

Zur Wahl und Parametrisierung von Reglern für die Einzelraumregelung

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades
Doktorin der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
an der Fakultät Gestaltung
der Universität der Künste Berlin

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Kristin Majetta

März 2021

1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Nytsch-Geusen
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Martin Otter
Tag der Disputation: 13.09.2021

Universität der Künste Berlin
Fakultät Gestaltung, Institut für Architektur und Städtebau
Fachgebiet Versorgungsplanung und Versorgungstechnik (VPT)

Kurzzusammenfassung

Zum Erreichen der weltweiten Klimaziele leistet Deutschland seinen Beitrag durch die Definition und Umsetzung des Maßnahmenpaketes *Energiewende*. Ein wesentlicher Bestandteil ist die Energieeinsparung im Gebäudebereich. Der Großteil des Endenergieverbrauchs entfällt auf die Wärmeversorgung der Gebäude. Auf Raumebene legt deshalb das Gebäudeenergiegesetz in §63 die Regelung wassergeführter Heizvorrichtungen fest. Dazu ist die Wahl geeigneter Einzelraumregler notwendig. Diese ist oft nicht trivial und erfolgt meist zwischen zwei Extremen. Entweder es werden klassische Regler wie Zweipunkt- oder P/PI/PID-Regler genutzt, deren optimale Parameter aber selten bekannt sind und ihre Anwendung somit zu Energieverschwendung und Komfortverlust führen kann, oder es werden spezialisierte, an den konkreten Raum angepasste Regler mittels Modellbildung und Simulation bestimmt, deren Entwicklung entsprechend teuer ist. Dies macht es erforderlich, die Wahl geeigneter Einzelraumregler zu untersuchen.

Ziel dieser Arbeit ist es, einen einfachen Weg zur Wahl eines geeigneten Reglers einschließlich seiner Parametrisierung für die Temperaturregelung eines Einzelraumes zu finden. Dazu wird untersucht, ob Zusammenhänge aus komprimierenden Kenngrößen für Räume, Standorte und Nutzungen und optimal parametrisierten Reglern gefunden werden können, die zur vereinfachten Wahl nahezu optimaler Regler und deren Parameter nutzbar sind. Es wird eine empirische Methodik entwickelt, die auf einer umfangreichen Simulationsstudie zur Generierung eines großen Datensatzes von Beispielräumen und wenigen, für diese Räume günstigsten, optimal parametrisierten Reglern, basiert. Dazu werden Simulationsszenarien definiert und deren Raum-, Nutzungs- und Standortmodelle sowie Reglermodelle in der Modellierungssprache *Modelica* unter Zuhilfenahme der *BuildingSystems*-Bibliothek erstellt. Die Methodik ist anwendbar und muss nun auf weitere Regler übertragen werden.

Die Entwicklung der Methodik geschieht im Hinblick auf eine einfache, praxisorientierte Anwendung, bei der dann keine Simulationsmodelle der Räume oder Regler mehr notwendig sind. Es werden nur wenige Raum- und Wetterkenngrößen benötigt, die vom Gebäudeplaner, -betreiber oder -nutzer vorzugeben sind. Durch die gefundenen Zusammenhänge, die als Künstliche Neuronale Netze vorliegen, kann der günstigste Regler einschließlich seiner optimalen Parameter leicht bestimmt werden. Die Anwendbarkeit der Methodik wird an einem Testszenario für drei unterschiedliche Standorte und zwei Heizungstypen demonstriert.

Abstract

Germany contributes to reach the world wide climate goals by developing a series of actions called *Energiewende* (*energy transition*). An essential component is saving energy in the building sector. The majority of the final energy consumption is used to supply buildings with heat, so the German law *Gebäudeenergiegesetz* (*building energy law*) specifies the regulation of water-based heating systems in §63. Therefore the choice of suitable room controllers is necessary. This choice is often not trivial and usually takes place within two extremes. Classic controllers such as two-point or P/PI/PID controllers are used, the optimal parameters of which are seldom known and their use can thus lead to wasted energy and loss of comfort. Alternatively, specialized controllers adapted to the specific room using modelling and simulation are determined, the development of which is correspondingly expensive. Therefore it is necessary to investigate the choice of suitable single room controllers.

The goal of this thesis is to find an easy way to choose a suitable room controller and its parametrisation for the temperature control of single rooms. Therefore it is investigated whether correlations between compressing parameters for rooms, locations, room usage, and optimally parametrised controllers, can be found that simplify the selection of almost optimal controllers and their parameters. An empirical method is developed based on an extensive simulation study to generate a large data collection of example room models, each with three controller models optimized for the room model. Therefore, simulation scenarios are defined and their room, usage, and location models, as well as their controller models, are written in the modelling language *Modelica* and developed with the help of the *BuildingSystems* library. This method is usable and needs now to be adapted to other controllers.

The methodology is developed with a view to a simple, practice-oriented application in which simulation models of the rooms or controllers are no longer necessary. Only a few room and weather parameters are required, which must be specified by the building planner, operator, or user. The most favourable controller, including its optimal parameters, can easily be determined from the relationships found, which are available as Artificial Neural Networks. The applicability of the methodology is demonstrated using a test scenario for three different locations and two types of heating systems.

Danksagung

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Christoph Nytsch-Geusen, der meine Arbeit von Beginn an betreut und sich intensiv mit meinem Thema auseinander gesetzt hat. Von ihm erhielt ich immer wieder wertvolle Anregungen und er war mir ein wichtiger Diskussionspartner. Recht herzlich bedanke ich mich auch bei Herrn Prof. Dr. Martin Otter für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Ein ganz herzlicher Dank geht an meinen Mentor und Freund Dr. Christoph Clauß, der mich auf dem oft anstrengenden Weg der Promotion begleitet und mich stets durch seine fachliche Expertise unterstützt hat. Er wusste immer einen Rat und war mir so in schwierigen Phasen ein starker Halt.

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen, am Institutsteil Entwicklung Adaptiver Systeme entstanden. Meinen Kollegen danke ich für den fachlichen Austausch, das positive Arbeitsklima und für die anregenden Diskussionen während unserer Kaffeepausen. Bei der Fraunhofer-Gesellschaft bedanke ich mich für die Förderung meiner Forschungen im Rahmen des Talenta-Programms.

Ein weiterer Dank gebührt meinen Freunden und meiner Schwester, die mir angenehme Pausen von meiner Arbeit verschafft und meinen Blick auch auf andere Lebensbereiche gelenkt haben.

Auch bei meinen Eltern bedanke ich mich herzlich. Sie haben vor vielen Jahren den Grundstein für den erfolgreichen Abschluss meiner Arbeit gelegt und mich seitdem stets uneingeschränkt unterstützt und mir Rückhalt gegeben. Ohne die Betreuung meines Sohnes in besonders arbeitsintensiven Phasen wäre diese Arbeit nicht denkbar gewesen.

Nicht zuletzt gilt mein besonderer Dank meinem Verlobten Oliver, der mir meine beiden wundervollen Söhne geschenkt hat. Er stellte meine Entscheidung, diese Arbeit anzufertigen, nie in Frage und gab mir zusammen mit den Kindern Kraft und Ansporn.

Dresden, im September 2021

Kristin Majetta

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	vi
Tabellenverzeichnis	x
Symbolverzeichnis	xiii
Abkürzungsverzeichnis	xviii
1. Einführung und Zielsetzung	1
2. Stand in Forschung und Praxis	6
2.1. Einzelraumregelung	6
2.1.1. Einzelraumregelung in Wissenschaft und Forschung	6
2.1.2. Einzelraumregelung in der Praxis	10
2.2. Parametrisierung von Reglern	12
3. Methodisches Vorgehen	15
4. Modellbildung und Optimierung ausgewählter Räume	21
4.1. Modellierungssprache Modelica	21
4.2. BuildingSystems-Bibliothek	23
4.3. Simulationsszenarien	25
4.3.1. Raum- und Heizungsmodelle	26
4.3.2. Standortmodelle	36
4.3.3. Nutzungsmodelle	37
4.3.4. Beleuchtungsmodell	39
4.3.5. Modell zur Berechnung der Luftwechselrate	40
4.3.6. Reglermodelle	40
4.3.7. Festlegung der Simulationsszenarien	44
4.3.8. Test und Simulation der Szenarien	46
4.4. Optimierung der Reglerparameter	54
4.5. Erweiterung der Datenbasis	63
4.6. Sensitivitätsanalyse	66
5. Bestimmung und Berechnung von Kenngrößen und Gütemaßen	70
5.1. Kenngrößen zur Beschreibung der Raummodelle	70
5.2. Kenngrößen zur Beschreibung der Klimamodelle	75
5.3. Kenngrößen zur Beschreibung des Nutzerverhaltens	78
5.4. Gütemaß zur Bewertung der Reglereignung	78
6. Ermittlung und Bewertung von Beziehungen zwischen Räumen und Reglern	80
6.1. Erfassung der Beziehungen zwischen Räumen und Reglern	80
6.1.1. Regressionsanalysen	81

6.1.2.	Künstliche Neuronale Netze zur Erfassung der Zusammenhänge zwischen Reglern und Räumen	89
6.1.2.1.	Ablauf der Untersuchungen	90
6.1.2.2.	KNN zur Erfassung der Zusammenhänge zwischen Räumen dem Zweipunktreglermodell	91
6.1.2.3.	KNN zur Erfassung der Zusammenhänge zwischen Räumen und dem P- sowie vs-Reglermodell	94
6.1.2.4.	Untersuchungen für quartalsweise Wetterabschnitte	95
6.2.	Exemplarische Anwendung der Zusammenhänge	97
6.3.	Praktischer Einsatz der Zusammenhänge	107
7.	Zusammenfassung und Ausblick	111
7.1.	Zusammenfassung der Arbeit	111
7.2.	Ausblick	113
Anhang		
A.	Parametrisierung der Raummodelle	132
B.	Funktionsweise und Anwendung des vs-Reglers	140
C.	Beschreibung der Simulationsszenarien	143
D.	Heizenergieverbrauch und Komfortverletzung	150
E.	Optimierung mit GenOpt	153
F.	Variantsimulation und Optimierung mit Gridworker	158
G.	Durchführung einer Fouriertransformation mittels Dymola	161
H.	Auswahl von Analysemethoden	164
H.1.	Regressionsanalyse zur Ermittlung von Beziehungen zwischen Räumen und Reglern	167
H.2.	Künstliche Neuronale Netze zur Ermittlung von Beziehungen zwischen Räumen und Reglern	175
I.	Ablauf der Untersuchungen zur Bestimmung der KNN	178
J.	Vergleich von Ergebnissen am Standort Helsinki unter Verwendung des P-Reglers	183
K.	Ergebnisse der Anwendung der Zusammenhänge für das Testszenario für szenarienweise gebildete Wetterkenngrößen	187
L.	Praktische Anwendung der KNN zur Ermittlung des besten Reglers und seiner optimalen Parameter - Beispielimplementierung	190

Abbildungsverzeichnis

1.1. Ziele der Energiewende in Deutschland (Bildquelle: [Zie20])	1
1.2. Ziele der Energieeffizienzstrategie Gebäude (Bildquelle: eigene Darstellung nach [BMW15a])	2
1.3. Schwierigkeit bei der Reglerauswahl	4
2.1. Klassifikation von Regelungsalgorithmen nach [AJS14]	7
3.1. Anlegen der Datenbasis	17
3.2. Bestimmung des Zusammenhangs Z zwischen Kenngrößen und Gütemaßen und Reglerparametern	19
3.3. Anwendung des Zusammenhangs Z zur Wahl eines passenden Reglers für einen neuen Raum	20
4.1. Modelle der <i>BuildingSystems</i> -Bibliothek	23
4.2. Teilmodelle eines Simulationsszenarios	25
4.3. Grafische Repräsentation des Gartenhauses (Quelle: Fraunhofer IIS EAS)	29
4.4. Büroraum (Quelle: eigene Fotografie)	31
4.5. Konferenzraum (Quelle: Fraunhofer IIS/EAS)	32
4.6. Klassenraum [Lü11]	33
4.7. Übersicht der Klimadatensätze der <i>BuildingSystems</i> -Bibliothek	36
4.8. Zieltemperatur- und Belegungssignal aus Informationen des Textfiles berechnet	39
4.9. Raumtemperatur T_{Raum} geregelt durch vs-Regler und Zieltemperatur T_{Ziel} (oben) sowie zugehörige An- und Abschaltzeitpunkte des Heizungsmodells (unten), abgewandelt nach [MCH ⁺ 15a]	43
4.10. Zusammensetzung der Szenarien	45
4.11. Operative Raumtemperatur und Zieltemperatur des Büroraummodells im Szenario Arbeitsphase am Standort Chemnitz (bei abgeschalteter Heizung und Regelung)	47
4.12. Operative Raumtemperatur T_{operativ} für den Büroraum im Szenario Arbeitsphase mit Zweipunktregler (Parameter $T_{\text{tol}} = 2$) am Standort Chemnitz	49
4.13. T_{cold} für den Büroraum im Szenario Arbeitsphase mit Zweipunktregler (Parameter $T_{\text{tol}} = 2$) am Standort Chemnitz	50
4.14. Operative Raumtemperatur T_{operativ} für das Büroraummodell im Szenario Arbeitsphase mit vs-Regler (Parameter $Opt_{p1} = 1$ und $Opt_{p2} = 1$) am Standort Chemnitz	51
4.15. Vergleich der operativen Raumtemperatur für das Szenario Arbeitsphase (Werte der Reglerparameter sind Tabelle 4.3 zu entnehmen)	52

4.16. Beispielhafte Signalverläufe für die Zieltemperatur und die operative Raumtemperatur eines Raummodells (oben) und T_{cold} (unten)	55
4.17. Vergleich der operativen Raumtemperaturen für das Szenario Arbeitsphase für optimierte Reglerparameter	60
4.18. Operative Raumtemperatur, die sich bei Anwendung des optimal parametrisierten Zweipunktreglers im Szenario Arbeitsphase einstellt; Zieltemperatur	61
4.19. Operative Raumtemperatur, die sich bei Anwendung des optimal parametrisierten vs-Reglers im Szenario Unterricht einstellt; Zieltemperatur	62
4.20. Zusammensetzung der erweiterten Datenbasis	65
4.21. Schritte der Optimierung der Reglerparameter	66
4.22. Empfindlichkeit 1. Ordnung der Systemgröße $\xi(t, P)$ bezüglich des Parameters P an der Stelle P_{nom}	67
4.23. Empfindlichkeit 1. Ordnung von ZF bzgl. T_{tol} in Abhängigkeit von der Zeit t	68
4.24. Änderung von ZF bei Subtraktion von 0,2 von T_{tol}	68
5.1. Durch Parametervariation entstandene Raummodelle, beschrieben durch ihre Raumparameter γ und τ	75
5.2. Regelkreis, eigene Darstellung nach [Lun16]	78
6.1. Ermittlung der Beziehungen zwischen Räumen und Reglern	80
6.2. PSPP-Ausgabe der Regressionsanalyse für den Zweipunktregler zur Bestimmung von T_{tol}	82
6.3. PSPP-Ausgabe der Regressionsanalyse für den Zweipunktregler zur Bestimmung von ZF	83
6.4. PSPP-Ausgabe der Regressionsanalyse für den Wert des Reglerparameters T_{tol} des Zweipunktreglers	85
6.5. Streudiagramm der standardisierten Residuen	86
6.6. Streudiagramm der standardisierten Residuen für den Reglerparameter k des p-Reglers	88
6.7. Streudiagramm der standardisierten Residuen für den Reglerparameter Opt_{p1} des vs-Reglers	89
6.8. Vergleich der optimalen Werte (blaue Kreise) und der durch das KNN bestimmten Werte (grüne Dreiecke) für den Parameter \hat{T}_{tol}	93
6.9. Gütemaße ZF des Zweipunktreglers; a) - original, b) - logarithmiert	94
6.10. Ersetzen der szenarienweise gebildeten Wetterkenngrößen durch quartalsweise gebildete	96
6.11. Exemplarische Anwendung der Zusammenhänge Z	97
6.12. Zieltemperatur im Testszenario	98
6.13. Operative Raumtemperatur und Zieltemperatur im Testszenario am Standort Chemnitz; Reglerparameter $k = 890$ mittels KNN für Zeitraum b bestimmt	104
6.14. Operative Raumtemperatur und Zieltemperatur im Zeitraum b am Standort Berlin, Heizungstyp Radiatorheizung; Reglerparameter $k = 861$ mittels KNN bestimmt	105

6.15. Operative Raumtemperatur für $\widehat{T}_{\text{tot}} = 0,51$ und $T_{\text{tot}} = 0,56$ sowie Zieltemperatur im Zeitraum b am Standort Helsinki	106
6.16. Operative Raumtemperatur und Zieltemperatur im Zeitraum b am Standort Berlin, Heizungstyp Fußbodenheizung; Reglerparameter $\widehat{Opt}_{p1} = 1,17$, $\widehat{Opt}_{p2} = 742$ mittels KNN bestimmt	107
6.17. Praktische Anwendung der KNN im Überblick	108
6.18. Exemplarische Parametrisierung des Modells <code>Raumdaten.mo</code>	109
6.19. Ablauf zum praktischen Einsatz der Zusammenhänge	110
7.1. Reglereignung des vs-Reglers in Abhängigkeit der Reglerparameter Opt_{p1} und Opt_{p2}	116
B.1. Ablesen der Größen g_E und a_0	142
C.1. Nutzungsprofil des Szenarios Party	143
C.2. Nutzungsprofil des Szenarios Winter	144
C.3. Nutzungsprofil des Szenarios Arbeitsphase	145
C.4. Nutzungsprofil des Szenarios Herbsturlaub	146
C.5. Nutzungsprofil des Szenarios Besprechungen	147
C.6. Luftwechselrate im Szenario Besprechungen	147
C.7. Nutzungsprofil des Szenarios Workshop	148
C.8. Nutzungsprofil des Szenarios Unterricht	148
C.9. Nutzungsprofil des Szenarios Ferien	149
E.1. Schnittstelle zwischen GenOpt und Simulationsprogramm (Quelle: [Wet16a])	153
F.1. Architektur der GridWorker-Software (Quelle: Bild 2 aus [Sch11])	159
G.1. Temperatur der Außenluft am Standort Chemnitz im Szenario Party	161
G.2. Navigation zum Menü zur Durchführung der FFT	162
G.3. Mittelwert der Außenlufttemperatur am Standort Chemnitz im Szenario Party	163
G.4. Tagesamplitude der Außenlufttemperatur am Standort Chemnitz im Szenario Party	163
H.1. Zerlegung der Gesamtstreuung (eigene Darstellung nach [BEPW15], Seite 83)	170
H.2. Schematische Darstellung eines KNN	176
J.1. Operative Raumtemperaturen und Zieltemperatur im Testszenario am Standort Helsinki für Zeitraum a; Reglerparameter des p-Reglers $k = 296$ durch Optimierung bestimmt, Reglerparameter des p-Reglers $k = 553$ mittels KNN bestimmt	183
J.2. Zielfunktionen im Testszenario am Standort Helsinki für Zeitraum a; Reglerparameter des p-Reglers $k = 296$ durch Optimierung bestimmt, Reglerparameter des p-Reglers $k = 553$ mittels KNN bestimmt	184
J.3. Signale „zu kalt“ im Testszenario am Standort Helsinki für Zeitraum a; Reglerparameter des p-Reglers $k = 296$ durch Optimierung bestimmt, Reglerparameter des p-Reglers $k = 553$ mittels KNN bestimmt	184

J.4.	Operative Raumtemperaturen und Zieltemperatur im Testszenario am Standort Helsinki für Zeitraum b; Reglerparameter des p-Reglers $k = 296$ durch Optimierung bestimmt, Reglerparameter des p-Reglers $k = 885$ mittels KNN bestimmt	185
J.5.	Zielfunktionen im Testszenario am Standort Helsinki für Zeitraum b; Reglerparameter des p-Reglers $k = 296$ durch Optimierung bestimmt, Reglerparameter des p-Reglers $k = 885$ mittels KNN bestimmt	185
J.6.	Signale „zu kalt“ im Testszenario am Standort Helsinki für Zeitraum b; Reglerparameter des p-Reglers $k = 296$ durch Optimierung bestimmt, Reglerparameter des p-Reglers $k = 885$ mittels KNN bestimmt	186
K.1.	Operative Raumtemperatur und Zieltemperatur im Testszenario am Standort Chemnitz; Reglerparameter $k = 905$ mittels KNN für Zeitraum a bestimmt	188
K.2.	Operative Raumtemperatur und Zieltemperatur im Zeitraum a am Standort Berlin; Reglerparameter $k = 883$ mittels KNN bestimmt	188
K.3.	Operative Raumtemperatur für $\widehat{T}_{\text{tol}} = 0,37$ und $T_{\text{tol}} = 0,56$ sowie Zieltemperatur im Zeitraum a am Standort Helsinki	189
K.4.	Operative Raumtemperatur und Zieltemperatur im Zeitraum a am Standort Berlin, Heizungstyp Fußbodenheizung; Reglerparameter $\widehat{Opt}_{p1} = 1,15$, $\widehat{Opt}_{p2} = 614$ mittels KNN bestimmt	189

Tabellenverzeichnis

1.1. Endenergieverbrauch nach Anwendungsbereichen (Quelle: [BMW15a])	2
1.2. Energieeinsparung durch Anwendung eines Einzelraumreglers (Quelle: [ene16]) . .	3
4.1. Gegenüberstellung der Raummodelle	35
4.2. Ausschnitt aus einem Textfile mit Belegungsinformationen	38
4.3. Überblick über den Einfluss der unterschiedlichen Reglermodelle auf den Heizenergieverbrauch und die Komfortverletzungsgrößen T_{warm} und T_{cold} im Szenario Arbeitsphase am Standort Chemnitz	51
4.4. Zusammenfassung der Eignung der unoptimierten Regler hinsichtlich der Simulationsszenarien am Standort Chemnitz	53
4.5. Zusammenfassung der Eignung der nicht optimierten Regler hinsichtlich der Raummodelle am Standort Chemnitz	53
4.6. Zusammenfassung der Eignung der unoptimierten Regler hinsichtlich der Simulationsszenarien (Bewertungskriterium abgeschwächt) am Standort Chemnitz . .	53
4.7. Zusammenfassung der Eignung der nicht optimierten Regler hinsichtlich der Raummodelle (Bewertungskriterium abgeschwächt) am Standort Chemnitz	54
4.8. Optimale Reglerparameter und zugehöriger Wert der Zielfunktion	57
4.9. Optimale Verletzungszeiten und Heizenergieverbrauch	58
4.10. Zusammenfassung der Eignung der optimierten Regler hinsichtlich der Simulationsszenarien am Standort Chemnitz	60
4.11. Zusammenfassung der Eignung der optimierten Regler hinsichtlich der Raummodelle am Standort Chemnitz	61
4.12. Zusammenfassung der Eignung der optimierten Regler hinsichtlich der Simulationsszenarien (Bewertungskriterium abgeschwächt) am Standort Chemnitz	62
4.13. Zusammenfassung der Eignung der optimierten Regler hinsichtlich der Raummodelle (Bewertungskriterium abgeschwächt) am Standort Chemnitz	63
5.1. Raumkenngrößen (gerundet) der Demonstratorräume	74
5.2. Klimaparameter der Standorte Chemnitz, Moskau und Helsinki	76
5.3. Kenngrößen für das Szenario Party am Standort Chemnitz mit Zweipunktregler .	79
6.1. Ausgewählte Parameter der Klasse <code>MLPRegressor</code>	91
6.2. Parameterbereiche für die Rastersuche	92
6.3. Durch Rastersuche bestimmte Parameter für das KNN	92
6.4. Zusammenfassung der Bestimmtheitsmaße	95
6.5. Zusammenfassung der Bestimmtheitsmaße für quartalsweise Wetterabschnitte . .	96

6.6. Klimaparameter ($\bar{\vartheta}_a, \Delta\vartheta_a, \bar{I}, \Delta I$) der Standorte Chemnitz, Helsinki und Berlin für die Testszenarien	99
6.7. Optimale Reglerparameter für das Testszenario	99
6.8. Aus KNN ermittelte Werte der Reglergüte für die Testszenarien im Zeitraum a .	101
6.9. Aus KNN ermittelte Werte der Reglergüte für die Testszenarien im Zeitraum b .	101
6.10. Optimale Werte der Reglergüte für die Testszenarien im Zeitraum a	102
6.11. Optimale (ZF) und durch die KNN ermittelte (\widehat{ZF}) Werte für die Reglergüte für Zeitraum a	102
6.12. Optimale (ZF) und durch die KNN ermittelte (\widehat{ZF}) Werte für die Reglergüte für Zeitraum b	102
6.13. Optimale (T_{tol}) und mittels KNN berechnete (\widehat{T}_{tol}) Reglerparameter für Zeitraum a	103
6.14. Optimale (T_{tol}) und mittels KNN berechnete (\widehat{T}_{tol}) Reglerparameter für Zeitraum b	103
6.15. Angabe der notwendigen Kenngrößen	109
7.1. Zusammenfassung der Eignung der optimierten Regler hinsichtlich der Raummodelle	114
7.2. Zusammenfassung der Eignung der optimierten Regler hinsichtlich der Raummodelle (Bewertungskriterium abgeschwächt)	114
A.1. Materialien der Begrenzungsflächen des Gartenhausmodells	132
A.2. Parameter der Fenster des Gartenhausmodells	132
A.3. Parameter des Modells Gartenhaus	133
A.4. Materialien der Begrenzungsflächen des Büromodells	133
A.5. Materialien der Schichten, aus denen der Fußboden des Büromodells aufgebaut ist	134
A.6. Parameter der Fenster des Büroraummodells	134
A.7. Parameter des Büroraummodells	135
A.8. Parameter des Modelica Records <code>pipe</code> des Modells <code>SingleCircuitSlab</code>	135
A.9. Parameter des Modelica Records <code>Layers</code>	136
A.10. Materialien der Begrenzungsflächen	136
A.11. Parameter der Fenster des Konferenzraummodells	136
A.12. Parameter des Modells Konferenzraum	137
A.13. Materialien der Begrenzungsflächen	138
A.14. Parameter der Fenster des Klassenraummodells	138
A.15. Parameter des Modells Klassenraum	139
C.1. Übersicht über Simulationsszenarien	143
D.1. Szenario Party	150
D.2. Szenario Winter	150
D.3. Szenario Herbsturlaub	151
D.4. Szenario Besprechungen	151
D.5. Szenario Workshop	151
D.6. Szenario Unterricht	151
D.7. Szenario Ferien	152

F.1. Ergebnisdatei einer Optimierung mit GridWorker	160
H.1. Skalenniveaus (Quelle [BEPW15], Seite 11)	164
H.2. Struktur-prüfende Verfahren	166
I.1. Ausgewählte Parameter der Klassen MLPRegression	180

Symbolverzeichnis

Lateinische Symbole

Symbol	Einheit	Bezeichnung
A_a	m^2	Gesamtaußenoberfläche eines Raumes
A_G	m^2	Grundfläche eines Raumes
$A_{opak\ i}$	m^2	Fläche des opaken Anteils i an der Außenfläche eines Raumes
$A_{transp\ i}$	m^2	Fläche des transparenten Anteils i an der Außenfläche eines Raumes
a_0	$\frac{K}{s}$	Anstieg der Raumtemperatur zum Zeitpunkt $t=0$
$a(net_j)$		Aktivierungsgrad eines Neurons eines KNN
$Anz_Personen$		Anzahl der Personen der aktuellen Belegungsphase
B		Teilmenge des Gesamtdatensatzes
$Belegung$		Zweiwertige Größe zur Angabe ob ein Raum belegt oder unbelegt ist
b_0		konstantes Glied der Regressionsfunktion
b_j		Regressionskoeffizienten der Regressionsfunktion
$b_{fenster\ i}$	m	Breite einer transparenten Fläche innerhalb einer Raumbegrenzungsfläche
$b_{wand\ i}$	m	Breite einer Raumbegrenzungsfläche
C	$\frac{J}{m^2K}$	Wärmekapazität
C_i	$\frac{J}{m^2K}$	Wärmekapazität einer Schicht i
c	$\frac{J}{kgK}$	spezifische Wärmekapazität
c_i	$\frac{J}{kgK}$	spezifische Wärmekapazität einer Schicht i
c_{cover}		Bewölkungsgrad des Himmels
$(c \cdot \rho)_{air}$	$\frac{J}{K}$	volumetrische Speicherkapazität der Luft
$c_{schichten_wand\ i}$	$\frac{J}{kg \cdot K}$	spezifische Wärmekapazität der am Aufbau einer Raumbegrenzungsfläche beteiligten Schichten
$d(t)$		Störgröße
$df_{Regression}$		Freiheitsgrade der erklärten Streuung im Rahmen der multiplen Regressionsanalyse
$df_{Residual}$		Freiheitsgrade der nicht erklärten Streuung im Rahmen der multiplen Regressionsanalyse
$d_{wand\ i}$	m	Dicke Raumbegrenzungsfläche i

