IFC-Objekten zur Verfügung.

Um zu überprüfen, ob ein Objekt einen bestimmten IFC-Typ hat, wird die `is_a()` Funktion benutzt. Es wird der String des zu überprüfenden Typs (bspw. "IfcWall") eingegeben und ein Boolean-Wert ausgegeben. Hierbei sei noch einmal darauf hingewiesen, dass das IFC-Datenmodell Vererbungen beinhaltet. Beispielsweise ergibt sich für ein IFC-Objekt des Typs `IfcWallStandardCase` das Verhalten in Abbildung 6. Es muss also darauf geachtet werden, auf welche Typen geprüft wird, und welche `child`-Typen bei einem bestimmten Typ auftreten.

Auf die Attribute der IFC-Objekte und damit auch auf die inversen Attribute kann mit `ifcopenshell` direkt zugegriffen werden. Die IFC-Attribute werden als Python Attribute der Python Objekte angelegt. Um auf alle inversen Attribute eines IFC-Objekts zugreifen zu können kann die Funktion `get_inverse(ifcopenshell.entity_instance)` der `file`-Klasse verwendet werden.

2.3.2 shapely Python Paket

Einige IFC-Objekteigenschaften werden mit Polygonen beschrieben. Ein Beispiel hierfür sind die Berührungsflächen zwischen Objekten. Diese können unter anderem mit `IfcCurveBoundedPlane`-Objekten beschrieben werden, welche wiederum `IfcPolyline`-Objekte als `OuterBoundary`-Attribut besitzen. Daher sind Werkzeuge notwendig, um mit diesen Polygonen sinnvoll umgehen zu können. Das `shapely`-Paket und dessen `geometry`-Modul erlauben es, Polygone aus Listen von Punkten zu erstellen und dessen Eigenschaften, wie die begrenzenden Rechtecke (engl.: Bounding Boxes) oder den Flächeninhalt, zu ermitteln.

```
In [8]: wall_standard_case.is_a('IfcWall')
Out[8]: True
In [9]: wall_standard_case.is_a('IfcWallStandardCase')
Out[9]: True
```

Abbildung 6 – Demonstration des Verhaltens der `is_a()`-Funktion bei Typenprüfung mit `parent`- und `child`-Typen.

Kapitel 3

Modellbildung

3.1 Ziele der Modellbildung

In dieser Arbeit soll auf möglichst effiziente Weise ein in einer IFC-Datei beschriebenes Gebäude unter thermodynamischen Aspekten modelliert werden, um eine Reglerauslegung für den Heizkessel durchführen zu können. Das für die Arbeit verwendete Gebäude besteht dabei aus einem einzelnen Raum. Dieser soll so beschrieben werden, dass ein System gewöhnlicher Differentialgleichungen entsteht, welches mit einem geeignet numerischen Verfahren gelöst werden kann.

Wenn möglich, sollen die physikalischen Daten aus der IFC-Datei extrahiert werden. Fehlen benötigte Daten, werden diese anderweitig ermittelt und im Text als Wert angegeben. Die Werte der aus der IFC-Datei ermittelbaren Daten werden in diesem Kapitel nicht extra genannt.

3.2 Modellgrenzen

Ein Modell kann nie die Realität vollständig und korrekt abbilden. Vielmehr soll es die Möglichkeit schaffen, ein System in einem anzunehmenden Einsatzbereich kostengünstig (im Sinne der Rechenleistung) zu simulieren. Folgende Forderungen und Modellgrenzen existieren:

1. Das Modell soll die Beheizung eines Raums betrachten. Der Fall, dass die Raumlufttemperatur über der Vorlauf- und/oder Rücklauf-temperatur der Heizung liegt ist zwar physikalisch nicht unmöglich, dieser Zustand ist in diesem Modell allerdings nicht vorgesehen. Es folgt die Forderung

$$\vartheta_V, \vartheta_R \stackrel{!}{\geq} \vartheta_L. \quad (3.1)$$

2. Das Heizwasser darf nicht Verdampfen. Daher darf die Heizwassertemperatur nicht über die (druckabhängige) Siedetemperatur steigen:

$$\vartheta_V, \vartheta_R \stackrel{!}{<} \vartheta_{\text{H}_2\text{O}, \text{Sdp}}(\rho_{\text{H}_2\text{O}}). \quad (3.2)$$

3. Das Heizwasser darf nicht gefrieren. Daher darf die Heizwassertemperatur nicht unter die (kaum druckabhängige) Schmelztemperatur fallen:

$$\vartheta_V, \vartheta_R \stackrel{!}{>} \vartheta_{\text{H}_2\text{O}, \text{Schm}}. \quad (3.3)$$

3.3 Beispielgebäude

Der verwendete Beispielraum stammt aus dem GitHub Repository `EnEffBIM_UseCases` [13] des Projekts `EnEff-BIM` [12]. Das Projekt benutzt die zur Verfügung gestellten BIM Daten zum Testen der eigenen Toolchain. Für diese Arbeit wird die Datei `UseCase1.1/1.1_Architecture+HVAC+Zone.ifc` verwendet. Sie beschreibt einen einzelnen Raum, bestehend aus einer dreischichtigen Außenwand (Beton, Isolierung und Fassade), drei Innenwänden aus Hohlblocksteinen und einer vierschichtigen Decke. Ein Boden ist nicht Teil des Modells. Der Raum wird durch einen Heizkreislauf beheizt, welcher aus einem generischen Gasheizkessel, einer Pumpe, einem Wasserspeicher, Ventilen, den Rohren und einem generischen Plattenheizkörper besteht. Eine Darstellung des Raums kann in Abbildung 7 gesehen werden.

Für diese Arbeit wird angenommen, dass dieser Raum Teil eines Gebäudes ist, in dem auf der gegenüberliegenden Seite jeder Innenwand ein weiterer Raum mit gleicher Raumlufttemperatur ϑ_L liegt. Für eine möglichst einfache Modellierung wird davon ausgegangen, dass diese anderen Räume unabhängig vom betrachteten Raum beheizt werden, jedoch trotzdem die gleiche Raumlufttemperatur haben. Die Innenwände des Beispielgebäudes sind alle Wände ohne Fenster. Sie sind in der IFC-Datei als intern gekennzeichnet, was in Abschnitt 4.1.3 zur Kategorisierung genutzt wird. Die Decke des Raums wird im Rahmen der Modellbildung ebenfalls zu den Innenwänden gezählt.

Gegenüber der Außenwand liegt die Umwelt, charakterisiert durch die Außenlufttemperatur ϑ_{aL} und den Wärmeübergangskoeffizienten $\alpha_{aW \rightarrow aL}$, welche in Abschnitt 3.6.7 näher beschrieben werden. Der Boden des Raums wird für diese Arbeit nicht berücksichtigt, da das unter dem Boden liegende Erdreich eine große Speichermasse und separate Temperatur besitzt, was das Modell aus nur einem Raum zu stark beeinflussen würde. Der Boden wird daher als adiabat betrachtet, es wird also keine Wärmeleitung durch diese Fläche und somit auch keine Speicherung der Wärme in den Medien Boden und Erdreich modelliert.

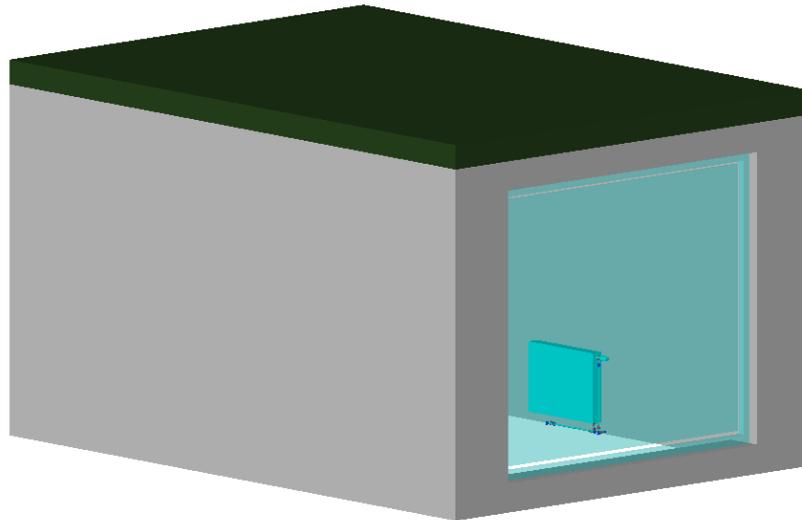


Abbildung 7 – Ansicht des Beispielraums, dargestellt mit FZKViewer [20].

Für die Bestimmung der Umweltbedingungen ist außerdem die örtliche Lage des Gebäudes relevant. In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass das Gebäude in Dresden Strehlen liegt.

3.4 Modellbildungsstrategie

Für die Modellbildung wird das System in verschiedene Teilsysteme zerlegt. Diese werden einzeln modelliert, und der Wärmetransport wird zwischen den Teilsystemen bestimmt. Das System lässt sich funktional in die Teile Wärmeerzeuger, Wärmeübertrager und Wärmeverbraucher unterteilen. Es sei darauf hingewiesen, dass diese Begriffe hier eine andere Bedeutung haben als in der Gebäudetechnik üblich ist. Der Wärmeerzeuger ist ein Heizkessel, Wärmeübertrager ein Heizkörper im zu beheizenden Raum. Die Übertragung der Wärme vom Heizkessel zum Heizkörper wird vereinfacht als verlustfrei angenommen und daher nicht weiter betrachtet. Die vom Heizkessel erzeugte Vorlauftemperatur ϑ_V herrscht somit auch sofort am Eingang des Heizkörpers. Der Wärmeverbraucher ist der zu beheizende Raum, also die Raumluft und die Wände des Raums. Der prinzipielle Aufbau des Modells mit der Flussrichtung der Wärme im Heizbetrieb kann aus [Abbildung 8](#) entnommen werden.

3.5 Allgemeine thermische Modelle

Allgemein wird für alle verschiedenen Medien bzw. Materialien in der Modellierung jeweils ein Wärmeknoten eingesetzt. Speziell gibt es Wärmeknoten für den Heizkörper, die Raumluft, die Innenwände und die verschiedenen Schichten der Außenwand. Auch das Heizwasser und die Außenluft können als Wärmeknoten angesehen werden. Dabei unterscheiden sich die Mechanismen und dementsprechend auch die Gleichungen des Wärmetransports zwischen den verschiedenen Wärmeknoten. Das Speichern der Wärme in den Knoten kann hingegen für alle Knoten auf dieselbe Art und Weise beschrieben werden. Hierfür wird die in Abschnitt 2.1.2 eingeführte Wärmekapazität verwendet. Für die Beschreibung der Wärmespeicherung in den verschiedenen Elementen müssen also die spezifische Wärmekapazität c und die Masse m des Wärmeknotenmaterials bekannt sein. Diese werden dann in die Gleichung

$$\dot{Q} = cm\dot{\vartheta} \quad (2.12 \text{ s.o.})$$

eingesetzt.

3.6 Modellteile

Im Folgenden werden die verschiedenen Modellteile separat betrachtet. Außerdem werden die Wärmetransportmechanismen zwischen den Modellteilen ermittelt.

3.6.1 Heizwasser

Das Heizwasser im Heizkreislauf wird zum Transport der Wärme vom Heizkessel zum Heizkörper verwendet. Es ändert dementsprechend nicht nur bei instationären, sondern auch bei stationären Systemzuständen seine Temperatur. Das heißt, dass das Heizwasser mit ϑ_V den Heizkessel verlässt und dort mit $\vartheta_R < \vartheta_V$ wieder ankommt. Dies zieht eine Veränderung der physikalischen Eigenschaften des Heizwassers nach sich.

Für diese Arbeit werden folgende Annahmen getroffen:

1. Die Heizwassermasse $m_{\text{H}_2\text{O}}$ ist konstant,
2. der Massenstrom des Heizwassers $\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}$ ist im gesamten Heizkreislauf gleich und
3. der Heizwasserdruck wird von einer Pumpe konstant gehalten und beträgt $p_{\text{H}_2\text{O}} = 15\,000 \text{ Pa} = 1,5 \text{ bar}$.

Das bedeutet nicht, dass der Massenstrom zeitlich konstant ist, sondern, dass er zu einem bestimmten Zeitpunkt an jedem Ort im System gleich ist. Eine weitere Eigenschaft,

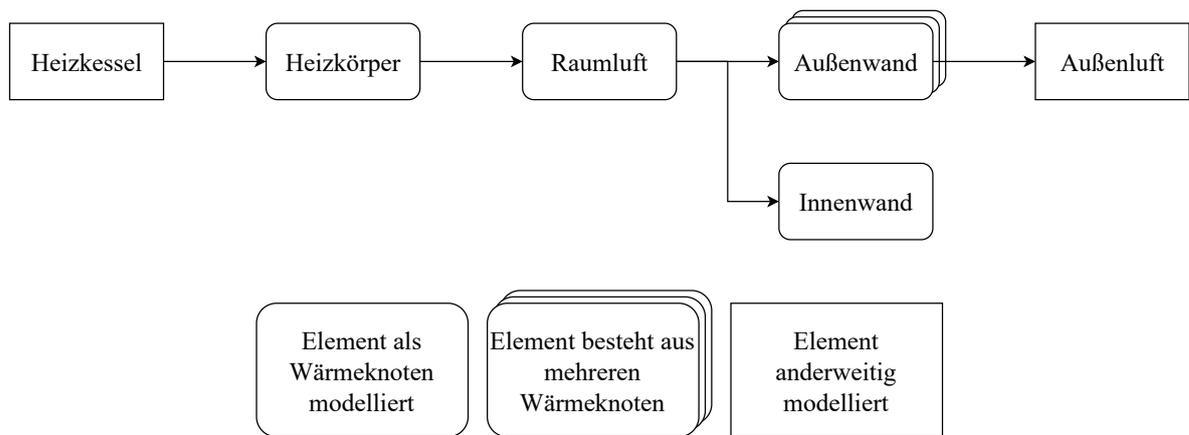


Abbildung 8 – Prinzipieller Systemaufbau mit Flussrichtung der Wärmeenergie im Heizbetrieb.

die für das Modell benötigt wird, ist die spezifische Wärmekapazität des Heizwassers $c_{\text{H}_2\text{O}}$. Diese wird mit Hilfe des `iapws`-Pakets ermittelt. Es wird das `IAPWS97`-Modul verwendet, welches die in „Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam“ der International Association for the Properties of Water and Steam [26] beschriebene IAPWS-IF97-Formulierung der thermodynamischen Eigenschaften von Wasser zur Verfügung stellt. Die Ausgabewerte des Pakets müssen teilweise nachjustiert werden, da sie nicht in SI-Einheiten angegeben werden.

Für die Ermittlung der thermodynamischen Eigenschaften sind zwei Werte notwendig, um den Zustand des Wassers eindeutig zu beschreiben. Es gibt verschiedene mögliche Kombinationen, in dieser Arbeit wird jedoch ausschließlich die Kombination aus Temperatur und Druck verwendet. Der Druck wird in dieser Arbeit als $p_{\text{H}_2\text{O}} = 1,5 \text{ bar}$ angenommen, kann aber auch als frei wählbarer Parameter an die entsprechende Funktion weitergegeben werden.

3.6.2 Heizkessel

Als Heizkessel wird ein Standardheizkessel mit stufenloser Leistungseinstellung und einer maximalen Leistung $P_{\text{B,max}} = 15 \text{ kW}$ angenommen. Der Heizkessel heizt das Heizwasser von der Rücklauftemperatur ϑ_{R} auf die Vorlauftemperatur ϑ_{V} auf. Er fasst ein Wasservolumen von $V_{\text{B}} = 10 \text{ L}$. Es wird angenommen, dass die Heizwassererhitzung verlustfrei geschieht.

Die Modellierung des Heizkessels wird aus „Model-based Controller Design Methods for Heating Systems“ von Pangalos [23, Abschnitt 3.1.1] übernommen. Es wird eine Wärmeflussbilanz aufgestellt, die sich aus den Wärmeflüssen aus dem Kessel in den

Heizkreisvorlauf \dot{Q}_V , aus dem Heizkreisrücklauf in den Kessel \dot{Q}_R , der Wärmeänderung des sich im Heizkessel befindlichen Heizwassers \dot{Q}_B , sowie der von außen hinzugefügten Wärme in Form der Brennerleistung P_B zusammensetzt:

$$0 = \dot{Q}_B + \dot{Q}_R - \dot{Q}_V + P_B. \quad (3.4)$$

Es wird lediglich der Kessel selbst betrachtet. Daher sind die Wassermassen für Heizwasservorlauf und -rücklauf $m_V = m_R = 0$. Sie befinden sich außerhalb des Heizkessels und werden somit bei der Modellierung des Heizkessels nicht betrachtet. Folglich werden die Wärmeflüsse \dot{Q}_V und \dot{Q}_R mit Gleichung (2.13) beschrieben:

$$\dot{Q}_V := c_{\text{H}_2\text{O}}(\vartheta_V) \cdot \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \vartheta_V \quad (3.5)$$

und

$$\dot{Q}_R := c_{\text{H}_2\text{O}}(\vartheta_R) \cdot \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \vartheta_R. \quad (3.6)$$

Der Massestrom des Heizwassers $\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}$ ist im gesamten Heizkreislauf gleich und wird deshalb in beiden Gleichungen verwendet. Die spezifische Wärmekapazität ist abhängig von der Wassertemperatur ϑ_V bzw. ϑ_R und vom Wasserdruck $p_{\text{H}_2\text{O}}$, der allerdings im Modell konstant ist und deshalb in den Gleichungen nicht explizit erwähnt wird.

Im Heizkessel selbst ändert sich das Kesselvolumen V_B und somit die Wassermasse im Kessel m_B nicht, weshalb für die Beschreibung der Wärmeänderung der Vorlauftemperatur die Gleichung (2.12) verwendet wird:

$$\dot{Q}_B := \underbrace{\rho_{\text{H}_2\text{O}} \cdot V_B}_{m_B} \cdot c_{\text{H}_2\text{O}}(\bar{\vartheta}_{\text{H}_2\text{O}}) \cdot \dot{\vartheta}_V. \quad (3.7)$$

Sie beinhaltet

$\rho_{\text{H}_2\text{O}}$	Heizwasserdichte,
V_B	Heizwasservolumen im Heizkessel,
$c_{\text{H}_2\text{O}}$	Spezifische Wärmekapazität des Heizwassers

und

$\dot{\vartheta}_V$ Zeitliche Änderung der Vorlauftemperatur.

Die spezifische Wärmekapazität ist von der Wassertemperatur abhängig, die sich im Heizkessel von ϑ_R auf ϑ_V erhöht. Daher wird für die Berechnung der spezifischen Wärmekapazität als Heizwassertemperatur im Heizkessel die mittlere Heizwassertemperatur $\bar{\vartheta}_{\text{H}_2\text{O}}$ mit

$$\bar{\vartheta}_{\text{H}_2\text{O}} := \frac{\vartheta_V + \vartheta_R}{2} \quad (3.8)$$

verwendet.

Setzt man in Gleichung (3.4) ein erhält man

$$0 = \rho_{\text{H}_2\text{O}} \cdot V_{\text{B}} \cdot c_{\text{H}_2\text{O}}(\bar{\vartheta}_{\text{H}_2\text{O}}) \cdot \dot{\vartheta}_{\text{V}} + c_{\text{H}_2\text{O}}(\vartheta_{\text{R}}) \cdot \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \vartheta_{\text{R}} - c_{\text{H}_2\text{O}}(\vartheta_{\text{V}}) \cdot \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \vartheta_{\text{V}} + P_{\text{B}}. \quad (3.9)$$

Diese Gleichung kann in die explizite Differentialgleichung

$$\dot{\vartheta}_{\text{V}} = \frac{P_{\text{B}} + \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot (c_{\text{H}_2\text{O}}(\vartheta_{\text{R}}) \cdot \vartheta_{\text{R}} - c_{\text{H}_2\text{O}}(\vartheta_{\text{V}}) \cdot \vartheta_{\text{V}})}{\rho_{\text{H}_2\text{O}} \cdot V_{\text{B}} \cdot c_{\text{H}_2\text{O}}(\bar{\vartheta}_{\text{H}_2\text{O}})} \quad (3.10)$$

für die Vorlauftemperatur umgeformt werden.

3.6.3 Heizkörper

Für die Modellierung des Heizkörpers wird von einem Plattenheizkörper ausgegangen. Der Heizkörper bezeichnet dabei das Gefäß, welches vom Heizmedium durchflossen wird. Das Heizmedium ist separat zu betrachten. Der Heizkörper selbst wird als Wärmeknoten mit dem Wärmefluss

$$\dot{Q}_{\text{K}} := C_{\text{K}} \cdot \dot{\vartheta}_{\text{H}_2\text{O}} \quad (3.11)$$

modelliert. Dieser beschreibt die Änderung der im Heizkörper gespeicherten Wärme, nicht die durch den Heizkörper an die Raumluft abgegebene Wärme. Es wird hierbei davon ausgegangen, dass die Heizkörpertemperatur gleich der mittleren Heizwassertemperatur $\bar{\vartheta}_{\text{H}_2\text{O}}$ ist. Aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit des Heizkörpermaterials Stahl, von mehr als 45 W/(mK) (siehe Recknagel et al. [24, Tafel 1.3.5-2]), kann hier, im Vergleich zu den Wärmeleitfähigkeiten der weiteren Gebäudematerialien, von einer quasi-sofortigen Wärmeübertragung vom Heizwasser an den Heizkörper ausgegangen werden.

Die für die Berechnung der Wärmekapazität des Heizkörpers benötigte spezifische Wärmekapazität c_{K} und die Leermasse m_{K} sind nicht Teil der BIM-Daten. Um diese Daten zu erhalten, wird ein Heizkörper gesucht, der gleichen Typs und gleicher Dimensionen des Heizkörpers in der IFC-Datei ist. Der „Kermi therm-x2 Profil-Kompakt-Heizkörper“ erfüllt diese Anforderungen. Die Leermasse beträgt laut baumarkteu.de [2] $m_{\text{K}} = 27,6$ kg. Da Plattenheizkörper aus Stahlblech gefertigt werden (vgl. Recknagel et al. [24, Abschnitt 2.2.2-2.1]), kann die spezifische Wärmekapazität von legiertem Stahl verwendet werden. Diese ist laut Ihle et al. [18, Tabelle 103.1] $c_{\text{K}} = 460$ J/(kgK).

Der Wärmefluss vom Heizwasser in den Heizkörper wird durch die erste Heizkörpergleichung

$$\dot{Q}_{\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{K}} := \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot (c_{\text{H}_2\text{O}}(\vartheta_{\text{V}}) \cdot \vartheta_{\text{V}} - c_{\text{H}_2\text{O}}(\vartheta_{\text{R}}) \cdot \vartheta_{\text{R}}) \quad (2.19a \text{ s.o.})$$

beschrieben, der Wärmefluss vom Heizkörper an die Raumluft durch die zweite Heizkörpergleichung

$$\frac{\dot{Q}_{\text{K} \rightarrow \text{L}}}{\dot{Q}_0} := \left(\frac{\vartheta_{\text{In}}}{\vartheta_{\text{In},0}} \right)^n. \quad (2.19b \text{ s.o.})$$

Der Heizkörperexponent und die Nennleistung können aus den BIM-Daten entnommen werden. Der Heizkörperexponent beträgt $n = 1,3208$, die Nennleistung¹ $\dot{Q}_0 = 1119 \text{ W}$.

Logarithmische Übertemperatur

Die logarithmische Übertemperatur

$$\vartheta_{\ln} = \frac{\vartheta_V - \vartheta_R}{\ln \frac{\vartheta_V - \vartheta_L}{\vartheta_R - \vartheta_L}} \quad (2.18 \text{ s.o.})$$

besitzt mehrere Singularitäten, die beachtet werden müssen. Für den Fall, dass $\vartheta_V = \vartheta_R$ ist, entsteht im Nenner eine Null, welche zu einer hebbaren Singularität führt. Sie kann in Abbildung 9 erkannt werden.

Die Singularität kann mit einer Grenzwertbetrachtung nach L'Hospital behoben werden:

$$\lim_{\vartheta_V \rightarrow \vartheta_R} \frac{\vartheta_V - \vartheta_R}{\ln \frac{\vartheta_V - \vartheta_L}{\vartheta_R - \vartheta_L}} \stackrel{\left[\frac{0}{0}\right]}{=} \lim_{\vartheta_V \rightarrow \vartheta_R} \frac{1}{\frac{\vartheta_R - \vartheta_L}{\vartheta_V - \vartheta_L} \cdot \frac{1}{\vartheta_R - \vartheta_L}} = \vartheta_R - \vartheta_L. \quad (3.12)$$

Weiterhin existieren Singularitäten für

$$\begin{aligned} \frac{\vartheta_V - \vartheta_L}{\vartheta_R - \vartheta_L} &= 0 \\ \implies \vartheta_V - \vartheta_L &= 0 \end{aligned} \quad (3.13a)$$

und für

$$\vartheta_R - \vartheta_L = 0. \quad (3.13b)$$

Diese Singularitäten werden durch die Verwendung einer stückweise definierten Funktion beseitigt.²

Für die Bereiche $\vartheta_V > \vartheta_L \cap \vartheta_R < \vartheta_L$ und $\vartheta_V < \vartheta_L \cap \vartheta_R > \vartheta_L$ existieren keine reellen Lösungen für den logarithmischen Term. Da hier eine Temperatur berechnet wird, sind komplexe Lösungen nicht sinnvoll. Für den Bereich $\vartheta_V, \vartheta_R < \vartheta_L$ existieren zwar reelle Lösungen, diese werden aber laut der Bedingung (3.1), genauso wie die oben genannten Bereiche, nicht benötigt.