Symbol	Einheit	Bezeichnung
d_i	m	Dicke einer Schicht i
$d_{\text{schichten_wand } i}$	m	Dicke der am Aufbau der Raumbegrenzungsfläche beteiligten Schichten
G		Grad der Verschattung für das Fenstermodell im Modell der thermischen Zone
E_{heat}	Wh	Wärmeenergie
\bar{E}_m	lx	Wartungswert der Beleuchtungsstärke
e_k	kontextabhängig	Residuum
e_{k_s}	kontextabhängig	standardisiertes Residuum
F_{emp}		empirischer F-Wert
F_{theo}		theoretischer F-Wert
G		mittlere Strahlungsdurchlässigkeit
g		Energiedurchlassgrad von transparenten Bauteilen
g_E	K	stationärer Endtemperaturwert
g_i		Energiedurchlassgrad einer transparenten Teilfläche i
H		Typ der Heizung (Radiator- oder Flächenheizung)
H_0		Nullhypothese
$Heating$		Heizsignal
$h(t)$		Exponentialfunktion, die den Aufheiz- und Abkühlvorgang eines Raumes beschreibt
$h_{\text{fenster } i}$	m	Höhe einer transparenten Fläche innerhalb einer Raumbegrenzungsfläche
$h_{\text{wand } i}$	m	Höhe einer Raumbegrenzungsfläche
I_{dir}	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	direkte solare Strahlung
\bar{I}_{dir}	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	Mittelwert der direkten solaren Strahlung
ΔI_{dir}	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	Tagesamplitude der direkten solaren Strahlung
J		Zahl der unabhängigen Variablen im Rahmen der Regressionsanalyse
K	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$	thermischer Verlustfaktor eines Raumes
K		Zahl der Beobachtungen im Rahmen der Regressionsanalyse
k		Verstärkung des P-Reglers
\hat{k}		durch Regression oder KNN bestimmter Wert für die Verstärkung des P-Reglers
l, h, b	m	Raumlänge, -breite, -höhe
n	$\frac{1}{\text{h}}$	Luftwechselrate
n_{min}	$\frac{1}{\text{h}}$	Mindestluftwechselrate
n_{Pers}		durchschnittliche Anzahl der sich in einem Raum befindlichen Personen

Symbol	Einheit	Bezeichnung
$n_{\text{schichten_wand } i}$		Anzahl der Materialschichten aus denen eine Raumbegrenzungsfläche i aufgebaut ist
net_j		Netzinput eines KNN
$nextDuration$	s	Dauer der kommenden Belegungsphase
Opt_{p1}, Opt_{p2} $\widehat{Opt}_{p1}, \widehat{Opt}_{p2}$		Optimierungsparameter des vs-Reglers durch Regression oder KNN bestimmte Werte für die Optimierungsparameter des vs-Reglers
P		Parameter der Sensitivitätsanalyse
P_{nom}		Nominalwert des Parameters P
P_{ges}	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	Gesamtleistung
P_{LED}	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	Leistung einer LED Lampe
p		p-Wert der F-Statistik
p_{ground}	Pa	Luftdruck am Boden
Q_{flow}	W	Wärmemenge
R^2		Bestimmtheitsmaß
R^2_{korr}		korrigiertes Bestimmtheitsmaß
R^2_{Test}		Bestimmtheitsmaß für einen Testdatensatz
R^2_{Training}		Bestimmtheitsmaß für einen Trainingsdatensatz
s_0	K	Startwert der Raumtemperatur
T_A	K	Temperatur der Außenluft
T_H	K	Temperatur des Himmels
$T_{\text{mittelOberfl}}$	K	mittlere Oberflächentemperatur
$T_N(t)$	K	Temperatur der Nachbarräume
T_{operativ}	K	operative Raumtemperatur
$T_{\text{Raum}}(t_{\text{start}})$	K	Raumlufttemperatur zum Zeitpunkt t_{start}
T_{Raum}	K	Raumlufttemperatur
$T_S(t)$	K	Vorlauftemperatur der Heizung
T_{tol}		Reglerparameter des Zweipunktreglers
\widehat{T}_{tol}		durch Regression oder KNN bestimmter Reglerparameter des Zweipunktreglers
$T_{\text{warm}}, T_{\text{cold}}$	Ks	Strafterme bei Verletzung des Komfortbereichs
T_{Ziel}	K	Zieltemperatur
$T_{\text{Ziel belegt}}$	K	Zieltemperatur eines belegten Raumes
$T_{\text{Ziel unbelegt}}$	K	Zieltemperatur eines unbelegten Raumes
t	s	Zeitpunkt
t_{emp}		empirischer t-Wert
$tNextOccEnd$	s	Endzeitpunkt der kommenden Belegungsphase
$tNextOccStart$	s	Startzeitpunkt der kommenden Belegungsphase
$tOccEnd$	s	Endzeitpunkt der aktuellen Belegungsphase
$tOccStart$	s	Startzeitpunkt der aktuellen Belegungsphase

Symbol	Einheit	Bezeichnung
t_{off}	K	Zeitpunkt zum Abschalten der Heizung
t_{on}	K	Zeitpunkt zum Anschalten der Heizung
t_{theo}		theoretischer t-Wert
Δt_{Bel}	s	Dauer einer Belegungsphase
$\Delta t_{\text{off}}(t)$	s	Dauer des Abkühlvorgangs
$\Delta t_{\text{on}}(t)$	s	Dauer des Aufheizvorgangs
U	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$	Wärmedurchgangskoeffizient
$U_{\text{fenster } i}$	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2\cdot\text{K}}$	Wärmedurchgangskoeffizient einer transparenten Fläche i innerhalb einer Raumbegrenzungsfläche
$U_{\text{wand } i}$	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$	Wärmedurchgangskoeffizient einer Raumbegrenzungsfläche i
u_k		Störgröße im Rahmen der Regressionsanalyse
V_{Raum}	m^3	Raumvolumen
$\dot{V}_{\text{min P}}$	$\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$	minimaler Außenluftvolumenstrom je Person
v_{wind}	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$	Windgeschwindigkeit
$w(t)$		Führungsgröße
w_{ij}		Kantengewicht eines KNN
X_1, X_2, \dots, X_n		unabhängige Variablen im Rahmen der Regressionsanalyse
x_A	$\frac{\text{kg}}{\text{kg}}$	absolute Feuchte der Außenluft
$x_{j,k}$		unabhängige Variable der Regressionsfunktion
$\bar{x}_{j,k}$		Mittelwert von $x_{j,k}$
Y		abhängige Variable im Rahmen der Regressionsanalyse
\hat{Y}		Schätzung der abhängigen Variablen Y
y_k		Beobachtungswerte der abhängigen Variablen Y für x_k
\bar{y}_k		Mittelwert von y_k
\hat{y}_k		ermittelter Schätzwert der abhängigen Variablen Y für x_k
$y(t)$		Regelgröße
Z		Zusammenhang zwischen Raum-, Nutzungs-, Standortmodell und optimal parametrisiertem Regler
ZF		Zielfunktion
\overline{ZF}		durch Regression oder KNN bestimmter Wert der Zielfunktion

Griechische Symbole

Symbol	Einheit	Bezeichnung
α_{wind}	$^{\circ}$	Windrichtung
$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_j$		Parameter des stochastischen Modells der Regressionsanalyse
γ	$\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$	Ankopplungsfaktor an das Klima
$\bar{\vartheta}_a$	K	Mittelwert der Außentemperatur
λ	$\frac{\text{W}}{\text{mK}}$	Wärmekapazität
λ_{geo}	$^{\circ}$	geografische Länge
Φ_v	lm	Lichtstrom
$\Phi_{\text{v LED}}$	lm	Lichtstrom einer LED Lampe
ϕ_{air}		relative Feuchte der Außenluft
ϕ_{geo}	$^{\circ}$	geografische Breite
ρ	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Dichte
$\rho_{\text{schichten_wand } i}$	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Dichte der am Aufbau einer Raumbegrenzungsfläche beteiligten Schichten
σ		Standardfehler
σ^2		Varianz
τ	s	Zeitkonstante des Raumes
Θ_j		Schwellwert für die Aktivierung eines Neurons
$\Delta\vartheta_a$	K	Tagesamplitude der Außenlufttemperatur
$\xi(t, P)$		Systemgröße, die in eine Taylorreihe entwickelt wird
$\tilde{\xi}(t, P)$		durch Taylorreihe angenäherte Systemgröße $\xi(t, P)$

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
Cov	Kovarianz
IIS EAS	Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS, Institutsteil Entwicklung Adaptiver Systeme EAS
EE	Erneuerbare Energie
EnEG	Energieeinspargesetz
enerMAT	Forschungsprojekt „Entwurfsverfahren für ganzheitliche Energiemanagementsysteme in Gebäuden“
EnEV	Energieeinsparverordnung
Erw	Erwartungswert
ESG	Energieeffizienzstrategie Gebäude
HLK	Heizung, Lüftung, Klima
HVAC	Heating, Ventilation, Air Conditioning
MLP	Multi-Layer-Perceptron
MPC	Modellprädiktive Regelung
MSL	Modelica Standard Library (Modelica-Standard-Bibliothek)
KNN	Künstliches Neuronales Netz
P-Regler	Proportional-Regler
PI-Regler	Proportional-Integral-Regler
PID-Regler	Proportional-Integral-Differential-Regler
PMV	Predicted-Mean-Vote
SSE	explained sum of squares (erklärte Streuung)
SSR	Sum of squares residuals (nicht erklärte Streuung)
SST	Total sum of squares (Gesamtstreuung)
TRNSYS	Transient System Simulation Tool
Var	Varianz
vs-Regler	vorausschauender Regler
VVS-Anlage	Variable-Volumenstrom-Anlage

1. Einführung und Zielsetzung

Das Ziel der Staatengemeinschaft ist es, die globale Erderwärmung auf unter 2 °C im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter zu begrenzen [kli19]. Die zentrale Maßnahme, die dafür ergriffen werden muss, ist die Senkung der Treibhausgasemission. So hat sich Deutschland zum Ziel gesetzt bis 2050, diese um 80 % bis 95 % verglichen zu 1990 zu reduzieren. Um dies zu erreichen, hat die Bundesregierung unter dem Begriff *Energiewende* ein Maßnahmenpaket ([Zie20]) beschlossen, was jeweils gegenüber 2008 die Steigerung des Anteils erneuerbarer Energien am Bruttoendenergieverbrauch auf 60 %, die Senkung des Stromverbrauchs auf 25 % und die Reduktion des Primärenergieverbrauchs um 50 % zum Ziel hat (Abbildung 1.1).

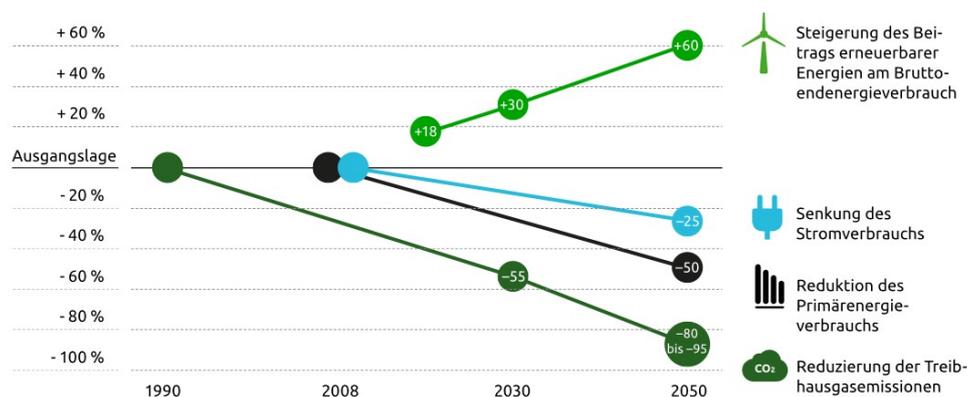


Abbildung 1.1. Ziele der Energiewende in Deutschland (Bildquelle: [Zie20])

Der größte Anteil am derzeitigen Endenergieverbrauch, (35 %) und an der Treibhausgasemission (ca. 33 %) entfallen auf den Gebäudebereich ([BMW15a]), der damit enorme Einsparpotentiale bietet. Um diese zu nutzen, verabschiedete die Bundesregierung die *Energieeffizienzstrategie Gebäude (ESG)* ([BMW15a]). Das entsprechende Strategiepapier für die Energiewende im Gebäudebereich erläutert, wie durch die Verbindung zwischen erneuerbaren Energien und Energieeffizienz ein nahezu klimaneutraler Gebäudebestand bis 2050 erreicht werden soll. Dies bedeutet, dass der Primärenergiebedarf durch den Einsatz erneuerbarer Energien und durch Energieeinsparung um 80 % im Jahr 2050 gegenüber 2008 gesenkt werden soll. Um dieses Ziel zu erreichen, muss also neben dem Ausbau der erneuerbaren Energieversorgung vor allem die Energieeffizienz der Gebäude gesteigert werden. Dazu ist eine Senkung des Stromverbrauchs und die Reduktion des Endenergieverbrauchs für Wärme erforderlich (Abbildung 1.2).

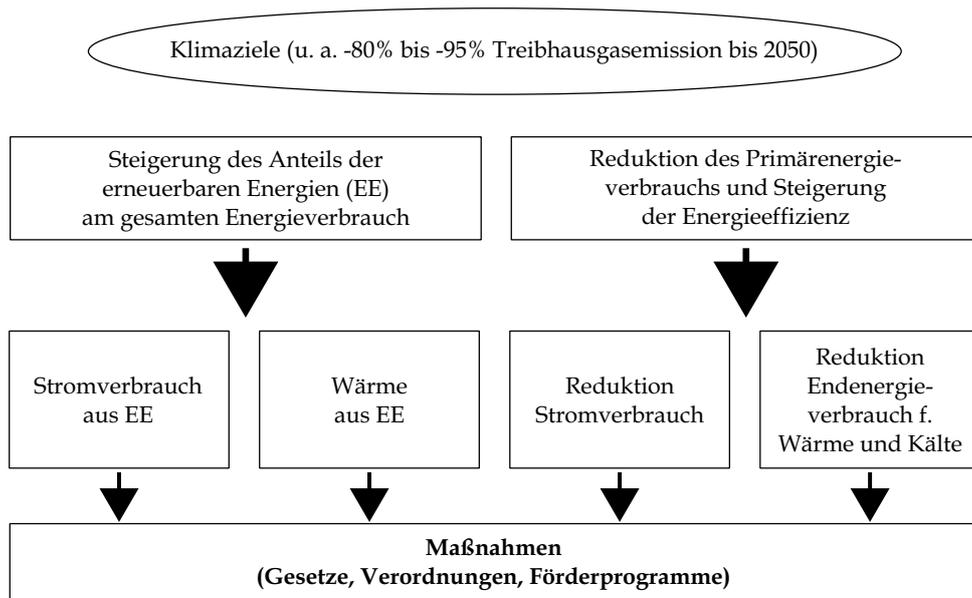


Abbildung 1.2. Ziele der Energieeffizienzstrategie Gebäude (Bildquelle: eigene Darstellung nach [BMW15a])

Eine Prognose ([BMW15a]) aus dem Jahr 2015 zeigt, wie hoch der Verbrauch an Endenergie in den einzelnen Anwendungen Raumwärme, Warmwasser, Kühlen/Lüften/Haustechnik und Beleuchtung im Jahr 2050 sein wird (Tabelle 1.1). Es ist deutlich zu erkennen, dass auf die Wärmeversorgung von Räumen der größte Teil des Energieverbrauchs entfällt.

Tabelle 1.1. Endenergieverbrauch nach Anwendungsbereichen (Quelle: [BMW15a])

Zielszenario Effizienz Anwendungen	Endenergieverbrauch in PJ				Veränderung ggü 2008 in %		
	2008	2020	2030	2050	2020	2030	2050
Raumwärme	2755	2346	1786	1002	-15	-35	-64
Warmwasser	375	371	354	311	-1	-6	-17
Kühlen/Lüften/Haustechnik	146	159	168	193	9	16	32
Beleuchtung	215	183	145	91	-15	-33	-58
Insgesamt	3491	3059	2453	1597	-12	-30	-54

Bereits jetzt ergreift Deutschland eine Reihe von Maßnahmen, um die Ziele der ESG zu erreichen. Durch Gesetze, Anreize, Informationen und Förderung der Forschung soll die Steigerung der Energieeffizienz und die Stärkung der erneuerbaren Energien erreicht werden. Ein zentrales Instrument bildet das Gebäudeenergiegesetz (GEG) vom 01.01.2020. Es legt die energetischen Anforderungen an beheizte oder klimatisierte Gebäude fest. Das GEG enthält Vorgaben zu Heizungs- und Klimatechnik und zum Wärmedämmstandard. Für Neubauten gibt das GEG festgelegte Anteile an erneuerbaren Energien vor, die das Gebäude zur Wärme- und/oder Kälteversorgung nutzen muss. Damit trägt das GEG nicht nur zur Reduktion des Energieverbrauchs von Gebäuden bei, sondern sorgt auch für ein behagliches Wohn- und Arbeitsumfeld. Für heizungstechnische Anlagen schreibt das GEG in §63 vor, dass „der Bauherr oder der Eigentümer dafür Sorge zu tragen“ hat, dass diese Anlagen, sollten sie Wasser als Wärmeträger nutzen, „mit einer selbsttätig wirkenden Einrichtung zur raumweisen Regelung der Raumtemperatur

ausgestattet ist“. Dass die Regelung von einzelnen Räumen wirksam ist, zeigt folgendes Beispiel aus dem Forschungsprojekt *enerMAT*, dessen Ziel es war, ein modellbasiertes Entwurfsverfahren für ganzheitliche Energiemanagementsysteme zu entwickeln ([BMW15b]). *enerMAT* wurde im Rahmen der Energiewende im Forschungsbereich *EnBop-Energetische Betriebsoptimierung* im Förderschwerpunkt *EnOB-Forschung für energieoptimiertes Bauen* durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert ([EnO15]). Im Rahmen des Projekts entstand ein Einzelraumregler für Räume mit Flächenheizung, der in einem Demonstrator in einer Reihe von Büroräumen eingesetzt wurde. Für den exemplarisch untersuchten Monat Januar 2014 konnte durch Anwendung des Reglers gegenüber dem Raumbetrieb ohne Regler eine Energieeinsparung von 5,7 % erreicht werden (Tabelle 1.2).

Tabelle 1.2. Energieeinsparung durch Anwendung eines Einzelraumreglers (Quelle: [ene16])

Gebäudezone	Name	Energieverbrauch in kWh ohne Raumregler	Energieverbrauch in kWh mit Raumregler	Einsparung in %	Einsparung in kWh
07	Sekretariat	98,15	92,48	5,78	5,67
10	Büros 07-10	490,97	468,27	4,62	22,70
12	Büros 12-15	403,78	375,81	6,93	27,97

Zur Regelung von Einzelräumen stehen eine Reihe unterschiedlicher Regler zur Verfügung, die sich in drei Kategorien einteilen lassen: klassische Regler, selbst adaptierende Regler sowie spezialisierte Regler. Die **klassischen Regler**, zu denen beispielsweise Zweipunkt- und P-, PI- und PID-Regler gehören, sind sehr weit verbreitet ([BWZ08], [JZUF98]), weil sie schnell und einfach installiert werden und für beliebige Räume ohne Kenntnis von Raumdetails verwendet werden können ([AJS14]). Sie können jedoch bei ungünstiger Parametrisierung ([UBRP16]) nicht immer den gewünschten Komfort liefern und führen in vielen Fällen sogar zu Energieverschwendung ([ene16]). Die Parametrisierung von klassischen Reglern, vor allem von P-, PI- und PID-Reglern, ist eine herausfordernde Aufgabe, die zeit- und kostenintensiv sein kann, da nicht selten ein Fachmann involviert ist ([BWZ08]). Oftmals wird ein Simulationsmodell des zu regelnden Raumes und des Reglers benötigt, um die Parameter vorteilhaft zu wählen. Eine andere Lösung der Problematik der Parametrisierung bieten **selbst adaptierende Regler**. Sie passen sich dem Raum und dem Nutzer an, in dem sie beispielsweise die typische Menge an solarer Einstrahlung in den Raum oder die Reaktion der Nutzer auf ein bestimmtes Raumklima lernen ([HL98]). Bei der Anwendung selbst adaptierender Regler zur Einzelraumregelung ergeben sich eine Reihe von Herausforderungen. So gilt es beispielsweise zu definieren, was für den Regler „guter“ Komfort bedeutet und wie mit unterschiedlichen Nutzeranforderungen umgegangen wird. Ebenso stellt sich die Frage, welche Informationen dem Regler zur Verfügung gestellt werden. Nutzer könnten es beispielsweise kritisch sehen, wenn deren persönliche Daten wie Anwesenheitszeiten oder Energieverbrauch durch Dritte eingesehen werden können ([Hau20]). Dies könnte die Anwendung einiger selbst adaptierender Regler einschränken. Es sollte in jedem Anwendungsfall geprüft werden, ob ein selbst lernender Regler möglicherweise für die vergleichsweise einfache Aufgabe der Raumregelung überdimensioniert ist. **Spezialisierte Regler** sind konkret auf einen zu regelnden Raum zugeschnitten und müssen genau für diesen entwickelt bzw. angepasst wer-

den. Dazu ist in nahezu allen Fällen ein Modell des Raumes sowie seiner technischen Anlagen, seines Standortes und seiner Nutzung notwendig. Ihre Entwicklung ist entsprechend teuer und ihre Anwendung am wenigsten weit verbreitet ([AJS14]). Sie liefern jedoch den gewünschten optimalen Komfort bei minimalem Energieverbrauch.

Neben der Vielzahl der Einzelraumregler (siehe Kapitel 2) ist auch die Vielfalt an Räumen enorm groß. Räume unterscheiden sich u.a. in ihrer Baukonstruktion, der Anzahl ihrer Fenster, ihrer Umgebung, ihrem Standort oder ihrer Nutzung. Betrachtet man die Fülle der Räume und Raumregler, so stellt sich die Frage, wie der passende Regler einschließlich seiner Parametrisierung für einen konkreten Raum gefunden kann (Abbildung 1.3).

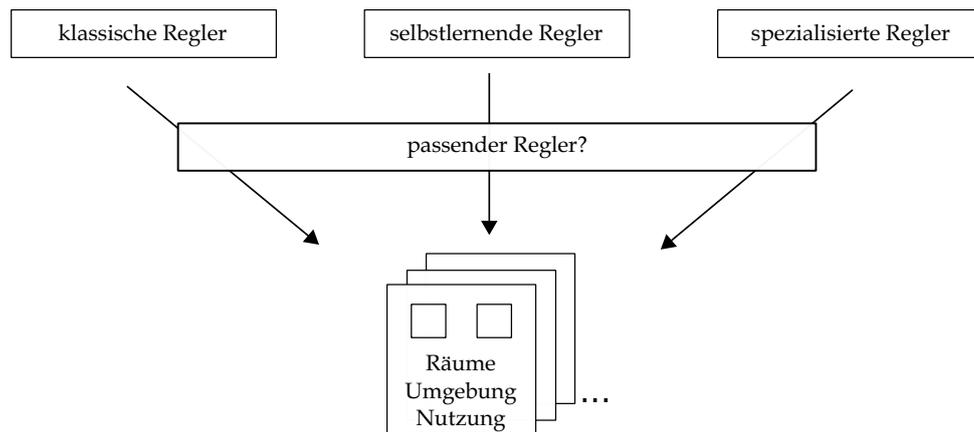


Abbildung 1.3. Schwierigkeit bei der Reglerauswahl

Einen passenden und korrekt parametrisierten Regler für einen konkreten Raum zu finden, ist aufwändig. Entweder wird der Regler mit Hilfe eines Simulationsmodells gewählt oder er wird durch Messungen im praktischen Einsatz im Raum parametrisiert. Das **Ziel** der vorliegenden Arbeit ist es, einen **einfachen** Weg zur Wahl eines geeigneten Reglers einschließlich seiner Parametrisierung zu finden. Dabei soll dieser Weg einfach in der Anwendung sein und letztendlich gut in die Abläufe der Bauprojektierung integriert werden können. Der Fokus liegt auf den klassischen Reglern. Spezialisierte und selbstadaptierende Regler werden nicht betrachtet.

Um diese Aufgabe zu lösen, sind verschiedene Herangehensweisen denkbar. Hier wird ein empirischer Ansatz verfolgt. Es wird eine große Anzahl an Räumen an unterschiedlichen Standorten und mit unterschiedlicher Nutzung analysiert und für diese die passenden Regler ermittelt. Anhand dieser Analyse wird ein Zusammenhang Z zwischen den Räumen und parametrisierten Reglern erforscht und versucht, ihn quantitativ zu erfassen, sodass aus der Charakterisierung von Raum, Standort und Nutzung sehr einfach der günstigste Regler und dessen Parameter ermittelt werden kann. Es ist zu prüfen, ob dieser Weg tragfähig ist und ob und wie er um weitere Reglertypen sowie auch Raumarten erweitert werden kann. Ein weiteres Ziel ist es, diesen Weg ohne die zeit- und kostenintensiven Schritte der Modellbildung und Simulation anwendbar zu machen.

Die Arbeit gliedert sich wie folgt. In Kapitel 2 werden Arbeiten zur Einzelraumreglung und zur Reglerparametrisierung in Forschung und Praxis dargestellt, die den Stand der Technik charakterisieren. In Kapitel 3 wird die oben angedeutete Methodik ausgearbeitet, die zur Lösung der Aufgabe zum Tragen kommt. Kapitel 4 beschreibt die erforderlichen Modellierungsarbeiten der Räume und Regler sowie die Anwendung von Optimierungsverfahren zur Bestimmung von Reglerparametern. Kapitel 5 stellt Kenngrößen und Gütemaße zur Charakterisierung von Räumen und Standorten und zur Bewertung von Raumreglern vor. Kapitel 6 beschreibt schließlich die Untersuchungen zur Erkennung und Bewertung von Zusammenhängen zwischen Räumen und Raumreglern sowie deren Parametern. Es werden zunächst geeignete Analysearten ausgewählt. Anschließend werden die Zusammenhänge bestimmt, deren Anwendung letztendlich die Wahl eines passenden Reglers für einen Raum ermöglicht. Schließlich wird die Eignung der Zusammenhänge exemplarisch nachgewiesen. Kapitel 7 fasst die Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf weitere Forschungsaufgaben und aus der Arbeit hervorgehende offene Fragen.

2. Stand in Forschung und Praxis

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über wichtige Meilensteine und aktuelle Entwicklungen in Forschung und Praxis. Dabei wird zum einen auf die Regelung einzelner Räume eingegangen, da diese im Rahmen der vorliegenden Arbeit mit passenden Raumreglern versehen werden sollen (Abschnitt 2.1). Zum anderen betrachtet Abschnitt 2.2 die Möglichkeiten zur Reglerparametrisierung genauer, da die Funktionstüchtigkeit der meisten Regler wesentlich von korrekt gewählten Parametern abhängt.

2.1. Einzelraumregelung

Durch eine Einzelraumregelung können bestimmte Parameter wie Raumtemperatur, Raumfeuchte, solare Einstrahlung und Luftqualität für einen einzelnen Raum individuell eingestellt werden. Die Regelung einzelner Räume ist keine neue Disziplin. Bereits Ende des 19./ Anfang des 20. Jahrhunderts wurden Patente angemeldet ([But93], [Eke95], [Jen39]), die verschiedene Apparate zur Temperaturregelung in Räumen beschreiben. Später wurden Regler zur Sicherstellung des gewünschten Raumklimas erfolgreich unter Zuhilfenahme mathematischer Methoden und mittels Modellierung entworfen und dank der Entwicklung leistungsfähiger Mikrocontroller auch als Programmcode zum Einsatz gebracht ([Tob79]). Aktuell liegt der Fokus der Forschung auf der modellprädiktiven Regelung, bei der der zukünftige Stellgrößenverlauf mittels eines Prozessmodells vorhergesagt wird ([PFH16]). In der Praxis wird die Regelung einzelner Räume durch das Gebäudeenergiegesetz vorgeschrieben (vgl. Kapitel 1).

2.1.1. Einzelraumregelung in Wissenschaft und Forschung

Es existiert eine große Vielfalt an wissenschaftlichen Veröffentlichungen auf dem Gebiet der Einzelraumregelung. Der überwiegende Teil erforscht die Regelung von sog. HLK-Systemen (Heizung, Lüftung, Klimatechnik, engl. HVAC: Heating, Ventilation, Air Conditioning). Ergänzend dazu werden weitere Systeme wie Verschattungs- und Beleuchtungseinrichtungen in die Regelung einbezogen. Abbildung 2.1 stellt eine Klassifikation verschiedener Raumregler für die Regelung von HLK-Anlagen nach [AJS14] dar.

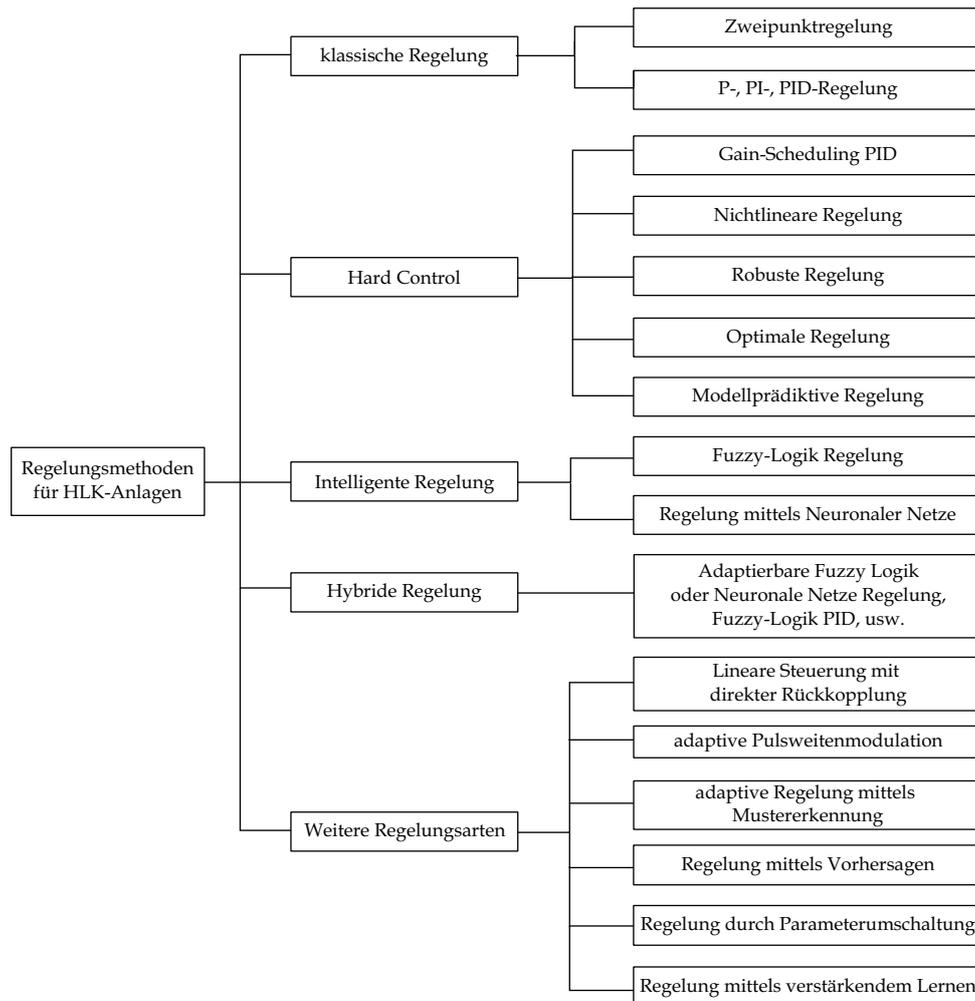


Abbildung 2.1. Klassifikation von Regelungsalgorithmen nach [AJS14]

Aufgrund ihrer einfachen Nutzbarkeit, ihrer geringen Kosten und ihrer in jahrelanger Anwendung erprobten Funktionstüchtigkeit, sind die *klassischen Regler*, d.h. Zweipunktregler, P-, PI- und PID-Regler, für die Einzelraumregelung am weitesten verbreitet ([AJS14]). In [YYKK11] beispielsweise werden die Temperatur und die Feuchte eines Einzelraumes geregelt, indem mittels eines PID-Reglers entsprechende Stellsignale an die Zuluftklappe und den Luftbefeuchter eines Lüftungsgerätes gegeben werden. Auch in [FCS⁺19] wird die Raumtemperatur mittels eines PID-Reglers gehalten, dessen Parameter mittels bayesscher Optimierung ([BKS10]) ohne Nutzereingriff festgelegt werden. In [Lin11] wird ein digitaler PID-Raumtemperaturregler entwickelt, der gemeinsam mit Software zur Temperaturmessung und zur Signalverarbeitung, auf einem Mikrocontroller implementiert und mittels LabVIEW getestet wird. Auch in [RSC14] wird ein PID-Regler zur Regelung der Raumtemperatur durch eine Klimaanlage auf einem Mikrocontroller implementiert. Im US Patent [HTS07] wird u.a. die Regelung der Raumtemperatur mittels einer VVS-Anlage (Variable-Volumenstrom-Anlage) durch einen PID-Regler beschrieben. In [Zha11] beschreiben die Autoren einen PID-Regler, der mittels eines Particle-Schwarm-Optimierungsalgorithmus’ parametrisiert wird. Der betrachtete Raum wird mit einer geregelten Klimaanlage temperiert. Die Parametrisierung des Reglers erfolgt mittels Modellen der Klimaanlage und des Raumes. Auch die Regelung des Zuluftdrucks von Lüftungsanlagen wird durch

PID-Regler vorgenommen ([JZUF98]). Ein Vergleich der Eignung von einem PID- und einem Fuzzy-Regler zur Regelung eines Heizsystems wird in [UBRP16] dargestellt. Im Großteil der genannten und weiterer Veröffentlichungen werden geeignete Parameter für die Regler bestimmt. Dies ist sehr zeitaufwendig und wird teilweise von Hand oder mittels Algorithmen automatisch durchgeführt. Die Güte der Regler hängt oftmals stark von ihrer Parametrisierung ab.

In die Kategorie *Hard Control* fallen nach [AJS14] die Algorithmen Gain-Scheduling (zu deutsch in etwa: arbeitspunktabhängige Verstärkungseinstellung), nichtlineare Regelung, robuste Regelung, optimale Regelung und modellprädiktive Regelung. Bei der Gain-Scheduling-Regelung wird ein zu regelndes nichtlineares System in lineare Teilsysteme zerlegt. Für jedes dieser Teilsysteme wird ein PI- oder PID-Regler parametrisiert [LL00]. In [PM08] wird ein Gain-Scheduling-PI-Regler beschrieben, dessen Parameter mittels Fuzzy-Regeln ermittelt werden. Der Dampfkompressionszyklus einer Klimaanlage wird in [RA09] mittels eines Gain-Scheduling-Algorithmus geregelt. In [SKYL08] und [ASVR99] werden je eine Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlage (HLK-Anlage) mittels eines nichtlinearen Reglers geregelt. Robuste Regelungen finden besonders dort Anwendung, wo der Prozess erheblichen Störungen ausgesetzt ist oder sich seine Parameter im Betrieb ändern. Ein Beispiel für die Anwendung eines robusten Regelalgorithmus liefert [KABG08] mit der Beschreibung der Regelung der Beleuchtung und der Temperatur in einem Raum. Der Grad der Beleuchtung wird sowohl durch eine dimmbare künstliche Lichtquelle als auch durch eine Verschattungseinrichtung am Fenster zur Beeinflussung des natürlichen Lichtes im Raum bestimmt. In [AAPZU⁺04] wird ein robuster Algorithmus zur Regelung einer Zonentemperatur entwickelt. Einige Regelungsaufgaben können als Optimierungsprobleme formuliert werden ([ÅW97]). In dieser Disziplin der optimalen Regelung geht es demnach darum, eine optimale Ansteuerung für den zu regelnden Prozess zu finden. In der Fachliteratur spielt die optimale Regelung von Einzelräumen eine untergeordnete Rolle. Zu nennen wäre jedoch beispielhaft die optimale Regelung einer Variablen-Volumenstrom (VVS)-Anlage zur Sicherstellung der gewünschten Temperatur in zwei Zonen ([ZUZ00]). Der Fokus aktuellerer Forschungen im Bereich der Einzelraumregelung liegt auf der modellprädiktiven Regelung (MPC - model-predictive-control). MPC zeichnet sich dadurch aus, dass ein Modell des zu regelnden Prozesses im laufenden Betrieb zur Berechnung der optimalen Stellgrößenverläufe ausgewertet wird. Im Arbeitspaket 1.2 des Forschungsprojektes *IBPSA Project 1* [IBP21] wird das Softwarepaket *BOBTEST* entwickelt, welches Tests, Bewertungen und Vergleiche von modellprädiktiven Regelungsalgorithmen erlaubt. Ferner wird in diesem Arbeitspaket eine Modelica-Bibliothek entwickelt, welche innerhalb modellprädiktiver Regler genutzt werden kann. In [PFH16] und [PZ18] wird ein MPC-Ansatz zur Regelung der Heizungs- und Lüftungsanlage zur Sicherstellung des thermischen Komforts in einem Konferenzraum beschrieben. Auch in [GOJ13], [Hua11] und [ZPS20] wird die Temperatur einzelner Räume mittels MPC geregelt.

Die *Hard Control*-Algorithmen regeln Einzelräume in den meisten Fällen sehr gut. Ihre Anwendung ist jedoch oft schwierig, da i.d.R. komplexe mathematische Analysen durchgeführt und Aufgaben gelöst werden müssen. So müssen nach [AJS14] im Falle der nichtlinearen Regelung stabile Zustände identifiziert werden, im Falle des Gain-Scheduling müssen lineare Regionen ausfindig gemacht und passende Umschaltpunkte zwischen diesen Regionen festgelegt werden.

Die Anwendung der optimalen Regelung und des MPC erfordert die Lösung von Optimierungsproblemen. Es erscheint daher relativ aufwendig, einen Algorithmus aus der Klasse der *Hard-Control*-Regler zur Anwendung zu bringen.

In die Klasse der *Intelligenten Regelung* fallen Fuzzy- und KNN-Regler. Die Fuzzy-Regelung geht zurück auf die Fuzzy-Logik, die 1965 von L. Zadeh [Zad65] beschrieben wurde. Die Fuzzy-Logik lässt, im Gegensatz zur binären Logik, beliebig viele Wahrheitswerte zu. Damit lassen sich Aussagen verarbeiten, die nur in einem gewissen Maß wahr oder falsch sind. Nach [Unb01] können mit der Fuzzy-Logik gewisse Strukturen des menschlichen Denkens nachgebildet werden. Bei der Fuzzy-Regelung werden die Regelungsanweisungen mittels „Wenn-Dann“-Regeln beschrieben. In [HSAN12] wird eine HLK-Anlage mittels eines Fuzzy-Reglers so geregelt, dass Temperatur und Feuchte eines Raumes im festgelegten Komfortbereich bleiben. Auch in [HL98] werden die Sollwerte für die Temperatur und die Luftgeschwindigkeit in einer HLK-Anlage so mit einem Fuzzy-Regler geregelt, dass der mittels Predicted-Mean-Vote (PMV) Index ermittelte Komfortbereich der Nutzer eingehalten wird. Der entwickelte Regler wird mittels Simulation in Matlab ([Mat20]) und TRNSYS ([FTKB95]) überprüft. [JH20] beschreibt einen Fuzzy-Regler, der die Zulufttemperatur des Wassers einer Luft-Wasser-Wärmepumpe regelt. Die Wärmepumpe ist an eine Fußbodenheizung angeschlossen. Neben der eigentlichen Regelung durch Fuzzy-Controller wird die Fuzzy-Logik häufig zur Ermittlung günstiger Parameter für andere Regler genutzt. Regler, die auf Künstlichen Neuronalen Netzen (KNN) basieren, werden anhand historischer Daten trainiert. Vorteil der Anwendung dieser Regler ist, dass kein Wissen über den zu regelnden Prozess verfügbar sein muss. Lediglich die Eingangs- und Ausgangsgrößen des Prozesses müssen bekannt sein. In [LD05] wird ein KNN zur Regelung einer HLK-Anlage zur Sicherstellung des thermischen Komforts in Innenräumen beschrieben. Nachteil der Fuzzy-Regler dagegen ist, dass der Entwickler detailliertes Wissen über den Ablauf des Prozesses und die Bedienmöglichkeiten der involvierten Geräte haben muss. Eine Schwierigkeit bei der Anwendung der KNN-Regler ist, dass große Datenmengen, die alle relevanten Betriebsfälle der zu regelnden Anlage beinhalten sollten, zum Training der Netze verfügbar sein müssen.

Kombinationen verschiedener Reglertechniken können nach [AJS14] als *hybride Regler* bezeichnet werden. So stellt [MMN14] einen Ansatz vor, bei dem mittels eines KNN die Temperatur eines Raumes vorhergesagt wird. Diese Information dient als Eingangsgröße für einen Fuzzy-Regler, der eine HLK-Anlage entsprechend der gewünschten und vorhergesagten Innenraumtemperatur regelt. Ebenfalls eine Kombination aus KNN- und Fuzzy-Ansätzen wird in [GDU06] zur Regelung einer elektrischen Heizung beschrieben. In [XYL10] wird die Regelung einer VVS-Anlage mittels Fuzzy-PID-Regler gezeigt. Die Autoren entwickeln in [WZJ07] einen hybriden Ansatz aus einem KNN und einem PID-Regler zur Regelung einer HLK-Anlage. Dabei dient der PID-Regler zur Stabilitätssicherung. Das KNN stellt eine hohe Regelgeschwindigkeit und -genauigkeit sicher. In [WJA06] wird eine Einzelzone durch eine HLK-Anlage versorgt. Die Regelung der HLK-Anlage erfolgt mittels eines PID-Reglers, dessen Parameter durch ein KNN ermittelt werden. So passt sich der Regler immer wieder neuen Gegebenheiten an. In [STL12] dient ein Hybrid-Regler in Form eines Zustandsautomaten der Regelung der Raumtemperatur mittels einer Klimaanlage und dem Öffnen und Schließen des Fensters.

Es gibt eine Reihe *weiterer Regelungsarten*, die sich den bisher genannten Klassen nicht zuordnen lassen. Die lineare Steuerung mit direkter Rückkopplung beispielsweise dient der Entkopplung unterschiedlicher Regelkreise und führt damit zu mehr Stabilität. In der Raumregelung wird sie u.a. von [LSH10] genutzt. In [MCH⁺15b] wird ein Raumregler entwickelt, der aufgrund des ihm bekannten Aufheiz- und Abkühlvorgangs im Raum geeignete Zeitpunkte zum An- und Abschalten der Heizung festlegt. Die Arbeiten in [ALKM12] und [AKLM14] betrachten nicht die Regelung der Raumtemperatur an sich, erforschen aber die Erstellung eines Sollwertprofils für die Raumtemperatur. Die Pulsweitenmodulation eignet sich zur Reduzierung der Schaltfrequenz bei Systemen, die nur zwei Zustände annehmen können [AJS14]. Die weiteren in Abbildung 2.1 genannten Regelungen in der Kategorie *weitere Regelungsarten* spielen für die Einzelraumregelung eine untergeordnete Rolle.

Die Regelung von Einzelräumen wird nach wie vor umfassend erforscht. Früher wurden besonders die klassischen und Hard-Control-Algorithmen untersucht, heute liegt der Fokus im Wesentlichen auf der modellprädiktiven Regelung. Der Entwurf der Regler wird in den meisten Fällen modellbasiert vorgenommen, d.h. der zu regelnde Raum wird modelliert und ein Regler wird speziell für dieses Raummodell entworfen. Neben dem Entwurf oder der passenden Auswahl eines Reglers spielt besonders die Parametrisierung der Regler eine wesentliche Rolle in den Forschungsarbeiten.

2.1.2. Einzelraumregelung in der Praxis

Das Gebäudeenergiegesetz GEG legt in §63 fest, dass, wenn „eine heizungstechnische Anlage mit Wasser als Wärmeträger in ein Gebäude eingebaut [wird], [...] der Bauherr oder der Eigentümer dafür Sorge zu tragen [haben], [dass] die heizungstechnische Anlage mit einer selbsttätig wirkenden Einrichtung zur raumweisen Regelung der Raumtemperatur ausgestattet [sein muss]“. ¹ Davon ausgenommen sind Fußbodenheizungen in Räumen, die weniger als sechs Quadratmeter Fläche besitzen und solche Räume, die ein „Einzelheizgerät, das zum Betrieb mit festen oder flüssigen Brennstoffen eingerichtet ist“ besitzen. Um diese gesetzlichen Vorgaben zu erfüllen, sind einfache Regler wie PID- oder Zweipunktregler zwar ausreichend, dennoch gibt es alternative marktverfügbare Einzelraumregelungen mit weiterentwickelten technologischen Ansätzen. Die Einrichtungen zur Raumregelung lassen sich in drei Arten einteilen:

- **Mechanische Heizungssteuerung:** Sie sind die am häufigsten verbauten Heizungsregler in Form klassischer Thermostate.
- **Digitale Thermostate bzw. Raumregler:** Digitale Raumregler bestehen üblicherweise aus einer zentralen Verarbeitungseinheit, die die Regelung innehat und einem oder mehreren Sensoren, die die aufgenommenen Daten kabelgebunden oder per Funk an die Verarbeitungseinheit senden. Digitale Thermostate kommen ohne zentrale Verarbeitungseinheit aus. In vielen Fällen können digitale Thermostate oder Raumregler komfortabel per App oder Sprachassistent gesteuert werden. Digitale Thermostate sind ein klassischer Anwendungsfall für SmartHome-Produkte.

¹Gebäudeenergiegesetz - GEG [GEG20]

- **Intelligente Raumregler:** Sie lernen das Nutzerverhalten und nutzen dieses Wissen in Kombination mit der Kommunikation mit Smart-Home-Komponenten wie z.B. Wetterapps oder Anwesenheitserkennung zur vorausschauenden Raumregelung. Im Betrieb adaptieren sie fortlaufend ihre Regelstrategien an sich ändernde Bedingungen.

Zu den **digitalen Raumreglern** gehören u.a. folgende: Das System *EasyControl* [Eas20] der Firma Bosch kann als Einzelraumregler genutzt werden, indem es die durch Funkthermostate übermittelten Raumtemperaturen einzelner Räume regelt. Durch eine Anwesenheitserkennung wird sichergestellt, dass nur im Bedarfsfall geheizt wird. Das System wird über eine dazugehörige App bedient und kann auf Wunsch auch per Sprachsteuerung Befehle entgegen nehmen. Nach Herstellerangaben unterstützt das *EasyControl*-System Heizgeräte der Firmen Junkers und Bosch. Durch die zusätzliche Nutzung eines *EasyControl-Adapters* können Heizgeräte, die das OpenTherm-Protokoll [Dri99] unterstützen, genutzt werden. Die Regelung von Fußbodenheizungen wird nicht unterstützt. Einen Raumtemperaturgeführten Regler zur Ansteuerung einfacher Heizanlagen mit einem Heizkreis, Speicherladung und einer Zirkulationspumpe bietet die Firma Vaillant mit ihrem Produkt *sensioHOME* [sen20]. Über vom Nutzer einstellbare Zeitpläne wird die Anwesenheit von Personen festgelegt. Das Gerät kann sowohl über das eigene Display als auch über eine App bedient werden. Der Raumregler *sensioHOME* ist nur mit Heizsystemen der Firma Vaillant kompatibel. Zu diesen Systemen gehören beispielsweise auch das *SmartHome Raumthermostat* [inn20] der Firma Innogy SE und das *Synco Living* [syn20] der Siemens Aktiengesellschaft, die neben der Raumregelung eine Verbrauchsdatenerfassung anbietet, die vorteilhaft in Mietshäusern eingesetzt werden kann. Die skalierbare *Metasys*[®] Automationsstation [met20b] der Johnson Controls Systems & Service GmbH kann zur Messung, zum Zählen und Berechnen, zur Regelung, Steuerung und Überwachung der angeschlossenen Gebäudetechnik genutzt werden. Darüber hinaus bietet sie Möglichkeiten zu Meldungen, zum Zeitschalten, Trendwertspeichern und Protokollieren. Der autark arbeitende *Einzelraumregler T7600* [T7620], ebenfalls von der Johnson Controls Systems & Service GmbH, regelt das Heizen und Kühlen durch Klimaanlage in Wohn- und gewerblich genutzten Gebäuden. Er kann mit der *Metasys*[®] Automationsstation verbunden werden. Auch die Neuberger Gebäudeautomation GmbH bietet mit ihrem *ER3000* [ER320] einen Einzelraumregler an, ebenso die Sauter Controls GmbH mit ihrem Produkt *ecos311* [eco20]. Die genannten Einzelraumregler finden vorrangig in Wohngebäuden Anwendung. In gewerblich genutzten Gebäuden findet beispielsweise das Gebäudeautomationssystem *Desigo*[™] der Siemens Aktiengesellschaft Anwendung. Ein Teil dieses Systems ist die *Desigo*[™] *Raumautomation* [Des20], die die Regelung einzelner Räume hinsichtlich Temperatur, Feuchte, Lüftung, Beleuchtung und Verschattung ermöglicht. Der Raumregler *OPEN SRU* [Ope20] der DEOS Aktiengesellschaft wird nach Herstellerangaben in Büro- oder Hotelräumen, in Wellnessbereichen, Krankenhäusern, Schulen und Universitäten eingesetzt. Er regelt ebenso Heizung, Lüftung, Kühlung, Verschattung und Beleuchtung.

Zu den **intelligenten, selbstlernenden Systemem** gehören beispielsweise folgende Raumregler: Das *Smarte Thermostat - Starter Kit V3+* [Sma20] der tado GmbH regelt die Raumtemperatur und -feuchte. Es ist mit einer Anwesenheitserkennung ausgestattet und zusätzlich können Belegungspläne erstellt werden. Über die Kommunikation mit dem Smartphone kann die

Heizung bereits vor dem Eintreffen der Nutzer eingeschaltet werden. Das *Smarte Thermostat* erkennt geöffnete Fenster und bezieht die lokale Wettervorhersage in die Regelung ein. Bestimmte Raumcharakteristika werden automatisch erfasst und durch selbstlernende Algorithmen zur Ermittlung effizienter Heizstrategien genutzt. Das Thermostat kann direkt oder über die zugehörige App bedient werden. Durch Einbindung in ein Smart-Home-System kann das Thermostat auch Sprachbefehle entgegennehmen. Laut Hersteller ist das *Smarte Thermostat* mit vielen gängigen Heizsystemen, darunter Brennwertthermen, Niedertemperaturkesseln und konventionellen Gas- und Ölthermen, kompatibel. Die Firma Google Ireland Limited bietet das selbstlernende Thermostat *Nest* [Nes20] an. Nach Vorgabe einiger Komforttemperaturen über mehrere Tage erstellt *Nest* eigenständig Heizroutinen. Es ist außerdem mit einer An- und Abwesenheitserkennung ausgestattet. Es kann direkt am Gerät oder wie bei allen modernen Smart-Home-Anwendungen, über eine App gesteuert werden. *Nest* ersetzt nicht die herkömmlichen Heizungsthermostate, es steuert demnach die Heizkörper nicht direkt an, sondern schaltet je nach Anforderung des Raumes die Therme ein oder aus. Damit setzt die Anwendung von *Nest* den Zugriff auf die Therme voraus und kann beispielsweise nicht bei Fernwärmesystemen eingesetzt werden. Andere selbstlernende Systeme wie *alphaEOS DRIVE* [alp20a] für Heizkörper und *alphaEOS FLOOR* [alp20b] für Fußbodenheizungen der alphaINSIDE GmbH oder das oben genannte *Smarte Thermostat* der tado GmbH steuern die Heizkörper bzw. die Fußbodenheizkreise direkt an. Der Raumregler *en:key* [enk20] der Kieback&Peter GmbH & Co. KG, bestehend aus einem Sensor und einem selbstlernenden Regler, nimmt die Nutzungszeiten eines Raumes auf und erstellt individuelle Heizpläne, die sich bei Nutzungsänderungen automatisch anpassen.

Die Regelung einzelner Räume ist demnach wissenschaftlich umfangreich untersucht und wird praktisch seit Jahrzehnten angewendet. Jedoch wurde bislang wenig Augenmerk darauf gelegt, welcher Regler bei einem vorgegebenen Raum am günstigsten zu nutzen wäre. Die Beantwortung dieser Fragestellung ist Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

2.2. Parametrisierung von Reglern

Klassische Regler wie Zweipunkt-, P-, PI- und PID-Regler werden aufgrund ihrer einfachen Arbeitsweise und Anwendbarkeit vorwiegend zur Einzelraumregelung genutzt. Eine große Schwierigkeit besteht allerdings darin, sie geeignet zu parametrisieren ([AJS14]). Dieser Schritt kann sehr aufwendig sein ([WSC01]) und erfordert in den meisten Fällen einen erfahrenen Ingenieur. Oft müssen die Parameter eines Reglers mehrfach angepasst werden, wenn sich beispielsweise im Gebäude oder in den technischen Anlagen Änderungen ergeben ([FCS⁺19]). Es ist daher wünschenswert, dass die Reglerparameter automatisch eingestellt werden. Dazu existiert eine Reihe von Methoden. Einen Ansatz zur Bestimmung der Parameter eines PID-Reglers liefert die Methode nach Ziegler und Nichols ([ZN⁺42]). Bei dieser Methode werden aus der Sprungantwort der Regelstrecke die PID-Parameter nach bestimmten Vorschriften berechnet. In [KPT⁺06] werden die Einstellregeln nach Ziegler und Nichols zur Parametrisierung eines PID-Reglers zur Einzelraumregelung genutzt. Eine Abwandlung der Methode nach Ziegler und Nichols stellt der Chien-Hrones-Reswick-Algorithmus dar, der besonderes Augenmerk auf die Sollwertregulie-

rung legt. Es existieren weitere ähnliche Algorithmen wie z.B. die Cohen-Coon-Methode und eine überarbeitete Ziegler-Nichols-Methode ([XCA02]). Die Autoren in [ÅH84b], [ÅH84a] und [HA88] beschreiben eine Methode zur automatischen Wahl der Parameter für PID-Regler. Ihre wesentlichen Vorteile im Vergleich zur Methode von Ziegler und Nichols liegen darin, dass sie den geschlossenen Regelkreis nicht instabil werden lässt und dass weniger Wissen über die Regelstrecke vorhanden sein muss. Eine Weiterentwicklung der Methode von Ziegler und Nichols, die auch für Systeme mit einer Totzeit anwendbar ist, liefern die Autoren in [Pes94]. Neben den genannten Methoden, die zu den bekanntesten zählen, existiert eine Reihe weiterer. Exemplarisch seien hier [SC03] und [SSC04] genannt, die eine Methode zur Parametrisierung von PI- und PID-Reglern für Systeme 1. Ordnung beschreiben. Zwei weitere Ansätze, welche auf der Kenntnis der Sprungantwort des geschlossenen Regelkreises basieren, werden in [SS10] und [HX11] diskutiert.

Auch im Bereich der Gebäude- und Anlagenregelung gibt es eine Reihe von Ansätzen zur Bestimmung von Reglerparametern, vorrangig von PI- und PID-Reglern. In [BCW⁺00] wird eine Kühlanlage mittels PID-Regler betrieben, dessen Parameter mit der von [WHZ00] entwickelten Methode ermittelt wurden. Zur Einhaltung des thermischen Komforts in einzelnen Räumen werden Dämpfer eingesetzt. Die Autoren in [Zha11] beschreiben einen PID-Regler, dessen Parameter mittels eines Partikel-Schwarm-Optimierungsansatzes gefunden werden. Eine weitere Methode, die ebenfalls auf der Optimierung der Reglerparameter basiert, wird in [ZU92] vorgestellt. Dort werden die Parameter eines PID-Reglers zur Regelung einer Wärmepumpe mit Speichertank zur Einhaltung der Temperatur und der Feuchte in Einzelräumen durch Lösen der Riccati-Gleichung ([Rod94]) ermittelt. Auch in [FCS⁺19] wird ein PID-Regler zur Sicherstellung des thermischen Komforts in Einzelräumen mittels eines Optimierungsverfahrens (Bayessche Optimierung, [SSW⁺15]) parametrisiert. Mit der automatischen Parameterwahl beim PI-Regler beschäftigen sich beispielsweise die folgenden drei Veröffentlichungen. In [JZUF98] wird eine Zweikanal-Lüftungsanlage geregelt. Zur Wahl der Reglerparameter werden die „Ziegler und Nichols Methode“, die „vereinfachte Internal Model Control (ICM)-PID Methode“ [FCL94] und die „Methode Becker et. al.“ [BMH91] angewendet und deren Eignung verglichen. In [ZC12] und [BWZ08] werden ebenfalls zwei Methoden zur automatischen Parameterwahl beim PI-Regler zur Regelung von Lüftungsanlagen beschrieben.

Die Arbeiten auf dem Gebiet der Raumregelung zeigen, dass nach wie vor die klassischen Regler am weitesten verbreitet sind. Daher wird für diese auch am häufigsten untersucht, inwieweit sich ihre Parameter automatisch wählen lassen. Was die Methoden zur Parameterwahl nicht leisten ist, für das zu regelnde System zu entscheiden, welcher Regler der vorteilhafteste wäre. Die Wahl des Reglers muss also vor der Anwendung dieser Methoden feststehen.

Bezogen auf den Gebäudesektor liefern die Regeln zur Wahl der Reglerparameter keine Information darüber, wie viel Energie (beispielsweise Heizenergie) durch die Anwendung des Reglers über einen gewissen Zeitraum verbraucht wird. Dies wäre jedoch bei der Wahl des Reglers hilfreich und wünschenswert. Einen ähnlichen Ansatz, bei dem es zwar nicht um die Wahl von Reglerparametern, sondern um die Ertragsabschätzung solarthermischer Anlagen in Abhängigkeit von

deren wesentlichen Auslegungsparametern wie Kollektorfläche, Speichergröße und Kollektorausrichtung geht, liefert die *f-Chart-Methode* ([DB91]). Sie basiert auf der Auswertung hunderter Simulationen von Solaranlagen. Der mittels dieser Methode berechnete *f*-Wert repräsentiert den Quotienten aus den solaren Erträgen der Anlage und der Gesamtenergielast. Die *f-Chart-Methode* wird jedoch nicht im Betrieb solarthermischer Anlagen, sondern lediglich bei deren Auslegung angewendet.

Für die Wahl des besten Reglers zur Einzelraumregelung ist ein solches Verfahren nicht bekannt. Der Schließung dieser Lücke widmet sich die vorliegende Arbeit.

3. Methodisches Vorgehen

Ziel der Arbeit ist es, für Räume passende Regler samt ihrer Parametrisierung leicht bestimmen zu können. Dazu wird ein auf einer Vielzahl von Beispielen basierender empirischer Ansatz verfolgt. Es ist dafür notwendig, für eine größere Anzahl an Beispielräumen einschließlich ihrer Nutzung und ihres Standortes die optimalen Regler zu bestimmen. Dies könnte anhand real existierender Räume geschehen. Dabei wäre jedoch die Ermittlung optimaler Regler schwierig, weil man innerhalb eines konkreten Zeitraumes nur Informationen über die Eignung eines Reglers erhielte und ein Vergleich mehrerer Regler unter sonst gleichen Bedingungen nicht möglich wäre. Außerdem dauern Untersuchungen an realen Räumen sehr lange, da der Untersuchungszeitraum mindestens einige Tage umfassen sollte. Daher werden passende Regler in dieser Arbeit durch Simulation bestimmt. So können gezielt alle erforderlichen Daten gewonnen werden, die zur Ermittlung der Beziehungen zwischen Räumen und Reglern relevant sind. Insbesondere sind die Raumnutzung und sein Standort definiert. Damit sind auch Informationen über das Wetter gegeben. Auch kann ein feststehender Simulationszeitraum bestimmt werden, für den ein Raummodell mit unterschiedlichen Reglermodellen simuliert werden kann. Dadurch ist die Vergleichbarkeit der Eignung der Reglermodelle gewährleistet.