Um die Singularitäten im Fall $\log(0)$ und $\vartheta_R = \vartheta_L$ auszuschließen und gutartiges Verhalten für eventuelle Modellbedingungsverletzungen zu erhalten, werden für alle

¹Wärmeabgabe des Heizkörpers bei Normbedingungen, siehe Gleichung (2.20).

²Der erste Ansatz dieser Funktion mitsamt der Glättung stammt von Dr. Knoll. Der Ansatz wurde dann vom Autor weiterentwickelt und angepasst.

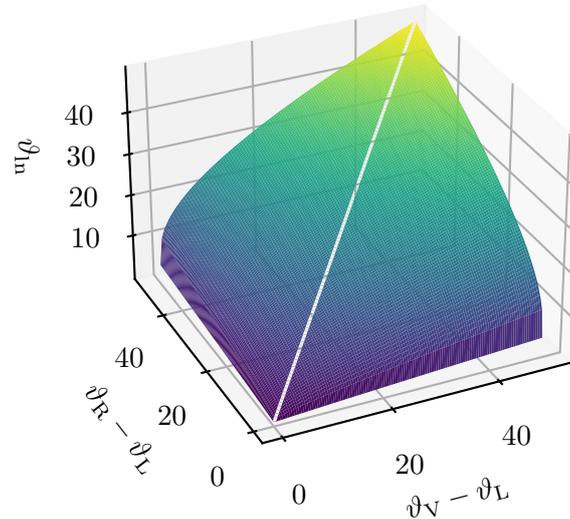


Abbildung 9 – Logarithmische Übertemperatur mit der Singularität für $\vartheta_V = \vartheta_R$.

Heizwassertemperaturwerte, die nicht im Bereich der Bedingung (3.1) liegen, der Wert Null für die logarithmische Übertemperatur ausgegeben. Für den Fall der hebbaren Singularität wird die in Gleichung (3.12) berechnete Grenzwertfunktion eingesetzt. Der Fall $\vartheta_V = \vartheta_R = \vartheta_L$ ist ein Sonderfall dieser Singularität und ergibt für die logarithmische Übertemperatur Null.

Für die Simulation mittels numerischer Lösungsverfahren und die Ruhelagefindung mittels Optimierung ist es sinnvoll, Unstetigkeiten zu vermeiden. Hierfür werden der Funktion für die logarithmischen Übertemperatur zwei Glättungsterme g_V und g_R hinzugefügt. Diese sind jeweils von der Form

$$g(\delta) := 1 - e^{-\frac{\delta^2}{k_G}}, \quad (3.14)$$

besitzen einen anpassbaren Glättungskoeffizienten k_G und sind von den Differenzen

$$\delta_V := \vartheta_V - \vartheta_L \quad (3.15a)$$

und

$$\delta_R := \vartheta_R - \vartheta_L \quad (3.15b)$$

abhängig. Insgesamt ergibt sich dann die in Abbildung 10 dargestellte Funktion

$$\bar{\vartheta}_{\ln}(\vartheta_V, \vartheta_R, \vartheta_L, k_G) := \begin{cases} 0 & \text{für } \vartheta_V, \vartheta_R < \vartheta_L \\ g_V \cdot g_R \cdot (\vartheta_R - \vartheta_L) & \text{für } (\vartheta_V = \vartheta_R) \wedge (\vartheta_V, \vartheta_R \geq \vartheta_L) \\ g_V \cdot g_R \cdot \frac{\vartheta_V - \vartheta_R}{\ln \frac{\vartheta_V - \vartheta_L}{\vartheta_R - \vartheta_L}} & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.16)$$

Abbildung 11 zeigt die Funktion mit einem sehr hohen Glättungskoeffizienten von $k_G = 100$ zur Verdeutlichung seiner Funktion. Im weiteren Verlauf wird er auf $k_G = 1$ gesetzt.

Thermostatisches Heizkörperventil

Das Thermostat wird verwendet, um die Raumlufttemperatur mittels der Wärmeabgabe des Heizkörpers zu regeln. Wie in Abschnitt 2.2.4 beschrieben, ist die eigentliche Stellgröße der Ventilhub, welcher den Massenfluss des Heizwassers steuert. Für die Modellberechnungen wird direkt der Massenfluss betrachtet. Da eine Hysterese, wie sie in der Kennlinie eines Thermostats auftaucht (vgl. Recknagel et al. [24, Abschnitt 2.5.1-1.1 und Bild 2.5.1-5]), die Simulation mittels eines numerischen Lösungsalgorithmus für Differentialgleichungssysteme verkompliziert, wird für die Modellierung von einer idealen, Hysterese-freien Thermostat-Kennlinie ausgegangen. Das P-Band, also der Bereich, in dem sich das Thermostat linear verhält, wird mit einer Breite von 2 K dimensioniert, als Obergrenze des Durchflusses wird der Nenndurchfluss $\dot{m}_{\text{H}_2\text{O},0}$ des Ventils berechnet und verwendet. An der unteren Grenze sperrt das Ventil. Der Nenndurchfluss wird mit Hilfe der Nennleistung des Heizkörpers und Gleichung 2.19a berechnet:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{\text{H}_2\text{O},0} &:= \frac{\dot{Q}_0}{c_{\text{H}_2\text{O}}(\vartheta_{V,0}) \cdot \vartheta_{V,0} - c_{\text{H}_2\text{O}}(\vartheta_{R,0}) \cdot \vartheta_{R,0}} \\ &= \frac{1119 \text{ W}}{c_{\text{H}_2\text{O}}(75^\circ\text{C}) \cdot 75^\circ\text{C} - c_{\text{H}_2\text{O}}(65^\circ\text{C}) \cdot 65^\circ\text{C}} \\ &= 3,185 \cdot 10^{-2} \frac{\text{kg}}{\text{s}}. \end{aligned} \quad (3.17)$$

Der angegebene Wert ist auf vier signifikante Stellen gerundet.

Für das Thermostat kann dann folgende Funktion verwendet werden:

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} := \begin{cases} \dot{m}_{\text{H}_2\text{O},0} & \text{für } \vartheta_L < \vartheta_{L,\text{soll}} - 1 \text{ K} \\ \frac{-(\vartheta_L - \vartheta_{L,\text{soll}} - 1 \text{ K})}{2} \cdot \dot{m}_{\text{H}_2\text{O},0} & \text{für } \vartheta_{L,\text{soll}} - 1 \text{ K} \leq \vartheta_L < \vartheta_{L,\text{soll}} + 1 \text{ K} \\ 0 & \text{für } \vartheta_L \geq \vartheta_{L,\text{soll}} + 1 \text{ K} \end{cases} \quad (3.18)$$

welche in Abbildung 12 zu sehen ist.

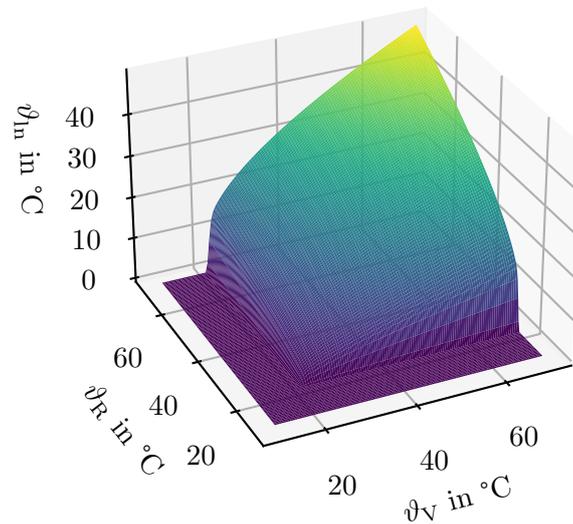


Abbildung 10 – Angepasste Funktion $\bar{\vartheta}_{ln}$ zur Berechnung der logarithmischen Übertemperatur ϑ_{ln} mit einem Glättungskoeffizienten von $k_G = 1$.

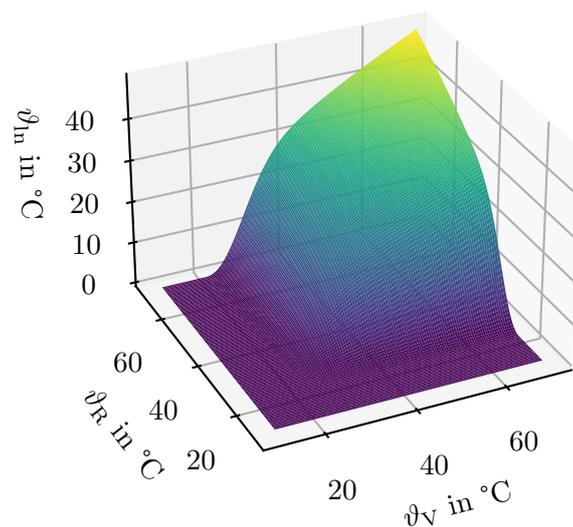


Abbildung 11 – Angepasste Funktion $\bar{\vartheta}_{ln}$ zur Berechnung der logarithmischen Übertemperatur ϑ_{ln} mit einem Glättungskoeffizienten von $k_G = 100$.

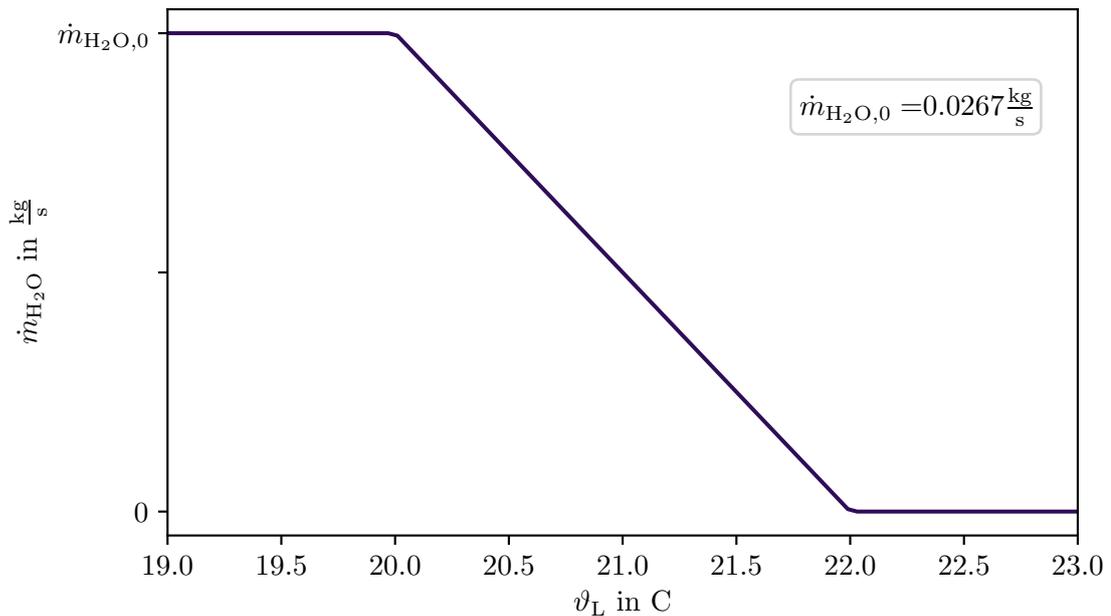


Abbildung 12 – Thermostatkennlinie für $\vartheta_{\text{L},\text{soll}} = 21 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

3.6.4 Rohre

Die Rohrlängen in der Beispieldatei sind sehr klein. Da die Verluste dadurch gering ausfallen, wird die gesamte Rohrlänge als $l_{\text{R}} = 0$ angenommen. So kann auch das Problem der Verzögerung von Temperaturänderungen zwischen Heizkessel und Heizkörper umgangen werden. Diese müssten sonst mit einem Totzeitglied modelliert werden, welches die Modellierung deutlich komplexer gestalten würde.

3.6.5 Raum

Raumluft

Die relevanten Elemente des zu beheizenden Raums sind zum einen die Raumluft und zum anderen die verschiedenen Wände des Raums. Der Wärmeknoten der Raumluft wird durch

$$\dot{Q}_{\text{L}} := C_{\text{L}} \cdot \vartheta_{\text{L}} \quad (3.19)$$

beschrieben. Die Wärmekapazität der Raumluft C_{L} ergibt sich aus

$$C_{\text{L}} := \rho_{\text{L}}(\vartheta_{\text{L}}) \cdot V_{\text{L}} \cdot c_{\text{L}}(\vartheta_{\text{L}}) = \frac{p_{\text{L}}}{R_{\text{s,Luft(trocken)}} \cdot \vartheta_{\text{L}}} \cdot V_{\text{L}} \cdot c_{\text{L}}(\vartheta_{\text{L}}) \quad (3.20)$$

mit

ρ_L	Raumluftdichte,
V_L	Raumluftvolumen,
c_L	Spezifische Wärmekapazität der Raumluft,
p_L	Raumluftdichte,
$R_{s,\text{Luft(trocken)}}$	Spezifische Gaskonstante von trockener Luft

und

ϑ_L	Raumlufttemperatur.
---------------	---------------------

Die Wärmekapazität der Raumluft hängt von der Luftfeuchtigkeit ab, welche hier vereinfachend als Null angenommen wird. Die Luftdichte ist temperaturabhängig und wird mit der idealen Gasgleichung ermittelt. Der Luftdruck wird als Standard-Luftdruck mit $p_L = 1,013\,25$ bar angenommen. Die spezifische Gaskonstante $R_s = \frac{R}{M}$ ist der Quotient der Gaskonstante und der molaren Masse des betrachteten Gases und lautet für trockene Luft etwa

$$R_{s,\text{Luft(trocken)}} = \frac{8,314\,462\,618\text{ J}/(\text{mol K})}{0,028\,964\,4\text{ kg/mol}} \approx 287,1 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} \quad (3.21)$$

(R aus Tiesinga [27] und $M_{\text{Luft(trocken)}}$ aus Warnecke [29, Abschnitt 2.1.1]).

Weiterhin ist die spezifische Wärmekapazität der Luft temperaturabhängig. Um diese Abhängigkeit zu beschreiben, werden relevante Werte von Urieli [28] verwendet und interpoliert. Die Werte der Interpolation können dann während der Simulation abgerufen werden. Für die Interpolation wird das `interpolate`-Modul des `scipy`-Pakets verwendet.

Von der Modellierung des Fensterlüftens wird abgesehen, wohl aber die sogenannte Infiltration betrachtet. Diese beschreibt den Luftaustausch mit der Umwelt aufgrund von Undichtheiten des Gebäudes, insbesondere am Fenster. Sie wird mittels der Luftwechselrate n_{inf} beschrieben und ist laut DIN 12831-1:2017 [9, Anlage B] mit mindestens $n_{\text{inf}} = 0,5/\text{h}$ zu bemessen. Diese Luftwechselzahl beschreibt den Anteil des Gesamtvolumens der Raumluft, der pro Stunde mit Außenluft ausgetauscht wird. Mit ihr kann der resultierende Wärmefluss unter Einbeziehung der Wärmekapazität der Innenraumluft C_L und der Raumluft- und Außenlufttemperatur wie folgt beschrieben werden:

$$\dot{Q}_{\text{inf}} := n_{\text{inf}} \cdot C_L \cdot (\vartheta_L - \vartheta_{aL}). \quad (3.22)$$

Wände

Die Wände des Raums bestehen entweder aus einer einzelnen Schicht (Innenwände, siehe Abbildung 13) oder drei Schichten (Außenwand, siehe Abbildung 14). Für die Berechnung des thermodynamischen Verhaltens wird für jede Wandschicht ein Wärmeknoten

eingesetzt. Weiterhin wird zwischen Wand und angrenzender Luft ein Wärmeübergang nach Gleichung 2.15 modelliert. Gibt es weitere Schichten, wird der Wärmetransport zwischen diesen mit Gleichung 2.3 beschrieben, wobei ähnlich wie in Gleichung 2.15 jeweils die halbe Wandschicht der Wärmeknoten für die Wärmeleitfähigkeiten und Schichtdicken verwendet wird.

Der Beispielraum besitzt drei Innenwände und eine Außenwand mit einem eingebetteten Fenster. Dies und die bereits genannte Anzahl an Wandschichten wird bei der Modellierung direkt berücksichtigt. Es ist daher nicht möglich, einen Raum mit beispielsweise zwei Außen- und zwei Innenwänden mit jeweils zwei Schichten zu simulieren.

Innenwände

Der Aufbau aller Innenwände des Beispielraums ist identisch. Auf der Rückseite aller Innenwände wird von gleicher Raumlufttemperatur ϑ_L wie im modellierten Raum ausgegangen. Der schematische Aufbau der Innenwände mit den zugehörigen physikalischen und thermischen Größen ist in Abbildung 13 dargestellt. Im Beispielgebäude bestehen die Innenwände aus Hohlblocksteinen, welche wiederum aus Beton bestehen. Ein Datenblatt für Hohlblocksteine wie sie im Gebäude verwendet werden kann von der Gebr. Geraedts & Co. GmbH [15] gefunden werden. Aus dem Datenblatt können benötigte Materialkonstanten übernommen werden.

Die Decke des Raums wird zu den Innenwänden gezählt und wie diese modelliert. Hierbei entsteht ein geringer Fehler, da die Raumdecke nicht aus dem gleichen Material wie die Innenwände besteht. Sowohl die Innenwände als auch die Decke bestehen aber zum Großteil aus Beton, weshalb sich die Materialeigenschaften kaum unterscheiden und der Fehler somit gering ausfällt und akzeptabel ist.

Alle Innenwände und die Decke können mit einer einzigen Gleichung beschrieben werden. Diese verwendet die Summe aller Innenwandflächen und der Deckenfläche $A_{\Sigma iW}$. Der Wärmeübergang vom Raum in diese Flächen wird durch

$$\dot{Q}_{L \rightarrow iW}^* := \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{L \rightarrow iW}} + \frac{2}{\lambda_{iW}}} \cdot A_{\Sigma iW} \cdot (\vartheta_L - \vartheta_{iW}) \quad (3.23)$$

mit

$\alpha_{L \rightarrow iW}$	Wärmeübergangskoeffizient von der Raumluft an die Innenwand,
λ_{iW}	Wärmeleitfähigkeit der Innenwand,
d_{iW}	Innenwanddicke,
$A_{\Sigma iW}$	Summe aller Innenwandflächen und der Deckenfläche

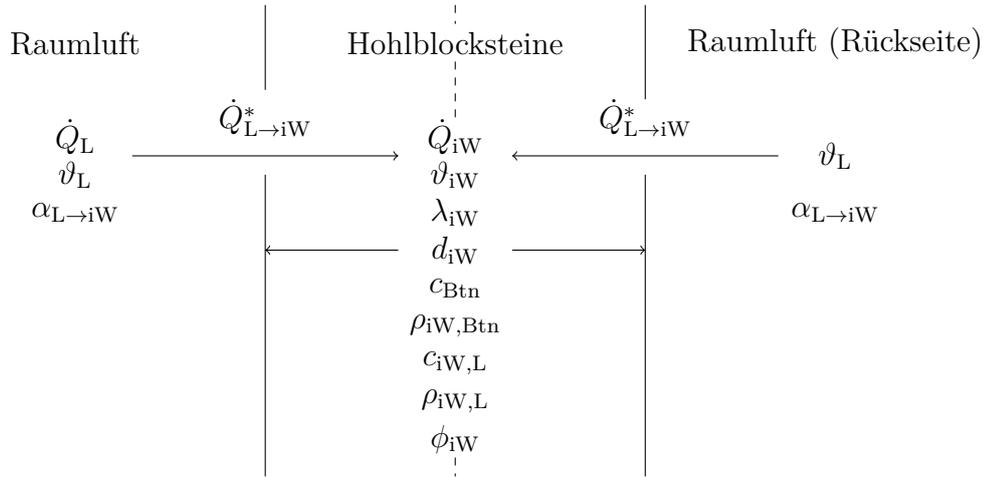


Abbildung 13 – Schematischer Innenwandaufbau mit zugehörigen physikalischen und thermischen Größen. Die Innenwandtemperatur ϑ_{iW} liegt auf der Mittellinie der Wandschicht um zu verdeutlichen, dass der Wärmeknoten der Wand in der Wandmitte liegt.

und

ϑ_{iW} Temperatur des Innenwandknotens.

Der Wärmeübergangskoeffizient ist laut Recknagel et al. [24, Tafel 1.3.5-14] für Wärmeübergänge in Innenräumen $\alpha_{L \rightarrow iW} = 7,7 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Die Wärmeleitfähigkeit der Hohlblocksteine ist laut Datenblatt $\lambda_{iW} = 0,39 \text{ W}/(\text{m K})$.

Auf der Rückseite der Wand spielt sich der gleiche Prozess ab, welcher ebenfalls mit Gleichung (3.23) beschrieben werden kann. Daher kann für die Gesamtbetrachtung der Wärmefluss verdoppelt werden:

$$\dot{Q}_{L \rightarrow iW} := 2\dot{Q}_{L \rightarrow iW}^* = \frac{2}{\frac{1}{\alpha_{L \rightarrow iW}} + \frac{2}{\lambda_{iW}}} \cdot A_{\Sigma iW} \cdot (\vartheta_L - \vartheta_{iW}). \quad (3.24)$$

Für die Beschreibung des Wärmespeichers wird die gesamte Wandspeichermasse berechnet. Die Hohlblocksteinen besitzen im Inneren Luftkammern. Es muss also sowohl die Speichermasse des Betons als auch die der eingeschlossenen Luft berücksichtigt werden. Aus den BIM-Daten kann ausgelesen werden, dass die Innenwände eine Dicke von $d_{iW} = 24 \text{ cm}$ haben. Die Betonmasse $m_{iW, Btn}$ wird mit der im verwendeten Datenblatt angegebenen Dichte von $\rho_{iW, Btn} = 900 \text{ kg}/\text{m}^3$ und dem gesamten Wandvolumen berechnet. Die spezifische Wärmekapazität des Betons ist laut Recknagel et al. [24, Tafel 1.3.1-7] $c_{Btn} = 1000 \text{ J}/(\text{kg K})$. Die spezifische Wärmekapazität der eingeschlossenen Luft kann wie in Abschnitt 3.6.5 beschrieben in Abhängigkeit von ϑ_{iW} bestimmt werden.

Eine Übersichtsrechnung anhand der Vorgaben in DIN 20000-403:2019-11 [7, Abschnitt 4.5.5 und Tabelle A.1] ergibt, dass die Steine einen volumenmäßigen Luftanteil von $\phi_{iW} = \frac{15}{49}$ haben. Somit kann der Wärmespeicher mittels

$$\dot{Q}_{iW} := \left(\underbrace{\frac{p}{R_{s,\text{Luft(trocken)}} \cdot \vartheta_{iW}}}_{\rho_{iW,L}} \cdot c_{iW,L}(\vartheta_{iW}) \cdot \underbrace{A_{\Sigma iW} \cdot d_{iW} \cdot \phi_{iW}}_{V_{iW,L}} \right. \\ \left. + c_{Btn} \cdot \underbrace{A_{\Sigma iW} \cdot d_{iW} \cdot \rho_{iW,Btn}}_{m_{iW,Btn}} \right) \dot{\vartheta}_{iW} \quad (3.25)$$

berechnet werden.

Außenwand

Die Außenwand besteht aus drei verschiedenen Schichten und hat außerdem ein Fenster. Der schematische Aufbau der Wand mit zugehörigen physikalischen Eigenschaften, thermischen Größen und Wärmetransportmechanismen ist in Abbildung 14 dargestellt. Die Indizes und Namen der einzelnen Schichten sowie deren Materialwerte können Tabelle 1 entnommen werden.

Im Gegensatz zu der Innenwand herrscht auf der äußeren Seite der Außenwand die Außenlufttemperatur ϑ_{aL} . Nichtsdestotrotz ist die prinzipielle Modellierung der Modellierung der Innenwände sehr ähnlich. Die Übergänge zwischen Raumluft und Wand sowie Wand und Außenluft können durch

$$\dot{Q}_{L \rightarrow aW} := \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{L \rightarrow aW}} + \frac{d_{aW,Btn}}{2 \lambda_{aW,Btn}}} \cdot A_{aW} \cdot (\vartheta_L - \vartheta_{aW,Btn}) \quad (3.26a)$$

und

$$\dot{Q}_{aW \rightarrow aL} := \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{aW \rightarrow aL}} + \frac{d_{aW,Putz}}{2 \lambda_{aW,Putz}}} \cdot A_{aW} \cdot (\vartheta_{aW,Putz} - \vartheta_{aL}) \quad (3.26b)$$

beschrieben werden. Für den Wärmeübergang von der Raumluft zur Außenwand gilt $\alpha_{L \rightarrow aW} = \alpha_{L \rightarrow iW} = 7,7 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ und für den Wärmeübergang zur Außenluft laut Recknagel et al. [24, Tafel 1.3.5-14] $\alpha_{aW \rightarrow aL} = 25 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$.