Die Vielfalt an Räumen, Raumnutzung und Standorten äußert sich in einer sehr großen Anzahl von Parametern, wie z.B. Materialparametern, Abmessungen und Standortparametern, aber auch in strukturellen Anordnungen, wie z.B. dem Wandaufbau. Um diese Vielzahl zu quantifizieren, werden Räume, Nutzung und Standorte durch bestimmte Kenngrößen erfasst. Dadurch erfolgt eine Verdichtung, bei der jedoch auch einige Informationen verloren gehen. Es gilt daher zu prüfen, ob die verwendeten Kenngrößen noch ausreichend sind und ob die für die Beispielräume bestimmten optimalen Regler und ihre Parameter auch für die durch die Kenngrößen beschriebenen Räume, Nutzungen und Standorte gelten. Um die Eignung eines Reglers für einen Raum zu bewerten, muss ein entsprechendes Gütemaß bestimmt werden. Dieses wird für jede betrachtete Kombination von Raum-, Nutzungs- und Standortkenngrößen zusammen mit den optimalen Reglerparametern abgespeichert. Dadurch entsteht eine Datenbasis, auf deren Grundlage versucht werden kann, einen Zusammenhang Z zwischen optimalem Regler und den ermittelten Kenngrößen in einer möglichst einfachen Form zu beschreiben. Wenn der Zusammenhang gefunden ist, kann allein aufgrund der Kenngrößen der optimale Raumregler bestimmt werden. Dies ist für ein Raumbeispiel nachzuweisen, das ursprünglich nicht in der Datenbasis enthalten ist. Es sind also folgenden Punkte zu bearbeiten:

- Charakterisierung von Räumen, Standorten und Raumnutzung durch Kenngrößen
- Bewertung der optimal parametrisierten Regler mittels Gütemaß.

- Schaffung einer Datenbasis zwischen Kenngrößen und Gütemaßen.
- Bestimmung des Zusammenhangs Z zwischen den Kenngrößen und den Gütemaßen der Regler.
- Beurteilung des gefundenen Zusammenhangs Z .
- Exemplarische Anwendung des gefundenen Zusammenhangs Z .

Charakterisierung von Räumen, Standorten und Raumnutzung durch Kenngrößen

Die erforderlichen Untersuchungen wären unter Einbeziehung aller einen Raum, seine Nutzung und seinen Standort beschreibenden Parameter sehr komplex und in der Praxis kaum anzuwenden. Oft werden ohnehin nicht alle Parameter bekannt sein. Daher gilt es, die Vielfalt an Parametern zu beschränken und die wesentlichen, einen Raum beschreibenden Kenngrößen zu erfassen. In dieser Arbeit werden Raumkenngrößen genutzt, die von Keller [KM06] bestimmt wurden:

- Ankopplungsfaktor an das Klima $\gamma = \frac{G}{K}$ mit $[\gamma] = \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$ und
- Zeitkonstante des Raumes $\tau = \frac{C}{K}$ mit $[\tau] = \text{s}$

γ beschreibt das Verhältnis der solaren Gewinne eines Raumes und seiner thermischen Verluste durch Transmission und Luftwechsel mit der Gebäudeumgebung. γ gibt demnach an, welche Auswirkungen die solare Einstrahlung auf die Rauminnentemperatur hat. τ beschreibt die Zeitkonstante eines Raumes und damit seine Trägheit, also die Reaktionsfähigkeit des Raumes auf sich ändernde Bedingungen. Nach [Kel97] beschreiben die beiden Raumkenngrößen die thermische Reaktion eines Raumes auf das Klima, in dem er sich befindet, vollständig. Sie werden in Abschnitt 5.1 genauer beschrieben.

Neben dem Raum hat auch sein Standort und damit das Klima einen wesentlichen Einfluss auf die Eignung eines Reglers. So ist es auch notwendig, wesentliche Eigenschaften des Klimas durch Kenngrößen zu erfassen. Auch dies wurde von Keller [Kel97] bereits durchgeführt. Die Klimakenngrößen sind:

- Mittelwert der Außenlufttemperatur $\bar{\vartheta}_a$ in K
- Tagesamplitude der Außenlufttemperatur $\Delta\vartheta_a$ in K
- Mittelwert der solaren Einstrahlung \bar{I} in $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$
- Tagesamplitude der solaren Einstrahlung ΔI in $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$

Auch die Raumnutzung muss, um sie zu quantifizieren, durch Kenngrößen ausgedrückt werden. Denkbar wäre es, die Dauer einer durchschnittlichen Raumebelegung und die Anzahl der Personen zu nutzen.

Bewertung der optimal parametrisierten Regler mittels Gütemaß

Zur Bewertung der Eignung eines Reglers für einen Raum wird ein geeignetes Gütemaß gewählt. Es wird ein Regler dann als geeignet bewertet, wenn er bei einem möglichst niedrigen Heizenergieverbrauch die Nutzerkomfortgrenzen einhält. Es ist zweckmäßig, die Zielfunktion der Regleroptimierung als Gütemaß zu nutzen, da diese den Heizenergieverbrauch unter Einhaltung der Komfortbedingungen minimiert. Die Zielfunktion ist in Gleichung (4.14) angegeben und wird in Abschnitt 4.4 beschrieben. Sie soll aber an dieser Stelle bereits genannt werden:

$$ZF = \frac{E_{\text{heat}}}{W_h} \left(1 + \frac{T_{\text{warm}}}{K_s} + \frac{T_{\text{cold}}}{K_s} \right) + \frac{T_{\text{warm}}}{K_s} + \frac{T_{\text{cold}}}{K_s}$$

Die Wahl des Gütemaßes wird in Abschnitt 5.4 näher erläutert.

Schaffung einer Datenbasis aus Kenngrößen und Gütemaßen

Die Kenngrößen der Räume, Nutzung und Standorte sowie die optimalen Parameter und Gütemaße der Regler sollen für viele Beispielsräume und -regler in einer Datenbasis zusammengefasst werden. Dazu werden Räume und Regler modelliert und deren Verhalten durch Simulation bestimmt. Es werden Simulationsszenarien definiert, die aus einem Raum-, einem Standort- und einem Nutzungsmodell bestehen. Ferner sind ein optimales Regelungsmodell sowie ein Modell zur Berechnung der Kenngrößen Bestandteil eines Szenarios. Auch der Simulationszeitraum wird durch das Szenario festgelegt. Jedes Simulationsszenario stellt einen vollständigen Datensatz innerhalb der Datenbasis zur Verfügung (Abbildung 3.1).

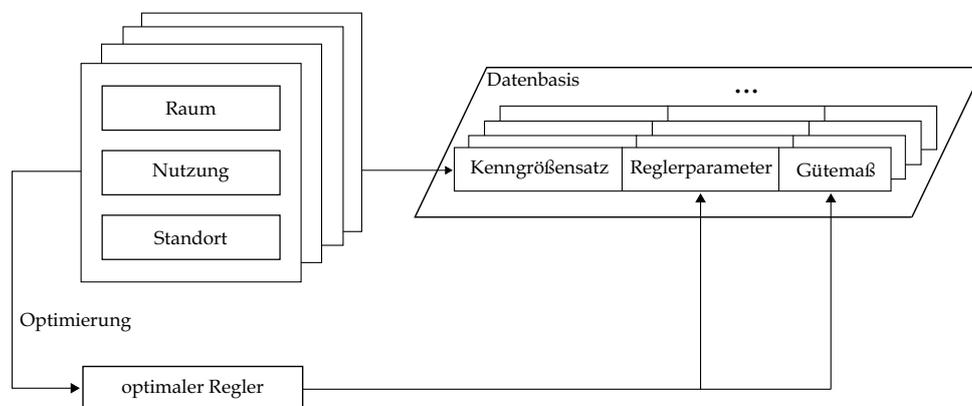


Abbildung 3.1. Anlegen der Datenbasis

Um verschiedene Simulationsszenarien anzulegen und damit verschiedene Datensätze zu erstellen, ist es notwendig, geeignete Modelle auszuwählen. Durch ihre Wahl muss eine gewisse Breite an praxisrelevanten Fällen abgedeckt werden. Dennoch muss ihre Anzahl sinnvoll begrenzt werden, um die anfallende Datenmenge beherrschen zu können. Es wird darauf geachtet, dass sich die **Raummodelle** durch ihr Volumen, die Lage ihrer Fenster hinsichtlich der Himmelsrichtung sowie durch die bauphysikalischen Eigenschaften unterscheiden. Es werden solche Raummodelle genutzt, deren Belegung sinnvoll vorhersagbar ist, wie das z.B. für einen Büroraum der Fall ist. Auch sollten unterschiedliche **Heizungsmodelle**, wie Radiatorheizung und Flächenheizung,

zum Einsatz kommen, um unterschiedliche Zeiten zur Aufheizung und Abkühlung des Raumes berücksichtigen zu können. Durch die Wahl der **Standortmodelle** werden klimatische Bedingungen festgelegt. Da der Eingriff zur Regelung der Raumtemperatur nur über Heizungsmodelle erfolgt (Kühlanlagen werden nicht betrachtet), muss das Standortmodell kühlere Standorte, die beispielsweise im Norden liegen, bereitstellen. Werden Standorte innerhalb Deutschlands gewählt, muss der **Simulationszeitraum** innerhalb der Heizperiode (Herbst, Winter, Frühling) liegen. Bei der Wahl von **Nutzungsmodellen** sollen sinnvolle Variationen realisiert werden. So werden unterschiedlich viele Personen in unterschiedlich langen Zeitspannen in den Räumen anwesend sein. Die Belegung wird passend zum Raummodell gewählt, d.h. dass beispielsweise in einem Einzelbüro eine Person in der Zeit zwischen 08:00 Uhr und 17:00 Uhr anwesend sein könnte. Bei der Wahl der **Reglermodelle** wird unter anderem darauf geachtet, dass sie in der Praxis weit verbreitet und leicht einsetzbar sind. So könnten beispielsweise Standardregler wie P-Regler oder Zweipunktregler betrachtet werden. Daneben wäre ein einfacher vorausschauender Regler betrachtenswert.

Die Modellierung der Bestandteile eines Simulationsszenarios erfolgt mit der Modellierungssprache *Modelica* ([Fri10]). Es werden Modelle aus unterschiedlichen Gebäude-Modellbibliotheken und der Modelica-Standard-Bibliothek ([MSL21]) genutzt. Um den Modellierungsaufwand zusätzlich zu begrenzen, wird vor allem für die Raum- und Reglermodelle untersucht, ob vorhandene, in Forschungsprojekten entstandene Modelle, genutzt werden können.

Um passende Regler für einen Raum zu finden, ist es in den meisten Fällen notwendig, die Reglerparameter zu optimieren. Dazu wird eine Zielfunktion formuliert, die den Heizenergieverbrauch minimiert, dabei jedoch die Nutzerkomfortgrenzen einhält. Diese Grenzen werden aus der DIN EN 15251 ([DIN12]) abgeleitet. Es wäre vorteilhaft, wenn die Zielfunktion durch einen einzigen Wert abgebildet wird. So könnte bei der Optimierung auf die Formulierung von Nebenbedingungen verzichtet werden. Beispielsweise wäre es möglich, die Verletzung der Komfortgrenzen als Strafterme zum Heizenergieverbrauch zu addieren. Möglichkeiten einer komfortablen rechen-technischen Umsetzung der Optimierung müssen gefunden werden. Dazu sollten bereits vorhandene Optimierungswerkzeuge eingesetzt werden.

Nachdem durch die Simulation der Szenarien eine gewisse Anzahl an Beispielräumen und für diese passende Regler erzeugt wurde, gilt es zu überprüfen, ob diese ausreichend sind, um den Zusammenhang Z zu ermitteln. Sollte dies nicht der Fall sein, müssen weitere Modelle erzeugt werden. Wird die Zahl dieser Modelle sehr groß, ist das Erzeugen von weiteren Simulationsszenarien per Hand nicht mehr praktisch handhabbar, da der Modellierungsaufwand je Szenario sehr hoch ist. Es müssen dann andere Möglichkeiten gefunden werden. Beispielsweise könnte eine Variation bestehender Simulationsszenarien zu weiteren Datensätzen führen.

Bestimmung des Zusammenhangs Z zwischen den Kenngrößen und den Gütemaßen der Regler

Ist die Datenbasis angelegt, wird mit Mitteln der Datenanalyse erforscht, ob ein Zusammenhang Z zwischen der Eignung der Regler und den Kenngrößen von Raum, Standort und Nutzung gefunden werden kann und wie er beschrieben werden kann (Abbildung 3.2). Dazu werden verschiedene Verfahren der Datenanalyse erprobt und damit auf ihre Eignung untersucht.

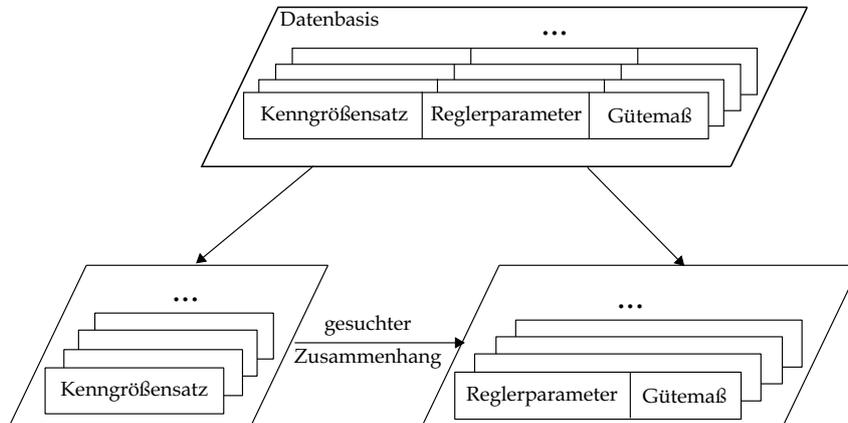


Abbildung 3.2. Bestimmung des Zusammenhangs Z zwischen Kenngrößen und Gütemaßen und Reglerparametern

Beurteilung des gefundenen Zusammenhangs Z

Es werden geeignete Möglichkeiten und Kenngrößen zur Beurteilung des gefundenen Zusammenhangs ermittelt und angewendet. Dazu werden Kriterien aus der Datenanalyse, wie das Bestimmtheitsmaß R^2 [BEPW15], genutzt. Weitere Bewertungskriterien ergeben sich aus der konkret zu wählenden Analysemethode.

Exemplarische Anwendung des gefundenen Zusammenhangs Z

Ist ein Zusammenhang zwischen Raum und Regler gefunden, wird er anhand eines neuen Beispielraumes, der nicht zur Erstellung der Datenbasis genutzt wurde, angewendet. Dazu wird ein neues Simulationsszenario angelegt und die notwendigen Kenngrößen werden ermittelt. Mit diesen Informationen erfolgt anhand des Zusammenhangs die Bestimmung des optimalen Reglers für das Szenario. Seine Eignung wird anhand des Gütemaßes für Regler bewertet. Anschließend wird zusätzlich ein Regler mittels Optimierung für dieses neue Szenario bestimmt. Es folgt ein Vergleich mit dessen ermittelter Eignung und der Eignung des durch den Zusammenhang gefundenen Reglers. Wenn sich bei diesem Vergleich zeigt, dass der gleiche Regler gewählt wurde, der außerdem ähnlich parametrisiert ist, ist dies eine Bestätigung dafür, dass der gefundene Zusammenhang Z angewendet werden kann. Eine Verallgemeinerung der Anwendbarkeit lässt sich aus dem Anwendungsbeispiel jedoch nicht ableiten. Bringt der Vergleich keine Übereinstimmung, muss die Methodik hinterfragt und gegebenenfalls revidiert werden.

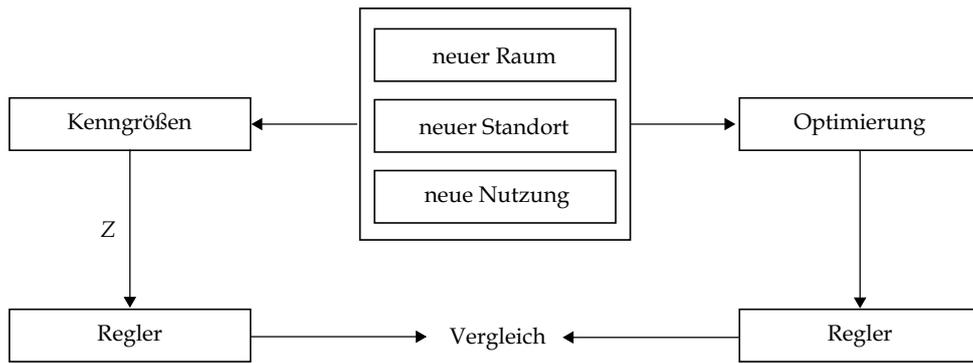


Abbildung 3.3. Anwendung des Zusammenhangs Z zur Wahl eines passenden Reglers für einen neuen Raum

4. Modellbildung und Optimierung ausgewählter Räume

In diesem Kapitel werden die Modellierungsarbeiten und daraus resultierende Simulationsmodelle beschrieben, mit denen eine Datenbasis geschaffen wird, auf deren Grundlage später Zusammenhänge zwischen Simulationsszenarien (auch als Szenarien bezeichnet) und optimal parametrisierten Reglern erforscht werden. Als Simulationsszenario wird dabei die Gesamtkonfiguration von Raummodell, Modellen energietechnischer Anlagen sowie Modellen der Umwelt- und Nutzereinflüsse verstanden. Die Modellierung erfolgt in der objektorientierten Modellierungssprache *Modelica*, welche in Abschnitt 4.1 vorgestellt wird. Dabei wird besonders auf deren Einsatz in der Gebäudemodellierung und in dieser Disziplin vorhandene Modellbibliotheken eingegangen. Abschnitt 4.2 geht speziell auf die *BuildingSystems*-Bibliothek ([Bui21b]) ein, auf deren Grundlage die in der Arbeit entwickelten Modelle entstanden sind. Aufbauend darauf folgt in Abschnitt 4.3 eine eingehende Darstellung der Simulationsszenarien, die zur Erstellung der Datenbasis simuliert werden. Im Einzelnen werden die Raum- und Heizungsmodelle, das Umgebungsmodell, das Nutzungsmodell, das Beleuchtungsmodell, das Modell zur Berechnung der Luftwechselrate sowie die Reglermodelle beschrieben. Die Reglerparameter werden mittels Optimierung bestimmt, was in Abschnitt 4.4 beschrieben ist. Da sich während der Forschungsarbeiten herausstellte, dass die Datenbasis zur Ermittlung eines Zusammenhangs zu wenig Daten umfasste, wurde sie, wie in Abschnitt 4.5 beschrieben, vergrößert. Abschnitt 4.6 untersucht in einer Sensitivitätsanalyse den Einfluss der Reglerparameter auf die bei der Optimierung genutzte Zielfunktion.

4.1. Modellierungssprache Modelica

Modelica [Mod17] ist eine frei verfügbare, objektorientierte Modellierungssprache zur Beschreibung komplexer heterogener physikalischer Systeme in Form von algebraischen, diskreten und gewöhnlichen Differentialgleichungen. Die Sprache wird seit 1996 nach Arbeiten von Elmqvist [Elm78] und Otter [Ott94] entwickelt und ist seit 2000 eine registrierte Marke der *Modelica Association*. *Modelica* wird zur Modellierung in vielen physikalischen Bereichen wie z.B. Mechanik, Elektronik und Fluidik eingesetzt. *Modelica*-Modelle sind üblicherweise hierarchisch aufgebaut. Die in komplexen realen technischen Systemen vorhandenen Hierarchien von Teilsystemen und Komponenten lassen sich leicht in eine entsprechende Hierarchie von *Modelica*-Modellen überführen. Die Sprache unterstützt eine hierarchische Modellierungsweise sehr vorteilhaft, da komplexe Systemmodelle leicht aus Subkomponenten zusammengesetzt werden können. Zur Si-

mulation eines *Modelica*-Modells sind mehrere Modellverarbeitungsschritte durch das Simulationswerkzeug notwendig. Zunächst werden durch den Modelica-Compiler alle Hierarchien im Modell aufgelöst, d.h. alle das Modell beschreibenden Gleichungen existieren nun auf einer „flachen“ Hierarchieebene gleichberechtigt nebeneinander. Anschließend wird das Gleichungssystem symbolisch vereinfacht und „optimiert“, indem z.B. Gleichungen analytisch differenziert werden um das System auf Zustandsform transformieren zu können und einfache Eliminationen von Variablen ausgeführt werden. Das Modell liegt nun als C-Code vor und wird mit einem externen Lösungsalgorithmus verbunden. Es folgt die eigentliche Lösung des Gleichungssystems sowie ein Aufbereiten der Simulationsergebnisse. Die Modellierung und Simulation von *Modelica*-Modellen wird üblicherweise innerhalb einer Toolumgebung durchgeführt. Zur Auswahl stehen unter anderem Dymola [BEOM02], SimulationX [Sim17] oder das Open Source-Simulationswerkzeug OpenModelica [FAP⁺06].

Ogleich *Modelica* zur Beschreibung beliebiger physikalischer Zusammenhänge in Form von Algebroidifferentialgleichungen geeignet ist, fand es ursprünglich besonders breite Anwendung in der Beschreibung mechanischer Zusammenhänge z.B. in den Bereichen Robotik und Automotive. Seit einigen Jahren wird *Modelica* jedoch zunehmend auch erfolgreich zur Modellierung im Gebäudebereich eingesetzt. So ist eine Vielzahl breit anwendbarer Modellbibliotheken entstanden, die es erlauben, Gebäudesysteme und ihre Randbedingungen in unterschiedlichen Detaillierungsgraden zu beschreiben und zu untersuchen. Die *Buildings*-Bibliothek [WZNP14] bietet Modelle zur Abbildung von Energie- und Steuersystemen, Räumen und Reglern an. Die *BuildingSystems* - Bibliothek [NGHLR12] bietet Möglichkeiten zur dynamischen Simulation des energetischen Verhaltens von einzelnen Räumen, über Gebäude bis hin zu Stadtquartieren. Der Fokus der *AixLib* - Bibliothek [MLC⁺16] liegt auf der Modellierung des dynamischen Verhaltens von Gebäuden, technischer Gebäudeausrüstung und Energieverteilnetzwerken zur Analyse energetischer Systeme, ebenfalls angefangen vom Einzelraum bis hin zum gesamten Quartier. Die Bibliothek *FastBuildings* ([BCJ⁺15]) stellt kleine, einfache und damit sehr performante Gebäudemodelle zur Verfügung, die sich z.B. für die Anwendung in der modellbasierten prädiktiven Regelung eignen. Auch werden *FastBuilding*-Modelle im Framework *OpenIDEAS* [BCJ⁺15] zur Energiesimulation auf Distriktebene eingesetzt. Die vier genannten Bibliotheken setzen alle auf einer gemeinsamen „Core“-Bibliothek, der *Modelica IBPSA Library* [IBP21] auf. Diese stellt die Kompatibilität der Bibliotheken untereinander sicher und bietet damit umfangreiche Unterstützung beim Entwurf von Gebäudemodellen. Die Zusammenführung der ehemals separaten Modellbibliotheken unter der *Modelica IBPSA Library* schafft Synergieeffekte, indem beispielsweise Werkzeugketten zur Verknüpfung von Building Information Modellen (BIM), Energiemodellen, Gebäudesimulation und Regelungsmodellen leicht aufgebaut werden können. Damit ist es möglich, Gebäude auf ihrem gesamten Lebensweg von der Planung bis zum Abriss simulativ zu begleiten, um deren Betriebsweise und damit z.B. deren Energieeffizienz zu bewerten. Die *Modelica IBPSA Library* gilt als Grundlage für die Entwicklung neuer vielfältiger Simulationsbibliotheken, welche universell von vielen Simulationsumgebungen interpretiert werden können. Die *Green City* - Bibliothek [SU16] wird zur Modellierung von Energieversorgungssystemen eingesetzt. Gebäude- und Anlagenmodelle, Nutzungs- und Regelungsmodelle sowie Speicheranlagen und Ladeinfrastrukturen sind Bestandteil dieser Bibliothek. Nicht zuletzt bietet auch die

Modelica-Standard-Bibliothek grundlegende Modelle zur Abbildung thermischer Prozesse, wie z.B. thermische Widerstände und Kapazitäten, an.

Die in dieser Arbeit erstellten Simulationsmodelle basieren auf Komponenten der *BuildingSystems* - Bibliothek, da sie günstige Voraussetzungen zur Modellierung der notwendigen Bestandteile innerhalb dieser Arbeit liefert ([MCNG17]). Ergänzend dazu wurden einige Modelle, z.B. die einiger Regler, direkt mit den Mitteln der Sprache *Modelica* formuliert. Dies ist ein Vorzug von *Modelica*. Es können leicht Erweiterungen und Ergänzungen an und von Modellen vorgenommen werden und so stehen nicht nur vorgefertigte Modelle allein zur Verfügung.

4.2. BuildingSystems-Bibliothek

Die *BuildingSystems*-Bibliothek wird an der Universität der Künste Berlin am Fachgebiet Versorgungsplanung und Versorgungstechnik entwickelt [NGHLR12]. Sie basiert auf *Modelica* und dient der Beschreibung und dynamischen Simulation des energetischen Verhaltens von Gebäuden und Stadtbezirken. Die Modelle der Bibliothek beschreiben die Energiebilanz der Gebäudehülle und ihrer Randbedingungen, wie Wittereinfluss und Gebäudenutzung. Energieversorgungssysteme können ebenfalls beschrieben und innerhalb eines Gesamtmodells mit dem Gebäudemodell verbunden werden. Abbildung 4.1 gibt einen Überblick über die in der *BuildingSystems*-Bibliothek enthaltenen Modellgruppen (sog. Modelica Packages).

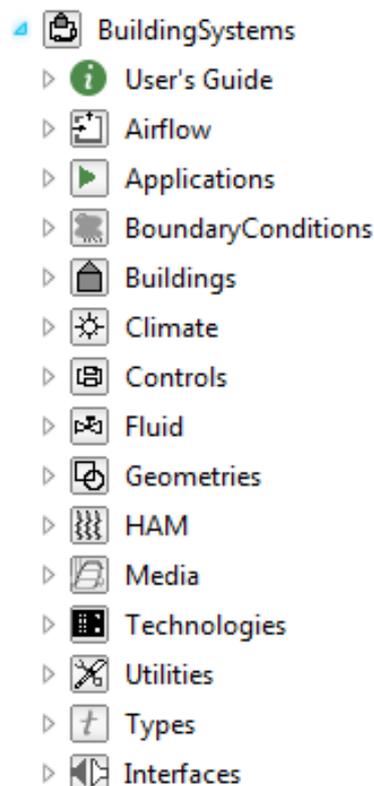


Abbildung 4.1. Modelle der *BuildingSystems*-Bibliothek

Die Modelle der Bibliothek bilden Räume und Gebäude (Buildings), solare Energietechnik (Technologies) sowie Heizungs- und Klimatechnik (HAM, Fluid) samt deren Regelung (Controls) ab. Zur ganzheitlichen Simulation werden diese um Modelle zur Erzeugung von Klima- und Nutzerrandbedingungen (BoundaryConditions) ergänzt. Aus diesen Teilmodellen können komplexe Gebäudesysteme, bestehend aus thermischen oder hygrothermischen Modellen, beschrieben, und deren dynamisches Verhalten in Kombination mit Modellen der zugehörigen energetischen Versorgungstechnik untersucht werden. Dabei kann die Gebäudetechnik thermische, hydraulische sowie elektrische Modelle der Solarthermie, der Photovoltaik und der Heizungs- und Klimatechnik umfassen. Die *BuildingSystems*-Bibliothek erlaubt es, Modelle in unterschiedlichen Detaillierungsgraden, d.h. unterschiedlichen Modellierungstiefen, zu beschreiben. So können beispielsweise Modelle hydraulischer Komponenten wie Pumpen, Rohrleitungen oder Ventile ohne räumliche Ausprägung (nulldimensionale (0D)-Modellierung) beschrieben werden. Auch Gebäude können mittels konzentrierter Parameter in der 0D-Modellierungsweise erstellt werden. Dabei wird das Raumvolumen als einzelner Luftknoten abgebildet und die geometrischen Ausprägungen des Raumes vernachlässigt. Ebenso ist eine eindimensionale (1D)-Modellierung eines Gebäudes mit der *BuildingSystems*-Bibliothek möglich, indem das Gebäudemodell in einer Dimension ortsdiskretisiert wird. Dabei werden die Bestandteile des Gebäudemodells, wie z.B. Wände, Fenster und Raumvolumen, als separate Modelle beschrieben und in einem übergeordneten Modell zum eigentlichen Gebäudemodell zusammengesetzt. Auch eine dreidimensionale (3D) Beschreibung eines Raummodells ist möglich. Dabei werden die Modelle in alle drei Raumrichtungen diskretisiert. So kann beispielsweise eine örtlich aufgelöste Analyse eines Raumklimas erfolgen. Damit ist die Bibliothek sehr vielseitig einsetzbar und kann beispielsweise die Fragestellung nach dem Heizwärmebedarf einzelner Räume im Gebäude, die ein detailliertes Gebäudemodell erfordert, ebenso geeignet beantworten, wie die nach dem Heizwärmebedarf eines Gebäudes im Quartiersverbund, welche ein nur wenig detailliertes Gebäudemodell erfordert. Für jeden dieser Detaillierungsgrade finden sich im Package Buildings der Bibliothek vorgefertigte Modelle, die je eine thermische Zone abbilden und durch geeignete Kombination zu einem Gesamtgebäudemodell aggregiert werden können. Solche in ihrer Struktur vorgegebenen, aber durch den Modellierer konfigurierbaren Modelle werden oft als Modelltemplates bezeichnet.

In dieser Arbeit wird das Modelltemplate **Building1Zone1DBox** der *BuildingSystems*-Bibliothek zur Modellierung der betrachteten Räume genutzt. Es erlaubt die Modellierung der Komponenten eines Raumes (Begrenzungsflächen, Fenster, interne Wände, Raumluftvolumina) unter Berücksichtigung ihrer Geometrie und Ausrichtung als einzelne Elemente und deren individuelle Zusammensetzung zu einem Raummodell und entspricht damit der oben genannten 1D-Modellierung. Für das Ziel der Arbeit sind 0D-Modelle zu grob und 3D-Modelle zu rechenintensiv. Weitere, nicht im Fokus dieser Arbeit liegende, dennoch erwähnenswerte Eigenschaften der Bibliothek sind deren Eignung zur Co-Simulation ihrer Modelle sowie zur dreidimensionalen Darstellung von Simulationsexperimenten.

4.3. Simulationsszenarien

Um Zusammenhänge zwischen Räumen und für diese passende, optimal parametrisierte Regler zu finden, werden viele Beispiele ausgearbeitet. Zu einem Beispiel gehört neben den Räumen und Reglern auch der Standort und die Raumnutzung. Diese Beispiele, die im Rahmen der Arbeit als Simulationsszenarien bezeichnet werden, werden später klassifiziert und in einer Datenbasis zusammengefasst. Ein Datensatz dieser Datenbasis wird aus Berechnungsergebnissen eines Simulationsszenarios angelegt. Ein Simulationsszenario ist ein vollständig beschriebenes, simulierbares Modell, welches aus mehreren Teilmodellen besteht. Diese Teilmodelle sind:

- Raum- und Heizungsmodell
- Standortmodell
- Nutzungsmodell
- Beleuchtungsmodell
- Modell zur Berechnung der Luftwechselrate
- Reglermodell

Verschiedene Simulationsszenarien unterscheiden sich in der konkreten Ausführung ihrer Teilmodelle sowie in ihrem Simulationszeitraum. Abbildung 4.2 zeigt exemplarisch die Teilmodelle eines Simulationsszenarios sowie deren Beziehungen untereinander als Blockschaltbild.

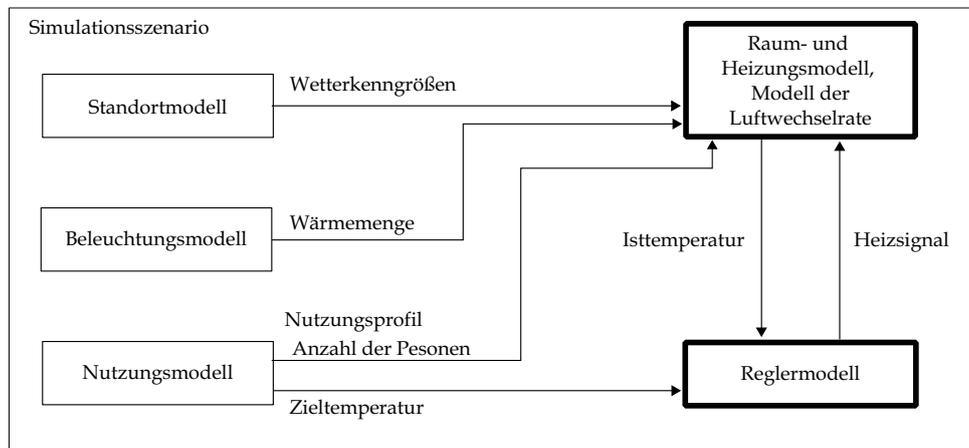


Abbildung 4.2. Teilmodelle eines Simulationsszenarios

Die einzelnen Teilmodelle tauschen Daten untereinander aus. Das Raummodell erhält vom Standortmodell die höhenabhängige Außentemperatur sowie die Außenluftfeuchte, die sich, z.B. durch undichte Stellen in der Raumhülle unmittelbar auf die Raumluft im Modell auswirken. Weiterhin werden für jede außenluftberührende Zonenoberfläche in Abhängigkeit ihrer Orientierung die Parameter für die Menge der direkten und diffusen Sonneneinstrahlung, den Einfallswinkel der direkten Sonnenstrahlung sowie der Grad der Abschattung bereitgestellt. Ferner wird für jede außenluftberührende Zonenoberfläche die Außentemperatur sowie die Windgeschwindigkeit

keit in Abhängigkeit der Höhe vorgegeben. Das Nutzungsmodell liefert dem Raummodell das Nutzungsprofil sowie Informationen über die Anzahl der im Raum befindlichen Personen und damit die Wärmemenge, die durch die Personen in das Raummodell abgegeben wird. Das Reglermodell bezieht durch das Nutzungsmodell den zeitlichen Verlauf der Sollraumtemperaturen. Aus diesen Daten und der durch das Raummodell bereitgestellten Raumlufttemperatur sowie je nach Reglermodell zusätzlich auch Klimadaten, berechnet der Regler die Betriebszeiten sowie die Betriebsintensität der Heizungsanlage, was letztendlich als konvektive- sowie Strahlungswärme in das Raummodell abgegeben wird. Ferner werden in einem Szenario der Grad der Verschattung der Fensterflächen für ein Raummodell, sowie dessen notwendige Luftwechselrate berechnet.

Im Folgenden werden die Teilmodelle eines Simulationsszenarios beschrieben.

4.3.1. Raum- und Heizungsmodelle

Um die Entwicklung einer breit einsetzbaren Methode zur Bestimmung eines geeigneten Raumtemperaturreglers für ein konkretes Raummodell samt Heizungsmodell zu gewährleisten und zur Abdeckung einer großen Bandbreite von Anwendungsfällen, werden vier Raummodelle entwickelt. Diese unterscheiden sich wesentlich in ihrer Größe, den bauphysikalischen Eigenschaften ihrer Begrenzungsflächen, ihrer Ausrichtung bezüglich der Himmelsrichtung und der Art ihrer Heizungsanlagen. Obgleich die Räume und Heizungsanlagen als eigenständige Modelle realisiert sind, werden sie im Folgenden zusammen betrachtet, da jedes Raummodell mit einem konkreten, feststehenden Heizungsmodell versehen ist. Im Einzelnen handelt es sich bei den Raummodellen um:

- einen freistehenden Einzelraum, im Folgenden bezeichnet als Gartenhaus mit wassergeführter Radiatorheizung
- einen Büroraum mit wassergeführter Fußbodenheizung
- einen kleinen Konferenzraum mit wassergeführter Radiatorheizung sowie
- ein Klassenzimmer mit wassergeführter Radiatorheizung

Nachfolgend werden diese Modelle vorgestellt sowie deren Modellierung erläutert.

Modellierung und Simulation einer thermischen Zone

Die Raummodelle basieren auf dem Modelltemplate `Building1Zone1DBox`, welches durch die *BuildingSystems*-Bibliothek (siehe Abschnitt 4.2) bereitgestellt wird. Dieses Modell ist aus Instanzen der Grundmodellklassen Wand-, Fenster-, Raumluft- und Zonenmodell, welche ebenfalls anwendungsbereit in der Bibliothek verfügbar sind, aufgebaut. Das Template beschreibt eine einzelne quaderförmige thermische Zone, welche von sechs opaken Begrenzungsflächen (Wandmodelle) und eventuell in diese integrierte Fensterflächen (Fenstermodelle) umgeben ist. Innerhalb des Zonenmodells wird im Raumluftmodell eine einfache Energiebilanz für die feuchte Raumluft berechnet sowie die Möglichkeit gegeben, sich im Luftvolumen befindliche konvektive

Wärmequellen sowie einen Außenluftwechsel anzugeben. Die Luftdurchmischung innerhalb des Raumlufmodells (Zone) wird als ideal angenommen, d.h. die Temperatur an jedem Punkt der Zone ist identisch. Das im Template `Building1Zone1DBox` verwendete Zonenmodell dient der Festlegung der Zonengeometrie und stellt die Schnittstellen zum Raumlufmodell, den Zonenumschließungsflächen und dem umgebenden Klimamodell bereit. Das Wandmodell legt für dessen sechs Instanzen die geometrische Form (quaderförmig) sowie deren Abmessungen (Länge, Breite, Dicke) fest. Des Weiteren wird hier der stoffliche Aufbau der Wände festgelegt. Dies geschieht durch Angabe der Parameter λ - Wärmeleitfähigkeit, c - spezifische Wärmekapazität sowie ρ - Dichte für jede am Aufbau der Wand beteiligte Schicht. In der *BuildingSystems*-Bibliothek wird dazu der Modelica Klassentyp `record`, welcher speziell zum Sammeln und Verwalten von Daten vorgesehen ist, genutzt. *Modelica*-Code 4.1 zeigt dies exemplarisch für das Material Putz.

```
record Putz =
  BuildingSystems.HAM.Data.MaterialProperties.BaseClasses.
  MaterialThermalGeneral (
    name="putz" ,
    lambda=0.87 "in W/m K" ,
    c=1000.0 "in J/kg K" ,
    rho=1800.0 "kg/m3" );
```

Modelica-Code 4.1 *Angabe der Eigenschaften des Materials Putz*

Die Aneinanderreihung mehrerer Materialien zur Modellierung einer Begrenzungsfläche erfolgt unter Angabe der Anzahl der Materialien (`nLayer`), deren jeweiliger Dicke (`thickness`) sowie Art (`material`) ebenfalls in einem *Modelica*-Record (beispielhaft angegeben in *Modelica*-Code 4.2).

```
record Wand "Parametrisierung einer Begrenzungsfläche"
  extends
    BuildingSystems.Buildings.Data.Constructions.
    OpaqueThermalConstruction (
      nLayers=5,
      thickness={0.01,0.05,0.15,0.1,0.01},
      material={data.solids.Putz(),
                data.solids.Styropor(),
                data.solids.Beton(),
                data.solids.Styropor(),
                data.solids.Putz()});
end Wand;
```

Modelica-Code 4.2 *Modellierung einer Begrenzungsfläche*

Jede der sechs modellierten Begrenzungsflächen wird als Parameter an das Zonen-Template übergeben. Sind Fenster in die Begrenzungsflächen integriert, werden ihre Eigenschaften ebenfalls in einem *Modelica*-Record durch Angabe der Anzahl der Fensterscheiben `nPanels`, deren jeweiliger Glasdicke `thickness`, des Wärmedurchgangskoeffizienten (auch U-Wert) für Glas `UValGla` und Rahmen `UValFra` sowie des Energiedurchlassgrades (auch g-Wert) `g` beschrieben. *Modelica*-Code 4.3 zeigt einen solchen Record beispielhaft. Die geometrischen Abmessungen Höhe `widthWindow`

und Breite `heightWindow` sowie der prozentuale Anteil des Rahmens an der Gesamtfläche des Fensters `framePortionWindow` werden direkt als Parameter ins Modelltemplate eingetragen.

```

record Fenster "Parametrisierung eines Fensters"
  extends
    BuildingSystems.Buildings.Data.Constructions.TransparentConstruction (
      final nPanes=1,
      thickness={0.025},
      UValGla = 1.1,
      UValFra = 2.8,
      g = 0.5)
end Fenster;

```

Modelica-Code 4.3 Angabe der Fenstereigenschaften

Durch Setzen des Parameters `use_GSCWindow1_in=true` (bzw. `use_GSCWindow2_in=true`, `use_GSCWindow3_in=true`, `use_GSCWindow4_in=true` je nach Begrenzungsfläche, in der ein Fenster inkludiert ist) wird für das entsprechende Fenstermodell ein Anschluss für eine Verschattungseinrichtung aktiviert. Dieser erfordert einen Wert für den Grad der Verschattung zwischen 0.0 für den Fall, dass das Fenster nicht, und 1.0 für den Fall, dass das Fenster vollkommen verschattet ist. Im Rahmen dieser Arbeit berechnet sich der Grad der Verschattung G der Fenster für jedes Raummodell durch Gleichung (4.1). Die boolesche Größe *Belegung* gibt an, ob der Raum belegt ist. T_{Raum} bezeichnet die aktuelle Raumlufttemperatur, T_{Ziel} die Soll-Raumlufttemperatur und I_{dir} die direkte solare Strahlung, die auf horizontale Flächen einstrahlt.

$$G = \begin{cases} 0,9 & \text{falls } Belegung = \text{true} \text{ und } T_{\text{Raum}} > T_{\text{Ziel}} + 2\text{K} \text{ und } I_{\text{dir}} > 100 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \\ 0,2 & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.1)$$

Neben den genannten Parametern, welche die eigentliche thermische Zone spezifizieren, sind Angaben über die Randbedingungen der Zone notwendig. Im genutzten Template `Building1Zone1DBox` wird für jede Begrenzungsfläche angegeben, ob deren Außenbedingungen vom Wettermodell vorgegeben werden, ob sie adiabatisch sind oder ob eine konstante Temperatur auf der Wandaußenseite anliegt. Zur Simulation einer thermischen Zone ist ferner die Spezifikation von Wetterbedingungen notwendig. Die *BuildingSystems*-Bibliothek stellt dafür ein parametrierbares Wettermodell zur Verfügung. Innerhalb des Modells ist es möglich, aus einer Vielzahl von Wetterdatensätzen, die aus der Meteonorm-Datenbank [Met20a] stammen und die klimatischen Bedingungen von Standorten im In- und Ausland repräsentieren, auszuwählen. Das Wettermodell versorgt die thermische Zone mit der Außenlufttemperatur, der Außenfeuchte, direkter und diffuser Strahlung sowie Windgeschwindigkeit und -richtung.

Raumlufttemperatur und operative Raumtemperatur

Innerhalb der Raummodelle werden die zwei Temperaturen Raumlufttemperatur T_{Raum} und operative Temperatur T_{operativ} unterschieden. Die Raumlufttemperatur T_{Raum} ist die messbare Temperatur des Luftvolumens im Raum. Die operative Raumtemperatur T_{operativ} ist die durch den Menschen wahrgenommene Temperatur im Raum ([OWC19]). Sie wird im Modell `Buildings`.

`BaseClasses.AirvolumeCompressible0D` der *BuildingSystems*-Bibliothek nach Gleichung (4.2) berechnet.

$$T_{\text{operativ}} = \frac{T_{\text{Raum}} + T_{\text{mittelOberfl}}}{2} \quad (4.2)$$

$T_{\text{mittelOberfl}}$ beschreibt die mittlere Oberflächentemperatur der das Raummodell umgebenden Begrenzungsflächen. Sie wird in der *BuildingSystems*-Bibliothek im Modell `Buildings.BaseClasses.RadiationDistribution` berechnet. Wird im Rahmen dieser Arbeit die Raumtemperatur bewertet, z.B. bei der Bewertung des Nutzerkomforts, wird die operative Raumtemperatur T_{operativ} ausgewertet. Wird die Raumtemperatur für einen technischen Vorgang benötigt, wie z.B. der Vergleich zwischen Soll- und Istwert in einem Reglermodell, so wird T_{Raum} genutzt, da diese mit üblichen Mitteln leicht messbar ist und in der praktischen Anwendung eines Raumreglers immer zur Verfügung steht.

Gartenhausmodell

Das Modell des Gartenhauses besitzt eine thermische Zone und wird als freistehender Raum modelliert. Das heißt, an allen nach außen gerichteten Begrenzungsflächen der Zone, ausgenommen an der des Fußbodens, herrschen Umgebungsbedingungen vor. Abbildung 4.3 zeigt eine grafische Repräsentation des Gartenhausmodells.



Abbildung 4.3. Grafische Repräsentation des Gartenhauses (Quelle: Fraunhofer IIS EAS)

Es besitzt eine rechteckige innere Nutzfläche von 30 m^2 , rechteckige Wandflächen sowie ein Flachdach und wird als einzelne thermische Zone unter Zuhilfenahme des Templates `Building1Zone1DBox` (vgl. Abschnitt 4.3.1), entnommen aus der *BuildingSystems*-Bibliothek, in der Sprache *Modelica* modelliert. Die vier Begrenzungsflächen, welche die Wände repräsentieren, sind gleich aufgebaut und aus den Materialien 10 mm Putz, 50 mm Styropor, 15 cm Beton, 10 cm Styropor und 10 mm Putz schichtweise von innen nach außen zusammengesetzt. Das Dach besteht aus 15 cm Steinwolle und 30 mm Tondachsteinen und der Fußboden aus einer 15 cm dicken

Betonschicht. Die Eigenschaften der Materialien werden durch die Angabe der Parameter c - spezifische Wärmekapazität, λ - Wärmeleitfähigkeit und ρ - Dichte charakterisiert.

Die nach Süd-Westen sowie Nord-Osten ausgerichteten Begrenzungsflächen besitzen je ein Fenster, deren Eigenschaften ebenfalls im Template der thermischen Zone angegeben werden. Die Fenster haben eine Höhe von 1,35 m und eine Breite von 1,4 m. Der Rahmenanteil beträgt 20 %. Durch Setzen der Booleschen Parameter `use_GSCWindow1_in = true` und `use_GSCWindow2_in = true` besitzen die Fenster einen Anschluss für eine Verschattungseinrichtung. Als Standort für das Gartenhausmodell wird im Template des Wettermodells zunächst Chemnitz mit den dazugehörigen Wetterbedingungen ausgewählt. Im weiteren Verlauf der Untersuchungen werden auch andere Standorte betrachtet.

Die die Zone umgebenden Begrenzungsflächen (vier Wände, Dach) haben, mit Ausnahme des Fußbodens, Kontakt zur Umwelt, d.h. sie sind den vorherrschenden Wetterbedingungen ausgesetzt.

Das Modell des Gartenhauses wird durch ein Modell einer wassergeführten Radiatorheizung geheizt. Dazu wird das Modell `BuildingSystems.Fluid.HeatExchanger.Radiators.RadiatorEN442_2` genutzt. Die im Modell erforderlichen Parameter orientieren sich an den typischerweise genutzten Heizkörperfabrikaten, die der europäischen Norm EN 442-2 entsprechen. Details zur Modellierung können der Modelldokumentation [Bui21b] entnommen werden.

Büromodell

Das Büromodell wird durch eine thermische Zone unter Zuhilfenahme des Templates `Building1Zone1DBox` (vgl. Abschnitt 4.3.1) modelliert. Als Modellvorlage dient ein real existierender Büroraum, der Platz für eine einzelne Person bietet. Abbildung 4.4 zeigt ein Foto des Büros.



Abbildung 4.4. Büroraum (Quelle: eigene Fotografie)

Das Modell des Büroraumes besitzt eine rechteckige Nutzfläche von $15,5 \text{ m}^2$ und rechteckige Begrenzungsflächen, welche die Wände und die Decke repräsentieren. Da die zur Modellierung der Begrenzungsflächen notwendigen Parameter nur für die kompletten Begrenzungsflächen und nicht für die an deren Aufbau beteiligten Materialschichten bekannt sind, werden die Begrenzungsflächen als eine einzelne Schicht unter Angabe der für die gesamte Begrenzungsfläche geltenden Parameter c , λ und ρ modelliert. Die Materialschichten, aus denen der Fußboden aufgebaut ist, sind bekannt und werden zur Modellierung genutzt. Der Fußboden besteht, von innen nach außen, aus den Schichten Industrieparkett, Sichtestrich, Dünnschichtestrich, Tackerplatte.FBH und Polystyrolschaum. Die nach Westen ausgerichtete Begrenzungsfläche besitzt ein Fenster, welches eine Höhe von $2,1 \text{ m}$ (abweichend von Abbildung 4.4) und eine Breite von 2 m aufweist. Der Rahmenanteil beträgt 20% . Das Modell des Büroraumes wird durch ein Modell einer wassergeführten Fußbodenheizung geheizt. Diese wird durch das Modell `SingleCircuitSlab` der *Modelica*-Bibliothek *Buildings* [WZNP14] (`Buildings.Fluid.HeatExchangers.RadiantSlabs.SingleCircuitSlab`) beschrieben. Die Funktionsweise des Modells `SingleCircuitSlab` kann der Modelldokumentation der *Buildings*-Bibliothek ([WZNP14]) entnommen werden, ebenso seine Parameter und deren Bedeutung.

Konferenzraummodell

Das Modell eines kleinen Konferenz- oder Besprechungsraumes wurde in Anlehnung an einen im Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen, Institutsteil Entwicklung Adaptiver Systeme (Fraunhofer IIS EAS) verfügbaren Besprechungsraum erstellt. Das Foto in Abbildung 4.5 zeigt ihn.



Abbildung 4.5. Konferenzraum (Quelle: Fraunhofer IIS/EAS)

Das Modell besitzt eine rechteckige innere Nutzfläche von 52 m^2 und eine Höhe von $3,7 \text{ m}$. Die Begrenzungsflächen, welche die Wände und die Decke repräsentieren, sind ebenfalls rechteckig. Die Begrenzungsflächen, die nach Norden und Süden zeigen, haben den gleichen Aufbau. Sie sind von innen nach außen aus $3,5 \text{ cm}$ Putz, 20 cm Vollklinker und $3,5 \text{ cm}$ Putz zusammengesetzt. Diese Begrenzungsflächen werden im Modell durch die Parameter `constructionWall2` und `constructionWall4` angegeben. Die nach Osten ausgerichtete Begrenzungsfläche wird durch den Parameter `constructionWall3` des Modells `Building1Zone1DBox` vorgegeben. Sie ist von innen nach außen aus $2,25 \text{ cm}$ Putz, 30 cm Vollklinker und $2,25 \text{ cm}$ Putz aufgebaut. Die nach Westen ausgerichtete Begrenzungsfläche wird durch den Parameter `constructionWall4` vorgegeben. Sie besteht von innen nach außen aus den Materialien $3,75 \text{ cm}$ Putz, 40 cm Vollklinker und $3,75 \text{ cm}$ Putz. Die Begrenzungsfläche, die den Fußboden repräsentiert, ist von innen nach außen aus den Materialien $1,0 \text{ cm}$ Teppichboden, 40 cm Leichtbeton und $5,0 \text{ cm}$ Putz aufgebaut. Die letzte Begrenzungsfläche aus den Materialien $3,75 \text{ cm}$ Putz, 40 cm Leichtbeton und $3,75 \text{ cm}$ Putz - ebenfalls von innen nach außen - repräsentiert die Decke des Raummodells. Die nach Westen ausgerichtete Begrenzungsfläche besitzt ein Fenster der Höhe $2,6 \text{ m}$ und der Breite $6,3 \text{ m}$ mit einem Rahmenanteil von 20% . Das Modell des Konferenzraumes wird durch das gleiche Modell einer wassergeführten Radiatorheizung, wie es auch im Gartenhausmodell genutzt wird, geheizt.

Klassenraummodell

Dem Modell des Klassenraumes liegen Daten der Plusenergie-Grundschule Hohen Neuendorf zugrunde. Die Grundschule ist ein Demonstrationsobjekt, welches im Rahmen der BMWI-Begleitforschung *EnEff:Schule* [EnE17] überwacht wurde. Abbildung 4.6 zeigt beispielhaft einen Klassenraum dieser Schule, in Anlehnung dessen das im Folgenden beschriebene Modell erstellt wurde.



Abbildung 4.6. Klassenraum [Lü11]

Das Modell des Klassenraumes beschreibt eine quaderförmige thermische Zone mit einer Nutzfläche von 98 m^2 . Es basiert auf dem im Abschnitt 4.3.1 beschriebenen Zonen-Templete der *BuildingSystems* - Bibliothek. Das Modell des Klassenzimmers hat eine Wandhöhe von $4,1 \text{ m}$. Die Begrenzungsflächen sind als in Reihe liegende Schichten unterschiedlicher Materialien modelliert. Die nach Osten und Westen ausgerichteten Begrenzungsflächen, welche im Modell durch die Parameter `constructionWall1` und `constructionWall3` repräsentiert werden, sind von innen nach außen aus den Materialien $4,0 \text{ cm}$ Hartschaumplatte (Parametername im Modell: `ExpandedPlasticSlab`) und $28,0 \text{ cm}$ Stahlbeton (`ConcreteReinforced`) zusammengesetzt. Die nach Süden ausgerichtete Begrenzungsfläche, welche im Modell durch Angabe des Parameters `constructionWall4` spezifiziert wird, ist von innen nach außen durch Schichten der Materialien $2,5 \text{ cm}$ Holz, $10,0 \text{ cm}$ Mineralwolle und $2,5 \text{ cm}$ Holz aufgebaut. Die nach Norden gerichtete Begrenzungsfläche, welche ein Fenster besitzt und deren Eigenschaften durch Angabe des Parameters `constructionWall2` festgelegt werden, besteht aus den Materialien (von innen nach außen) $2,5 \text{ cm}$ Gipskarton (Parametername im Modell: `Gipskartonplatte`), $4,0 \text{ cm}$ Holz (`Wood`), $4,0 \text{ cm}$ Mineralwolle (`MineralWool`), 4 cm Holz, 2 cm Mineralwolle und $1,2 \text{ cm}$ Holz. Das Fenster hat eine Höhe von $3,5 \text{ m}$ und eine Breite von $8,4 \text{ m}$. Davon entfallen 30% auf den Fensterrahmen. Die den Fußboden der Zone repräsentierende Begrenzungsfläche (Parametername im Modell `constructionFloor`) ist von innen nach außen durch die Materialien $2,0 \text{ mm}$ Linoleum, $7,0 \text{ cm}$ Zement, $2,0 \text{ mm}$ Polyethylen (PE)-Folie, $22,0 \text{ cm}$ Hartschaumplatte, $5,0 \text{ mm}$ Bitumen, $25,0 \text{ cm}$ Stahlbeton, $2,0 \text{ mm}$ PE-Folie und $12,0 \text{ cm}$ Schaumstoff (`Ethafoam`) zusammengesetzt. Die die Zimmerdecke repräsentierende Begrenzungsfläche setzt sich aus Linoleum, Zement, Hartschaumplatte und Stahlbeton zusammen. An der nach Norden gerichteten Begrenzungsfläche (Wand) des Modells liegen Wetterbedingungen an. Die Randbedingungen der übrigen drei vertikalen Begrenzungsflächen sowie die der horizontalen Begrenzungsfläche, welche die Decke des Raumes beschreibt, werden durch die Angabe einer konstanten Temperatur festgelegt.

Das Modell des Klassenraumes wird durch ein Modell einer wassergeführten Radiatorheizung geheizt. Dazu wird das Modell

`BuildingSystems.Fluid.HeatExchanger.Radiators.RadiatorEN442.2` genutzt. Die im Modell erforderlichen Parameter orientieren sich an den typischerweise genutzten Heizkörperfabrikaten, die der DIN EN 442-2 ([DIN15]) entsprechen. Details zur Modellierung können der Modelldokumentation [Bui21b] entnommen werden.

In Tabelle 4.1 werden die wesentlichen Eigenschaften der vier vorgestellten Raummodelle zusammengefasst und gegenübergestellt.

Tabelle 4.1. Gegenüberstellung der Raummodelle

	Gartenhaus	Büro	Konferenzraum	Klassenraum	
Höhe h	3,5 m	2,7 m	3,7 m	4,1 m	
Breite b	5 m	2,9 m	5,7 m	7,7 m	
Länge l	6 m	5,35 m	9,1 m	12,7 m	
Fensterfläche	1,35 m x 1,4 m = 1,89 m ²	2,1 m x 2 m = 4,2 m ²	2,6 m x 6,3 m = 16,4 m ²	3,5 m x 8,4 m = 29,4 m ²	
Rahmenanteil	20 %	20 %	20 %	30 %	
g-Wert Fenster	0,5	0,5	0,85	0,8	
U-Wert Fenster	1,1 $\frac{W}{m^2K}$	1,05 $\frac{W}{m^2K}$	2,3 $\frac{W}{m^2K}$	0,8 $\frac{W}{m^2K}$	
Wandaufbau (Schichten von innen nach außen)	<u>alle Wände:</u> Putz Styropor Beton Styropor Putz	Schichten nicht bekannt nur Angabe von <i>c, λ, ρ</i> für gesamte Wand	<u>alle Wände:</u> Putz Vollklinker Putz	<u>Ost/West:</u> Hartschaumplatte Stahlbeton <u>Süd:</u> Holz Mineralwolle Holz	<u>Nord:</u> Gipskarton Holz Mineralwolle Mineralwolle Holz
Deckenaufbau	Steinwolle Tondachsteine	wie Wände	Putz Leichtbeton Putz	Linoleum Zement Hartschaumplatte Stahlbeton	
Fußbodenaufbau	Beton	Industrieparkett Sichtestrich Dünnheizestrich	Teppich Leichtbeton Putz Tackerplatte_FBH Polystyrolschaum	Linoleum Zement Hartschaumplatte Stahlbeton	
Heizung	Radiatorheizung	Fußbodenheizung	Radiatorheizung	Radiatorheizung	

Anhang A listet die Modellparameter der vier Raummodelle detailliert auf. Zusätzlich werden die Materialien, aus denen die Begrenzungsflächen aufgebaut sind, die Eigenschaften der Fenstermodelle und die Parametrisierung der Heizungsmodelle angegeben.

4.3.2. Standortmodelle

Die Raummodelle sollen für verschiedene Standorte gerechnet werden. Dafür liefert die *BuildingSystems*-Bibliothek eine Vielzahl an Standortmodellen, die komfortabel über ein Dropdown-Menü innerhalb des Wettermodells der Bibliothek ausgewählt werden können. Die den Standortmodellen zugrundeliegenden Datensätze stammen zum einen aus Testreferenzjahren für unterschiedliche Standorte innerhalb Deutschlands, zum anderen aus der Klimadatenbank Meteonorm für Metropolen der Welt und vom Deutschen Wetterdienst für Potsdam für die Jahre 2003 bis 2016. Die in der Bibliothek enthaltenen Standorte können Abbildung 4.7 entnommen werden.