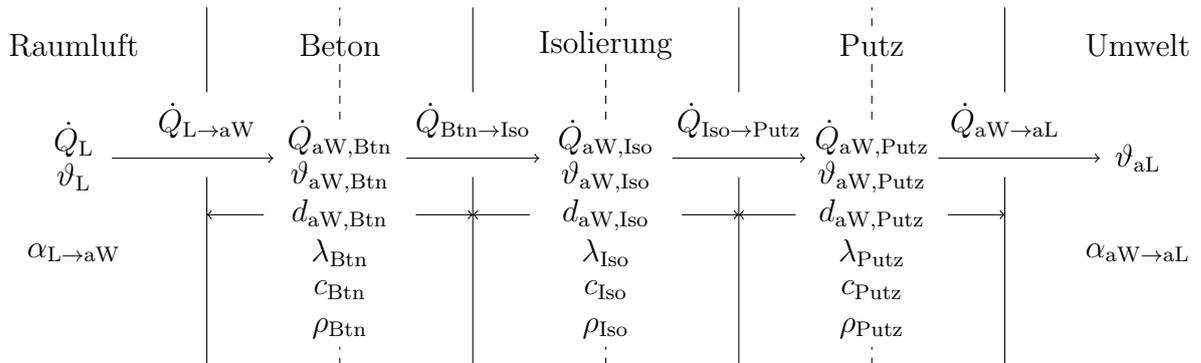


Abbildung 14 – Schematischer Außenwandaufbau mit zugehörigen physikalischen und thermischen Größen. Die Wandschichttemperaturen $\vartheta_{aW, \square}$ liegen auf den jeweiligen Mittellinien der Schicht um zu verdeutlichen, dass die Wärmeknoten der Schichten in der Schichtmitte liegen.

Tabelle 1 – Indizes, Schicht- und Materialnamen sowie Materialwerte der einzelnen Außenwandschichten von innen nach außen.

Index	Schichtname	IFC Material	ρ in kg/m^3	λ in $\text{W}/(\text{m K})$	c in $\text{J}/(\text{kg K})$
L	Raumlufte	N/A	s. 3.6.5	N/A	s. 3.6.5
Btn	Beton ¹	Concrete Wall	1800 ⁴	1,1 ⁴	1000 ⁵
Iso	Isolierung ²	Insulation	30 ⁶	0,04 ⁶	1380 ⁵
Fde	Fassade ³	Facade Slab	1200 ⁴	0,35 ⁴	1090 ⁵
aL	Außenluft	N/A	N/A	N/A	N/A

¹ Leichtbeton haufwerkporig mit nichtporigen Zuschlägen

² Syropor bzw. Polystyrol Hartschaum

³ Gipsputz ohne Zuschlag

⁴ aus Recknagel et al. [24, Tafel 1.3.5-3]

⁵ aus Recknagel et al. [24, Tafel 1.3.1-7]

⁶ aus Recknagel et al. [24, Tafel 1.3.5-6]

Die Wärmeflüsse zwischen den Wärmeknoten lauten wie folgt:

$$\dot{Q}_{\text{Btn} \rightarrow \text{Iso}} := \frac{1}{\frac{d_{\text{Btn}}}{\lambda_{\text{Btn}}} + \frac{d_{\text{Iso}}}{\lambda_{\text{Iso}}}} \cdot A_{\text{aW}} \cdot (\vartheta_{\text{Btn}} - \vartheta_{\text{Iso}}) \quad (3.27a)$$

und

$$\dot{Q}_{\text{Iso} \rightarrow \text{Putz}} := \frac{1}{\frac{d_{\text{Iso}}}{\lambda_{\text{Iso}}} + \frac{d_{\text{Putz}}}{\lambda_{\text{Putz}}}} \cdot A_{\text{aW}} \cdot (\vartheta_{\text{Iso}} - \vartheta_{\text{Putz}}) \quad (3.27b)$$

mit

- d_{\square} Dicke der jeweiligen Schicht,
- λ_{\square} Wärmeleitfähigkeit der jeweiligen Schicht,
- A_{aW} Außenwandfläche ohne Fensterfläche

und

- ϑ_{\square} Wärmeknotentemperatur der jeweiligen Schicht.

Die Wärmespeicher der einzelnen Schichten lassen sich aufgrund der Homogenität der Schichten etwas einfacher als die der Innenwände ermitteln:

$$\dot{Q}_{\text{aW}, \text{Btn}} := c_{\text{Btn}} \cdot \rho_{\text{Btn}} \cdot d_{\text{aW}, \text{Btn}} \cdot A_{\text{aW}} \cdot \dot{\vartheta}_{\text{aW}, \text{Btn}} \quad (3.28a)$$

$$\dot{Q}_{\text{aW}, \text{Iso}} := c_{\text{Iso}} \cdot \rho_{\text{Iso}} \cdot d_{\text{aW}, \text{Iso}} \cdot A_{\text{aW}} \cdot \dot{\vartheta}_{\text{aW}, \text{Iso}} \quad (3.28b)$$

und

$$\dot{Q}_{\text{aW}, \text{Putz}} := c_{\text{Putz}} \cdot \rho_{\text{Putz}} \cdot d_{\text{aW}, \text{Putz}} \cdot A_{\text{aW}} \cdot \dot{\vartheta}_{\text{aW}, \text{Putz}} \quad (3.28c)$$

mit den jeweiligen spezifischen Wärmekapazitäten der Schichten c_{\square} und Dichten der Schichten ρ_{\square} zusätzlich zu den bereits genannten Größen.

Das Gesamtverhalten der Außenwand kann dann durch die Bilanz-Gleichungen

$$\dot{Q}_{\text{Btn}} := \dot{Q}_{\text{L} \rightarrow \text{aW}} - \dot{Q}_{\text{Btn} \rightarrow \text{Iso}} \quad (3.29a)$$

$$\dot{Q}_{\text{Iso}} := \dot{Q}_{\text{Btn} \rightarrow \text{Iso}} - \dot{Q}_{\text{Iso} \rightarrow \text{Putz}} \quad (3.29b)$$

und

$$\dot{Q}_{\text{Putz}} := \dot{Q}_{\text{Iso} \rightarrow \text{Putz}} - \dot{Q}_{\text{aW} \rightarrow \text{aL}} \quad (3.29c)$$

beschrieben werden.

Fenster

Das Fenster nimmt einen großen Teil der Außenfläche des Gebäudes ein. Aufgrund der geringen Dicke des Fensterglases und der daraus resultierenden, im Vergleich zu anderen vorkommenden Materialien, geringen Masse wird die Wärmespeicherung des Fensters vernachlässigt. Es wird lediglich die Wärmeleitung von der Raumluft an die Außenluft in vereinfachter Weise betrachtet. Hierfür wird der Wärmedurchgangskoeffizient, auch als U-Wert bekannt, verwendet. Für den U-Wert wird der im Gebäudeenergiegesetz [4, Anlage 1, Nummer 1.4] angegebene Maximalwert von $U_F = 1,3 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ verwendet. Es ergibt sich der Wärmefluss über das Fenster

$$\dot{Q}_{L \rightarrow F \rightarrow aL} := U_F A_F (\vartheta_L - \vartheta_{aL}) \quad (3.30)$$

mit der Fensterfläche A_F .

Wärmebrücken

Aufgrund von Materialeigenschaften und geometrischen Bedingungen kommt es an Gebäudeteilen die mit der Umwelt verbunden sind zu erhöhter Wärmeleitung (vgl. „Lehrbuch der Bauphysik“ von Maas [22, Abschnitt 3.1]). Beispiele hierfür sind Außenecken oder ein Dachanschluss. Um diese Effekte bei der Berechnung zu berücksichtigen werden in der DIN EN 12831 zusätzliche pauschale Wärmedurchgangskoeffizienten angegeben [9, Tabelle B.1]. Das Ziel der Norm ist die Berechnung der Norm-Heizlast von Gebäuden. Die Wärmebrückenzuschläge aus dem Anhang der Norm werden in dieser Arbeit verwendet, um diese Wärmebrücken zu modellieren. Um eine echte Modellierung dieser Wärmebrücken durchzuführen, könnten laut Maas [22, Abschnitt 3.1] beispielsweise eine Finite-Elemente- oder Finite-Differenzen-Methode angewandt werden. Dies würde allerdings weit über den Rahmen dieser Arbeit hinausgehen und das Ziel einer einfachen Modellierung verfehlen.

Für diese Arbeit wird der höchste Wärmebrückenzuschlag aus der DIN EN 12831 [9, Tabelle B.1] mit $\Delta U_{TB} = 0,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ verwendet. Die Wärmebrücke wird über die gesamte Außenwandfläche mit Fensterfläche angenommen und wie folgt modelliert:

$$\dot{Q}_{TB} := \Delta U_{TB} (A_{aW} + A_F) (\vartheta_L - \vartheta_{aL}). \quad (3.31)$$

3.6.6 Heizkesselregler

Die Heizkesselregelung soll eine konstante Vorlauftemperaturregelung realisieren. Es wird davon ausgegangen, dass die Vorlauftemperatur ϑ_V fehlerfrei gemessen wird. Führungsgröße des Reglers ist der Sollwert $\vartheta_{V,\text{soll}}$ und Stellgröße ist die Brennerleistung P_B . Es ergibt sich der Regelfehler $e := \vartheta_{V,\text{soll}} - \vartheta_V$. Ziel ist es, einen möglichst simplen

Regler einzusetzen. Daher wäre es ideal, einen P-Regler zu verwenden. Dafür ist es aber notwendig, dass das System mit diesem Regler zumindest im Arbeitspunkt stabil ist.

Das Regelgesetz des P-Reglers lautet

$$P_{B,P} := K_P (\vartheta_{V,\text{soll}} - \vartheta_V). \quad (3.32)$$

Es setzt sich aus dem Regelfehler e und dem Verstärkungsfaktor K_P zusammen.

Ein P-Regler erzeugt, sofern die Regelstrecke nicht integrierendes Verhalten hat, immer einen bleibenden Regelfehler. Um dem entgegenzuwirken kann er durch einen Konstantanteil ergänzt werden, der die für den Arbeitspunkt benötigte Leistung liefert. Dieser Konstantanteil wird mit $P_{B,\text{offset}}$ bezeichnet. Es ergibt sich ein leicht verändertes Regelgesetz

$$P_{B,P}^+ := K_P (\vartheta_{V,\text{soll}} - \vartheta_V) + P_{B,\text{offset}}. \quad (3.33)$$

3.6.7 Umwelt

Die Umwelt wird durch die Außenlufttemperatur und den Wärmeübergangskoeffizient zwischen Außenwand und Außenluft beschrieben. Für die Untersuchungen ist es sinnvoll, verschiedene Außenlufttemperatur-Profile zu erzeugen. Für realistische Temperaturdaten werden Werte des Deutschen Wetterdienstes [6] verwendet. Der Datensatz heißt OBS_DEU_PT1H_T2M und beinhaltet stündliche Stationsmessungen der Lufttemperatur in 2 m Höhe. Als Zeitraum wurde der Januar 2015 gewählt, die betrachtete Station ist Dresden Strehlen (ID im Datensatz: 1051). Die Wetterdaten beginnen um 0:00 Uhr am 1. Januar 2015 und sind in Abbildung 15 dargestellt.

Für manche Betrachtungen ist es sinnvoll, eine konstante Außenlufttemperatur zu simulieren. Dafür wird die entweder Auslegungsaußentemperatur aus der nationalen Ergänzung zur DIN EN 12831-1 [11] mit $\vartheta_{aL,0} = -12,8^\circ\text{C}$ oder der Mittelwert des Datensatzes mit $\bar{\vartheta}_{aL} \approx 7,215^\circ\text{C}$ verwendet, je nachdem ob eine Temperatur oberhalb des Gefrierpunkts von Wasser benötigt wird oder nicht.

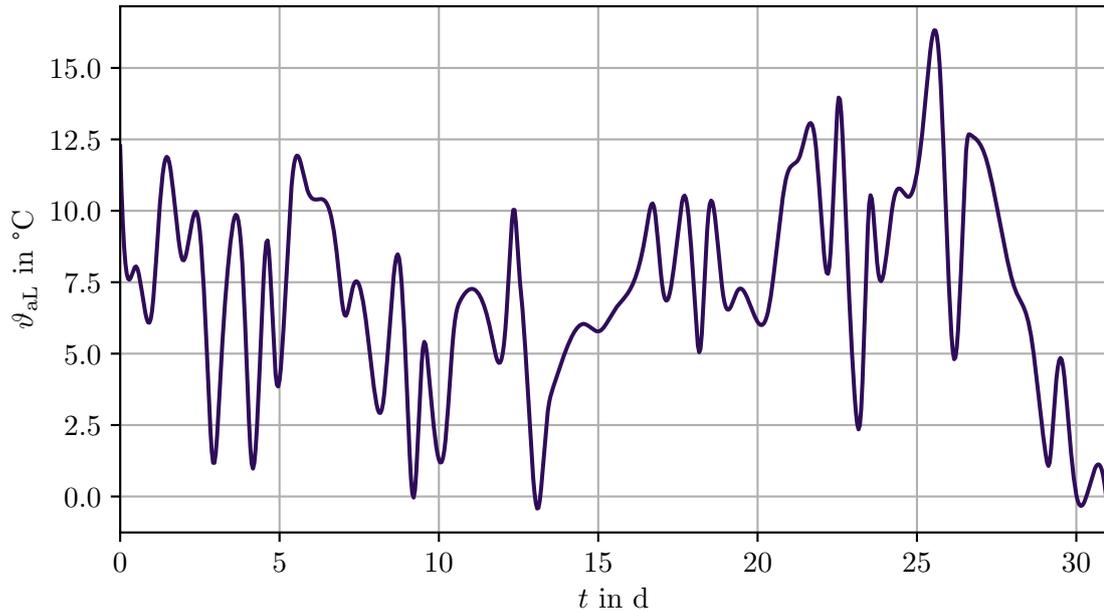


Abbildung 15 – Interpolierte stündliche Außentemperatur der Wetterstation Dresden Strehlen (ID: 1051) für den Januar 2015 aus Daten des Deutschen Wetterdienstes [6].

3.7 Zusammenführung der Teilmodelle

Die Gleichungen, welche die Systemteile beschreiben, müssen im weiteren Verlauf zu einem Gesamtsystem zusammengeführt werden. Dafür muss zunächst die Bilanzierung der Wärmeflüsse in und aus dem Raumlufknoten erfolgen, welche erst jetzt nach der Definition sämtlicher Wärmetransportgleichungen möglich ist. Bei Berücksichtigung aller Wärmeflüsse erhält man die Bilanz

$$\dot{Q}_L := \dot{Q}_{K \rightarrow L} - \dot{Q}_{L \rightarrow iW} - \dot{Q}_{L \rightarrow aW, Btn} - \dot{Q}_{L \rightarrow F \rightarrow aL} - \dot{Q}_{inf} - \dot{Q}_{TB}. \quad (3.34)$$

Ziel ist es, ein System expliziter gewöhnlicher Differentialgleichungen erster Ordnung zu erhalten, welches mit einem geeigneten Lösungsverfahren behandelt werden kann. Da das Modell zu umfangreich ist, um es händisch in diese Form zu bringen, wird dies stattdessen mit Hilfe des `sympy`-Pakets symbolisch durchgeführt.

Für die Variablen des Systems, also Zustandskomponenten, Eingänge und physikalische Größen, welche abhängig von Zustandskomponenten oder Eingängen sind und Zwischengrößen, welche in der Modellierung verwendet wurden, werden `sympy.Symbol`-Objekte erzeugt. Die Gleichungen, die die Modellteile beschreiben, werden in symbolische Gleichheiten überführt. Der Lösungsalgorithmus, `solve()` aus dem `solvers`-Modul des `sympy`-Pakets, benötigt diese Gleichheitsobjekte und die Symbole, nach denen aufgelöst werden soll. Hierzu zählen alle Symbole, die nicht auf der rechten Seite der

Lösung erwünscht sind. Also muss auch nach den Zwischengrößen, wie beispielsweise \dot{Q}_{iW} , aufgelöst werden. Die Lösung enthält somit Gleichungen für die Zwischengrößen und muss auf die relevanten Systemgleichungen zugeschnitten werden. Die relevanten Systemgleichungen bilden dann das System

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (3.35)$$

mit dem Zustandsvektor

$$x = \left(\vartheta_V \quad \vartheta_R \quad \vartheta_L \quad \vartheta_{aW,Btn} \quad \vartheta_{aW,Iso} \quad \vartheta_{aW,Putz} \quad \vartheta_{iW} \right)^T, \quad (3.36)$$

seiner zeitlichen Ableitung \dot{x} und dem Eingangsvektor

$$u = \begin{pmatrix} P_B \\ \vartheta_{aL} \end{pmatrix}. \quad (3.37)$$

Für die Beispieldatei ergeben sich auf vier signifikante Stellen gerundet folgende Systemgleichungen:

$$\dot{\vartheta}_V = \frac{P_B + \dot{m}_{H_2O} \cdot (c_{H_2O}(\vartheta_R) \cdot \vartheta_R - c_{H_2O}(\vartheta_V) \cdot \vartheta_V)}{C_{H_2O}} \quad (3.38a)$$

$$\begin{aligned} \dot{\vartheta}_R &= 1,575 \cdot 10^{-4} \frac{K}{J} \cdot \dot{m}_{H_2O} \cdot (c_{H_2O}(\vartheta_V) \cdot \vartheta_V - c_{H_2O}(\vartheta_R) \cdot \vartheta_R) \\ &\quad - 1,010 \cdot 10^{-3} \frac{1}{s K^{0,3208}} \cdot \vartheta_{ln}^{1,3208} \\ &\quad - \frac{P_B + \dot{m}_{H_2O} \cdot (c_{H_2O}(\vartheta_R) \cdot \vartheta_R - c_{H_2O}(\vartheta_V) \cdot \vartheta_V)}{C_{H_2O}} \end{aligned} \quad (3.38b)$$

$$\begin{aligned} \dot{\vartheta}_L &= 1,389 \cdot 10^{-4} \frac{1}{s} \cdot (\vartheta_{aL} - \vartheta_L) + \frac{10,30 \frac{J}{sK} \cdot \vartheta_{aL} - 176,2 \frac{J}{sK} \cdot \vartheta_L}{C_L} \\ &\quad + \frac{20,93 \frac{J}{sK} \cdot \vartheta_{aW,Btn} + 144,9 \frac{J}{sK} \cdot \vartheta_{iW} + 6,414 \frac{J}{sK^{1,3208}} \cdot \vartheta_{ln}^{1,3208}}{C_L} \end{aligned} \quad (3.38c)$$

$$\dot{\vartheta}_{aW,Btn} = 9,687 \cdot 10^{-6} \frac{1}{s} \cdot \vartheta_L - 1,231 \cdot 10^{-5} \frac{1}{s} \cdot \vartheta_{aW,Btn} + 2,618 \cdot 10^{-6} \frac{1}{s} \cdot \vartheta_{aW,Iso} \quad (3.38d)$$

$$\dot{\vartheta}_{aW,Iso} = 4,407 \cdot 10^{-4} \frac{1}{s} \cdot \vartheta_{aW,Btn} + 4,806 \cdot 10^{-4} \frac{1}{s} \cdot \vartheta_{aW,Putz} - 9,212 \cdot 10^{-4} \frac{1}{s} \cdot \vartheta_{aW,Iso} \quad (3.38e)$$

$$\dot{\vartheta}_{aW,Putz} = 4,039 \cdot 10^{-4} \frac{1}{s} \cdot \vartheta_{aL} - 4,416 \cdot 10^{-4} \frac{1}{s} \cdot \vartheta_{aW,Putz} + 3,772 \cdot 10^{-5} \frac{1}{s} \cdot \vartheta_{aW,Iso} \quad (3.38f)$$

$$\dot{\vartheta}_{iW} = 1,449 \frac{J}{sK} \cdot \frac{\vartheta_L - \vartheta_{iW}}{2,329 \cdot 10^{-2} m \cdot s_L + 5,509 \cdot 10^4 \frac{J}{K}}. \quad (3.38g)$$

Kapitel 4

Verarbeitung der IFC-Datei

4.1 Extraktion der Gebäudedaten

Für die Simulation und Reglerauslegung sollen möglichst alle benötigten Daten, soweit vorhanden, aus der IFC-Datei extrahiert werden. Das Auslesen dieser Daten soll dabei programmatisch geschehen, da das langfristige Ziel ist, den gesamten Prozess zu automatisieren. Das IFC-Datenmodell hat eine Vielzahl von Beschreibungsmöglichkeiten für Gebäude und deren Teile. Daher kann es sein, dass ein Gebäudeteil oder eine Eigenschaft eines Gebäudeteils, zum Beispiel der Aufbau einer Wand, in verschiedenen IFC-Dateien auf verschiedene Weisen beschrieben wird. Dies kann insbesondere der Fall sein, wenn dasselbe Gebäude in verschiedenen CAD-Programmen modelliert wurde. Der Entwurf eines Programms, welches aus einer *beliebigen* IFC-Datei alle Gebäudedaten auslesen und diese semantisch sinnvoll zuordnen kann, ist daher mindestens aufwändig, eventuell auch nicht mit sinnvollem Aufwand möglich.

Für diese Arbeit wird die IFC-Datei `UseCase1.1/1.1_Architecture+HVAC+Zone.ifc` aus dem Github Repository des EnEff-BIM Projekt [13] verwendet. Sie wurde mit *Autodesk Revit 2016* erstellt. Die Extraktion der Gebäudedaten beschränkt sich auf die Struktur dieser IFC-Datei.

Zur Extraktion der Gebäudedaten wird das Paket `ifcopenshell` [16, 17] verwendet. Dabei wird objektorientiert vorgegangen. In Python definierte Klassen und deren Relationen können im Klassendiagramm in Abbildung 16 gesehen werden.

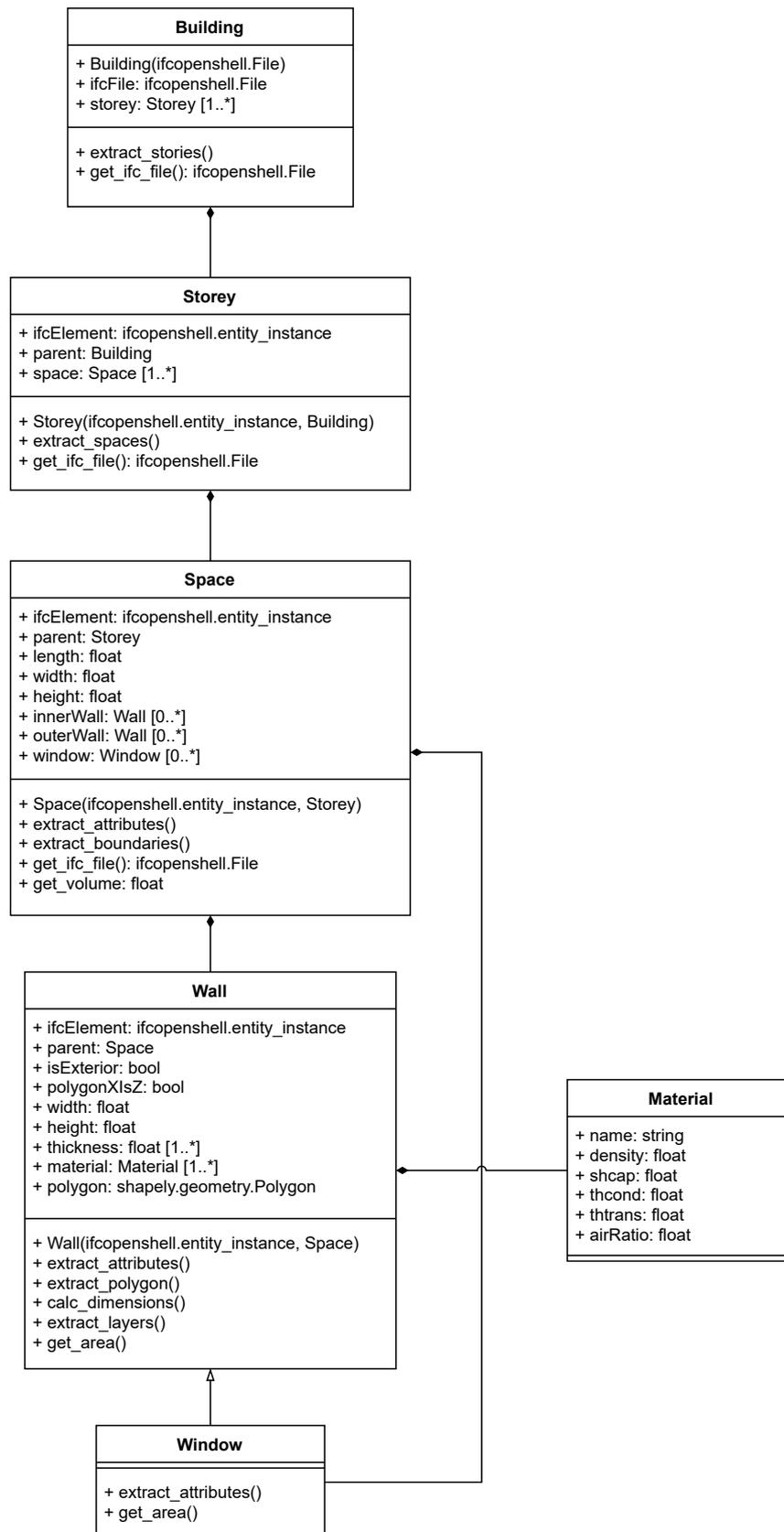


Abbildung 16 – Klassendiagramm der in Python erstellten Klassen zur Extraktion der Gebäudedaten [21]

4.1.1 Building-Klasse

Die Extraktion beginnt mit der Initialisierung eines Objekts der Klasse `Building`. Dieses Objekt lädt die IFC-Datei als `ifcopenshell.file`-Objekt und durchsucht sie anschließend nach IFC-Objekten des Typs `IfcBuildingStorey`, welche dann als `Storey`-Objekt in eine zum `Building`-Objekt gehörende Liste eingetragen werden.

Die Klasse stellt außerdem die Funktion `get_ifc_file()` zur Verfügung, welche die in der Klasse gespeicherte IFC-Datei zurück gibt, um eine eindeutige Zuordnung zur Quelle der Entitäten herzustellen. Alle weiteren Klassen besitzen ebenfalls diese Funktion. Diese rufen jeweils die gleichnamige Funktion des `parent`-Objekts auf, bis letztendlich die Funktion der `Building`-Klasse aufgerufen wird. So kann die Datei von überall aus abgerufen werden, muss aber nur in einem Objekt hinterlegt sein.

4.1.2 Storey-Klasse

Die `Storey`-Klasse beschreibt ein Geschoss des Gebäudes. Ein Objekt dieser Klasse besitzt ein `parent-Building` und das zum Objekt zugehörige `IfcBuildingStorey`-Objekt als IFC-Entität. Bei der Initialisierung werden direkt die im Geschoss liegenden Räume ermittelt und gebildet. Die Räume sind in der IFC-Datei `IfcSpace`-Objekte, welche über die `IfcRelDecomposes`-Beziehung mit dem `IfcStorey` verknüpft sind. Diese Beziehungen können in einem `IfcStorey`-Objekt über das `IsDecomposedBy`-Attribut gefunden werden.

4.1.3 Space-Klasse

Im Gebäude liegende Räume werden als Instanzen der `Space`-Klasse erfasst. Sie beinhaltet alle zum Raum gehörenden Wände und Fenster, sowie die Dimensionen des Raums selbst. Die Raumdimensionen werden aus der `IfcShapeRepresentation` des `IfcSpace` ausgelesen. In der betrachteten Datei hat der Raum eine rechteckige Grundfläche, die durch ein `IfcExtrudedAreaSolid` beschrieben wird. Es können dementsprechend die Attribute `Depth`, `SweptArea.XDim` und `SweptArea.YDim` verwendet werden um die Raumdimensionen zu ermitteln.¹ Für Räume mit anderen Grundflächen muss ein anderer Ansatz, beispielsweise die Verwendung des Polygons, welches die Grundfläche beschreibt, gewählt werden.

¹Bei dem `IfcExtrudedAreaSolid` handelt sich um ein Quader, der durch Extrusion definiert wird. Das bedeutet, dass eine rechteckige Grundfläche mit den Längen `XDim` und `YDim` um die Länge `Depth` parallel zur Grundfläche verschoben wird, um den dreidimensionalen Quader zu erzeugen. Der Quader und damit auch der Raum werden durch diese drei Längen beschrieben.

Um die Wände und Fenster zu finden, werden alle `IfcRelSpaceBoundary`-Beziehungen, die den betrachteten `IfcSpace` beinhalten, gesucht. Hat das zugehörige Attribut `PhysicalOrVirtualBoundary` den Wert `PHYSICAL` handelt es sich um eine den Raum begrenzende Wand oder ein den Raum begrenzendes Fenster. Mit Hilfe des Attributs `InternalOrExternalBoundary` kann entschieden werden, ob es eine Innen- oder Außenwand bzw. ein Fenster ist. Zur Unterscheidung von Außenwand und Fenster wird zusätzlich noch der Typ des IFC-Objekts überprüft. Die Wände und Fenster werden direkt initialisiert und in die jeweiligen Listen des `Space`-Objekts eingetragen.

Des Weiteren stellt die `Space`-Klasse die Funktion `get_volume()` zur Verfügung, welche das Raumvolumen anhand der Raumdimensionen berechnet und zurück gibt.

4.1.4 Wall-Klasse

Die `Wall`-Klasse wird zur Beschreibung sowohl der Innen- als auch Außenwände verwendet. Sie beschreibt die Dimensionen der Wände und die Zusammensetzung, insbesondere im Fall mehrerer Wandschichten. Wichtig ist hierbei, dass es sich bei den beinhalteten Dimensionen um die Dimensionen der Berührungsfläche zwischen Raum und Wand handelt. Die Berührungsfläche ist die Fläche, an der sich die den Raum und die Wand beschreibenden Quader berühren, also der aus dem Raum aus gesehen „sichtbare“ Teil der Wand.

Die Berührungsflächen der Wände in der benutzten IFC-Datei werden durch Berührungsflächen zweiter Ordnung (engl.: second level space boundaries) beschrieben.² Diese sind dafür ausgelegt unter anderem thermische Berechnungen zu ermöglichen. Durch die Verwendung der Berührungsflächen in der thermischen Berechnung entsteht ein gewisser Fehler. Es wird nur das Wandvolumen direkt hinter dieser Fläche, nicht aber die Ecken des Raums berücksichtigt, wie in Abbildung 17 zu sehen ist.

Um die Dimensionen der Wand zu bestimmen, wird die Berührungsfläche zwischen der Wand und dem Raum verwendet. Das die Berührungsfläche beschreibende Polygon aus der IFC-Datei wird mit einem `shapely.geometry.Polygon`-Objekt nachgebildet. Mit diesem nachgebildeten Polygon kann im Anschluss die Wandfläche mit der Funktion `get_area()` bestimmt werden. Die Wanddimensionen werden mit der Funktion `calc_dimensions()` und der Bounding-Box des Polygons bestimmt.

²Zur Unterscheidung von Berührungsflächen erster Ordnung: Berührungsflächen erster Ordnung ignorieren Änderungen im Baumaterial während Berührungsflächen zweiter Ordnung nur die Berührungsfläche für ein aus einem Material bestehenden Objekts beschreiben können. Besteht eine Wand aus verschiedenen Teilen mit verschiedenen Baumaterialien, wird für jedes dieser Teile eine neue Berührungsfläche zweiter Ordnung definiert, während eine Berührungsfläche erster Ordnung die gesamte Wand beschreiben kann. Es müssen nicht beide Arten von Berührungsflächen innerhalb einer IFC-Datei verwendet werden.

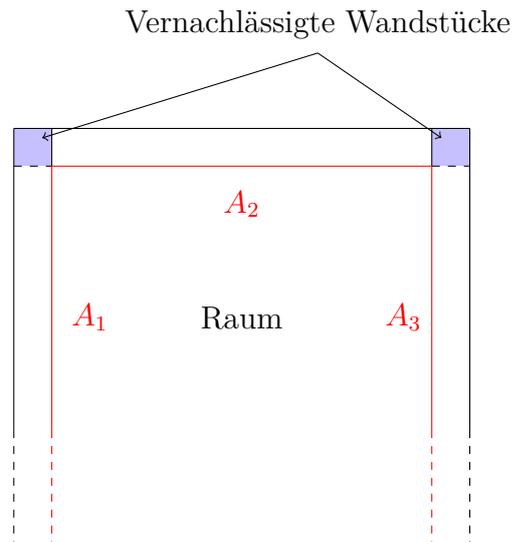


Abbildung 17 – Grundriss eines beliebigen Raums zur Darstellung der durch die Modellierung vernachlässigten Wandvolumina.

Die Innenwände der Beispieldatei haben auf der vom Raum abgewandten Seite keine weiteren Räume, sondern die Umwelt, obwohl sie als innere Begrenzung in der IFC-Datei definiert sind. In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass hinter jeder Innenwand ein weiterer Raum liegt, welcher auch eine Außenwand besitzt. Daher werden für die Rückseite der Innenwände jeweils der gleiche, durch Betrachtung der Berührungsfläche ermittelte, Flächeninhalt benutzt. Gleichung (3.24) ist daher, wenn alle Räume die gleiche Raumlufttemperatur ϑ_L haben, für die Beschreibung des Wandverhaltens legitim.

Die Dicke und das Wandmaterial der Innenwände werden in Listen gespeichert. So können die Eigenschaften jeder Wandschicht mit einem gemeinsamen Index adressiert werden. Die Dicke wird direkt ausgelesen und gespeichert. Die Materialbezeichnung wird ausgelesen, an die Funktion `get_material(String)` weitergegeben, welche das korrespondierende `Material`-Objekt³ zurück gibt, was dann in der Liste gespeichert wird.

4.1.5 Window-Klasse

Die Fenster können größtenteils mit der `Wall`-Klasse beschrieben werden. Daher erbt die Klasse `Window` von dieser. Es existieren allerdings einige Unterschiede.

Die Maße rechteckiger Fenster können im IFC-Datenmodell deutlich einfacher als die der Wände gespeichert werden. Die Funktion `extract_attributes()` wird daher überladen

³Siehe Abschnitt 4.1.6.

und die Höhe und Breite des Fensters werden angepasst ausgelesen. Genauso wird die Funktion `get_area()` überladen, da die Berechnung nicht über ein Polygon, sondern direkt über die Maße des Fensters geschieht.

In der IFC-Datei werden zwei Materialien für das Fenster angegeben (*Glas* und *Farbe Grau*). Es scheint, als sei eines dieser Materialien für die Darstellung in CAD-Programmen zuständig. In der `Window`-Klasse wird nur das relevante Material gespeichert.

4.1.6 Material-Klasse

Grundsätzlich gibt es im IFC-Datenmodell die Möglichkeit, Materialwerte zu speichern. Für die Klasse `IfcMaterial` gibt es beispielsweise `Pset_MaterialThermal`, was die Attribute `SpecificHeatCapacity` und `ThermalConductivity` enthält, beides Größen die für die Simulation in dieser Arbeit benötigt werden. Diese Werte sind in der verwendeten IFC-Datei nicht enthalten, Materialien werden lediglich benannt. Um trotzdem anhand dieser Materialnamen die Simulation anpassen zu können, wird mit Hilfe der `Material`-Klasse ein Objekt für jedes in der Datei vorkommende Material angelegt. Diese Objekte werden dann mit den relevanten physikalischen Größen aus Abschnitt 3.6 und 4.2 ausgestattet. Dabei müssen nicht alle möglichen Attribute belegt werden. Welche Attribute möglich sind, ist in der `Material`-Klasse in Abbildung 16 dargestellt. Die Abkürzungen sind in Tabelle 2 erklärt.

Tabelle 2 – Variablenamen der `Material`-Klassenattribute.

Abkürzung	Englischer Name	Deutscher Name	Symbol
<code>density</code>	density	Dichte	ρ
<code>shcap</code>	specific heat capacity	spezifische Wärmekapazität	c
<code>thcond</code>	thermal conductivity	Wärmeleitfähigkeit	λ
<code>thtrans</code>	thermal transmittance	Wärmedurchgangskoeffizient	U
<code>airRatio</code>	air ratio	Luftanteil	ϕ_{iW}

4.2 Erzeugung von Gebäudescharen

Um das zu entwickelnde automatisierte Reglerentwurfsverfahren testen zu können, ist es sinnvoll, das Verfahren auf verschiedene Gebäude bzw. IFC-Dateien dieser anzuwenden. Da die Extraktion der Gebäudedaten für eine bestimmte IFC-Datei entwickelt wurde und die weitere Modellbildung anhand des in der Datei enthaltenen Raums geschehen ist, können nur IFC-Dateien verwendet werden, welche einen identischen strukturellen Aufbau haben. Um solche Dateien zu erzeugen, können Teile der ursprünglichen IFC-Datei verändert werden, um unterschiedliches thermodynamisches Verhalten zu erhalten. Diese Variation kann auch mit dem `ifcopenshell`-Paket durchgeführt werden.

Aufgrund der Granularität des IFC-Datenmodells, lassen sich trivial wirkende Eigenschaften des Gebäudes nicht auf einfache Weise ändern. Die Dimensionen des Raums sind beispielsweise Teil des `IfcSpace`, werden aber auch durch die Dimensionen der Wände widerspiegelt. Grundsätzlich ist das IFC-Datenmodell nicht dafür konzipiert, Gebäude zu modellieren, sondern um den Austausch von Informationen eines bereits modellierten Gebäudes zu ermöglichen. Daher werden stattdessen Parameter gesucht, welche den grundsätzlichen Aufbau des Raums nicht verändern und trotzdem Einfluss auf das Gebäudeverhalten haben. Die entstehenden Gebäudemodelle haben dadurch einen räumlich erlaubten Aufbau⁴ und können mit den bereits entwickelten Werkzeugen zur Extraktion von Gebäudedaten behandelt werden.

Als Kompromiss zwischen Umsetzbarkeit und Realitätsnähe des entstehenden Gebäudes werden die Schichtdicken der Wände und die Materialien dieser Schichten als änderbare Parameter verwendet. Diese Parameter haben starken Einfluss auf das thermische Verhalten des Gebäudes und sind somit auch geeignet, das Reglerentwurfsverfahren zu validieren. Um eine vollkommen realistische Änderung der Wanddicken im IFC-Datenmodell durchzuführen, müssten eigentlich auch die Grundflächen der Wände verändert werden. Da diese für die Berechnungen in dieser Arbeit aber nicht verwendet werden, ist die alleinige Änderung der Wanddicke im `IfcMaterialLayer` legitim. Streng genommen ist die entstehende IFC-Datei allerdings nicht mehr in sich stimmig und somit ungültig. Der räumliche Aufbau des entstehenden Gebäudes ist allerdings geometrisch erlaubt.

Eine Änderung des `IfcMaterial` in `IfcMaterialLayer` ist legitim und verändert nicht die Gültigkeit der IFC-Datei.

Um verschiedene Gebäudeverhalten zu erhalten, werden drei Wandkonfigurationen mit unterschiedlichen Schichtdicken als Scharen von IFC-Dateien generiert. Das Verfahren kann aber beliebig verändert werden, um weitere Materialien oder andere Schichtdicken oder Anzahl derer zu erhalten.

4.2.1 Innenwand aus Gipswandbauplatten verschiedener Stärken

„Gips-Wandbauplatten (früher auch Gips-Dielen genannt) sind Bauelemente aus massivem Stuckgips zum Herstellen von nichttragenden inneren Trennwänden Die Wände werden ohne Unterkonstruktion allein mit Gipskleber errichtet. Wegen dieses grundsätzlichen Unterschieds dürfen Gips-Wandbauplatten nicht mit den dünneren Gipskartonplatten (GKB) verwechselt werden“ [5]. Nach der DIN EN 12859:2011 [10, Abschnitt 4.8.1] lassen sich Gipswandbauplatten in drei Rohdichteklassen einteilen. Für

⁴Ein Gegenbeispiel für einen räumlich verbotenen Aufbau wäre die Vergrößerung der Raumfläche ohne die Wandbreiten zu verändern. Der Raum würde dann über die Wandgrenzen hinausgehen, was selbstverständlich in der Realität unmöglich und daher in der IFC-Datei nicht erlaubt ist.

diese Arbeit wird die Klasse „mittlere Rohdichte“ mit einer Dichte von $\rho_{\text{Gips}} = 900 \text{ kg/m}^3$ verwendet. Die Materialeigenschaften werden aus der DIN EN ISO 10456:2007 [8, Tabelle 3] entnommen und lauten $\lambda_{\text{Gips}} = 0,3 \text{ W/(m K)}$ und $c_{\text{Gips}} = 1000 \text{ J/(kg K)}$. Es wird eine Schar mit den Dicken 6 cm, 8 cm und 10 cm gebildet.

4.2.2 Verschiedene Dämmschichtstärken

Je dicker die Dämmschicht der Außenwand, desto geringer der Wärmefluss durch diese Schicht (siehe Gleichung (2.3)). Um den Einfluss verschiedener Dämmschichtdicken untersuchen zu können, wird eine Schar aus drei verschiedenen Dämmschichtdicken gebildet. Außerdem soll untersucht werden, wie sich das Gebäude ohne Dämmung verhält. Für die verschiedenen Dämmschichtdicken werden 6 cm, 18 cm und 30 cm gewählt.

Die Modellierung ist auf drei Außenwandschichten festgelegt. Um eine Betrachtung ohne Dämmschicht zu ermöglichen, wird in diesem Fall die Dämmschicht in eine Betonschicht umgewandelt. Die Dicke der ursprünglichen Betonschicht wird dann auf die zwei entstehenden Betonschichten aufgeteilt, sodass die Dämmschicht verschwindet und sich die Dicke der Betonschicht nicht ändert.

4.2.3 Außenwand aus Sandstein verschiedener Stärken

Um eine monolithische Bauweise zu untersuchen, wird eine Außenwand aus Sandstein betrachtet. Für die zu betrachtenden Dicken werden 15 cm, 30 cm, 45 cm und 60 cm gewählt. Um keine Änderungen an der mathematischen Modellierung vornehmen zu müssen, wird das Material jeder der drei Außenwandschichten zu Sandstein geändert und die Gesamtdicke auf die drei Schichten aufgeteilt. Die Materialkonstanten können aus Recknagel et al. [24, Tafel 1.3.1-7 und Tafel 1.3.5-3] entnommen werden und lauten

$$\rho_{\text{Ss}} = 2400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \quad (4.1a)$$

$$\lambda_{\text{Ss}} = 2 \frac{\text{W K}}{\text{m}}, \quad (4.1b)$$

und

$$c_{\text{Ss}} = 710 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}. \quad (4.1c)$$

Kapitel 5

Reglerentwurf

Wie bereits in Abschnitt 3.6.6 beschrieben, ist es das Ziel, eine möglichst einfache Regelung für die Vorlauftemperatur zu entwerfen. Diese muss für den nominalen Betrieb und bestimmte andere Situationen einen stabilen geschlossenen Regelkreis bilden. Da es sich um ein nichtlineares System handelt, kann die Stabilität des Systems nicht ohne Weiteres für das gesamte System berechnet werden. Stattdessen wird die Stabilität für den Arbeitspunkt des Systems und für annehmbare Szenarien außerhalb des Arbeitspunkt untersucht.

Der Arbeitspunkt des Systems wird durch die Soll-Raumlufttemperatur $\vartheta_{L,\text{soll}}$ definiert, welche durch den Thermostatregler eingestellt wird. Ist die Außenlufttemperatur ϑ_{aL} konstant, stellt sich im System eine Ruhelage ein. Für die Auslegung des Reglers wird die Auslegungsaußentemperatur für Dresden Strehlen mit $\vartheta_{aL,0} = -12,8^\circ\text{C}$ aus der nationalen Ergänzung zur DIN EN 12831-1 [11] verwendet. Das System wird dementsprechend in diesem Arbeitspunkt linearisiert. So können die Methoden zur Untersuchung der Stabilität linearer Systeme verwendet werden. Es wird das Kleinsignalverhalten bei kleinen Eingangsänderungen betrachtet.

Um die Stabilität auch für Systemzustände außerhalb der Ruhelage untersuchen zu können, werden Szenarien definiert, welche mit hoher Wahrscheinlichkeit auftreten. Für diese werden die berechneten Reglerwerte in das nichtlineare System eingesetzt und die Stabilität für die Szenarien anhand des Systemverhaltens grafisch analysiert. Die Definition der Szenarien geschieht in Abschnitt 6.1.

5.1 Kleinsignalverhalten

Gegeben sei das nach Abschnitt 3.7 bestimmte nichtlineare Differentialgleichungssystem

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (5.1)$$

mit dem Zustandsvektor

$$x = \left(\vartheta_V \quad \vartheta_R \quad \vartheta_L \quad \vartheta_{aW,\text{Btñ}} \quad \vartheta_{aW,\text{Iso}} \quad \vartheta_{aW,\text{Putz}} \quad \vartheta_{iW} \right)^T, \quad (5.2)$$

seiner zeitlichen Ableitung \dot{x} und dem Eingangssignal (Brennerleistung)

$$u = P_B. \quad (5.3)$$

Die Außentemperatur ϑ_{aL} wird für die Betrachtung des Kleinsignalverhaltens als konstanter Parameter angenommen und tritt deshalb hier in den Systemgleichungen nicht als Variable auf.

Da die Vorlauftemperatur ϑ_V Regelgröße ist, wird sie als Ausgangsgröße des Systems definiert:

$$y = \vartheta_V. \quad (5.4)$$

Mit $y = c^T x$ folgt

$$c^T = (1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0). \quad (5.5)$$

Um das Kleinsignalverhalten zu überprüfen, muss zunächst die Ruhelage des Systems ermittelt werden.

5.1.1 Bestimmung der Ruhelage

Die Ruhelage eines Systems ist erreicht, wenn der Systemzustand x konstant ist, also die zeitliche Ableitung des Systemzustands \dot{x} Null ist. Das bedeutet, dass für das nichtlineare algebraische Gleichungssystem $\dot{x} = f(x, u)$ die Bedingung

$$0 \stackrel{!}{=} \dot{x} = f(x, u) \quad (5.6)$$

erfüllt sein muss. Das System hat die Form $f : \mathbb{R}^7 \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^7$, es muss also der Wert einer Variablen im Vorhinein festgelegt, damit die Lösung keine Freiheitsgrade enthalten kann. Daher wird die Raumlufttemperatur auf $\vartheta_{L,RL} = \vartheta_{L,soll} = 21 \text{ °C}$ festgelegt. Es wird also eine Zustandskomponente festgelegt und die sechs korrespondierenden Komponenten des Zustandsvektor x_{RL} und die passende Eingangsgröße u_{RL} gesucht.

Das symbolische Systemmodell enthält Symbole für Zustands- und Eingangsgrößen, sowie für zustandsabhängige physikalische Größen und Größen, die durch stückweise definierte Funktionen beschrieben werden. Das symbolische Gleichungssystem enthält dementsprechend mehr Variablen als das mathematische Modell. Daher ist eine analytische Bestimmung der Lösung, welche das symbolische Systemmodell verwendet, grundsätzlich nicht möglich, da durch die erhöhte Anzahl an Variablen Freiheitsgrade existieren.

Bei näherer Betrachtung der symbolischen Systemgleichungen kann aber festgestellt werden, dass es ein Teilsystem gibt, welches nur Symbole der Zustands- und Eingangsgrößen enthält. Genauer gesagt enthält es eine Teilmenge der Symbole für die Zustandskomponenten. Dieses Teilsystem kann analytisch gelöst werden, das verbleibende Teilsystem

kann mit einem numerischen Lösungsverfahren behandelt werden. Es ergibt sich die Aufteilung

$$f(x, u) = \begin{pmatrix} f_{\text{num}}(x_{\text{num}}, x_{\text{an}}, u) \\ f_{\text{an}}(x_{\text{an}}) \end{pmatrix}. \quad (5.7)$$

Analytische Teillösung

Der analytisch lösbare Teil beinhaltet die Gleichungen für $\dot{\vartheta}_{\text{aW,Btn}}$, $\dot{\vartheta}_{\text{aW,Iso}}$, $\dot{\vartheta}_{\text{aW,Putz}}$ und $\dot{\vartheta}_{\text{iW}}$ (siehe Gleichungen (3.38)). Setzt man die Raumlufttemperatur-abhängige Wärmespeicherzahl der Luft $s_L(\vartheta_{\text{L,soll}}) = \frac{c_L(\vartheta_{\text{L,soll}})}{V_L}$, die Soll-Raumlufttemperatur $\vartheta_{\text{L,soll}} = 21 \text{ }^\circ\text{C}$ und die Bemessungsaußenlufttemperatur $\vartheta_{\text{aL},0} = -12,8 \text{ }^\circ\text{C}$ in die Bedingung

$$0 = f_{\text{an}}(x_{\text{RL,an}}) \quad (5.8)$$

ein, erhält man ein Gleichungssystem der Form

$$M \begin{pmatrix} \vartheta_{\text{aW,Btn}} \\ \vartheta_{\text{aW,Iso}} \\ \vartheta_{\text{aW,Putz}} \\ \vartheta_{\text{iW}} \end{pmatrix} = b, \quad M \in \mathbb{R}^{4 \times 4}, b \in \mathbb{R}^4. \quad (5.9)$$

Das System ist eindeutig lösbar, wenn $\det M \neq 0$. Für die Beispieldatei ergibt sich $\det M \approx 9,409 \cdot 10^{-17} \neq 0$. Die Lösung des Systems lautet

$$x_{\text{an,RL}} = \begin{pmatrix} \vartheta_{\text{aW,Btn,RL}} \\ \vartheta_{\text{aW,Iso,RL}} \\ \vartheta_{\text{aW,Putz,RL}} \\ \vartheta_{\text{iW,RL}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 16,98 \text{ }^\circ\text{C} \\ 2,110 \text{ }^\circ\text{C} \\ -11,53 \text{ }^\circ\text{C} \\ 21,00 \text{ }^\circ\text{C} \end{pmatrix}. \quad (5.10)$$

Die angegebenen Temperaturwerte sind auf vier signifikante Stellen gerundet.