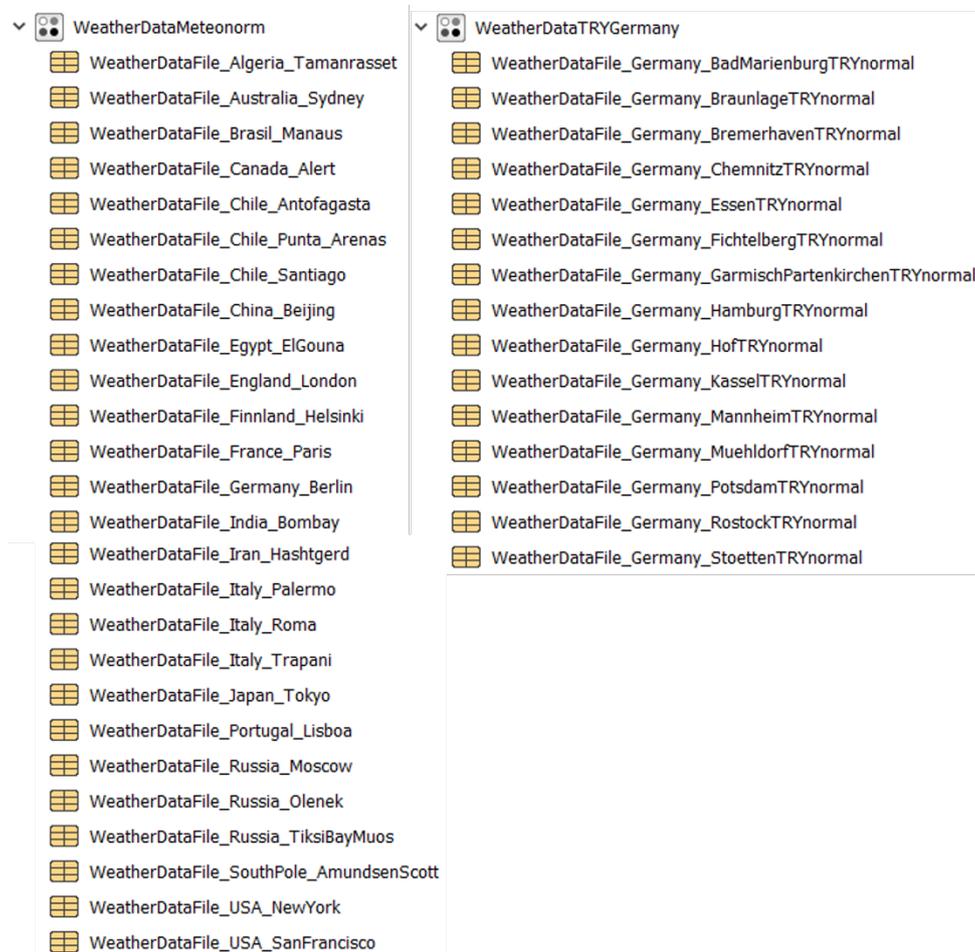


Abbildung 4.7. Übersicht der Klimadatenätze der *BuildingSystems*-Bibliothek

Das Standortmodell der *BuildingSystems*-Bibliothek beinhaltet folgende Wetterinformationen:

- Luftdruck am Boden p_{ground} in Pa
- Absolute Feuchte der Außenluft x_A in $\frac{\text{kg}}{\text{kg}}$
- Temperatur der Außenluft T_A in K
- Relative Feuchte der Außenluft ϕ_{air}
- Direkte solare Strahlung auf horizontale Flächen I_{dir} in $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$
- Diffuse solare Strahlung auf horizontale Flächen I_{dif} in $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$
- Windgeschwindigkeit v_{wind} in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
- Windrichtung α_{wind} in $^\circ$
- Bewölkungsgrad des Himmels c_{cover}
- Temperatur des Himmels T_H in K
- Geografische Breite ϕ_{geo} in $^\circ$
- Geografische Länge λ_{geo} in $^\circ$

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Standortmodelle von Chemnitz, Helsinki und Moskau genutzt. Aus den Standortmodellen werden nur die Außentemperatur und die direkte solare Strahlung genutzt.

4.3.3. Nutzungsmodelle

Für jedes Szenario wird ein Nutzungsprofil festgelegt. Dieses muss als zeitabhängiges Signal im Simulationsmodell zur Verfügung gestellt werden. Die dazu notwendigen Belegungsinformationen liegen in Form eines Textfiles vor. Tabellarisch sind dort folgende Daten erfasst:

- Zeitpunkt t in s
- Startzeitpunkt der aktuellen Belegungsphase $tOccStart$ in s
- Startzeitpunkt der kommenden Belegungsphase $tNextOccStart$ in s
- Endzeitpunkt der aktuellen Belegungsphase $tOccEnd$ in s
- Endzeitpunkt der kommenden Belegungsphase $tNextOccEnd$ in s
- Anzahl der Personen $Anz_Personen$ der aktuellen Belegungsphase
- Dauer der kommenden Belegungsphase $nextDuration$ in s

Ferner werden im Textfile das Datum und die Uhrzeit der aktuellen Belegungsphase hinterlegt. Diese werden später im Modell jedoch nicht verarbeitet, sondern dienen nur dem Nutzer zur Orientierung innerhalb des Textfiles. Tabelle 4.2 zeigt einen Ausschnitt des Textfiles für die Belegung des Büroraummodells im Szenario Arbeitsphase.

Tabelle 4.2. Ausschnitt aus einem Textfile mit Belegungsinformationen

#1	#Zeit	tOccStart	tNextOccStart	tOccEnd	tNextOccEnd	Anz_Personen	nextDuration	Datum	Uhrzeit
	double	Occupancy_Arbeitsphase(26,9)							
	0	0	5126400	0	5072400	0	32400	28.2.	0
	5039999	0	5126400	0	5072400	0	32400	28.2.	0
	5040000	5040000	5126400	0	5072400	1	32400	28.2.	8
	5072399	5040000	5126400	0	5072400	1	32400	28.2.	0
	5072400	5040000	5126400	5072400	5158800	0	32400	28.2.	17
	5126399	5040000	5126400	5072400	5158800	0	32400	1.3.	0
	5126400	5126400	5212800	5072400	5158800	1	32400	1.3.	8
	5158799	5126400	5212800	5072400	5158800	1	32400	1.3.	0
	5158800	5126400	5212800	5158800	5245200	0	32400	1.3.	17
	5212799	5126400	5212800	5158800	5245200	0	32400	2.3.	0
	5212800	5212800	5299200	5158800	5245200	1	32400	2.3.	8
	5245199	5212800	5299200	5158800	5245200	1	32400	2.3.	0
	5245200	5212800	5299200	5245200	5331600	0	32400	2.3.	17
	5299199	5212800	5299200	5245200	5331600	0	32400	3.3.	0
	5299200	5299200	5385600	5245200	5331600	1	32400	3.3	8
	5331599	5299200	5385600	5245200	5331600	1	32400	3.3	0
	5331600	5299200	5385600	5331600	5418000	0	32400	3.3	17
	5385599	5299200	5385600	5331600	5418000	0	32400	4.3.	0
	5385600	5385600	5472000	5331600	5418000	1	32400	4.3	8
	5417999	5385600	5472000	5331600	5418000	1	32400	4.3.	0
	5418000	5385600	5472000	5418000	5504400	0	32400	4.3	17
	5471999	5385600	5472000	5418000	5504400	0	32400	5.3.	0
	5472000	5472000	5731200	5418000	5504400	1	32400	5.3	8
	5504399	5472000	5731200	5418000	5504400	1	32400	5.3.	0
	5504400	5472000	5731200	5504400	5763600	0	32400	5.3	17
	5731199	5472000	5731200	5504400	5763600	0	32400	6.3.	0

Für jedes Szenario wird ein separates Textfile erstellt. Dazu wurde ein Python-Skript entwickelt. Jedes Textfile wird mittels des Modells `CombiTimeTable` aus dem Package `Block.Sources` der *Modelica-Standard-Bibliothek* (`Modelica.Blocks.Sources.CombiTimeTable`) eingelesen. Dieses Modell erfordert die in Tabelle 4.2 angegebene erste und dritte Zeile. Die dritte Zeile beinhaltet den Namen der Tabelle sowie die Anzahl der Zeilen und Spalten. Den Namen benötigt das Modell `CombiTimeTable`, um die richtige Tabelle einzulesen für den Fall, dass es mehrere Tabellen in einem Textfile gibt. Die zweite Zeile ist eine Kommentarzeile zum besseren Überblick für den Modellierer. Die Belegungsinformationen im Textfile werden innerhalb des Szenarios als zeitabhängiges Signal zur Verfügung gestellt. Dies geschieht im Modell `calcTempZielFromOccSignals`, welches innerhalb der Arbeit entstand. Außerdem wird in diesem Modell ein Signal für die Zieltemperatur berechnet. Dazu werden dem Modell die Eingangsgrößen $T_{\text{Ziel belegt}}$ - Zieltemperatur bei Belegung- und $T_{\text{Ziel unbelegt}}$ - Zieltemperatur bei Nicht-Belegung - zur Verfügung gestellt. Für das Beispiel aus Tabelle 4.2 haben die Signale *Belegung* und T_{Ziel} den in Abbildung 4.8 gezeigten Verlauf. In der unteren Grafik sind die genannten Belegungsinformationen, aus denen der zeitliche Verlauf berechnet wird, eingetragen.

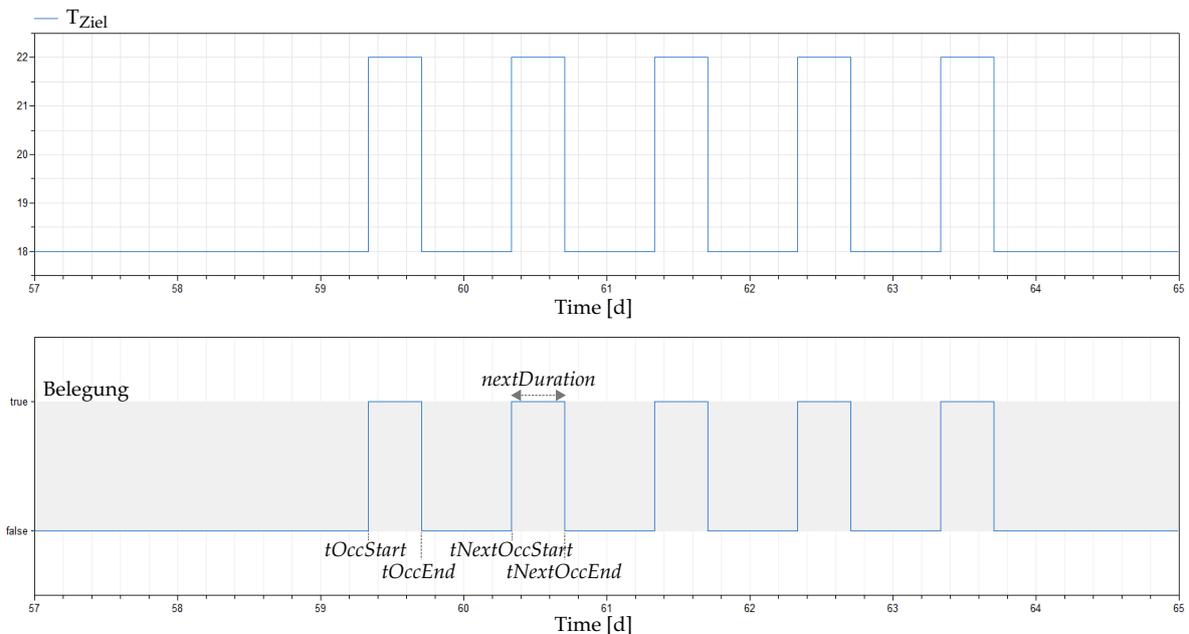


Abbildung 4.8. Zieltemperatur- und Belegungssignal aus Informationen des Textfiles berechnet

Ein Überblick über die in den Szenarien zur Anwendung kommenden Nutzungsprofile ist im Anhang C gegeben.

4.3.4. Beleuchtungsmodell

Auch die Wärmemenge, die durch Beleuchtung in das Raummodell eingebracht wird, wird in jedem Szenario berechnet. Die Berechnung erfolgt stark vereinfacht und basiert auf dem Wertungswert der Beleuchtungsstärke \bar{E}_m . Dieser beschreibt den Mittelwert der Beleuchtungsstärke, der nicht unterschritten werden darf. In der DIN EN 12464-1 [DIN11] sind für eine Vielzahl von

Arbeitsstätten in Innenräumen Mindestwerte für \bar{E}_m angegeben. Für Unterhaltungsstätten, wie beispielsweise dem Gartenhaus innerhalb des Szenario Party, ist z.B. ein Mindestwartungswert der Beleuchtungsstärke von $\bar{E}_m = 300 \text{ lx}$ angegeben. Durch Multiplikation des Wartungswertes der Beleuchtungsstärke mit der Grundfläche des Raumes A_G , erhält man den Lichtstrom Φ_v in Lumen (lm).

$$\Phi_v = \bar{E}_m \cdot A_G \quad (4.3)$$

Unter der Annahme einer LED-Beleuchtung, die für $\Phi_{v\text{LED}} = 300 \text{ lm}$ eine Leistung pro Quadratmeter $P_{\text{LED}} = 6,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ verbraucht, ergibt sich die Gesamtleistung je Quadratmeter P_{ges} , die zur Sicherstellung des gesamten geforderten Lichtstroms Φ_v nach Gleichung (4.3) benötigt wird, nach Gleichung (4.4)

$$P_{\text{ges}} = \frac{P_{\text{LED}} \cdot \Phi_{v\text{LED}}}{\Phi_v} \quad (4.4)$$

Weiterhin unter der Annahme, dass 70 % der Leistung in Wärme umgewandelt wird und ca. 10 % des Kunstlichtes den Raum durch transparente Flächen verlässt, berechnet sich die Wärmemenge Q_{flow} , welche in den Raum fließt, durch

$$Q_{\text{flow}} = P_{\text{ges}} \cdot A_G \cdot 0,9 \quad (4.5)$$

Diese Wärmemenge wird zu gleichen Teilen als Strahlung und als Konvektion in den Raum eingebracht.

4.3.5. Modell zur Berechnung der Luftwechselrate

Die Mindestluftwechselrate n_{min} zur Sicherstellung eines gesundheitlich unbedenklichen Raumklimas, wird aus dem Produkt des minimalen Außenluftbedarfs je Person $\dot{V}_{\text{min,P}}$ und dem Reziproken des Raumvolumens V_{Raum} berechnet (Gleichung (4.6)).

$$n_{\text{min}} = \frac{\dot{V}_{\text{min,P}}}{V_{\text{Raum}}} \quad (4.6)$$

Der minimale Außenluftbedarf wird bei einer bestimmten CO_2 Konzentration der Außenluft und einem bestimmten Aktivitätsgrad der Nutzer abgeschätzt ([DIN17]). Bei Abwesenheit von Personen wird eine minimale Luftwechselrate von $0,1 \frac{1}{\text{h}}$ festgelegt.

4.3.6. Reglermodelle

Für die Untersuchungen zur Eignung von Reglern für bestimmte Räume wurden drei Regler exemplarisch ausgewählt. Zum einen wurden **Zweipunkt-** und **P-Regler** als Vertretung der klassischen Regler gewählt, da sie in der Praxis gängig und weit verbreitet sind und so die Ergebnisse dieser Arbeit breit in die praktische Anwendung bringen können. Zum anderen wurde ein Regler ausgewählt, der im Rahmen eines Forschungsprojektes am Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen am Standort Dresden entwickelt wurde. Dieser **vorausschauende**

Regler (vs-Regler) ist komplexer als die bisher genannten und bezieht Kenntnisse über den Aufheiz- und Abkühlvorgang im Raum in die Regelung ein. Im Folgenden wird die Modellierung der Regler vorgestellt.

Zweipunkt- und P-Regler

Das Verhalten von Zweipunkt- und P-Regler ist hinreichend bekannt und kann bei Bedarf in der gängigen Fachliteratur zum Thema Regelungstechnik studiert werden ([Lun16]). Der in der Arbeit genutzte Zweipunktregler mit Hysterese wurde in *Modelica* modelliert. Das Modell besitzt die Eingangsgrößen Raumtemperatur T_{Raum} und Zieltemperatur T_{Ziel} . Die Ausgangsgröße **Heizen** gibt an, ob die Heizung an- oder abgeschaltet werden soll. Im Algorithmenteil des Modells erfolgt mittels einer If-Anweisung der Vergleich zwischen Raum- und Zieltemperatur. Dabei wird beachtet, dass die Raumtemperatur eine gewisse Spanne sowohl über als auch unter der Zieltemperatur liegen darf (Hysterese). Diese Temperaturspanne wird als Parameter T_{tol} (Name im Modell `temperature_tolerance`) im Modell vorgegeben.

Das Modell `LimPID` aus der *Modelica-Standard-Bibliothek* (`Modelica.Block.Continuous.LimPID`) wurde genutzt, um den P-Regler zu modellieren. Über den Parameter `controllerType` wird ausgewählt, ob das Reglermodell P, PI, PD oder PID Verhalten zeigen soll. Der Ausgang des Reglers `LimPID` ist begrenzt. Modellierungsdetails, die Bedeutung der Modellparameter und Hinweise zur Wahl dieser können der Modelldokumentation, welche neben dem Modell selbst Bestandteil der *Modelica-Standard-Bibliothek* ist, entnommen werden.

Vorausschauender Regler

Das Modell des vorausschauenden Reglers (vs-Regler) ist im Rahmen des Forschungsprojekts *enerMAT* [ene16] entstanden. Wird in einem Raum die Heizung angeschaltet, so heizt dieser sich innerhalb eines gewissen Zeitraumes auf, bis die Zieltemperatur T_{Ziel} erreicht ist. Dieser Zeitraum zwischen dem Anschalten der Heizung und dem Erreichen der gewünschten Raumtemperatur hat je nach Beschaffenheit des Raumes und Art der Heizung eine gewisse Dauer. Gleiches gilt für das Abschalten der Heizung und demzufolge Abkühlen des Raumes. Die Zeitspannen des Aufheizens und des Abkühlens des Raumes werden bei der Wahl eines geeigneten An- bzw. Abschaltzeitpunktes der Heizung durch den vs-Regler berücksichtigt. Der Regler hat demnach Kenntnis darüber, wann in der Zukunft eine bestimmte Temperatur im Raum herrschen soll. Dies setzt voraus, dass der Regler Wissen über die Aufheiz- und Abkühlvorgänge der Räume, in denen er eingesetzt wird, hat. Daher wurde das Attribut „vorausschauend“ bei der Benennung des Reglers ausgewählt. Der Regler ist besonders dann sinnvoll einsetzbar, wenn die Aufheiz- bzw. Abkühlphase eines Raumes besonders lang ist, wie z.B. bei Räumen, die durch eine Flächenheizung temperiert werden.

Der Aufheiz- und Abkühlvorgang der betrachteten Räume hat näherungsweise das Verhalten einer Exponentialfunktion (Gleichung (4.7)).

$$h(t) = g_E - (g_E - s)e^{\frac{-a}{g_E - s}t} \quad (4.7)$$

Die charakteristischen Größen der Exponentialfunktion sind g_E - stationärer Endtemperaturwert, s_0 - Startwert der Raumtemperatur, a_0 - Anstieg der Raumtemperatur bei Beginn des Heiz- bzw. Abkühlvorgangs. Bei Kenntnis dieser charakteristischen Größen ist die Dauer $\Delta t_{\text{on}}(t)$ für den Aufheizvorgang bzw. $\Delta t_{\text{off}}(t)$ für den Abkühlvorgang aus Gleichung (4.7), wie in Gleichung (4.8) angegeben, berechenbar.

$$\Delta t_{\text{on,off}}(t) = -\frac{g_E - s_0}{a_0} \ln \left(\frac{T_{\text{Ziel}} - g_E}{g_E - s_0} \right) \quad (4.8)$$

Der Parameter T_{Ziel} in Gleichung (4.8) bezeichnet die gewünschte Zieltemperatur im Raum. Die Größen g_E und a_0 sind charakteristisch für jeden Raum. Sie hängen von der Außentemperatur $T_A(t)$ des Raumes, von den Temperaturen der den Raum umgebenden Nachbarräumen $T_N(t)$, der Vorlauftemperatur der Heizung $T_S(t)$ und der Raumtemperatur $T_{\text{Raum}}(t_{\text{start}})$ beim Beginn t_{start} des Aufheiz- bzw. des Abkühlvorgangs ab. Die Größe s_0 ist durch die Wahl der Initialwerte für die Simulation bekannt. Bei der Berechnung des Abkühlvorgangs spielt die Vorlauftemperatur der Heizung keine Rolle.

Die Bestimmung von g_E und a_0 sowie die Funktionsweise des Reglers wird in Anhang B detailliert beschrieben.

Zur Demonstration seiner Arbeitsweise wurde der vs-Regler über einen Zeitraum von fünf Tagen in einem Beispielraum angewendet. Abbildung 4.9 zeigt das Ergebnis. In der oberen Grafik ist die Zieltemperatur T_{Ziel} in rot und mit einem Kreuz markiert dargestellt sowie in grün der durch die Exponentialfunktion (4.7) berechnete Verlauf der Raumtemperatur T_{Raum} . Die Zieltemperatur T_{Ziel} besitzt bei Belegung einen Wert von 20 °C, bei Nichtbelegung einen Wert von 14 °C. In der unteren Grafik ist der Verlauf des Heizungssignals dargestellt, der sich aus der Berechnung der An- und Abschaltzeitpunkte t_{on} und t_{off} ergibt. Es ist zu erkennen, dass t_{on} und t_{off} nach einer gewissen Einschwingzeit von etwa einem Tag im Verlauf der weiteren vier simulierten Tage so durch den vs-Regler berechnet werden, dass die Raumtemperatur immer zu Beginn eines Belegungszeitraumes die gewünschte Zieltemperatur von 20 °C erreicht und so der Nutzerkomfort sichergestellt wird und zum Ende der Belegung die Zieltemperatur von 20 °C unterschreitet, um keine unnötige Heizenergie zu verbrauchen.

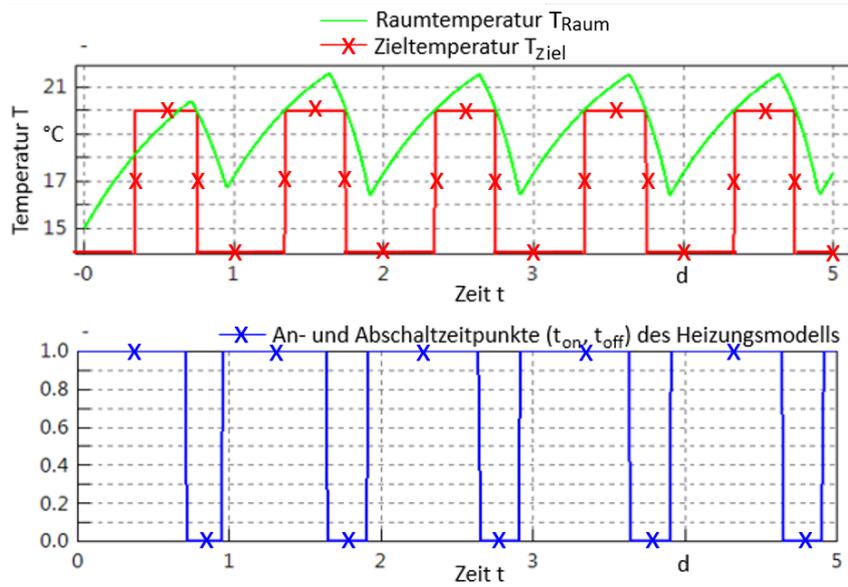


Abbildung 4.9. Raumtemperatur T_{Raum} geregelt durch vs-Regler und Zieltemperatur T_{Ziel} (oben) sowie zugehörige An- und Abschaltzeitpunkte des Heizungsmodells (unten), abgewandelt nach [MCH⁺15a]

Der Berechnung der Raumtemperatur innerhalb des Reglermodells liegt die Annahme zugrunde, dass sich der Aufheiz- und der Abkühlvorgang der Raumluft exakt durch eine Exponentialfunktion beschreiben ließe. Dies ist jedoch in der Praxis nicht der Fall, da neben den berücksichtigten Größen $T_A(t)$, $T_N(t)$, $T_{\text{Raum}}(t_{\text{start}})$ und $T_S(t)$ weitere Größen, wie z.B. die solare Strahlung, die Raumtemperatur beeinflussen. Um dennoch zu erreichen, dass die Raumtemperatur genau mit Beginn der Belegung die Zieltemperatur erreicht und mit Ende der Belegung die Zieltemperatur wieder unterschreitet, wurde das vs-Reglermodell um zwei Parameter Opt_{p1} und Opt_{p2} erweitert. Opt_{p1} ist ein Faktor zur Verlängerung oder Verkürzung der im Modell berechneten notwendigen Heizdauer zum Erreichen der Zieltemperatur bei Beginn der Belegung (Gleichung (4.9)). Opt_{p2} ist ein Faktor zur Verlängerung oder Verkürzung der notwendigen Abkühldauer des Raummodells zum Unterschreiten der Zieltemperatur am Ende jeder Belegung (Gleichung (4.10)).

$$\Delta t_{\text{on}}(t) = Opt_{p1} \left(-\frac{g_E - s_0}{a_0} \ln \left(\frac{T_{\text{Ziel}} - g_E}{g_E - s_0} \right) \right) \quad (4.9)$$

$$\Delta t_{\text{off}}(t) = Opt_{p2} \left(-\frac{g_E - s_0}{a_0} \ln \left(\frac{T_{\text{Ziel}} - g_E}{g_E - s_0} \right) \right) \quad (4.10)$$

Diese Parameter gilt es nun so zu wählen, dass das gewünschte Verhalten der Raumtemperatur erreicht wird, auch wenn diese nicht genau der Exponentialfunktion nach Gleichung (4.7) entspricht. Im Rahmen dieser Arbeit werden Opt_{p1} und Opt_{p2} durch Optimierung gefunden. Wie diese durchgeführt und wie die notwendige Zielfunktion gewählt wird, wird im Abschnitt 4.4 beschrieben.

Damit das vs-Reglermodell arbeiten kann, benötigt es Kenntnis über die Belegung im Raum. Durch das Nutzungsmodell (Abschnitt 4.3.3) werden die Informationen bereitgestellt, zu welchem Zeitpunkt die aktuelle Belegung begonnen hat, wann sie enden wird und wann die kom-

mende Belegung beginnen und enden wird. Aus diesen Informationen wird innerhalb des vs-Reglermodells ein Belegungssignal berechnet, welches u.a. zur Berechnung des Zieltemperaturverlaufs benötigt wird.

Um das vs-Reglermodell im Rahmen eines Simulationsszenarios einsetzen zu können, besitzt es folgende Schnittstellen, die sich in Eingangs- und Ausgangsgrößen untergliedern. Eingangsgrößen sind:

- Raumtemperatur T_{Raum}
- Außentemperatur T_{A}
- Zieltemperatur im Raum bei Belegung $T_{\text{Ziel belegt}}$
- Zieltemperatur im Raum bei Nichtbelegung $T_{\text{Ziel unbelegt}}$
- Durchschnittstemperatur der Nachbarräume T_{N}
- Vorlauftemperatur der Heizung T_{S}
- Zeitpunkt des Beginns der aktuellen Belegung t_{OccStart}
- Zeitpunkt des Endes der aktuellen Belegung t_{OccEnd}
- Zeitpunkt des Beginns der anschließenden Belegung $t_{\text{NextOccStart}}$
- Zeitpunkt des Endes der anschließenden Belegung $t_{\text{NextOccEnd}}$

Die Temperaturen können sowohl in Kelvin als auch in Grad Celsius angegeben werden. Dies legt der Nutzer für jede Temperatur einzeln mittels eines Parameters fest. Die Ausgangsgrößen des Modells sind:

- Heizsignal *Heizen*
- zeitlicher Verlauf der Zieltemperatur T_{Ziel}
- Belegungssignal *Belegung*

Das reelle Heizsignal *Heizen* gibt die An- und Abschaltpunkte für das Heizungsmodell vor. T_{Ziel} ist der durch die Eingangsgrößen t_{OccStart} , t_{OccEnd} , $t_{\text{NextOccStart}}$ und $t_{\text{NextOccEnd}}$ berechnete Verlauf der Zieltemperatur. Die boolesche Größe *Belegung* gibt den Verlauf des Belegungssignals vor.

4.3.7. Festlegung der Simulationsszenarien

Insgesamt wurden 24 Simulationsszenarien entwickelt. Sie ergeben sich aus der Kombination der vier Raum- und drei Reglermodellen sowie aus zwei Nutzungszeiträumen pro Raum. Abbildung 4.10 zeigt, wie sich die Szenarien aus den einzelnen Modellen zusammensetzen. Die Szenarien, die sich nur durch das Reglermodell unterscheiden, wurden in Gruppen zusammengefasst und, zur besseren Übersichtlichkeit, mit einem Namen versehen.