Numerische Teillösung

Für die restlichen Gleichungen wird eine numerische Lösung mit einem Optimierungsverfahren ermittelt. Hierfür wird eine Optimierungsfunktion $g(z)$ und ein Anfangswert für den Lösungsvektor z benötigt. Da die letzten vier Gleichungen des Systems $\dot{x} = f(x, u)$ bereits analytisch gelöst wurden, kann das Teilsystem

$$\dot{x}_{\text{num}} = \begin{pmatrix} \dot{\vartheta}_{\text{V}} \\ \dot{\vartheta}_{\text{R}} \\ \dot{\vartheta}_{\text{L}} \end{pmatrix} = f_{\text{num}}(x_{\text{num}}, x_{\text{an}}, u) \quad (5.11)$$

zur weiteren Berechnung verwendet werden. Die Form dieses Systems nach Einsetzen der analytisch berechneten Zustandskomponenten $x_{\text{an,RL}}$, der Auslegungsaußentemperatur

$\vartheta_{\text{aL},0}$ und der Soll-Raumlufttemperatur $\vartheta_{\text{L,soll}}$ ist $f_{\text{num}} : \mathbb{R}^2 \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^3$ und erlaubt somit eine Lösung ohne Freiheitsgrade. Als numerisches Lösungsverfahren wird die Funktion `minimize()` des `optimize`-Moduls aus dem `scipy`-Paket verwendet. Die Funktion benötigt eine Optimierungsfunktion $g(z)$ der Form $g : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}, n \in \mathbb{N}$. Das System kann mit der Transformation

$$g(z) := |f_{\text{num}}(x_{\text{num}}, x_{\text{an}}, u)|^2 \quad (5.12)$$

in diese Form überführt werden. Durch die Berechnung des Betragsquadrats des Systems ergibt sich eine skalare Funktion. Der Lösungsvektor z setzt sich wie folgt zusammen:

$$z := \begin{pmatrix} x_{\text{num}} \\ u \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \vartheta_V \\ \vartheta_R \\ P_B \end{pmatrix}. \quad (5.13)$$

Die Funktion `minimize()` benötigt außerdem einen Startwert für den Lösungsvektor. Hierfür werden die Nennwerte verwendet:

$$z_{\text{init}} = \begin{pmatrix} 75 \text{ °C} \\ 65 \text{ °C} \\ 1119 \text{ W} \end{pmatrix}. \quad (5.14)$$

Für die Beispieldatei erhält man die Lösung

$$z_{\text{RL}} = \begin{pmatrix} 63,72 \text{ °C} \\ 51,05 \text{ °C} \\ 729,4 \text{ W} \end{pmatrix} \quad (5.15)$$

mit einer Genauigkeit von $g(z_{\text{RL}}) = 1,581 \cdot 10^{-17}$. Die Werte inklusive der Genauigkeit sind auf vier signifikante Stellen gerundet.

5.1.2 Linearisierung des Systems

Als nächster Schritt wird das System in der berechneten Ruhelage linearisiert. Dafür werden zunächst symbolische Äquivalente für den Zustandsvektor x und dessen zeitliche Ableitung \dot{x} gebildet. Weiterhin wird die Eingangsgröße u mit dem Symbol für die Brennerleistung P_B belegt.

In der Systemgleichung explizit enthaltene, zustandsabhängige physikalische Größen werden für die Ruhelage berechnet und in die Systemgleichung $f(x, u)$ eingesetzt. Streng genommen ist dies mathematisch nicht korrekt, da für die Linearisierung auch die Gleichungen dieser physikalischen Größen nach dem Zustand x und dem Eingang u abgeleitet werden müssten. Da die Funktionen zur Berechnung dieser Größen allerdings hinter Funktionsaufrufen verschiedener Python-Pakete oder Interpolationsobjekten versteckt sind, ist dies ohne erheblichen Aufwand nicht möglich.

Berechnet man die spezifische Wärmekapazität von Wasser $c_{\text{H}_2\text{O}}$ für zwei willkürlich gewählte Temperaturen oberhalb und unterhalb der im Modell vorkommenden, extremalen Temperaturen, erhält man auf vier signifikante Stellen gerundet

$$c_{\text{H}_2\text{O}}(\vartheta_{\text{H}_2\text{O}} = 10^\circ\text{C}) = 4190 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$$

und

$$c_{\text{H}_2\text{O}}(\vartheta_{\text{H}_2\text{O}} = 80^\circ\text{C}) = 4192 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}.$$

Die prozentuale Abweichung des maximalen vom minimalen Wert beträgt circa 0,054 41%. Eine ähnliche Betrachtung der spezifischen Wärmekapazität der Luft ergibt

$$c_{\text{L}}(\vartheta_{\text{L}} = 0^\circ\text{C}) = 1004 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$$

und

$$c_{\text{L}}(\vartheta_{\text{L}} = 30^\circ\text{C}) = 1005 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}.$$

Die prozentuale Abweichung beträgt in diesem Fall circa 0,1258%. In beiden Fällen ist der entstehende Fehler somit so gering, dass er ignoriert werden kann.

Weiterhin werden für die stückweise definierten Funktionen $\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}$ (3.18) und $\bar{\vartheta}_{\text{ln}}$ (3.16) die für die Ruhelage gültigen Funktionsabschnitte eingesetzt.

Für das linearisierte System der Form

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{x}} &= A\tilde{x} + B\tilde{u} \\ \tilde{y} &= c^\top \tilde{x}\end{aligned}\tag{5.16}$$

mit $\tilde{x} = x - x_{\text{RL}}$, $\tilde{u} = u - u_{\text{RL}}$ und $\tilde{y} = y - y_{\text{RL}}$ werden die Jacobi-Matrizen

$$A = \left. \frac{\text{d}f(x, u)}{\text{d}x} \right|_{x=x_{\text{RL}}, u=u_{\text{RL}}}\tag{5.17}$$

und

$$B = \left. \frac{\text{d}f(x, u)}{\text{d}u} \right|_{x=x_{\text{RL}}, u=u_{\text{RL}}}\tag{5.18}$$

benötigt. Dafür werden zunächst die Jacobi-Matrizen mit dem `sympy`-Paket berechnet, und im Anschluss die bereits berechnete Ruhelage eingesetzt.

5.1.3 Stabilitätsbetrachtung

Wie in Abschnitt 3.6.6 beschrieben, soll die Heizkesselleistung mit einem P-Regler geregelt werden. Dafür muss überprüft werden, ob das System mit P-Regler um die Ruhelage stabil ist. Der P-Regler hat die Form

$$P_{B,P}^+ = K_P (\vartheta_{V,\text{soll}} - \vartheta_V) + P_{B,\text{offset}}. \quad (3.33 \text{ s.o.})$$

Somit kann für den Eingang des linearisierten Systems

$$\begin{aligned} \tilde{u} &= \underbrace{K_P (\vartheta_{V,\text{soll}} - \vartheta_V) + P_{B,\text{offset}}}_u - \underbrace{K_P (\vartheta_{V,\text{soll}} - \vartheta_{V,\text{RL}}) - P_{B,\text{RL}}}_{u_{\text{RL}}} \\ &= K_P (\vartheta_{V,\text{soll}} - \vartheta_V) \end{aligned} \quad (5.19)$$

mit $\vartheta_{V,\text{RL}} = \vartheta_{V,\text{soll}}$ und $P_{B,\text{offset}} = P_{B,\text{RL}}$ eingesetzt werden. Der Systemeingang kann dann auf den Systemausgang und damit auf den Systemzustand zurückgeführt werden:

$$\begin{aligned} \tilde{u} &= K_P (\vartheta_{V,\text{soll}} - \vartheta_V) \\ &= -K_P (\vartheta_V - \vartheta_{V,\text{soll}}) \\ &= -K_P \tilde{y} \\ &= -K_P c^\top \tilde{x}. \end{aligned} \quad (5.20)$$

Dieser Ausdruck wird dann in die Systemgleichung eingesetzt:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}} &= A\tilde{x} + B\tilde{u} \\ &= A\tilde{x} - BK_P c^\top \tilde{x} \\ &= \underbrace{(A - BK_P c^\top)}_{=A_P} \tilde{x}. \end{aligned} \quad (5.21)$$

Jetzt ist es möglich, die Stabilität des Systems mit P-Regler um die Ruhelage anhand der Systemmatrix des geschlossenen Regelkreises mit P-Regler A_P zu untersuchen. Hierfür wird aus der Systemmatrix das charakteristische Polynom $\text{CLCP}(s)$ des geschlossenen Regelkreises berechnet und dessen Nullstellen bestimmt:

$$0 = \text{CLCP}(s_0) = |s_0 I - A_P|. \quad (5.22)$$

Damit das System stabil ist, muss gelten:

$$\Re(s) < 0 \forall s : 0 = \text{CLCP}(s). \quad (5.23)$$

Da

$$\text{grad}(\text{CLCP}(s)) = 7 \quad (5.24)$$

gilt, lassen sich die Nullstellen nicht analytisch bestimmen. Sie müssen stattdessen numerisch für bestimmte Verstärkungswerte K_P berechnet werden. Um eine allgemeine Aussage über die Stabilität auch ohne analytische Nullstellenberechnung treffen zu

können, werden die Nullstellen des charakteristischen Polynoms für eine Schar von Verstärkungswerten berechnet. Diese Schar besteht aus 1000 logarithmisch verteilten Werten von $K_P = 1$ bis 10000.

Die berechneten Nullstellen können auf negativen Realteil überprüft und als Wurzelortskurve in der Gauß'schen Zahlenebene visualisiert werden. Für die Verstärkungswerte, für die die Wurzelortskurve in der linken Halbebene liegt, ist das linearisierte System um die Ruhelage stabil. Gibt es Nullstellen mit einem Realteil $\Re(s_0) \geq 0$ muss überprüft werden, ob dies nur für einen Teil der Wurzelortskurve gilt und für welche Verstärkungen sie in der linken Halbebene liegt. Liegen alle berechneten Nullstellen in der linken Halbebene ist dies ein gutes Indiz dafür, dass die Nullstellen für höhere Verstärkungen ebenso dort liegen, es handelt sich aber nur um eine notwendige Bedingung. Um eine verlässliche Aussage treffen zu können muss die Wurzelortskurve von Hand analysiert werden, um ausschließen zu können, dass die Kurve für hohe Verstärkungen die linke Halbebene verlässt.

Wurzelortskurve für die Beispieldatei

Die Wurzelortskurve für die Beispiel-IFC-datei ist in Abbildungen 18 und 19 dargestellt. Abbildung 19 stellt einen kleineren Ausschnitt um den Ursprung dar, um das Verhalten der Kurve an der imaginären Achse besser erkennen zu können.

Man kann erkennen, dass es für große Verstärkungswerte einen bleibenden Imaginärteil bei mehreren Nullstellen gibt. Der maximale Imaginärteil wird bei einer Verstärkung von circa $K_{P,oscmax} = 1429$ erreicht und lautet betragsmäßig ungefähr $2,999 \cdot 10^{-3}$. Daraus folgt, dass das System geringfügig schwingungsfähig ist. Betrachtet man die Sprungantwort bei $K_P = K_{P,oscmax}$ in Abbildung 20 kann man erkennen, dass das System sehr gering schwingt und dabei nicht über den Sollwert tritt. Die Schwingungsvorgänge sind daher aufgrund des geringen Überschwingens bei Betrachtung des stationären Werts und nicht vorhandenen Überschwingens bei Betrachtung des Sollwerts nicht für die Reglerauslegung relevant.

Die verschiedenen Nullstellen des charakteristischen Polynoms wandern für steigende Verstärkungswerte unterschiedlich stark. Die jeweils betragsmäßig kleinsten Nullstellen sind der Imaginär-Achse am nächsten und liegen im Vergleich zu der restlichen Wurzelortskurve sehr nahe beieinander, sodass sie selbst im vergrößerten Ausschnitt nicht gut unterschieden werden können. Die der imaginären Achse am nächsten liegende Nullstelle entsteht für den Verstärkungswert $K_P = 1$ mit einem Realteil von circa $-3,488 \cdot 10^{-6}$. Für steigende Verstärkungen verringert sich dieser Wert, wie auch die Realteile der weiteren Nullstellen, zunehmend. Eine Instabilität bei hohen Verstärkungen ist somit ausgeschlossen. Es gibt aus Stabilitätsgründen keine Obergrenze des Verstärkungsfaktors.

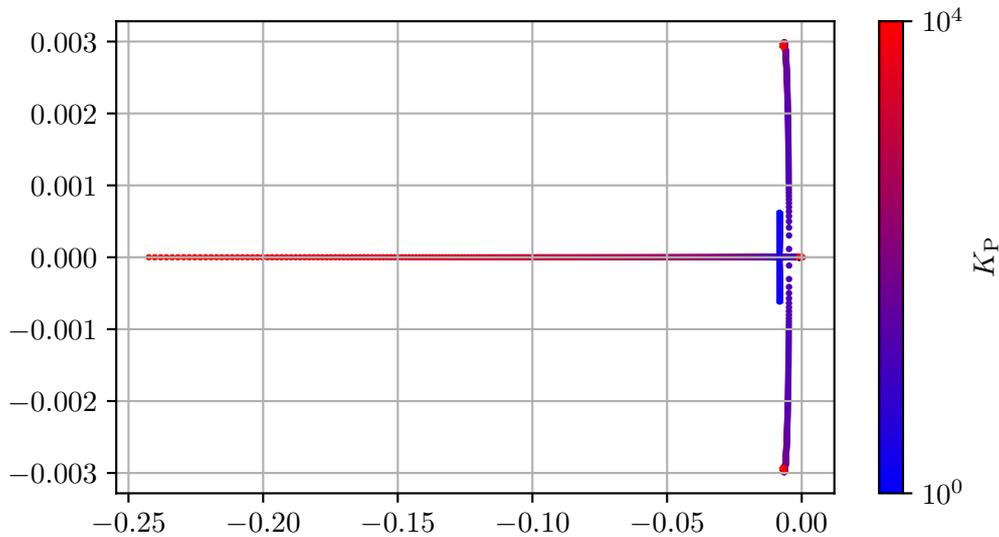


Abbildung 18 – Wurzelortskurve des linearisierten Systems für logarithmisch verteilte Verstärkungswerte von $K_P = 1$ bis 10000. Für zwei komplex konjugierte Polstellenpaare nähert sich der Imaginärteil für steigende Verstärkungswerte einem Wert ungleich Null. Das System wird geringfügig schwingungsfähig. Die Realteile der Polstellen sinken mit steigenden Verstärkungswerten, die Einstellzeit nimmt somit ab.

Für die generierten Gebäudescharen kann davon ausgegangen werden, dass die allgemeine Systemcharakteristik der des unveränderten Gebäudes gleicht. Durch veränderte Gebäudeparameter ändert sich das Systemverhalten, es werden aber keine neuen Null- oder Polstellen in der Übertragungsfunktion erzeugt. Daher wird davon ausgegangen, dass die Stabilitätsbetrachtung der Wurzelortskurve des unveränderten Gebäudes auf die Gebäudescharen übertragbar ist.

Trotzdem werden im Programm für jedes Gebäudemodell die Polstellen für die Schar an Verstärkungswerten berechnet. Existiert eine Polstelle außerhalb der linken Halbebene kommt es zum Programmabbruch mit einer entsprechenden Fehlermeldung. In diesem Fall kann die Wurzelortskurve näher von Hand untersucht werden.

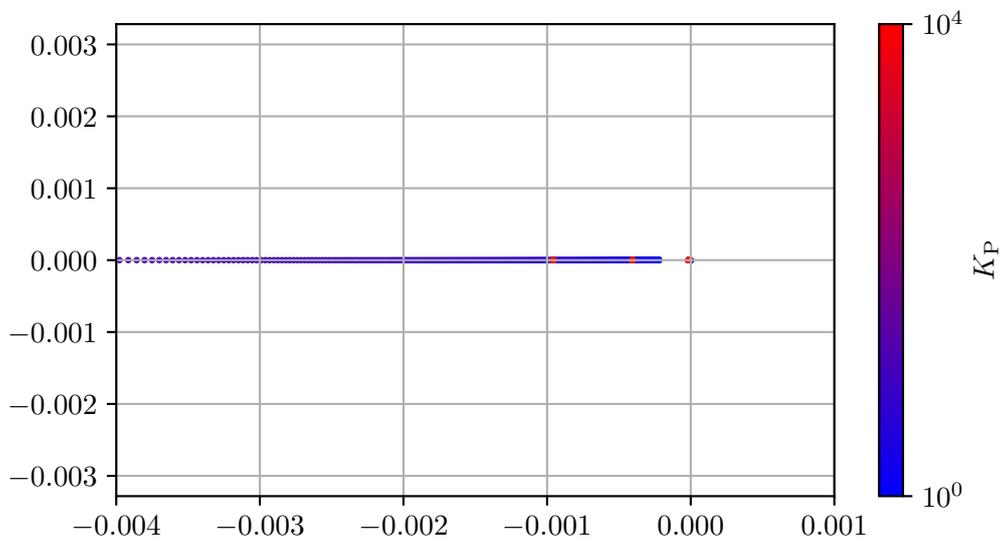


Abbildung 19 – Vergrößerter Ausschnitt der Wurzelortskurve aus Abbildung 18 um den Koordinatenursprung. Trotz Vergrößerung liegen einige Polstellen immernoch sehr nahe am Ursprung. Bei Betrachtung der numerischen Werte kann festgestellt werden, dass alle Polstellen in der linken Halbebene liegen und sich für steigende Verstärkungswerte von der imaginären Achse entfernen.

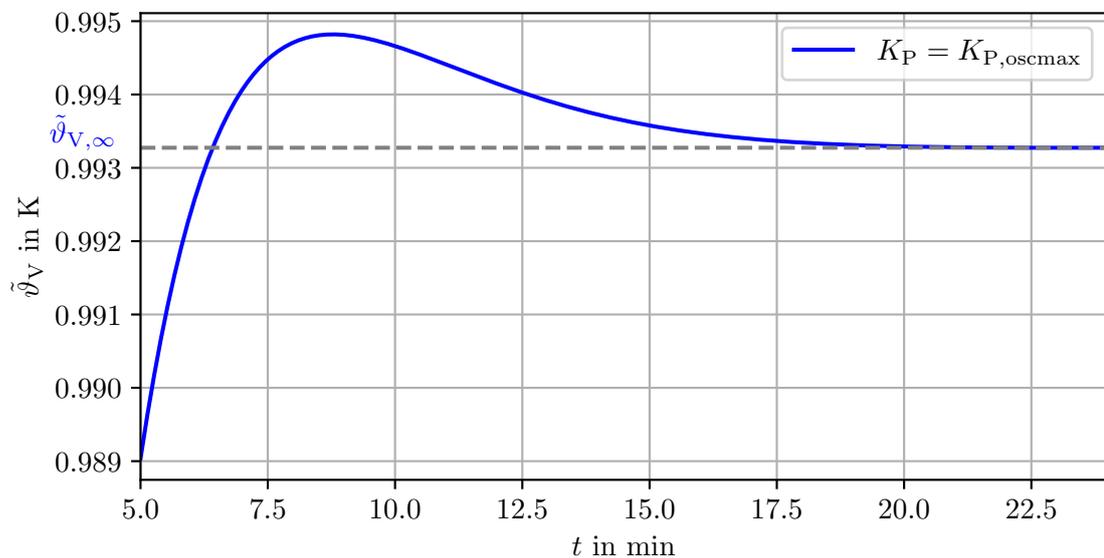


Abbildung 20 – Sprungantwort des linearisierten Systems bei maximaler Schwingung durch $K_P = K_{P,oscmax}$ mit stationärem Regelwert $\tilde{\vartheta}_{V,\infty}$. Das System schwingt leicht über den stationären Endwert, aber nicht über den eigentlichen Sollwert.

5.1.4 Eingrenzung des Verstärkungsfaktors

Da durch die Analyse mit Wurzelortskurve gezeigt werden konnte, dass für Verstärkungen $K_P \geq 1$ keine Instabilität herrscht, kann nun nach Belieben ein positiver Verstärkungsfaktor größer eins gewählt werden. Wichtige Faktoren für das System sind die Einschwingzeit T_S und die resultierende Stellgröße in der Brennerleistung P_B . Für die Bestimmung der Einschwingzeit wird die Sprungantwort betrachtet. Der Eingangsgrößensprung ist hier vom Normwert der Vorlauftemperatur $\vartheta_{V,0} = 75^\circ\text{C}$ auf einen 1 K höheren Wert von 76°C . Wie auch bei der Wurzelortskurve wird das Systemverhalten für eine Schar von logarithmisch verteilten Verstärkungswerten bestimmt. In Abbildung 21 sind eine Teilmenge der berechneten Sprungantworten und die zugehörigen Stellgrößenverläufe dargestellt. Es werden nicht alle berechneten Verläufe dargestellt um das Diagramm übersichtlicher zu gestalten. Für die Eingrenzung des Verstärkungsfaktors werden aber alle berechneten Verläufe verwendet.

Die Brennerleistung ist physikalisch durch den verwendeten Heizkessel beschränkt. Sollwerte oberhalb der maximal möglichen Brennerleistung $P_{B,\max} = 15\text{ kW}$ wären theoretisch möglich und würden sich durch maximale Brennerleistung äußern, bis die vom Regler verlangte Leistung unter diese sinkt.

Die Einschwingzeit sollte möglichst klein sein und maximal im einstelligen Minutenbereich liegen. Der Heizkessel sollte nicht die beschränkende träge Komponente des Systems sein. Als maximale Einschwingzeit wird ein Wert von $T_{S,\max} = 5\text{ min}$ gewählt.

Die Einschwingzeit ist die Zeit, nach der die Regelgröße ein vordefiniertes Toleranzband um ihren Sollwert nicht mehr verlässt. Schwingt das betrachtete System nicht, handelt es sich um den Zeitpunkt, zu dem die Regelgröße das Toleranzband durchbricht. Für das Toleranzband wird hier eine Breite von 20%, also alle Werte zwischen 0,9 K und 1,1 K gewählt. Der minimale Verstärkungswert, für den die Einschwingzeit unter der maximalen Einschwingzeit $T_{S,\max}$ liegt, kann programmatisch ermittelt werden. Bei dem ermittelten Wert handelt es sich allerdings nicht um den genauen Wert, sondern um den ersten gültigen Wert aus der generierten Schar an Verstärkungswerten. Da es keine Obergrenze für die Verstärkungswerte gibt, wird der nächstgrößere ganzzahlige Wert verwendet. Dieser lautet für die Beispieldatei $K_{P,\min} = 636$.

Bei Verwendung eines P-Reglers entsteht ein bleibender Regelfehler, der mit höheren Verstärkungswerten sinkt. Daher wird die minimale Reglerverstärkung verdoppelt, um den stationären Regelfehler zu verkleinern. Die Sprungantworten und entsprechende Stellgrößen für die Verstärkungen $K_{P,\min}$ und $2K_{P,\min}$ sind in Abbildung 22 mit dem Toleranzband und der Einschwingzeit dargestellt. Die Einschwingzeiten lauten $T_S(K_{P,\min}) = 206\text{ s}$ und $T_S(2K_{P,\min}) = 95\text{ s}$. Die stationären Regelfehler können aus Abbildung 23 abgelesen werden und belaufen sich bei Rundung auf vier signifikante Stellen auf $e_\infty(K_{P,\min}) = 1,662 \cdot 10^{-2}\text{ K}$ und $e_\infty(2K_{P,\min}) = 8,383 \cdot 10^{-3}\text{ K}$.

Wie zu sehen ist, wird bei doppelter Verstärkung eine schnellere Einschwingzeit und geringere stationäre Regelabweichung erreicht. Auch für diesen höheren Verstärkungswert liegt die Brennerleistung weit unter dem Maximum und läuft somit nicht in die Begrenzung.

5.2 Untersuchung des Großsignalverhaltens

Um eine sinnvolle Betrachtung des Großsignalverhaltens durchführen zu können, müssen wahrscheinliche Szenarien für das System definiert werden. Neben dem „Nominalbetrieb“, in dem reale Wetterdaten verwendet werden (siehe Abschnitt 3.6.7), werden die Szenarien „Abkühlen“ und „Kaltstart“ definiert. Mit diesen Szenarien können Untersuchungen am Nominalmodell der IFC-Datei aber auch an den gebildeten Gebäudescharen durchgeführt werden. Die Beschreibung der Szenarien erfolgt in Abschnitt 6.1.

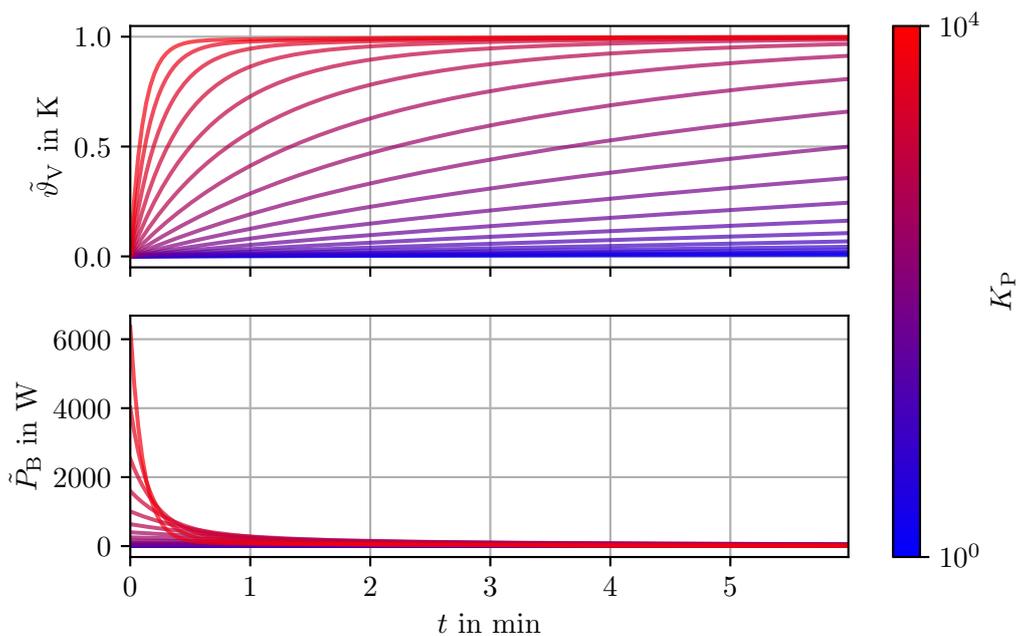


Abbildung 21 – Sprungantworten und Stellgrößenverläufe des linearisierten Systems für eine Auswahl an logarithmisch verteilten Verstärkungswerten von $K_P = 1$ bis 10000. Für geringe Verstärkungswerte entstehen große Regelabweichungen. Je größer die Verstärkung, desto geringer die Regelabweichung und Einstellzeit. Für große Verstärkungswerte steigt das Maximum der Stellgröße. Die Stellgröße, also die Summe aus \tilde{P}_B und der Ruhelage $P_{B,RL}$, bleibt dennoch unterhalb der maximal gerätetechnisch möglichen Leistung $P_{B,max} = 15$ kW.

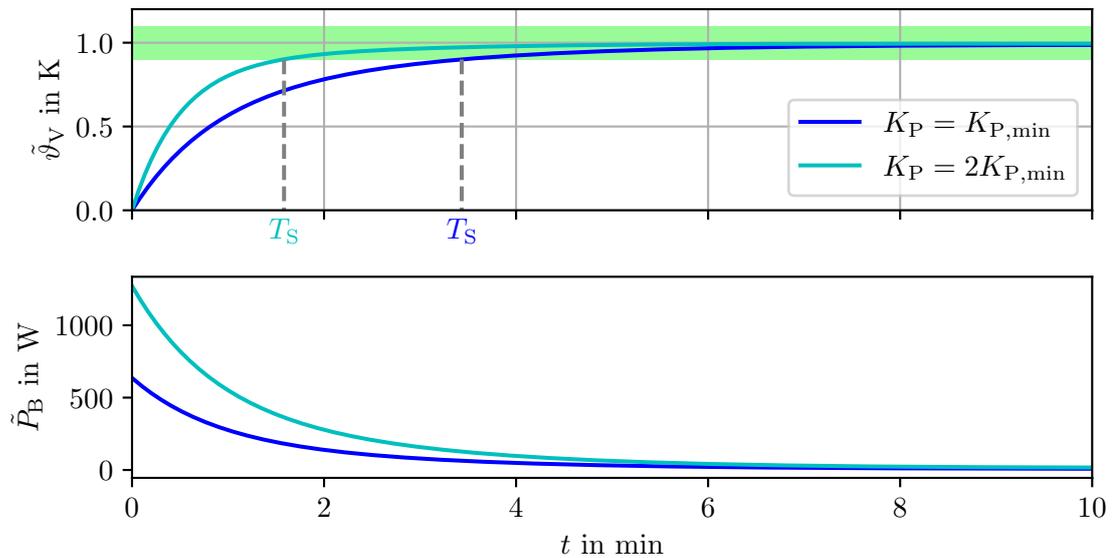


Abbildung 22 – Sprungantwort mit Einschwingzeit T_S und Regelgröße des linearisierten Systems für Verstärkungswerte $K_P = K_{P,\min}$ und $2K_{P,\min}$. Mit doppelter Reglerverstärkung halbiert sich die Einstellzeit des Systems.

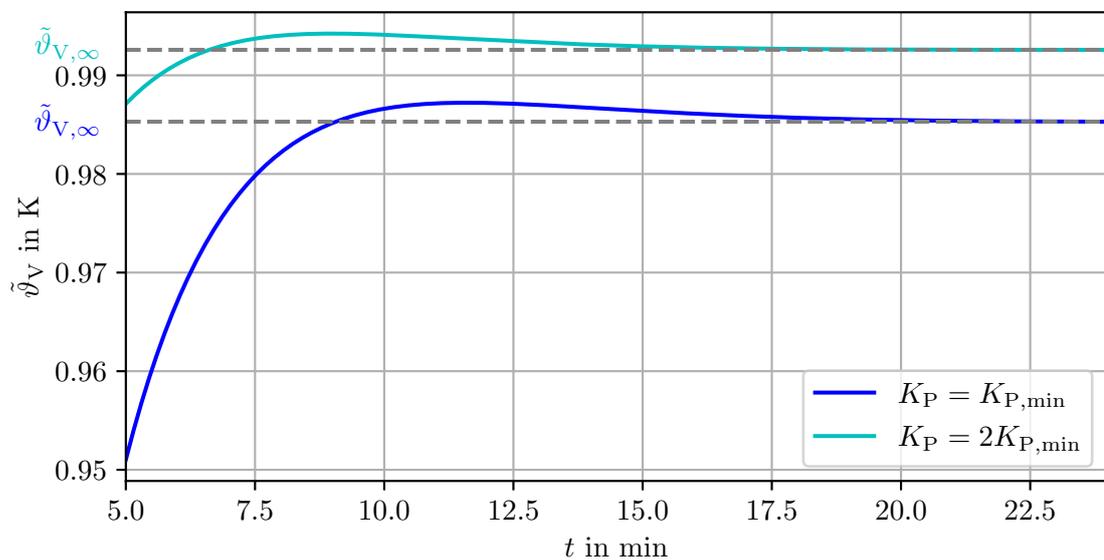


Abbildung 23 – Sprungantwort des linearisierten Systems mit stationären Regelwerten $\tilde{\vartheta}_{V,\infty}$ für Verstärkungswerte $K_P = K_{P,\min}$ und $2K_{P,\min}$. Die stationäre Regelabweichung sinkt bei höherer Reglerverstärkung. Das Überschwingen über den stationären Endwert ist relativ gesehen für die höhere Verstärkung geringer. Für keine Verstärkung schwingt die Regelgröße über den Sollwert.

Kapitel 6

Simulation

Im Folgenden werden erst die Simulationsszenarien beschrieben und dann die Simulationsergebnisse präsentiert. Für die Präsentation der Simulationsergebnisse werden zunächst die Simulationsszenarien auf das nominale Gebäude angewandt und die Ergebnisse interpretiert. Anschließend werden die Szenarien auch auf Teile der Gebäudescharen angewandt und diese Ergebnisse ebenfalls diskutiert.

Um die verschiedenen Temperaturen, die in den Diagrammen vorkommen, einordnen zu können, werden die räumlichen Zuordnungen in Abbildung 24 noch einmal dargestellt. Die Bedeutung der Vor- und Rücklauftemperaturen ϑ_V und ϑ_R können Abbildung 3 entnommen werden.

6.1 Simulationsszenarien

6.1.1 Nominalbetrieb

Im Nominalbetrieb wird ein realer Außentemperaturverlauf nach Abschnitt 3.6.7 simuliert. Dadurch wird das Verhalten des Gebäudes unter realen Bedingungen untersucht. Die Initialwerte für die Simulation bei Nominalbetrieb werden in einer separaten Simulation berechnet, in der die Außentemperatur auf den ersten Außentemperaturwert des realen Verlaufs gesetzt wird. Der stationäre Zustand dieser zusätzlichen Simulation bildet dann den Anfangszustand der Simulation des nominalen Betriebs.

Der Simulationszeitraum für den Nominalbetrieb beträgt 10 Tage, um einen großen Zeitraum abzudecken, aber trotzdem die tagesbedingten Temperaturschwingungen in Diagrammen sichtbar zu machen. Dieser Zeitraum ist arbiträr gewählt und kann bis auf den gesamten Zeitraum der Wetterdaten verlängert werden.

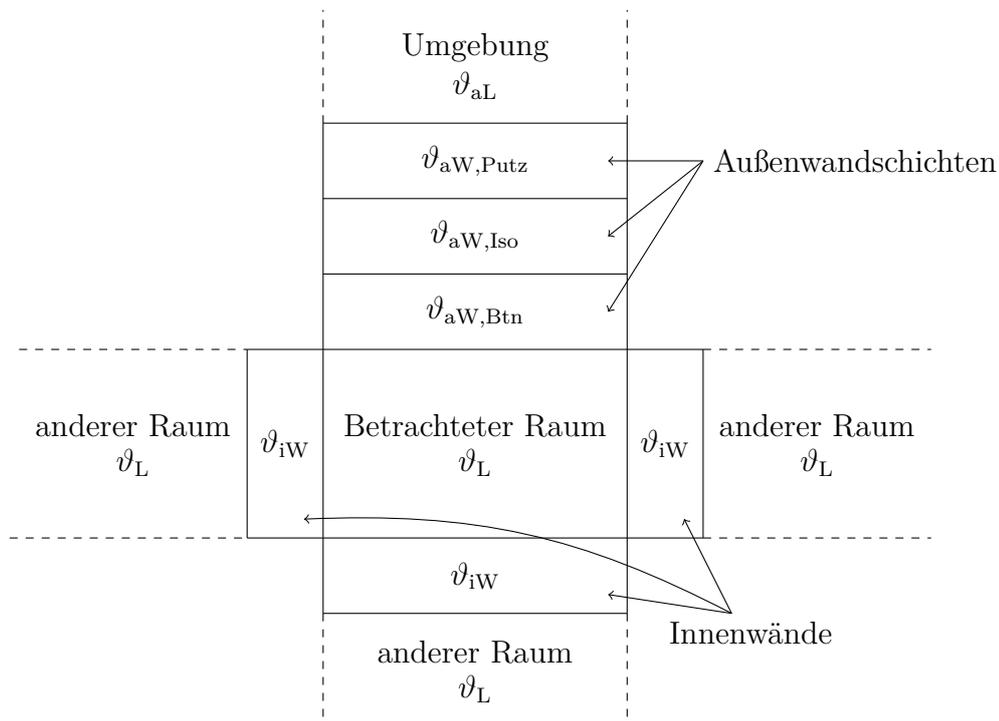


Abbildung 24 – Schematische, nicht maßstabsgetreue Darstellung der verschiedenen im Modell als Zustandskomponenten vorkommenden Temperaturen. Zustandskomponenten ϑ_V und ϑ_R sind nicht dargestellt und können Abbildung 3 entnommen werden.

6.1.2 „Abkühlen“

Das Szenario „Abkühlen“ soll den Fall simulieren, in dem die Heizung vollständig ausgeschaltet wird. Dies ist keinesfalls ein normaler Betrieb, sondern stellt vielmehr den ungeplanten Ausfall des Heizkessels dar. Des Weiteren können unabhängig von der Stabilitätsuntersuchung mit diesem Szenario Vergleiche zwischen verschiedenen Gebäudevarianten durchgeführt werden. So kann beispielsweise untersucht werden, wie sich die Dämmschichtdicke auf die Auskühlgeschwindigkeit auswirkt.

Im Abkühlenszenario wird die Brennerleistung auf $P_B = 0$ gesetzt. Für die Anfangswerte werden die in Abschnitt 5.1.1 berechneten Gleichgewichtswerte für die jeweilige Gebäudevariante verwendet. Die Außentemperatur wird auf die Auslegungsaußentemperatur $\vartheta_{aL,0} = -12,8^\circ\text{C}$ gesetzt. Es wird eine Zeitspanne von 24 h simuliert.

Es ist zu beachten, dass diese Simulation scheitert, wenn sie zu lange betrieben wird, da die Systemtemperaturen unter die Modellbeschränkung sinken. Eine vollständige Simulation bis zu einem Gleichgewichtszustand ist also nicht möglich, für die Untersuchungen aber auch nicht notwendig.

6.1.3 „Kaltstart“

Der „Kaltstart“ stellt die Inbetriebnahme des Systems nach einer längeren ausgeschalteten Phase dar. Dies kann die erste Inbetriebnahme sein, oder auch das Wiedereinschalten nach einer Störung oder Abwesenheit. Da die Systemtemperaturen im Urlaubs- oder Störfall nicht unbedingt auf die als Anfangswerte verwendeten Temperaturen sinken würden, kann dies als Analyse des Worst-Case-Szenarios betrachtet werden.

Für das Szenario wird als Anfangswert aller Temperaturen die Durchschnittstemperatur der Außentemperaturen des Datensatzes $\bar{\vartheta}_{aL} \approx 7,215 \text{ °C}$ verwendet. Diese wird statt der Auslegungsaußentemperatur $\vartheta_{aL,0}$ verwendet, da diese unterhalb des Gefrierpunkts von Wasser liegt und somit die Modellbeschränkungen verletzen würde. Es wird über einen Zeitraum von 24 h simuliert.

6.2 Unverändertes Beispielgebäude

Die Simulationsergebnisse für den Nominalbetrieb des unveränderten Raums mit realem Außentemperaturverlauf (siehe Abschnitt 3.6.7) sind in Abbildung 25 dargestellt. Die Ergebnisse der Szenarien „Abkühlen“ und „Kaltstart“ können in Abbildungen 26 und 27 gefunden werden. Alle im weiteren Verlauf angegebenen Werte sind außerdem auf vier signifikante Stellen gerundet.

6.2.1 Stabilitätsbetrachtung

Für das System mit P-Regler wurde in Abschnitt 5.1.3 bereits in der Ruhelage Stabilität bewiesen. Da es zwischen der Ruhelage und dem Nominalbetrieb allerdings signifikante Unterschiede gibt, ist eine Betrachtung des Systemverhaltens bei Nominalbetrieb trotzdem unabdingbar. In Abbildung 25 kann erkannt werden, dass das System zu keiner Zeit instabiles Verhalten aufweist. Auch Schwingungsverhalten ist nicht zu erkennen.

Im Szenario „Abkühlen“ wird die Stellgröße auf $P_B = 0$ gesetzt. Dadurch ist instabiles Systemverhalten ausgeschlossen. Das Szenario dient somit zur Plausibilisierung. Durch die Ergebnisse in Abbildung 26 wird diese noch einmal veranschaulicht und bestätigt.

Im Gegensatz zum „Abkühl“-Szenario ist für das „Kaltstart“-Szenario instabiles Verhalten *nicht* ausgeschlossen. In den Simulationsergebnissen in Abbildung 27 können jedoch keine Schwingungsvorgänge oder instabiles Verhalten erkannt werden.

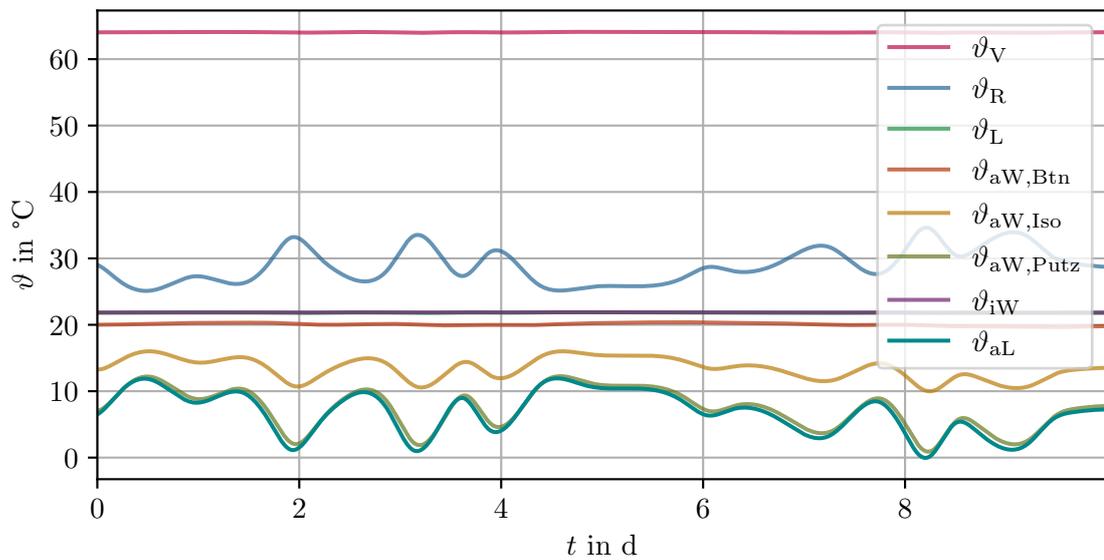


Abbildung 25 – Simulationsergebnis des unveränderten Gebäudes im Nominalbetrieb mit allen Zustandskomponenten aus x und der Außenlufttemperatur ϑ_{aL} . Sowohl Vorlauftemperatur ϑ_V als auch Raumlufttemperatur ϑ_L sind stabil leicht oberhalb ihrer Sollwerte, was auf die Verwendung eines P-Reglers mit bleibender Regelabweichung für die Vorlauftemperatur und die Reglerauslegung mit der Auslegungstemperatur $\vartheta_{aL,0} < \bar{\vartheta}_{aL}$ zurückzuführen ist.

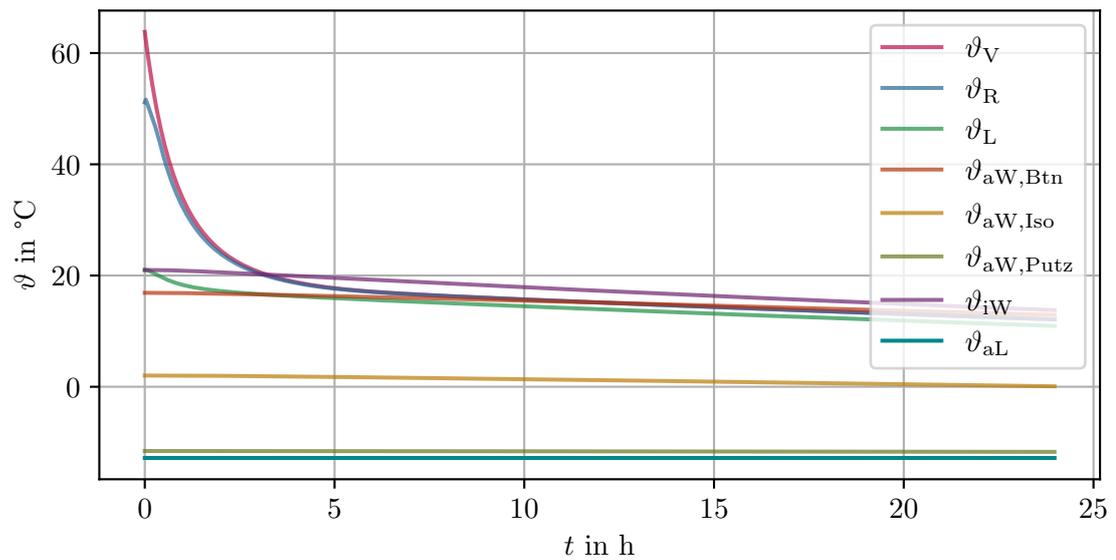


Abbildung 26 – Simulationsergebnis des unveränderten Gebäudes im „Abkühl“-Szenario mit allen Zustandskomponenten aus x und der Außenlufttemperatur ϑ_{aL} . In diesem Szenario ist der Brenner ausgeschaltet, instabiles Verhalten ist dementsprechend nicht möglich, was durch diese Abbildung bestätigt wird.

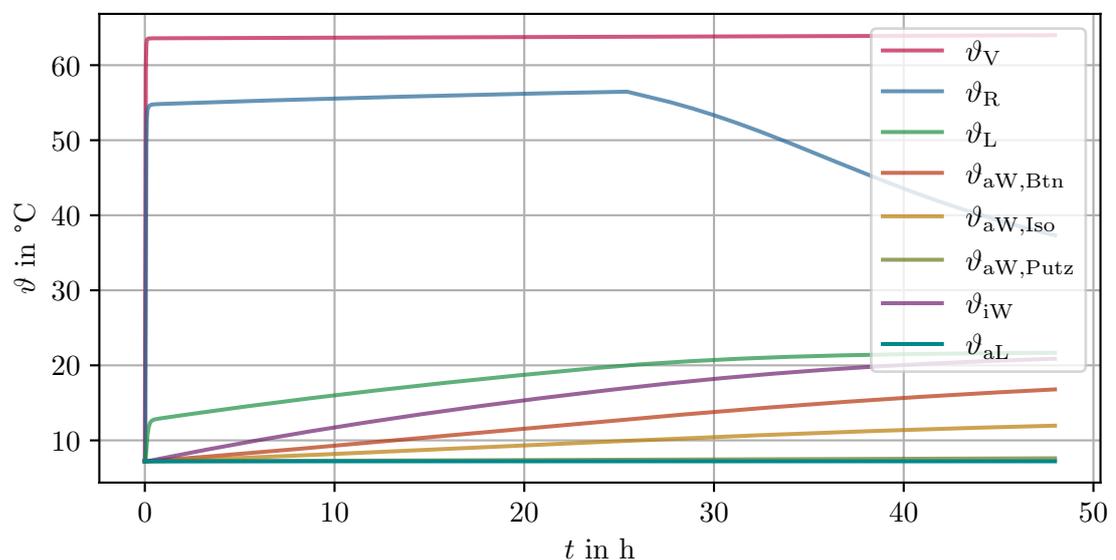


Abbildung 27 – Simulationsergebnis des unveränderten Gebäudes im „Kaltstart“-Szenario mit allen Zustandskomponenten aus x und der Außenlufttemperatur ϑ_{aL} . Alle Größen erreichen ohne Schwingung oder instabiles Verhalten ihre Gleichgewichtswerte. Die Rücklauftemperatur ϑ_R nimmt ab dem Zeitpunkt ab, ab dem das Thermostat den Massenfluss des Heizwassers $\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}$ verringert.

6.2.2 Allgemeine Betrachtungen

Das Systemverhalten im nominalen Betriebsfall wirkt allgemein realistisch. Eine stabile Raumlufttemperatur ϑ_L kann während der gesamten Simulation gehalten werden. Sie liegt dabei in einem Bereich von $\vartheta_L \in [21,73 \text{ °C}; 21,89 \text{ °C}]$ und somit oberhalb ihrer Solltemperatur von $\vartheta_{L,\text{soll}} = 21 \text{ °C}$. Die Vorlauftemperaturreglung funktioniert ebenfalls und hält den Wert in einem Bereich von $\vartheta_V \in [64,03 \text{ °C}; 64,20 \text{ °C}]$ bei einer Soll-Temperatur von $\vartheta_{V,\text{soll}} = 63,81 \text{ °C}$.

Die Regelabweichungen der Raumluft- und Vorlauftemperatur sind auf das Reglerentwurfungsverfahren zurückzuführen. Die Reglerwerte werden für eine Ruhelage bestimmt, die in der Simulation nicht erreicht wird. Der durchschnittliche Außentemperaturwert liegt mit $\bar{\vartheta}_{aL} = 7,215 \text{ °C}$ deutlich über der Auslegungstemperatur der Ruhelage mit $\vartheta_{aL,0} = -12,8 \text{ °C}$. Dadurch gibt es weniger Wärmeverluste nach außen, weshalb sowohl Vorlauf- als auch Raumtemperatur oberhalb ihrer Sollwerte liegen. Dies äußert sich außerdem in einer größeren Spreizung von $\sigma \in [29,30 \text{ K}; 39,11 \text{ K}]$ als im Normfall $\sigma_0 = \vartheta_{V,0} - \vartheta_{R,0} = 10 \text{ K}$, da das Thermostat durch die erhöhte Raumlufttemperatur den Heizwasserfluss gering hält, wie in Abbildung 28 zu sehen ist. Ein geringer Volumenstrom des Heizwassers führt zu einer höheren Spreizung, wie auch in Abbildung 29 zu erkennen ist.

6.3 Generierte Gebäudescharen

Im Folgenden werden die Simulationsergebnisse für die drei verschiedenen, in Abschnitt 4.2 beschriebenen, Gebäudescharen dargestellt und untersucht. Auf die einzelnen Gebäude wird jeweils das Reglerentwurfungsverfahren aus Kapitel 5 angewandt. Um die Übersichtlichkeit zu wahren, werden jeweils nur die Gebäude mit der kleinsten und größten Schichtdicke betrachtet. Wird nur ein Simulationsergebnis eines Gebäudes dargestellt, handelt es sich um die Variation mit der geringsten Schichtdicke.