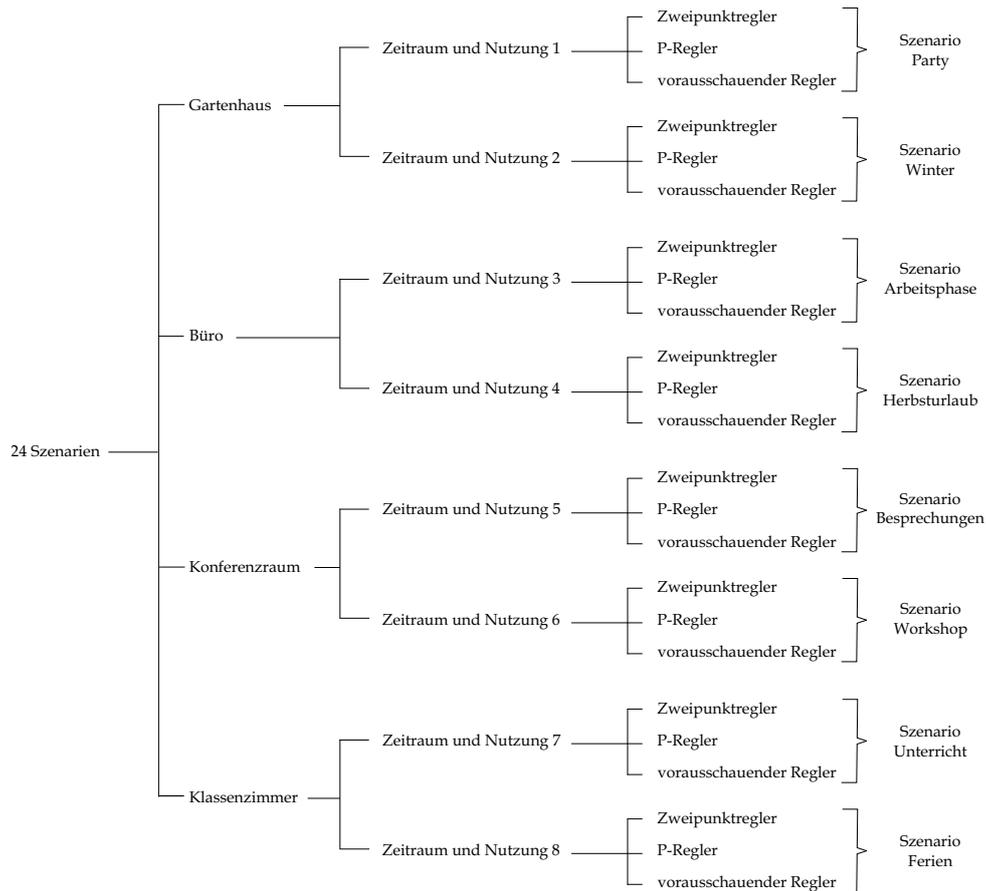


Abbildung 4.10. Zusammensetzung der Szenarien

Da ein aktiver Eingriff in die Raumtemperatur nur über eine Heizung möglich ist, werden die meisten der Szenarien zweckmäßig in die Heizperiode eines Jahres gelegt. Ebenso werden Wettermodelle von Standorten der gemäßigten Klimazone und damit kühlen Temperaturen gewählt wie Chemnitz, Moskau und Helsinki. Um dennoch Daten für das komplette Kalenderjahr zu erheben werden auch Szenarien untersucht, deren Simulationszeiträume im Sommer liegen. Die Wahl der Belegungsdauer und Personenzahlen während einer Belegung orientiert sich am Zweck der Räume und ihrer jeweiligen Nutzung. Es werden Belegungen mit unterschiedlich vielen Personen, die sich unterschiedlich lange im Raum befinden, vorgegeben. Dies liegt neben der durch die Räume vorgegebenen Sinnhaftigkeit vor allem in der angestrebten Vielfalt der Szenarien zur Sicherung einer möglichst weitreichenden Gültigkeit der Forschungsergebnisse begründet. Die durch die Personen abgegebene Wärmemenge wird in jedem Szenario vorgegeben und zu gleichen Teilen als Strahlung und durch Konvektion in den Raum abgegeben. Auch die im Raum benötigte Luftwechselrate bei Anwesenheit zur Sicherstellung eines gesundheitlich unbedenklichen Mindestluftwechsels n_{\min} wird im Szenario festgelegt. Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Szenarien liefert Anhang C.

4.3.8. Test und Simulation der Szenarien

Die modellierten Szenarien setzen sich aus vielen Teilmodellen zusammen und sind recht komplex. Daher sind Tests zur Sicherstellung der korrekten Funktionsweise und Auswertungen ihrer Simulationsergebnisse notwendig. Folgende Punkte werden dabei berücksichtigt:

- Test der einzelnen Teilmodelle der Szenarien
- Test der Simulationsszenarien ohne Heizen
- Test der Simulationsszenarien mit Reglermodellen

Anhand des Szenarios Arbeitsphase werden nachfolgend die durchgeführten Tests und Untersuchungen dargestellt. Sie werden so auch für die anderen Szenarien durchgeführt.

Test einzelner Teilmodelle

Einige Teilmodelle eines Szenarios wurden im Rahmen ihrer Entwicklung für verschiedene Bibliotheken oder Forschungsprojekte getestet. So stammen die Raum-, Heizungs- und Wettermodelle aus der *BuildingSystems*-Bibliothek. Die Reglermodelle stammen einerseits aus der *Modelica-Standard-Bibliothek*, andererseits aus dem Forschungsprojekt *enerMAT*. Kleinere, im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Modelle, wurden in separaten Testmodellen isoliert unter definierten Eingangsbelegungen und unter Kenntnis des gewünschten Verhaltens geprüft.

Test der Simulationsszenarien ohne Heizen

Zunächst wurde für jedes Szenario eine Variante ohne Reglermodell erstellt, um so modellierte Eigenschaften leichter überprüfen und den Einfluss des Wettermodells auf das Raummodell besser einschätzen zu können. Beim folgenden Test war das Heizungsmodell abgeschaltet, indem der Massenstrom durch die Heizung mit Null vorgegeben wurde. Für die operative, d.h. wahrgenommene Raumtemperatur T_{operativ} im Szenario Arbeitsphase ergibt sich der in Abbildung 4.11 gezeigte Verlauf.

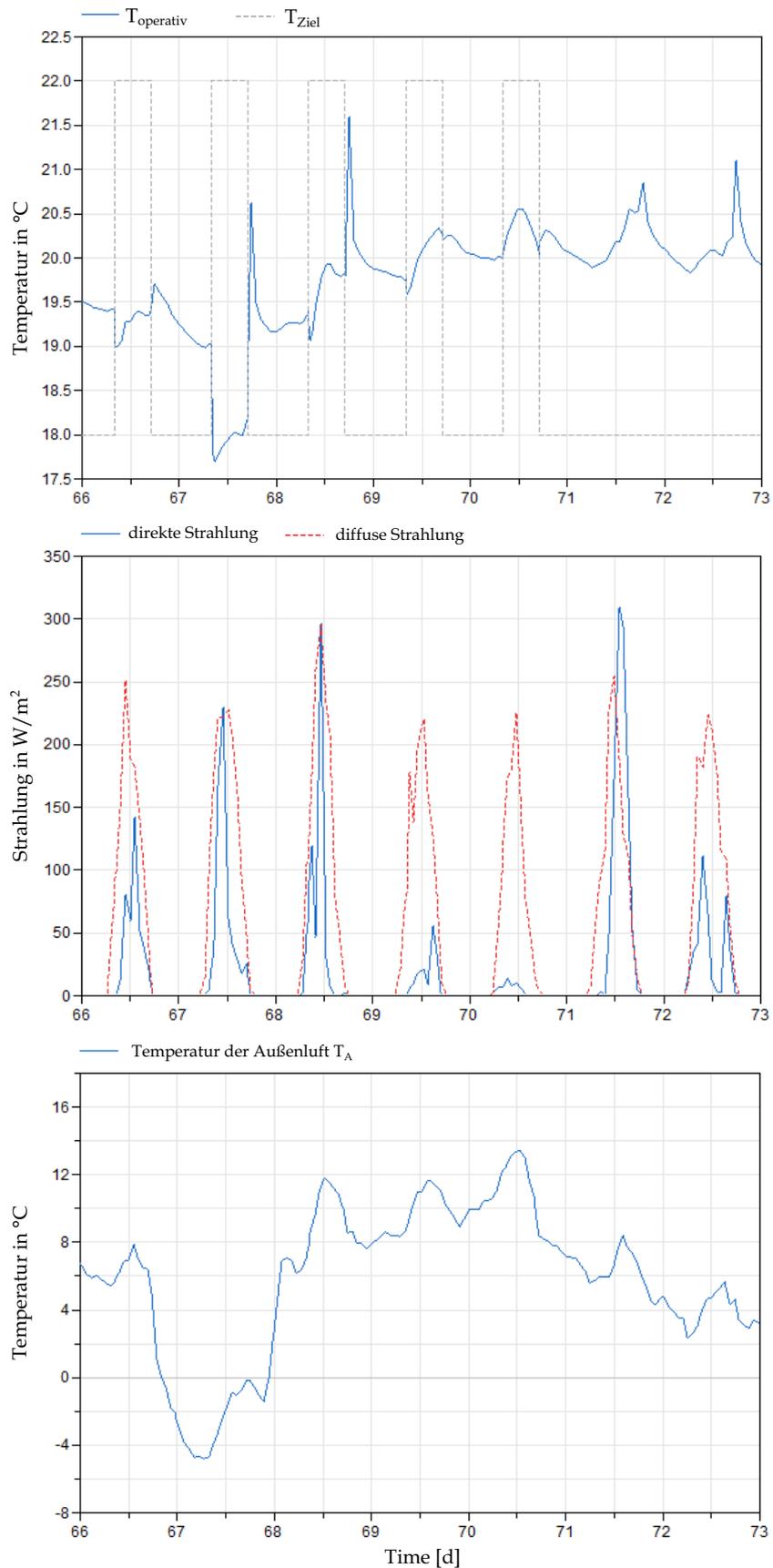


Abbildung 4.11. Operative Raumtemperatur und Zieltemperatur des Büroraummodells im Szenario Arbeitsphase am Standort Chemnitz (bei abgeschalteter Heizung und Regelung)

Für jedes Szenario wird überprüft, ob die Raumlufttemperatur bei ausgeschalteter Heizung unter der gewünschten Zieltemperatur liegt. Ist dies der Fall wird davon ausgegangen, dass die Heizung so dimensioniert ist, dass die Zieltemperatur durch Heizen erreicht werden kann. So ist beispielsweise in Abbildung 4.11 zu erkennen, dass die operative Raumtemperatur während der Belegungsphasen des Raummodells, d.h. in den Zeiten, in denen die Zieltemperatur 22 °C beträgt, immer niedriger ist, als die Zieltemperatur. In diesen Phasen ist demnach durch Heizen eine höhere Temperatur zu erreichen.

Weiterhin wurde in Voruntersuchungen für jedes Szenario geprüft, ob die Zieltemperatur sowie der zeitliche Verlauf des Belegungssignals korrekt aus den vorgegebene Belegungsinformationen berechnet werden.

Test der Simulationsszenarien mit Reglermodellen

Zur Untersuchung des Einflusses der Reglermodelle auf die Raumlufttemperaturen sowie die operativen Raumtemperaturen werden zunächst Reglerparameter frei, jedoch in einer sinnvollen Größenordnung angenommen. Für jedes Reglermodell wird der Heizenergieverbrauch E_{heat} sowie die Dauer und die Höhen der Verletzung der Komforttemperatur T_{warm} und T_{cold} berechnet und analysiert. T_{warm} und T_{cold} ergeben sich durch Integration der Komfortverletzungszeiten, die sich während der Simulation mit berechnen. Dabei wird eine Verletzung der Zieltemperatur von 2 K akzeptiert. (Vergleich Abschnitt 4.4).

Es gilt:

$$T_{\text{warm}}(t) = \int_0^t \max(T_{\text{operativ}}(\tau) - (T_{\text{Ziel}}(\tau) + 2\text{K}), 0) \text{bel}(\tau) d\tau \quad (4.11)$$

$$T_{\text{cold}}(t) = \int_0^t \max(T_{\text{Ziel}}(\tau) - 2\text{K} - T_{\text{operativ}}(\tau), 0) \text{bel}(\tau) d\tau \quad (4.12)$$

mit

$$\text{bel}(t) = \begin{cases} 1 & \text{falls Raum belegt} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.13)$$

Zur Berechnung von T_{warm} und T_{cold} wird die operative Raumtemperatur T_{operativ} genutzt. Diese hat beispielsweise für das Szenario Arbeitsphase mit Zweipunktregler und dem Parameter $T_{\text{tol}} = 2$ den in Abbildung 4.12 gezeigten Verlauf. Werden die Größen T_{warm} und T_{cold} im Text ohne Zeitbezug verwendet, sind damit die Werte dieser Größen zum Simulationszeitende gemeint, d.h. $T_{\text{warm}} = T_{\text{warm}}(t_{\text{end}})$ und $T_{\text{cold}} = T_{\text{cold}}(t_{\text{end}})$.

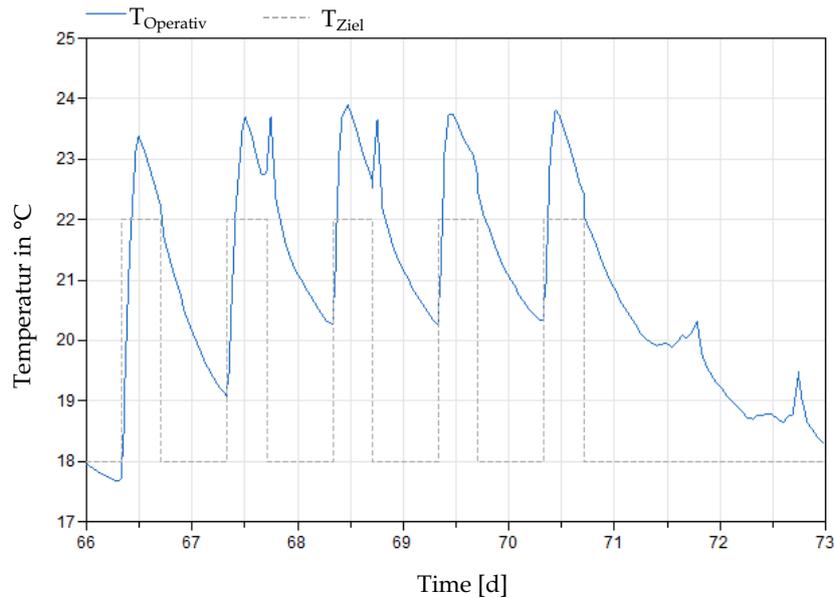


Abbildung 4.12. Operative Raumtemperatur T_{operativ} für den Büroraum im Szenario Arbeitsphase mit Zweipunktregler (Parameter $T_{\text{tol}} = 2$) am Standort Chemnitz

Die visuelle Bewertung des Temperaturverlaufes zeigt bereits, dass die operative Raumtemperatur bezüglich der Bewertungskriterien für die Verletzung des Komforts gut verläuft. Sie erreicht während der Belegung die vorgegebene Zieltemperatur von 22 °C und steigt auch nicht höher als 2 °C über die Zieltemperatur. Während der unbelegten Phase sinkt die operative Raumtemperatur zur Vermeidung eines unnötigen Energiebedarfs ab. Die Auswertung der berechneten Verläufe für T_{warm} und T_{cold} bestätigen den visuellen Eindruck. T_{warm} hat während des gesamten Simulationszeitraumes von Szenario Arbeitsphase den Wert Null. Der Verlauf von T_{cold} ist in Abbildung 4.13 gezeigt. Das Signal wird immer dann wesentlich größer, wenn die Zieltemperatur nach zwei Tagen auf dem niedrigen Wert von 18 °C lag und danach das erste Mal wieder 22 °C betragen soll (nach einem Wochenende). Die operative Raumtemperatur sinkt innerhalb der zwei Tage mit niedriger Zieltemperatur ab und steigt anschließend nicht schnell genug wieder an, weil der Zweipunktregler erst genau mit Beginn der Forderung der höheren Zieltemperatur beginnt, dem Heizungsmodell das Signal zum Heizen zu erteilen.

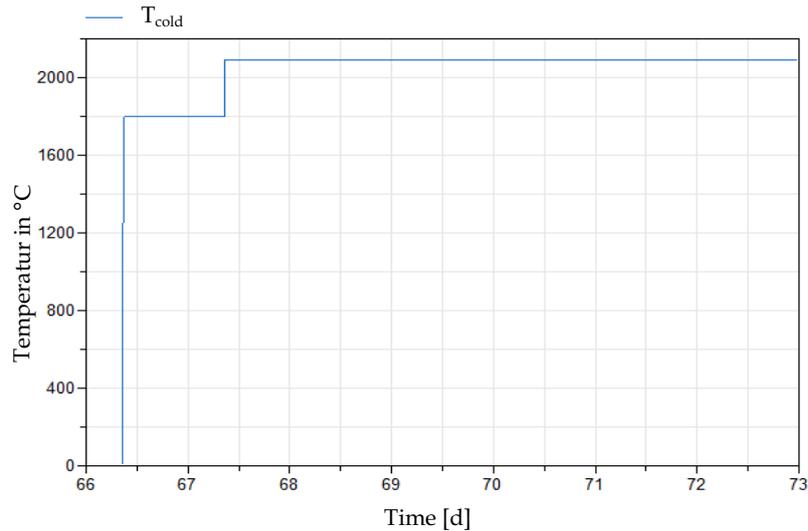


Abbildung 4.13. T_{cold} für den Büroraum im Szenario Arbeitsphase mit Zweipunktregler (Parameter $T_{\text{tol}} = 2$) am Standort Chemnitz

Im Folgenden wird das Szenario Arbeitsphase mit dem vs-Reglermodell betrachtet. Die Reglerparameter Opt_{p1} und Opt_{p2} werden beide mit dem Wert eins festgelegt. Die Parameter dienen der Skalierung des Startzeitpunktes für das Ein- und Ausschalten des Heizungsmodells (siehe Abschnitt 4.3.6). Die operative Raumtemperatur, die sich aufgrund der Anwendung des Reglermodells ergibt, ist in Abbildung 4.14 gezeigt. Sie liegt während des betrachteten Simulationszeitraumes zu niedrig und erreicht in den Belegungsphasen das vorgegebene Temperaturtoleranzband von zwei Kelvin über und unter der Zieltemperatur von 22 °C nicht. Die Auswertung der Komfortverletzungsgrößen ergeben für $T_{\text{warm}} = 0$ Ks und für $T_{\text{cold}} = 1,4e6$ Ks = 16,2 Kd. Es ist nun zu prüfen, ob sich das Reglermodell für dieses Szenario generell nicht eignet, oder ob es schlecht parametrisiert ist. Der Abschnitt 4.4 widmet sich der Optimierung der Reglerparameter. Dort wird sich dem Beispiel des Szenarios Arbeitsphase mit vs-Reglermodell erneut zugewandt und es wird deutlich, dass die Optimierung der Reglerparameter zu einem sehr guten Ergebnis bezüglich der Verletzungsgrößen des Nutzerkomforts führt.

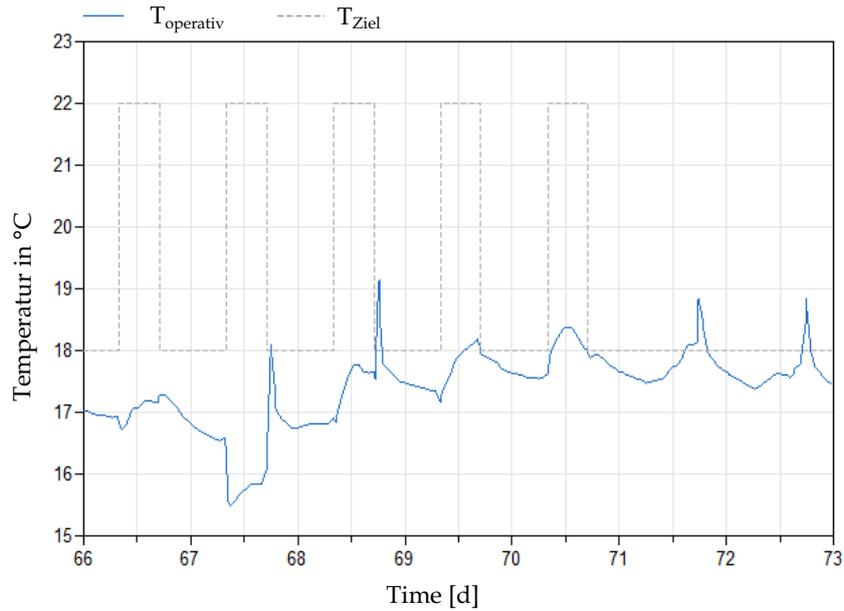


Abbildung 4.14. Operative Raumtemperatur T_{operativ} für das Büroraummodell im Szenario Arbeitsphase mit vs-Regler (Parameter $Opt_{p1} = 1$ und $Opt_{p2} = 1$) am Standort Chemnitz

Vergleicht man innerhalb des Szenarios Arbeitsphase den Einfluss aller Reglermodelle auf die operative Raumtemperatur T_{operativ} , so ergibt sich das in Tabelle 4.3 notierte Ergebnis für den Heizenergieverbrauch E_{heat} des Szenarios sowie für die Verletzungsgrößen des Nutzerkomforts T_{cold} und T_{warm} . Es ist ersichtlich, dass keines der Reglermodelle die Anforderungen an den Nutzerkomfort erfüllen kann. Der Zweipunktregler verursacht die geringste Verletzung des Komforts. Abbildung 4.12 visualisiert den Verlauf der operativen Raumtemperatur für das Szenario Arbeitsphase mit Zweipunktregler. Der Einfluss der Reglermodelle auf den Heizenergieverbrauch und die Komfortverletzung ist für die übrigen Simulationsszenarien im Anhang D angegeben.

Tabelle 4.3. Überblick über den Einfluss der unterschiedlichen Reglermodelle auf den Heizenergieverbrauch und die Komfortverletzungsgrößen T_{warm} und T_{cold} im Szenario Arbeitsphase am Standort Chemnitz

	Parameterwert	E_{heat}	T_{cold}	T_{warm}
Zweipunktregler		22895 Wh	6802 Ks	0 Ks
T_{tol}	2			
P-Regler		91164 Wh	16922 Ks	0 Ks
k	0,5			
vs-Regler		0 Wh	1444580 Ks	0 Ks
Opt_{p1}	1			
Opt_{p2}	1			

Abbildung 4.15 zeigt alle operativen Raumtemperaturen des Szenarios Arbeitsphase, die sich aufgrund der unterschiedlichen Reglermodelle ergeben. Es wird deutlich, dass die Verläufe, die durch das Zweipunktreglermodell und das P-Reglermodell verursacht werden, sehr ähnlich sind. Der Verlauf der operativen Raumtemperatur, der sich durch Anwendung des vs-Regler ergibt, liegt deutlich zu niedrig. Es ist zu kalt. Dies spiegelt sich auch im Wert für T_{cold} wider, der deutlich größer ist, als der durch die anderen Reglermodelle verursachte Wert für T_{cold} (Tabelle 4.3).

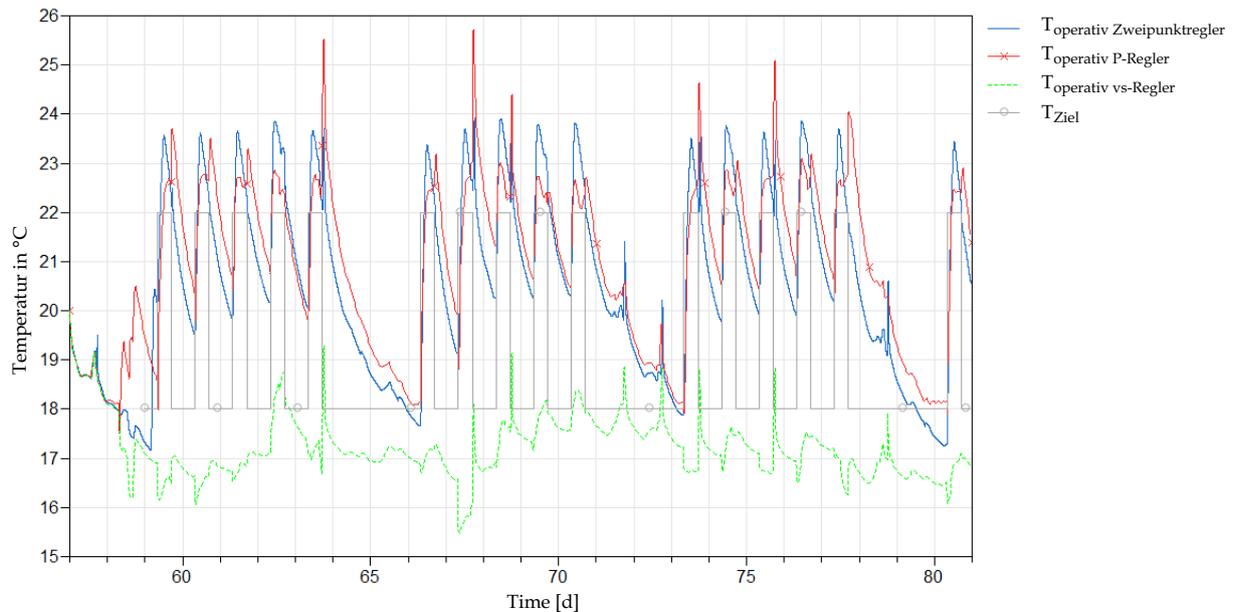


Abbildung 4.15. Vergleich der operativen Raumtemperatur für das Szenario Arbeitsphase (Werte der Reglerparameter sind Tabelle 4.3 zu entnehmen)

Nach Abschluss der Untersuchungen des Einflusses der Reglermodelle auf die operative Raumtemperatur liegen für jedes Szenario Daten für den Heizenergieverbrauch sowie die Komfortwerte vor. Damit ist bekannt, ob sich bereits ein nicht optimiertes Reglermodell für ein Raummodell eignet. Ein Reglermodell eignet sich dann, wenn $T_{\text{cold}} + T_{\text{warm}} = 0 \text{ Ks}$ gilt. Da dieses Kriterium sehr hohe Anforderungen an die Reglermodelle stellt, wird es zur Auswertung leicht abgeschwächt zu $T_{\text{cold}} + T_{\text{warm}} < 100 \text{ Ks}$. Dabei erwies sich der Wert von 100 Ks in Voruntersuchungen als praktisch. Die Abschwächung des Kriteriums ist notwendig, da andernfalls insbesondere die Regler, die erst mit sich ändernder Zieltemperatur zu regeln beginnen, das strenge Kriterium niemals erfüllen könnten. Tabelle 4.4 fasst die Eignung der nicht optimierten Reglermodelle hinsichtlich der Simulationsszenarien zusammen. Da es Ziel ist, für bestimmte Räume passende Regler zu finden, werden nun jeweils die beiden Szenarien, die das gleiche Raummodell nutzen, betrachtet. Nur wenn ein Regler in beiden Szenarien als geeignet bewertet wird, wird er auch für das in den Szenarien genutzte Raummodell als geeignet angesehen. Tabelle 4.5 fasst die Eignung der nicht optimierten Reglermodelle hinsichtlich der untersuchten Räume zusammen. Ein mit einem Häkchen markiertes Feld bedeutet, ein Reglermodell ist geeignet, ein mit einem x markiertes Feld bedeutet, ein Reglermodell ist nicht geeignet. Die Werte der Reglerparameter werden, wie in Tabelle 4.3 angegeben, gewählt.

Tabelle 4.4. Zusammenfassung der Eignung der unoptimierten Regler hinsichtlich der Simulationsszenarien am Standort Chemnitz

Szenario	Regler		
	Zweipunkt	P	vs
Party	✓	✓	x
Winter	✓	✓	x
Arbeitsphase	x	x	x
Herbsturlaub	x	✓	x
Besprechungen	✓	✓	x
Workshop	x	x	x
Unterricht	x	x	x
Ferien	x	x	x

Tabelle 4.5. Zusammenfassung der Eignung der nicht optimierten Regler hinsichtlich der Raummodelle am Standort Chemnitz

Raummodell	Regler		
	Zweipunkt	P	vs
Gartenhaus	✓	✓	x
Büro	x	x	x
Konferenzraum	x	x	x
Klassenzimmer	x	x	x

Wird das strenge Kriterium für die Eignung eines Reglermodells weiter abgeschwächt, sodass neben „geeignet“ und „ungeeignet“ eine dritte Bewertungskategorie „eingeschränkt geeignet“ ($T_{\text{cold}} + T_{\text{warm}} \leq 3600 \text{ Ks}$) zulässig ist, ergibt sich nach Tabelle 4.6 folgende Zusammenfassung für die Szenarien und nach Tabelle 4.7 für die Räume. Die eingeschränkte Eignung ist durch ein Quadrat symbolisiert.

Tabelle 4.6. Zusammenfassung der Eignung der unoptimierten Regler hinsichtlich der Simulationsszenarien (Bewertungskriterium abgeschwächt) am Standort Chemnitz

Szenario	Regler		
	Zweipunkt	P	vs
Party	✓	✓	x
Winter	✓	✓	x
Arbeitsphase	x	x	x
Herbsturlaub	x	✓	x
Besprechungen	✓	✓	x
Workshop	□	□	x
Unterricht	x	x	x
Ferien	□	□	□

Tabelle 4.7. Zusammenfassung der Eignung der nicht optimierten Regler hinsichtlich der Raummodelle (Bewertungskriterium abgeschwächt) am Standort Chemnitz

Szenario	Regler		
	Zweipunkt	P	vs
Gartenhaus	✓	✓	x
Büro	x	x	x
Konferenzraum	□	□	x
Klassenzimmer	x	x	x

Bei allen Reglern besteht Optimierungspotential, welches im Abschnitt 4.4 untersucht, beschrieben und ausgenutzt wird.

4.4. Optimierung der Reglerparameter

Die Zusammenfassungen der Eignung der Regler hinsichtlich der Simulationsszenarien in den Tabellen 4.4 und 4.6 zeigen deutlich, dass der Großteil der Regler mit den gewählten Standardreglerparametern nicht oder nur eingeschränkt zur Regelung der Raumtemperaturen geeignet ist. Daher wird im Folgenden untersucht, ob eine günstige Wahl der Reglerparameter dazu führen kann, dass die Regler besser nutzbar werden. Die Reglerparameter werden mittels Optimierung bestimmt. Ziel ist es, für jedes der drei Reglermodelle für jedes Raummodell optimale Parameter zu finden. Da für jedes der vier Raummodelle je zwei Szenarien vorhanden sind, werden demnach 24 Modelle optimiert.