6.3.1 Nominalbetrieb

Die Ergebnisse der Simulation des Nominalbetriebs sind in Abbildung 30 dargestellt. Erkennbar ist, dass der Wandaufbau starken Einfluss auf die berechnete Vorlaufsoltemperatur $\vartheta_{V,\text{soll}}$ und das Verhalten der Rücklauftemperatur ϑ_R hat. Da die Wärmeverluste über die Außenwand geschehen, spielt der Aufbau der Innenwand für den nominalen Betrieb eine untergeordnete Rolle. Die Ergebnisse des unveränderten Gebäudes und des Gebäudes mit Gipswandbauplatten als Innenwände unterscheiden sich daher kaum.

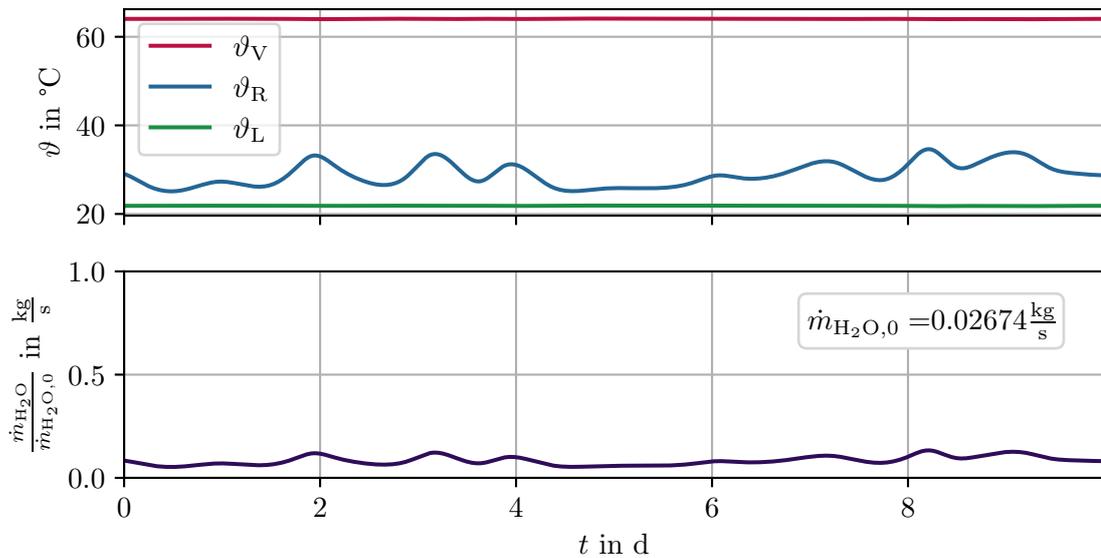


Abbildung 28 – Simulationsergebnis des unveränderten Gebäudes im Nominalbetrieb mit Zustandskomponenten ϑ_V , ϑ_R und ϑ_L und durch das Thermostat geregelter Massenstrom des Heizwassers $\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}$. Da ϑ_V und ϑ_L oberhalb ihrer Sollwerte liegen, ist $\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}$ durchgehend gering.

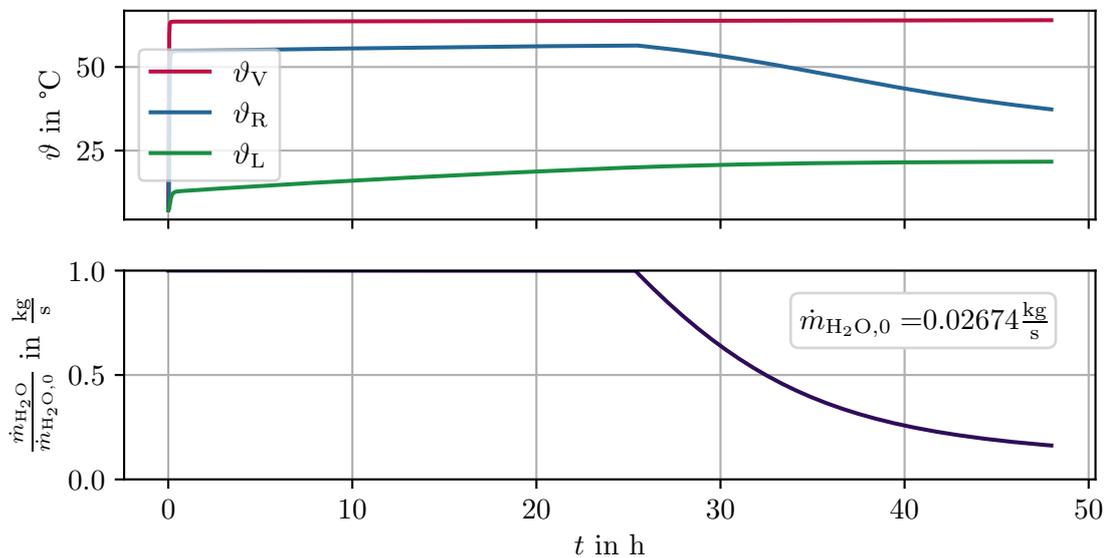


Abbildung 29 – Simulationsergebnis des unveränderten Gebäudes im „Kaltstart“-Szenario mit Zustandskomponenten ϑ_V , ϑ_R und ϑ_L und durch das Thermostat geregelter Massenstrom des Heizwassers $\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}$. Sobald die ϑ_L in das P-Band des Thermostats eindringt, verringert sich der $\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}$ und daraufhin auch ϑ_R .

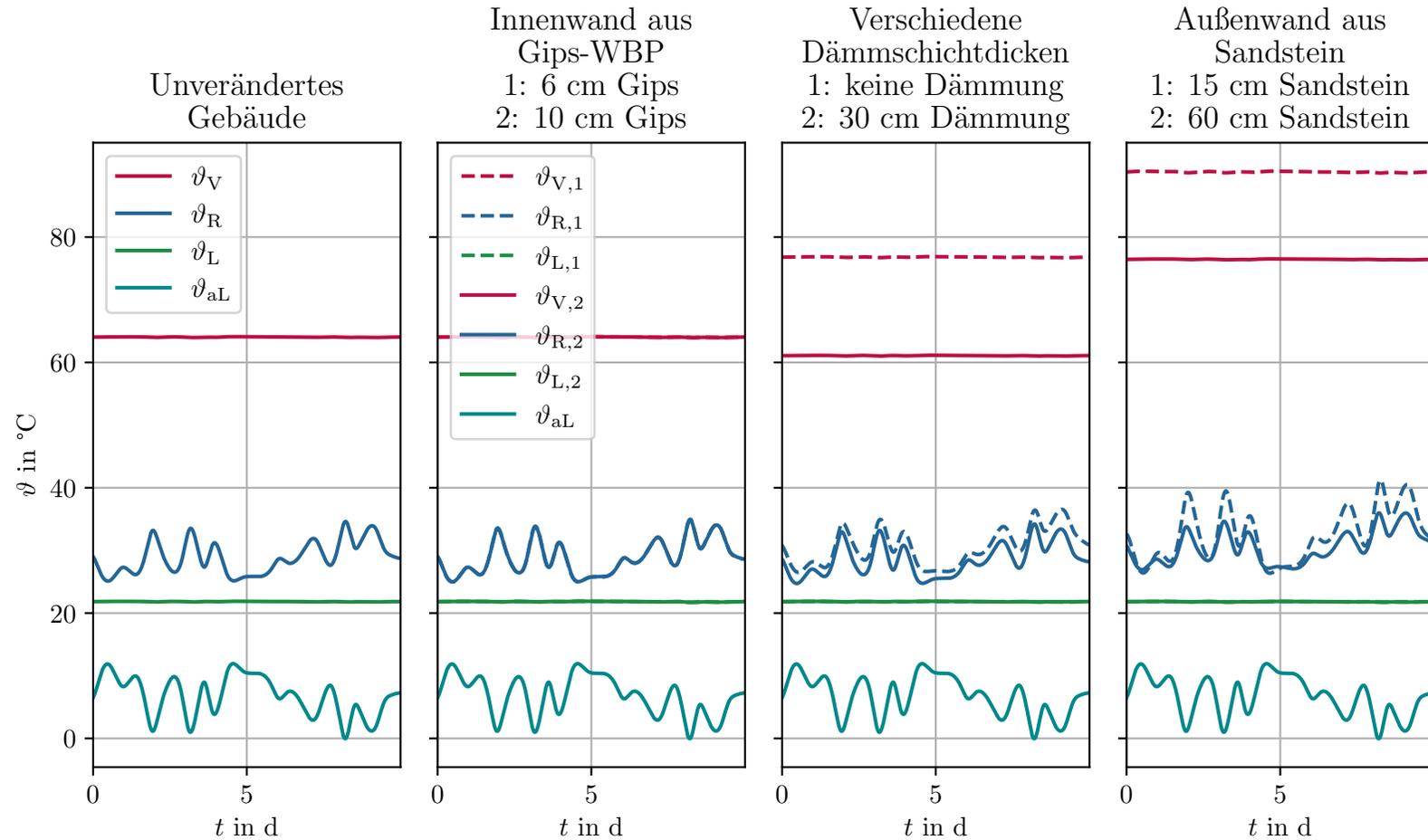


Abbildung 30 – Simulationsergebnis für verschiedene Wandaufbauten im Nominalbetrieb mit Zustandskomponenten ϑ_V , ϑ_R und ϑ_L und der Außenlufttemperatur ϑ_{aL} . Die Vorlaufsollltemperatur $\vartheta_{V,soll}$, die Rücklauftemperatur ϑ_R und somit der Spreizung σ sind vom Außenwandmaterial abhängig. Das Innenwandmaterial hat kaum Auswirkungen. Alle Konfigurationen sind stabil.

Bei Änderung der Außenwandbeschaffenheit zeigen sich hingegen Unterschiede in der Vorlaufsollltemperatur $\vartheta_{V,soll}$ und der Rücklauftemperatur ϑ_R . Auch bei unterschiedlichen Wandstärken sind Änderungen zu sehen. Die genauen Reglerwerte können Tabelle 3 entnommen werden. Ein Vergleich der sich einstellenden Raumlufttemperaturen ϑ_L in Abbildung 31 zeigt, dass es trotz unterschiedlicher Wandbeschaffenheiten sehr ähnliches Raumlufttemperaturverhalten gibt. Dies spricht für den Erfolg des Reglerentwurfsverfahrens.

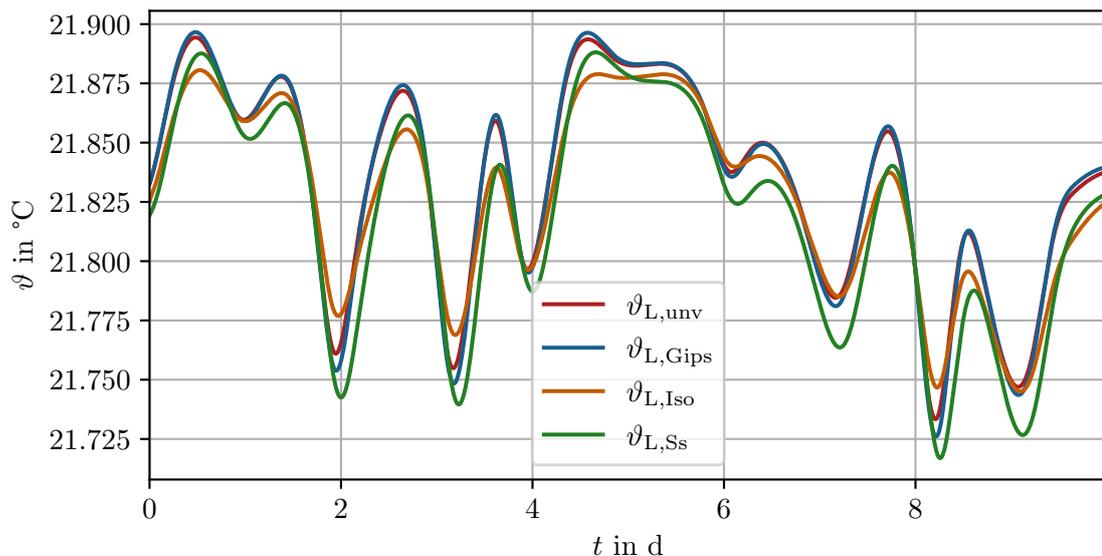


Abbildung 31 – Vergleich der Raumlufttemperaturen ϑ_L für verschiedene Wandaufbauten im Nominalbetrieb. Alle Temperaturen liegen zu jeder Zeit oberhalb der Solltemperatur $\vartheta_{L,soll} = 21\text{ °C}$ und zeigen sehr ähnliches Verhalten. Die Reglerauslegung ist somit im Sinne der Reproduzierbarkeit von Ergebnissen erfolgreich.

6.3.2 „Abkühl“-Szenario

Aus den Simulationsergebnissen des „Abkühl“-Szenarios in Abbildung 32 ist zu erkennen, dass zusätzlich zur Beschaffenheit der Außenwand auch die der Innenwand Einfluss auf das Systemverhalten hat. Durch die geringere Wärmespeichermasse kühlt die Raumluft bei Gipswandbauplatten als Innenwandmaterial deutlich schneller ab als beim unverändertem Gebäude. Die Außenwandaufbauten haben aufgrund unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeiten ebenfalls einen Einfluss auf die Auskühlgeschwindigkeit. Auch bei den verschiedenen Wanddicken gleichen Materials sind Unterschiede zu erkennen.

In Abbildung 33 können die Unterschiede durch den Vergleich der Raumlufttemperaturen ϑ_L verschiedener Konfigurationen noch einmal klar gesehen werden.

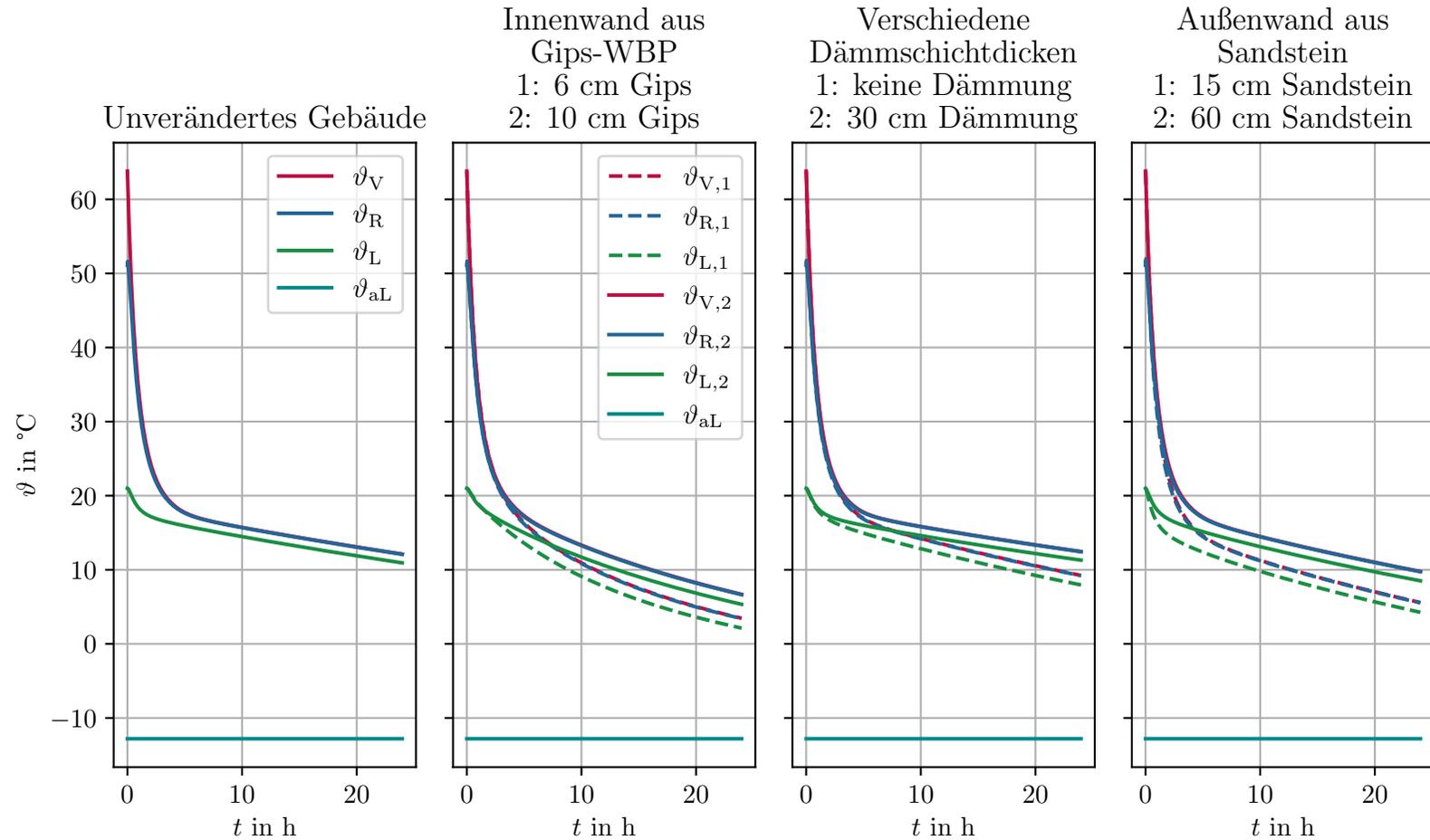


Abbildung 32 – Simulationsergebnisse für verschiedene Wandaufbauten im „Abkühl“-Szenario mit Zustandskomponenten ϑ_V , ϑ_R und ϑ_L und der Außenlufttemperatur ϑ_{aL} . Je schlechter die Dämmung der Außenwand, desto höher der Wärmeverlust und die Auskühlgeschwindigkeit. Bei weniger Wärmespeichermasse durch andere Innenwandbeschaffenheit ist ebenfalls höhere Auskühlgeschwindigkeit zu beobachten. Insgesamt ist durch $P_B = 0$ kein instabiles Verhalten möglich, was bestätigt wird.

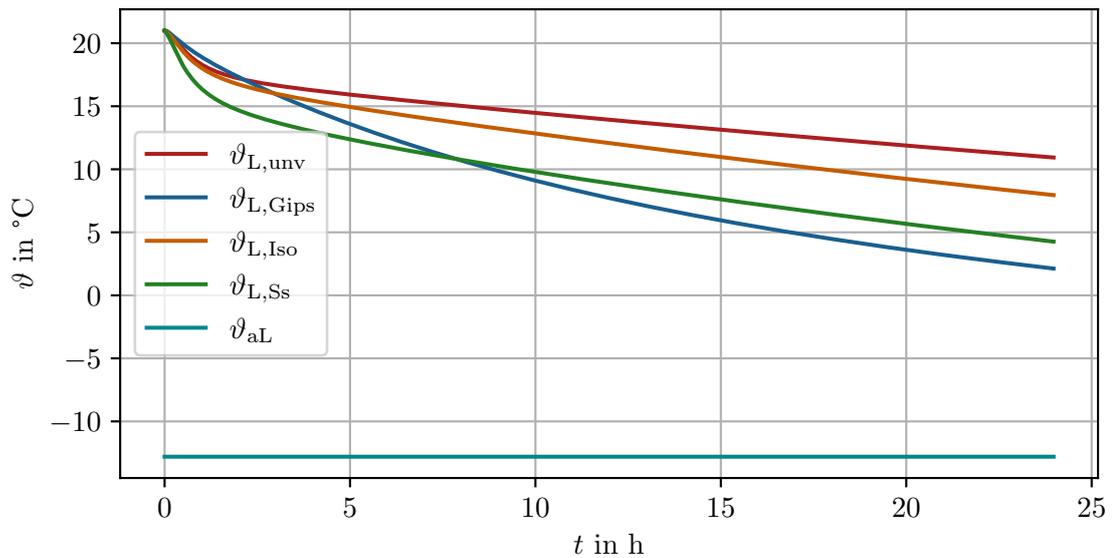


Abbildung 33 – Vergleich der Raumlufttemperaturen ϑ_L für verschiedene Wandaufbauten im „Abkühl“-Szenario. Sowohl Unterschiede im Innenwandaufbau, als auch im Außenwandaufbau haben Einfluss auf das Auskühlverhalten.

6.3.3 „Kaltstart“-Szenario

Die Ergebnisse des „Kaltstart“-Szenarios sind in Abbildung 34 dargestellt. Im Vergleich zwischen unverändertem Gebäude und Gebäude mit Gipswandbauplatten als Innenwandmaterial in Abbildung 35 ist gut sichtbar, dass hohe Wärmekapazitäten der Innenwände das Aufheizen der Raumluft verzögern, da laut Gleichung (2.12) für die Erwärmung auf gleiche Temperaturen bei höheren Wärmekapazitäten eine größere Wärmemenge benötigt wird. Es fließt daher ein größerer Teil der Wärme in die Wände. Wird weniger Wärme an die Wände abgegeben, kann die Raumluft schneller erwärmt werden, ihre Wärmekapazität ist unabhängig der Wandbeschaffenheiten. Daher erreicht die Raumlufttemperatur ϑ_L bei der Verwendung von Gipswandbauplatten deutlich schneller einen Gleichgewichtswert.

Aus verschiedenen Außenwandbeschaffenheiten folgen ebenfalls verschiedene Wärmekapazitäten, welche wiederum einen Einfluss auf die Zeitspanne zwischen Heizbeginn und Erreichen der Gleichgewichtslage haben. Dies kann in Abbildung 36 beobachtet werden.

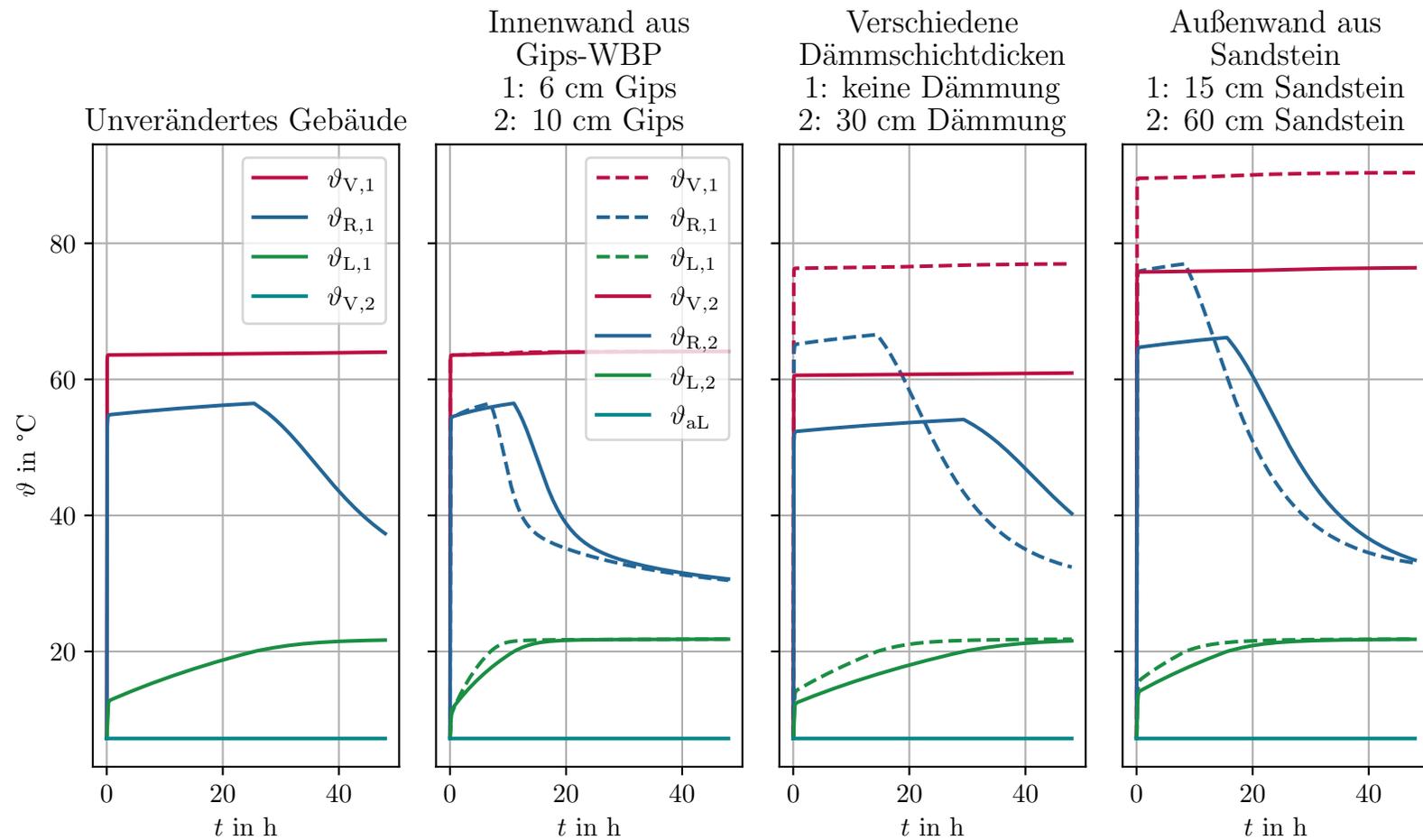


Abbildung 34 – Simulationsergebnisse für verschiedene Wandaufbauten im „Kaltstart“-Szenario mit Zustandskomponenten ϑ_V , ϑ_R und ϑ_L und der Außenlufttemperatur ϑ_{aL} . Je höher die gesamte Wärmekapazität der Wände, desto länger der Aufheizvorgang. Sowohl Änderungen an Innenwänden als auch an der Außenwand sorgen für verändertes Verhalten.

6.3.4 Bewertung der Stabilität

In den letzten drei Abschnitten wurden die Ergebnisse der Simulationen für die erstellten Gebäudescharen präsentiert. Während es zwischen den verschiedenen Konfigurationen gut sichtbare und zu erwartende Unterschiede gibt, sind an keiner Stelle für die Vorlauf-temperatur ϑ_V Anzeichen von instabilem Verhalten zu erkennen.

Die Ergebnisse des Reglerentwurfs können Tabelle 3 entnommen werden. Wie in Abbildung 30 an den erreichten Vorlauftemperaturen zu sehen ist, werden für verschiedene Gebäudekonfigurationen verschiedene Reglersollwerte, also Vorlaufsolltemperaturen $\vartheta_{V,soll}$, generiert. Anzumerken ist, dass für alle Konfigurationen die gleiche minimale Verstärkung $K_{P,min} = 636$ berechnet wurde. Grund hierfür ist, dass die Differentialgleichung für die Vorlauf-temperatur ϑ_V allein von den Eigenschaften des Heizkessels abhängig ist. Somit haben die Gebäudeeigenschaften keinen Einfluss auf die Berechnung dieses Teils des Reglers. Die einzustellende Vorlaufsolltemperatur und der Offset $P_{B,offset}$ weisen für die verschiedenen Gebäudekonfigurationen hingegen Unterschiede auf.

Tabelle 3 – Ergebnisse des Reglerentwurfs für die verschiedenen Gebäudekonfigurationen. Die errechnete Heizleistung für das Gebäude mit minimaler Dicke an Sandstein liegt oberhalb der Nennleistung des Heizkörpers. Der ermittelte minimale Verstärkungswert K_{min} gilt für alle Konfigurationen.

Gebäudekonfiguration	$\vartheta_{V,soll}$ in °C	$P_{B,offset}$ in W	K_{min}
Unverändert	63,72	729,4	
6 cm Gipsinnenwand	63,72	729,4	
10 cm Gipsinnenwand	63,72	729,4	
Keine Außenwandisolierung	76,36	1013	636
30 cm Außenwandisolierung	60,79	666,5	
15 cm Sandsteinaußenwand	89,81	1336	
60 cm Sandsteinaußenwand	76,01	1005	

6.4 Diskussion der Ergebnisse

Anhand der vorherigen Betrachtungen kann erkannt werden, dass der Reglerentwurf für das unveränderte Gebäude und die Gebäudescharen erfolgreich war. Im Verlauf der Arbeit hat sich herausgestellt, dass die Dimensionierung der Regelverstärkung K_P unabhängig vom Gebäude möglich ist. Sie ist allein vom Heizkessel abhängig. Der Regler-Offset $P_{B,offset}$ und die Vorlaufsolltemperatur $\vartheta_{V,soll}$ hingegen werden, wie in Tabelle 3 ablesbar ist, vom Gebäudeaufbau beeinflusst. Es ist daher nicht ausreichend, einen Reglerentwurf mitsamt der Bestimmung aller relevanten Parameter lediglich anhand des Heizkessels vorzunehmen.

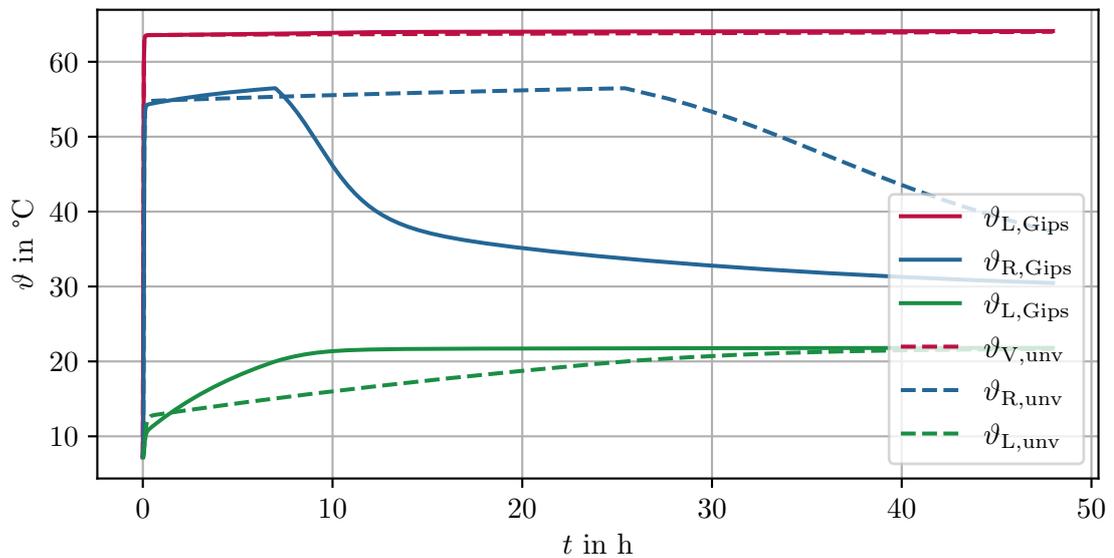


Abbildung 35 – Vergleich der Zustandskomponenten ϑ_V, ϑ_R und ϑ_L für das unveränderte Gebäude und das Gebäude mit Gipswandbauplatten als Innenwandmaterial im „Kaltstart“-Szenario. Durch die geringere Wärmekapazität der Gipswände erreicht die Raumlufttemperatur schneller ihren Gleichgewichtswert.

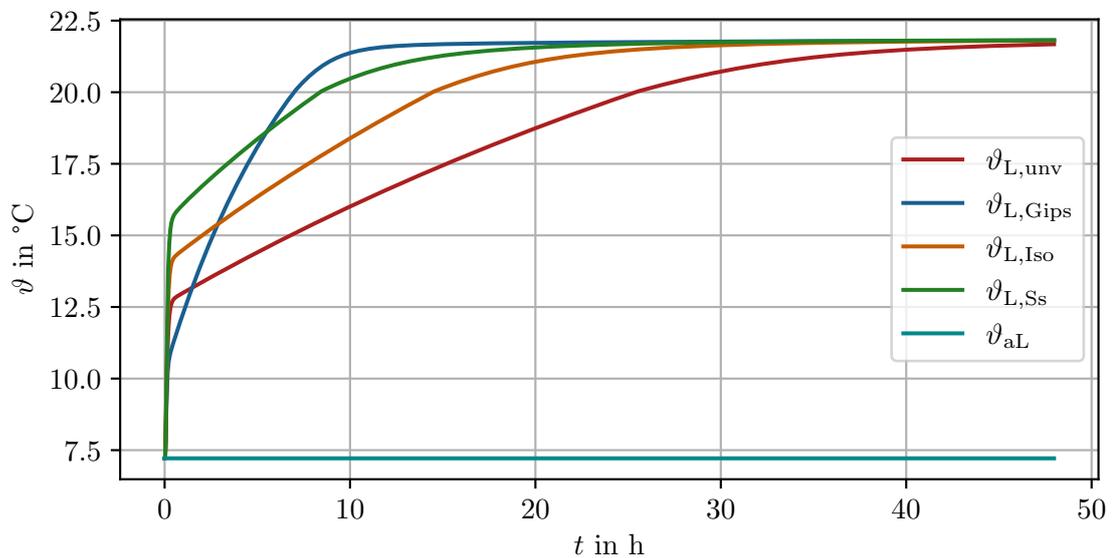


Abbildung 36 – Vergleich der Raumlufttemperaturen ϑ_L für verschiedenen Wandaufbauten im „Kaltstart“-Szenario. Je geringer die Wärmekapazität der Wände desto schneller erreicht die Raumlufttemperatur einen Gleichgewichtswert.

Bei allen Simulationen verschiedener Gebäudekonfigurationen kam es zu einem bleibenden Regelfehler der Raumlufttemperatur ϑ_L . Die Ursache hierfür ist eine Kombination verschiedener Faktoren. Zum einen gibt es durch die Verwendung eines P-Reglers für die Vorlauftemperatur ϑ_V eine bleibende Regelabweichung, weshalb der Sollwert $\vartheta_{V,\text{soll}}$ nie erreicht werden kann. Zum anderen ist die Außenlufttemperatur ϑ_{aL} eine dynamische Größe, die grundsätzliche und tageszeitabhängige Schwankungen aufweist und einen Mittelwert über der Auslegungstemperatur besitzt. Um die Raumlufttemperatur $\vartheta_{L,\text{soll}}$ zu erreichen, muss die Vorlauftemperatur ihren in der Reglerauslegung berechneten Sollwert $\vartheta_{V,\text{soll}}$ erreichen, und die Außentemperatur konstant die Auslegungstemperatur $\vartheta_{aL,0}$ betragen. Dies ist aus den genannten Gründen nicht der Fall, weshalb es zu einer Abweichung vom Raumlufttemperatursollwert kommt. Durch die dynamische Außenlufttemperatur ergeben sich dynamische Abweichungen mit einer quasi-stationären Abweichung die der Differenz des gleitenden Mittelwerts der Außenlufttemperatur und der Auslegungstemperatur geschuldet ist. Zusätzlich ergibt sich aus der stationären Vorlauftemperaturabweichung eine weitere stationäre Abweichung der Raumlufttemperatur.

Die stationäre Abweichung der Raumlufttemperatur zeigt, dass die Verwendung eines PI-Reglers sinnvoll ist, um ebendiese Abweichung aufgrund des Vorlauftemperaturregelfehlers zu beseitigen. Bei einem Gebäude mit manuellen Thermostaten werden die Raumlufttemperaturen von den Bewohnern bzw. Benutzern des Gebäudes nach ihrem Komfort eingestellt, weshalb eine Verwendung eines P-Reglers für den Heizkessel weniger bedenklich ist. Soll aber beispielsweise eine zentrale Steuerung die Raumlufttemperaturen einstellen, ist es notwendig, dass die von der Steuerung vorgegebenen Raumlufttemperatursollwerte erreicht werden. In diesem Fall ist die Verwendung eines Reglers ohne stationäre Regelabweichung, wie einem PI-Regler, unabdingbar. Trotzdem würde die Reglerauslegung mit der Auslegungsaußentemperatur zu Regelabweichungen der Raumlufttemperatur führen. Um diesen Effekt zu beseitigen, müsste die Reglerauslegung aktuelle Außentemperaturwerte verwenden, um die Vorlauf Solltemperatur zu ermitteln.

Kapitel 7

Ausblick

Die Ergebnisse dieser Arbeit sind für den gewählten Rahmen zufriedenstellend. Es wurden Vereinfachungen getroffen, um den Aufwand der Arbeit zu begrenzen, einige Vereinfachungen wurden aber auch bewusst eingeführt, um den Rechenaufwand der Simulationen gering zu halten. Es war nicht das Ziel eine vollständige Abbildung der Realität zu erzeugen, sondern mit angemessenem Aufwand ein möglichst realistisches Modell zu bilden. Für Weiterentwicklungen auf Basis dieser Arbeit können einige Vereinfachungen beseitigt werden. Außerdem werden weitere Ansätze genannt, welche für fortführende Arbeiten interessant sein könnten.

Die Modellierung wurde speziell für die Beispieldatei durchgeführt. Die in dieser Datei beschriebene Konfiguration eines Gebäudes aus einem einzigen Raum mit außen liegendem Heizkessel ist nicht realitätsnah. Weiterhin würden in einem echten Gebäude nicht nur ein Heizkörper, sondern mehrere von einem Heizkessel mit Heizwasser versorgt werden. Hierdurch würden Transportwege für das Heizwasser entstehen, welche nicht mehr vernachlässigt werden können. In diesem Fall sollten die Wärmeverluste in den Rohrleitungen modelliert werden. In diesem Zuge müssten dann auch die Verzögerungen durch die Fließgeschwindigkeit des Heizwassers als Totzeiten mit berücksichtigt werden. Außerdem kommt es bei der Verwendung mehrerer Heizkörper zu Abzweigungen und Zusammenführungen in den Rohrleitungen. Die dadurch entstehende Vermischung von eventuell verschiedenen Heizwassertemperaturen sollte ebenfalls betrachtet werden.

Weiterhin könnte ein Gebäude auch über eine andere Kombination aus Wärmeerzeugern und -verbrauchern beheizt werden. Denkbar wäre zum Beispiel eine Kombination aus einer oder mehrerer Wärmepumpen und Fußbodenheizungen. In diesem Fall müssten diese neuen Objekte thermodynamisch modelliert werden, um sie in das Modell einbinden zu können. Da die Teilmodelle unabhängig voneinander erstellt wurden, ist der Austausch eines Wärmeerzeugers oder -verbrauchers möglich. Bei der Verwendung einer Fußbodenheizung muss allerdings darauf geachtet werden, dass diese Boden- bzw. Deckenfläche nicht doppelt in das Modell eingebunden wird.

Reale Gebäude haben mehr als einen Raum mit verschiedenen Funktionen. Daher müsste die Simulation unterschiedlicher Raumlufttemperaturen $\vartheta_{L,i}$ in verschiedenen Räumen

ermöglicht werden. Hierfür könnte für die Innenwandmodellierung der gleiche Ansatz wie für die Außenwand verwendet werden.

Bei der Modellierung des Thermostatventils wurde idealisiert von einer Hysterese-freien Kennlinie ausgegangen. Bei einer Weiterentwicklung könnte dies um eine Hysterese erweitert werden. Elektronisch gesteuerte Heizkörperventile, die in eine Gebäudeautomatisierungsanlage eingebunden sind, können jedoch vorerst auch mit der hier verwendeten Modellierung beschrieben werden, da sich die grundsätzliche Funktionsweise von der eines Thermostatventils kaum unterscheidet.

Die Umgebung des Gebäudes wurde nur über die Außentemperatur modelliert. Hierfür wurden zwar reale Werte verwendet, es gibt aber weitere Möglichkeiten, um näher an die Realität zu gelangen. Denkbar wäre die Verwendung von Wetterdaten aus verschiedenen Jahreszeiten, die Berücksichtigung von Wind auf die Wärmeübergangskoeffizienten zur Umgebung sowie die Betrachtung des täglichen Sonnenverlaufs und des resultierenden strahlungsbedingten Wärmeflusses in das Gebäude. Hierfür wäre auch die Lage des Gebäudes, also die Orientierung und eventuelle Schatten-werfende Nachbargebäude, zu beachten.

Die Decke des Raums wurde bisher wie eine Innenwand behandelt und der Boden als adiabatisch angenommen. Hierfür sollte eine genauere Modellierung erfolgen. Die in der Arbeit präsentierten Modelle für Wände lassen sich auch für Decken und Böden zwischen Räumen anwenden und müssten dafür angepasst im Programm implementiert werden. Hierfür müssten die Materialwerte und Dimensionen aus der IFC-Datei extrahiert und in den Arbeitsfluss des Programms eingegliedert werden. Die Modellierung des Bodens eines Raums im Erdgeschoss, oder eines Kellerraums, müsste allerdings neu durchgeführt werden. Bei Kellerräumen sind auch die Außenwände anders zu behandeln als bisher. Das Erdreich könnte in diesem Fall als große Speichermasse mit einer eigenen Bodentemperatur modelliert werden.

Für die Extraktion der BIM-Daten aus einer IFC-Datei wurde mit Abschnitt 4.1 eine gute Basis gebildet. Um diese auf verschiedene Dateien anwenden zu können müssen allerdings weitere Entwicklungen, auch im Hinblick auf die verschiedenen Beschreibungsmöglichkeiten verschiedener Eigenschaften, geschehen. Auch die Implementierung der Modellierung muss auf Programm-Seite angepasst werden, da momentan die Anzahl der Wände und deren Anzahl an Schichten festgelegt sind. Diese sollten nach Möglichkeit dynamisch gestaltet werden. Außerdem sind Einteilung und Zuordnung in verschiedene Räume vorzunehmen. Hierfür muss ein sinnvolles semantisches Programm-Modell erstellt werden, welches die Beziehungen der Räume zueinander und die Rolle der verschiedenen Wände beschreiben kann und bei der Berechnung des mathematischen Modells mitberücksichtigt.

Letztendlich ist bei allen Weiterentwicklungen des Modells abzuwägen, wie detailliert eine Modellierung sein muss, um ausreichend genaue Reglerparameter zu erhalten. Der Reglerentwurf selbst könnte um zusätzliche Simulationsszenarien zur Validierung erwei-

tert werden. Beispiele hierfür wären eine Nachtschaltung für die Raumluft Solltemperatur $\vartheta_{L,soll}$ oder verschiedene Räume mit verschiedenen Solltemperaturen.

Das erstellte Modell kann aber auch dafür verwendet werden, das Reglerentwurfsverfahren selbst zu verändern, um das Gebäude effizienter mit Wärme zu versorgen. Hierfür könnte zum Beispiel untersucht werden, wie weit die Vorlauf Solltemperatur $\vartheta_{V,soll}$ verringert werden kann, sodass trotzdem die gewollte Raumlufttemperatur $\vartheta_{L,soll}$ erreicht wird. Für diese und weitere Untersuchungen bietet das in dieser Arbeit erschaffene Modell eine gute Grundlage.

Literatur

- [1] Fawaz Alshehri, Paul Kenny und James O'Donnell. „Requirements for BIM-based Thermal Comfort Analysis“. In: *Proceedings of the 2017 Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design (SimAUD 2017)*. Society for Modeling und Simulation International (SCS), 2017. DOI: [10.22360/simaud.2017.simaud.002](https://doi.org/10.22360/simaud.2017.simaud.002).
- [2] baumarkteu.de. *Kermi therm-x2 Profil-Kompakt-Heizkörper 22 600/800 FK0220608*. Feb. 2022. URL: <https://www.baumarkteu.de/kermi-therm-x2-profil-kompakt-heizkorper-22-600-800-fk0220608-17851>.
- [3] André Borrmann u. a., Hrsg. *Building Information Modeling*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015. DOI: [10.1007/978-3-658-05606-3](https://doi.org/10.1007/978-3-658-05606-3).
- [4] Bundesrepublik Deutschland. *Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden*. Aug. 2020.
- [5] de.wikipedia.org. *Wikipedia-Artikel: Gipswandbauplatte*. März 2022. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Gipswandbauplatte>.
- [6] Deutscher Wetterdienst. *Climate Data Center*. Juli 2021. URL: <https://cdc.dwd.de/portal/>.
- [7] Deutsches Institut für Normung. *Anwendung von Bauprodukten in Bauwerken - Teil 403: Regeln für die Verwendung von Mauersteinen aus Beton (mit dichten und porigen Zuschlägen) nach DIN EN 771-3:2015-11*. Nov. 2019. DOI: [10.31030/3089328](https://doi.org/10.31030/3089328).
- [8] Deutsches Institut für Normung. *Baustoffe und Bauprodukte - Wärme- und feuchte-technische Eigenschaften - Tabellierte Bemessungswerte und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte (ISO 10456:2007 + Cor. 1:2009); Deutsche Fassung EN ISO 10456:2007 + AC:2009*. Mai 2010. DOI: <https://dx.doi.org/10.31030/1571277>.
- [9] Deutsches Institut für Normung. *Energetische Bewertung von Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast - Teil 1: Raumheizlast, Modul M3-3; Deutsche Fassung EN 12831-1:2017*. Sep. 2017. DOI: [10.31030/2571775](https://doi.org/10.31030/2571775).
- [10] Deutsches Institut für Normung. *Gips-Wandbauplatten - Begriffe, Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 12859:2011*. Mai 2011. DOI: <https://dx.doi.org/10.31030/1748709>.
- [11] Deutsches Institut für Normung. *Verfahren zur Berechnung der Raumheizlast - Teil 1: Nationale Ergänzungen zur DIN EN 12831-1, mit CD-ROM*. Apr. 2020.

- [12] EnEff-BIM Konsortium. *EnEff-BIM*. Nov. 2016. URL: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/eneff-bim.html>.
- [13] EnEff-BIM Konsortium. *EnEff-BIM use cases*. Okt. 2016. URL: https://github.com/EnEff-BIM/EnEffBIM_UseCases.
- [14] Horst Esdorn, Hrsg. *Raumklimatechnik*. Springer Berlin Heidelberg, 1994. DOI: [10.1007/978-3-540-68938-6](https://doi.org/10.1007/978-3-540-68938-6).
- [15] Gebr. Geraedts & Co. GmbH. *Datenblatt Geka-Therm Leichtbetonsteine nach DIN 771-3 einschl. DIN 18151-100, Artikel Nr. 140*. Feb. 2022. URL: <http://www.betonwerk-geraedts.de/unternehmen/downloads/category/9-datenblaetter-geka-therm-leichtbetonsteine?download=40:geka-therm-24-16-df-hbl4-0-9-n-f-art-nr-140-pdf>.
- [16] ifcopenshell.org. *IfcOpenShell*. Feb. 2022. URL: <http://ifcopenshell.org/python>.
- [17] ifcopenshell.org. *IfcOpenShell GitHub Repository*. Feb. 2022. URL: <https://github.com/IfcOpenShell/IfcOpenShell>.
- [18] Claus Ihle, Rolf Bader und Manfred Golla. *Tabellenbuch Sanitär, Heizung, Klima, Lüftung Anlagenmechanik SHK, Ausbildung und Praxis : Netzmeister/-monteure*. Köln: Bildungsverlag EINS, 2016. ISBN: 9783441921622.
- [19] International Organization for Standardization. *Industry Foundation Classes (IFC) für den Datenaustausch in der Bauwirtschaft und im Anlagenmanagement - Teil 1: Datenschema (ISO 16739-1:2018); Englische Fassung EN ISO 16739-1:2020, nur auf CD-ROM*. Nov. 2018.
- [20] Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Automation und angewandte Informatik. *FZKViewer*. v6.3. Dez. 2021. URL: <https://www.iai.kit.edu/1302.php>.
- [21] Nils Leimbach. *Begleitendes Repository zur Studienarbeit: Semantikbasierte Entwurfsautomatisierung gebäudetechnischer Anlagen*. März 2022. URL: [Semantikbasierte%20Entwurfsautomatisierunggeb%C3%A4udetechnischer%20Anlagen](https://github.com/semantikbasierte/20Entwurfsautomatisierunggeb%C3%A4udetechnischer%20Anlagen).
- [22] Anton Von Maas. „Wärmebrücken“. In: *Lehrbuch der Bauphysik*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Dez. 2012, S. 34–50. DOI: [10.1007/978-3-8348-2101-0_3](https://doi.org/10.1007/978-3-8348-2101-0_3).
- [23] Georg Pangalos. *Model-based Controller Design Methods for Heating Systems*. Berlin: Neopubli GmbH, 2016. ISBN: 9783741823060.
- [24] Hermann Recknagel, Eberhard Sprenger und Karl-Josef Albers. *Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik*. 78. Aufl. DIV Deutscher Industrieverlag GmbH, 2018.
- [25] Andreas Sporr, Gerhard Zucker und René Hofmann. „Automatically Creating HVAC Control Strategies Based on Building Information Modeling (BIM): Heat Provisioning and Distribution“. In: *Energies* 13.17 (Aug. 2020), S. 4403. DOI: [10.3390/en13174403](https://doi.org/10.3390/en13174403).

-
- [26] The International Association for the Properties of Water and Steam. „Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam“. In: (Aug. 2007). URL: <http://www.iapws.org/relguide/IF97-Rev.pdf>.
- [27] Eite Tiesinga u. a. *CODATA Internationally recommended 2018 values of the Fundamental Physical Constants*. v8.1. Okt. 2021. URL: <https://physics.nist.gov/cuu/Constants/index.html>.
- [28] Israel Urieli. *Specific Heat Capacities of Air*. März 2021. URL: https://www.ohio.edu/mechanical/thermo/property_tables/air/air_Cp_Cv.html.
- [29] Günter Warnecke. *Meteorologie und Umwelt*. Springer Berlin Heidelberg, März 1997. 372 S. ISBN: 3540615938. URL: https://www.ebook.de/de/product/1475215/guenter_warnecke_meteorologie_und_umwelt.html.
- [30] Herbert Windisch. *Thermodynamik*. de Gruyter Oldenbourg, Sep. 2017. ISBN: 3110533561. URL: https://www.ebook.de/de/product/29683832/herbert_windisch_thermodynamik.html.
- [31] Tianyi Zhao u. a. „BIM-based analysis of energy efficiency design of building thermal system and HVAC system based on GB50189-2015 in China“. In: *International Journal of Low-Carbon Technologies* 16.4 (Juli 2021), S. 1277–1289. DOI: [10.1093/ijlct/ctab051](https://doi.org/10.1093/ijlct/ctab051).