Die zu minimierende Zielfunktion (ZF) ist in Gleichung (4.14) angegeben. Sie wurde so gewählt, dass sie nur dann Null wird, wenn alle drei Größen, d.h. E_{heat} , T_{warm} und T_{cold} Null werden. Da der Komfort unbedingt eingehalten werden soll, wird die Zielfunktion dann besonders groß, wenn T_{warm} und T_{cold} einen Wert größer Null annehmen, da sie mit E_{heat} multipliziert werden. Für den Fall, dass E_{heat} Null ist, entfallen die Produkte und T_{warm} und T_{cold} gehen als Summanden in die Zielfunktion ein.

$$ZF = \frac{E_{\text{heat}}}{\text{Wh}} \left(1 + \frac{T_{\text{warm}}}{Ks} + \frac{T_{\text{cold}}}{Ks} \right) + \frac{T_{\text{warm}}}{Ks} + \frac{T_{\text{cold}}}{Ks} \quad (4.14)$$

In praktischen Rechnungen wird die Zielfunktion nach Gleichung (4.14) durch 1000 dividiert, um kleinere absolute Zahlenwerte zu erreichen. Auf die Ergebnisse hat diese Division keinerlei Einfluss. E_{heat} in Gleichung (4.14) beschreibt die notwendige Wärmeenergie in Wattstunden (Wh), die aufgrund des Heizens verbraucht wird. Der Heizenergieverbrauch wird durch Integrieren der Wärmemenge, die innerhalb eines Szenarios vom Heizungsmodell an das Raummodell abgegeben wird, gewonnen. Die Berechnung der Wärmemenge erfolgt innerhalb des Heizungsmodells, welches vorgefertigt in der Modellbibliothek *BuildingSystems* zur Verfügung steht. Die Größe T_{warm} beschreibt sowohl die Dauer als auch den Betrag der Abweichung der operativen Raum-

temperatur (Isttemperatur) T_{operativ} von mehr als 2 K von der Zieltemperatur T_{Ziel} nach oben (zu warm). T_{warm} wird durch Integration über alle Belegungsphasen innerhalb eines Szenarios berechnet und steht am Ende eines Szenarios als Einzelwert in Kelvinsekunden (Ks) zur Auswertung zur Verfügung (vgl. Gleichung 4.11). Eine Verletzungsdauer von 30 Minuten pro Szenario wird nicht gewertet, damit auch der Zweipunktregler, der erst mit sich ändernder Zieltemperatur zu regeln beginnt, die Möglichkeit bekommt, ohne eine Komfortverletzung hervorzurufen zu arbeiten. Für T_{cold} in Ks gelten dieselben Vorgaben wie für T_{warm} für den Fall, dass die operative Raumtemperatur für mehr als 2 K nach unten von der Zieltemperatur abweicht. Im Folgenden ist die Berechnung von T_{cold} an einem Beispiel demonstriert. Abbildung 4.16 zeigt im oberen Diagramm die Zieltemperatur (gestrichelter Verlauf), die bei Anwesenheit von Personen 22 °C und bei Abwesenheit 18 °C beträgt. Ferner wird der Zeitverlauf der operativen Raumtemperatur (blauer, durchgängiger Graph) im oberen Diagramm gezeigt. Im unteren Diagramm ist der Verlauf der Größe T_{cold} gezeigt. Durch den ersten senkrechten Strich bei $t = 5,8176 \text{e}6 \text{ s}$ wird in beiden Diagrammen der Punkt gekennzeichnet, an dem die operative Raumtemperatur erstmals unter 2 K unter der Zieltemperatur liegt. Dies ist in der oberen Grafik in Abbildung 4.16 zu erkennen. Der unteren Grafik ist zu entnehmen, dass zu diesem Zeitpunkt das Signal T_{cold} zunächst noch Null bleibt und erst nach der vereinbarten Zeitspanne von 30 Minuten (Differenz der beiden durch die schwarzen senkrechten Geraden gekennzeichneten Zeitpunkte), in der bei einer Temperaturverletzung noch keine Bestrafung erfolgt, größer als Null wird. Das Signal T_{cold} steigt so lange an, bis die operative Raumtemperatur weniger als 2 K unter der Zieltemperatur liegt.

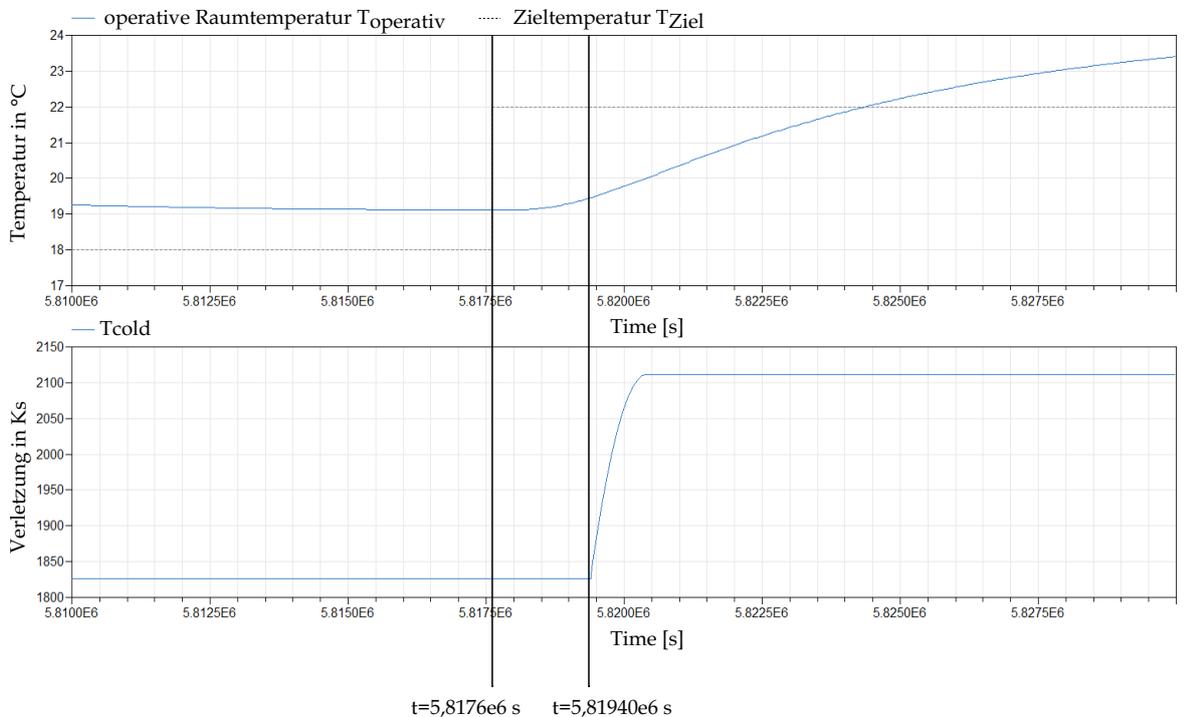


Abbildung 4.16. Beispielhafte Signalverläufe für die Zieltemperatur und die operative Raumtemperatur eines Raummodells (oben) und T_{cold} (unten)

Zur Optimierung der Reglerparameter wird das Werkzeug *GenOpt* (Generic Optimization Program) ([Wet16b]) genutzt, welches an der University of California im Lawrence Berkeley National Laboratory entwickelt wird. *GenOpt* ist ein Optimierungsframework, das eine Kostenfunktion minimiert, die durch ein externes Simulationsprogramm ausgewertet wird. Diese Voraussetzung ist im Rahmen dieser Arbeit durch die Nutzung von Dymola ([BEOM02]) erfüllt. Eines der Hauptanwendungsfelder von *GenOpt* ist die Optimierung von Kostenfunktionen, die durch externe Gebäudesimulationswerkzeuge berechnet werden. Daher werden für dieses Anwendungsgebiet spezielle Problemstellungen durch *GenOpt* berücksichtigt. Welche das konkret sind, kann der Literatur ([Wet16c]) entnommen werden. *GenOpt* ist in der Lage, Kostenfunktionen, die aufwendig ausgewertet werden und für die keine Ableitung bekannt ist, zu minimieren. Die unabhängige Größe kann eine kontinuierliche und/oder diskrete Variable sein. Zur Optimierung bietet *GenOpt* eine Bibliothek mit lokalen und globalen ein- und mehrdimensionalen Optimierungsalgorithmen an. Diese sind (nach [Wet16a]):

- General-Pattern-Search-Algorithmen
- Partikel-Schwarm-Algorithmen
- ein hybrider Algorithmus, der zur globalen Optimierung einen Partikel-Schwarm und zur lokalen Optimierung das Hooke-Jeeves Verfahren nutzt
- diskreter Armijo-Gradient-Algorithmus
- Nelder-Mead-Verfahren (auch Downhill-Simplex-Verfahren genannt)
- Goldener Schnitt- und Fibonacci-Algorithmen für eindimensionale Minimierung

Optimierungsalgorithmus

Aus diesen Algorithmen wird der Partikel-Schwarm-Algorithmus (engl. Particle Swarm Optimization - PSO) ausgewählt, weil PSO-Algorithmen keine Stetigkeit der Zielfunktion fordern, was für die Zielfunktionen der zu optimierenden Reglermodelle Gleichung (4.14) zutrifft. Ferner liegen aus dem abgeschlossenen Forschungsprojekt *enerMAT* bereits Kenntnisse in der Anwendung von PSO-Algorithmen zur Optimierung von Reglermodellen und Gebäudeenergiemanagementsystemen vor. Im Rahmen von *enerMAT* wurden positive Erfahrungen mit PSO-Algorithmen gemacht ([ene16], Abschnitt 2.4). PSO-Algorithmen geben eine bestimmte Anzahl von Lösungsvorschlägen für das Optimierungsproblem vor. Jede dieser potentiellen Lösungen wird als Partikel bezeichnet. Die Gesamtheit aller potentiellen Lösungen innerhalb eines Iterationsschrittes der Optimierung wird Population genannt. Die initiale Population wird oft per Zufall aus der vom Nutzer vorgegebenen Anzahl an Partikeln erstellt. Eine sogenannte Partikel-Update-Funktion ermittelt in jeder Iteration die Partikel der nächsten Generation. Bei der Wahl der Anzahl der Partikel und Generationen hat sich aus den Erfahrungen in *enerMAT* gezeigt, dass 20 Partikel und 15 Generationen einen guten Kompromiss zwischen Rechenzeit und Nähe zur optimalen Lösung zeigen. Details zur PSO können beispielsweise [EK95] entnommen werden. Genauere Kenntnis über die Funktion und die Implementierung des in *GenOpt* genutzten Algorithmus kann durch das Nutzerhandbuch ([Wet16d] Abschnitt 5.4) erlangt werden. Die Funktionsweise und Bedienung von *GenOpt* wird im Anhang E genauer dargestellt.

Optimale Reglermodelle

Für alle Reglermodelle wurden optimale Parameter gefunden, für die der Wert der Zielfunktion (Gleichung (4.14)) minimal (ZF_{\min}) ist. Diese sind in Tabelle 4.8 angegeben. Tabelle 4.9 listet die durch die optimal parametrisierten erreichbaren Verletzungsgrößen T_{warm} und T_{cold} sowie den notwendigen Heizenergieverbrauch je m^2 E_{heat} auf.

Tabelle 4.8. Optimale Reglerparameter und zugehöriger Wert der Zielfunktion

Szenarien	Reglermodelle						
	Zweipunktregler		P-Regler		vs-Regler		
	T_{tol}	ZF_{\min}	k	ZF_{\min}	Opt_{p1}	Opt_{p2}	ZF_{\min}
Party	0,102	2,97	968	2,77	0,15	30473	3,61
Winter	0,114	0,35	10	0,37	0,0112	464	0,30
Arbeitsphase	0,53	16,6e3	2800	680e3	9,4e-4	240	59,1
Herbsturlaub	0,5	8,9e3	0,1	13,2	2,1e-2	400	1937
Besprechungen	0,12	9,0	831	8,4	2,1e-3	3,3	16,6e3
Workshop	4,3	5,2e-3	0,5	390,0	0,41	447	2,5
Unterricht	0,37	2,7e6	0,5	3,1e6	4,8e-4	17,5	9,5e6
Ferien	0,112	4,7e7	92,7	4,5e7	7,2e-3	5,6	1,7e7

Tabelle 4.9. Optimale Verletzungszeiten und Heizenergieverbrauch

Szenarien	Reglermodelle								
	Zweipunktregler			P-Regler			vs-Regler		
	T_{cold}	T_{warm}	E_{heat} je m ²	T_{cold}	T_{warm}	E_{heat} je m ²	T_{cold}	T_{warm}	E_{heat} je m ²
Party	0 Ks	0 Ks	98,9 Wh	0 Ks	0 Ks	92,2 Wh	0 Ks	0 Ks	120,2 Wh
Winter	0 Ks	0 Ks	11,8 Wh	0 Ks	0 Ks	12,4 Wh	0 Ks	0 Ks	10,0 Wh
Arbeitsphase	7862,3 Ks	0 Ks	3809,8 Wh	11461 Ks	0 Ks	3738,8 Wh	0 Ks	0 Ks	3867,2 Wh
Herbsturlaub	0 Ks	1640,0 Ks	352,5 Wh	0 Ks	0 Ks	850,0 Wh	0 Ks	0 Ks	20,2 Wh
Besprechungen	0 Ks	0 Ks	172,7 Wh	0 Ks	0 Ks	161,9 Wh	0 Ks	584,0 Ks	547,5 Wh
Workshop	0 Ks	3,6 Ks	75,9 Wh	0 Ks	105,5 Ks	70,5 Wh	0 Ks	27,4 Ks	1,6 Wh
Unterricht	1018,0 Ks	5624,0 Ks	3588,4 Wh	1137,0 Ks	4637,0 Ks	3926,9 Wh	255,0 Ks	30087,0 Ks	4260,4 Wh
Ferien	3400,0 Ks	0 Ks	1502,3 Wh	3356,0 Ks	0 Ks	1510,0 Wh	124,0 Ks	467,0 Ks	2035,8 Wh

Die optimalen Reglerparameter führen beim Szenario **Party** dazu, dass jedes der untersuchten Reglermodelle geeignet ist, d.h. die Verletzungsgrößen T_{cold} und T_{warm} 0 Ks betragen. Der Heizenergieverbrauch je Quadratmeter Grundfläche ist für jedes Reglermodell ähnlich groß und liegt zwischen $E_{\text{heat}} = 92,2 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2}$ für das P-Reglermodell und $E_{\text{heat}} = 120,2 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2}$ für das Modell des vs-Reglers. Dabei gilt es zu beachten, dass ein Vergleich der Heizenergieverbräuche innerhalb eines Szenarios zwischen den diese Verbräuche verursachenden unterschiedlichen Reglermodellen sinnvoll ist. Ein Vergleich zwischen den Szenarien bietet sich an dieser Stelle nicht an, da sie alle über unterschiedliche Zeiträume definiert sind und unterschiedlichen Wetter- und Nutzungsbedingungen unterliegen. Auch im Szenario **Winter** ist jedes der untersuchten Reglermodelle mit optimalen Parametern geeignet. Auch hier betragen die Verletzungszeiten 0 Ks. Der niedrigste Heizenergieverbrauch je Quadratmeter Grundfläche wird durch das vs-Reglermodell erzielt und beträgt $E_{\text{heat}} = 10,0 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2}$. Der Heizenergieverbrauch, der aufgrund der Anwendung des Zweipunktreglermodells verursacht wird, liegt bei $E_{\text{heat}} = 11,8 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2}$, der des P-Reglers bei $E_{\text{heat}} = 12,4 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2}$. Im Szenario **Arbeitsphase**, für das keines der nicht optimierten Reglermodelle als geeignet bewertet werden konnte, erfüllt nach der Optimierung das vs-Reglermodell das geforderte Eignungskriterium $T_{\text{cold}} + T_{\text{warm}} = 0$ Ks. Der Heizenergieverbrauch durch Nutzung des vs-Reglermodells ist unwesentlich höher als die Heizenergieverbräuche durch die anderen beiden Reglermodelle. Auch die anderen optimal parametrisierten Reglermodelle verursachen Verringerungen der Verletzungsgrößen und/oder des Heizenergieverbrauchs. So ist beispielsweise für alle optimalen Reglermodelle innerhalb des Szenarios Arbeitsphase die Verletzungszeit $T_{\text{warm}} = 0$ Ks. Im Szenario **Herbsturlaub** betragen die Verletzungsgrößen für das vorausschauende sowie das P-Reglermodell 0 Ks. Diese Reglermodelle sind demnach für das Szenario Herbsturlaub geeignet. Im Szenario **Besprechungen** haben sich das Zweipunkt- und das P-Reglermodell als geeignet erwiesen. Die verbrauchten Heizenergien je Quadratmeter Grundfläche, die durch diese Reglermodelle verursacht werden, liegen in der gleichen Größenordnung. Für das Szenario **Workshop** wird das Modell des Zweipunktreglers als geeignet bewertet. Dabei wird die sehr kleine Verletzungszeit $T_{\text{warm}} = 3,6$ Ks vernachlässigt. Auch das Modell des vs-Reglers ist, trotz kleiner Verletzungsgröße von $T_{\text{warm}} = 27,4$ Ks noch gut geeignet. Eine etwas größere Verletzungsgröße von $T_{\text{warm}} = 105,5$ Ks liefert die Anwendung des optimierten P-Reglermodells. Es fällt auf, dass die Anwendung des vs-Reglermodells mit $E_{\text{heat}} = 1,6 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2}$ den geringsten Heizenergieverbrauch je Quadratmeter aufweist. Die Heizenergieverbräuche aufgrund der Anwendung der restlichen Reglermodelle liegen zwischen $E_{\text{heat}} = 70,5 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2}$ und $E_{\text{heat}} = 75,9 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2}$. Im Szenario **Unterricht** ist trotz Optimierung keines der Reglermodelle geeignet. Die Summen der Verletzungszeiten, die pro Regler erzeugt werden, ist größer als Null. Das Modell des P-Reglers weist die kleinste Summe der Verletzungszeiten von $T_{\text{warm}} + T_{\text{cold}} = 5774$ Ks auf. Der Heizenergieverbrauch je Quadratmeter, der aufgrund der Anwendung dieses Reglers entsteht, beträgt $E_{\text{heat}} = 3926,9 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2}$. Die übrigen Heizenergieverbräuche liegen in derselben Größenordnung. Für das Szenario **Ferien** eignen sich nach der Optimierung der Reglerparameter alle Reglermodelle eingeschränkt, d.h. die Summe der Verletzungszeiten ist kleiner als 3600 Ks. Die Heizenergieverbräuche, die durch die Reglermodelle erzeugt werden, liegen in der gleichen Größenordnung und besitzen Werte zwischen $E_{\text{heat}} = 1502,3 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2}$ und $E_{\text{heat}} = 2035,8 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2}$. Abbildung 4.17 zeigt exemplarisch die Verläufe der operativen Raumtemperaturen für das Szenario Arbeitsphase.

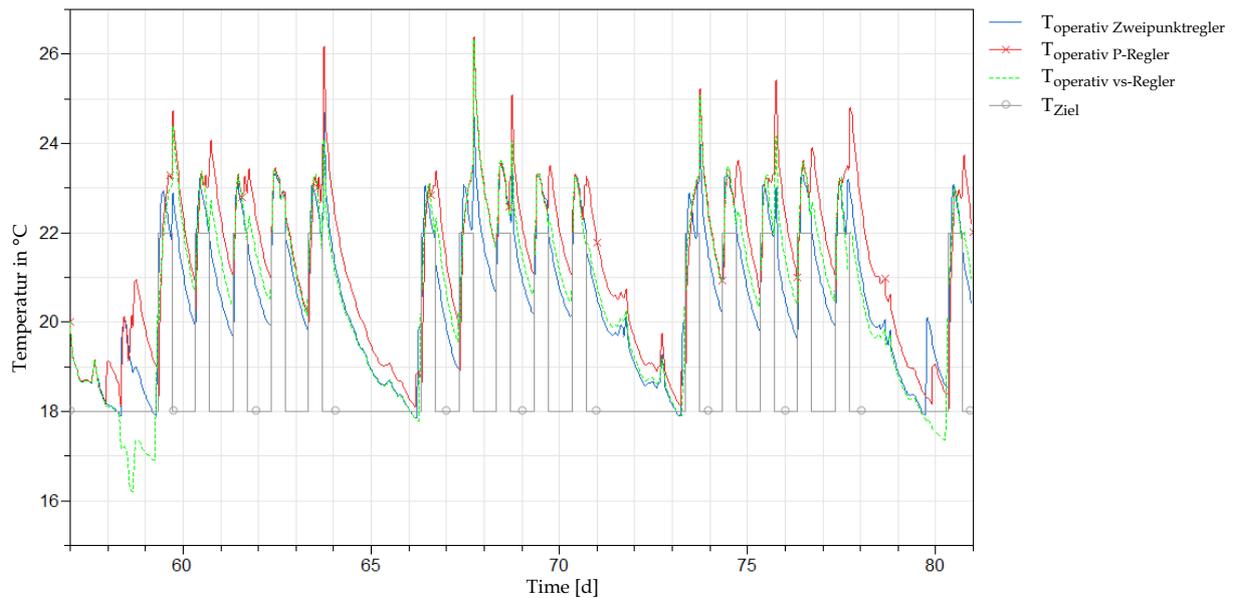


Abbildung 4.17. Vergleich der operativen Raumtemperaturen für das Szenario Arbeitsphase für optimierte Reglerparameter

Im Vergleich zu Abbildung 4.15 zeigt sich in Abbildung 4.17, dass erst die Optimierung der Reglerparameter die Regler sinnvoll anwendbar macht. Die Ergebnisse der Eignung der Regler hinsichtlich der Simulationsszenarien fasst Tabelle 4.10 zusammen. Dabei zeigt das Symbol eines grünen Häkchens, dass das Reglermodell geeignet ist, es also gilt: $T_{\text{cold}} + T_{\text{warm}} = 0$ Ks. Ein rotes Kreuz symbolisiert, dass ein Reglermodell ungeeignet für ein Szenario ist. Tabelle 4.11 verdichtet die Ergebnisse wieder und fasst sie bzgl. der Räume zusammen.

Tabelle 4.10. Zusammenfassung der Eignung der optimierten Regler hinsichtlich der Simulationsszenarien am Standort Chemnitz

Szenario	Regler		
	Zweipunkt	P	vs
Party	✓	✓	✓
Winter	✓	✓	✓
Arbeitsphase	x	x	✓
Herbsturlaub	x	✓	✓
Besprechungen	✓	✓	x
Workshop	x	x	✓
Unterricht	x	x	x
Ferien	x	x	x

Tabelle 4.11. Zusammenfassung der Eignung der optimierten Regler hinsichtlich der Raummodelle am Standort Chemnitz

Raummodell	Regler		
	Zweipunkt	P	vs
Gartenhaus	✓	✓	✓
Büro	x	x	✓
Konferenzraum	x	x	x
Unterricht	x	x	x

Wird ein Regler in den Tabellen 4.10 und 4.11 als ungeeignet bewertet, bezieht sich dies auf das sehr strenge Bewertungskriterium, was insbesondere dem Zweipunktregler sowie dem P-Regler wenig Möglichkeiten lässt, erfolgreich zu regeln, da beide Regler ihre Tätigkeit erst mit sich ändernder Zieltemperatur aufnehmen und somit beispielsweise bei einem Zieltemperatursprung von 18 °C auf 22 °C es kurzzeitig fast immer zu kalt sein wird im Raum. Ferner handelt es sich bei den Verletzungsgrößen T_{cold} und T_{warm} um integrale Größen, die mit jeder neuen Komfortverletzung größer werden. Demnach ist es wahrscheinlicher, dass bei längeren Szenarien die Verletzungsgrößen größere Werte annehmen und das Komfortkriterium weniger gut erfüllen. Aus diesen Gründen ergibt eine visuelle Beurteilung der operativen Raumtemperaturen in den Szenarien, dass auch die als nicht geeignet bewerteten Regler gute Ergebnisse liefern. Abbildung 4.18 beispielsweise zeigt die operative Raumtemperatur im Büroraum innerhalb des Szenarios Arbeitsphase, die sich bei Anwendung des optimal parametrisierten Zweipunktreglers ergibt. Die operative Raumtemperatur folgt der Zieltemperatur sehr gut. Kleinere Verletzungen treten insbesondere nach der Wochenendabsenkung der Zieltemperatur auf.

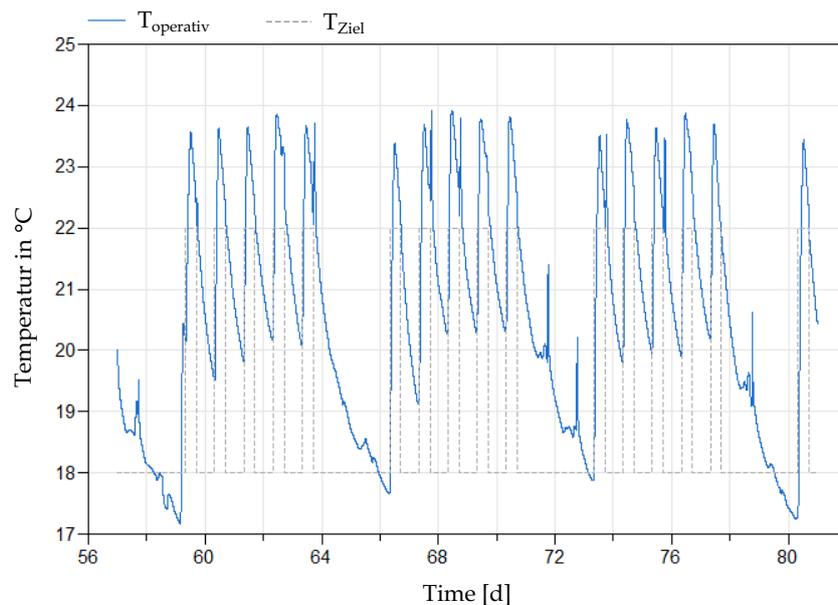


Abbildung 4.18. Operative Raumtemperatur, die sich bei Anwendung des optimal parametrisierten Zweipunktreglers im Szenario Arbeitsphase einstellt; Zieltemperatur

Bei einigen Szenarien eignet sich auch der vs-Regler bzgl. des Bewertungskriteriums nicht. Im Szenario Unterricht beispielsweise ist es an einigen Tagen etwas zu warm, an deren Tagen etwas zu kalt im Raum. Dennoch liefert auch hier die visuelle Bewertung der operativen Raumtemperatur (Abbildung 4.19), dass diese der Zieltemperatur gut folgt und dass die Abweichungen pro Tag so gering sind, dass sie den Komfort der Raumnutzer nicht merklich einschränken.

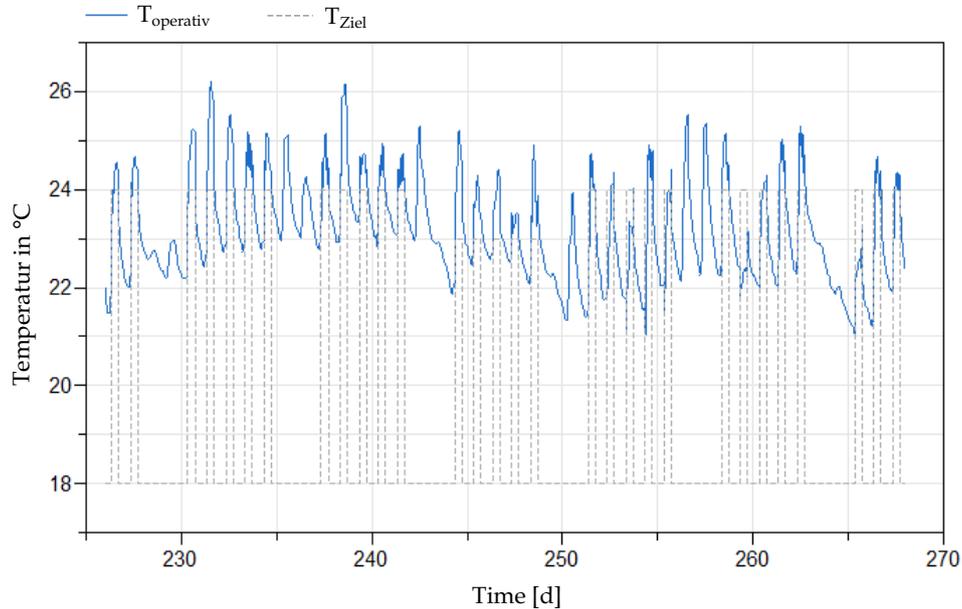


Abbildung 4.19. Operative Raumtemperatur, die sich bei Anwendung des optimal parametrisierten vs-Reglers im Szenario Unterricht einstellt; Zieltemperatur

Wird, wie bereits bei der Zusammenfassung der nicht optimierten Regler getan, das strenge Kriterium für die Eignung eines Reglermodells abgeschwächt, sodass neben „geeignet“ und „ungeeignet“ eine dritte Bewertungskategorie „eingeschränkt geeignet“ ($T_{\text{cold}} + T_{\text{warm}} \leq 3600 \text{ Ks}$) zulässig ist, ergibt sich nach Tabelle 4.12 folgende Zusammenfassung hinsichtlich der Simulationsszenarien. Tabelle 4.13 verdichtet die Ergebnisse und stellt sie hinsichtlich der untersuchten Räume dar. Die eingeschränkte Eignung ist durch ein Quadrat symbolisiert.

Tabelle 4.12. Zusammenfassung der Eignung der optimierten Regler hinsichtlich der Simulationsszenarien (Bewertungskriterium abgeschwächt) am Standort Chemnitz

Szenario	Regler		
	Zweipunkt	P	vs
Party	✓	✓	✓
Winter	✓	✓	✓
Arbeitsphase	✗	✗	✓
Herbsturlaub	□	✓	✓
Besprechungen	✓	✓	□
Workshop	□	□	✓
Unterricht	✗	✗	✗
Ferien	□	□	□

Tabelle 4.13. Zusammenfassung der Eignung der optimierten Regler hinsichtlich der Raummodelle (Bewertungskriterium abgeschwächt) am Standort Chemnitz

Raummodell	Regler		
	Zweipunkt	P	vs
Gartenhaus	✓	✓	✓
Büro	x	x	✓
Konferenzraum	□	□	□
Klassenzimmer	x	x	x

Nach der Optimierung liegen für alle 24 Szenarien optimierte Regler vor. Es ist nun für vier Raummodelle, die unterschiedlichen Nutzer- und Wittereinflüssen unterliegen, bekannt, welche der drei optimierten Reglermodelle sich eignen. Da es Ziel der Arbeit ist, einen allgemeingültigen Zusammenhang zwischen Raummodellen und Reglermodellen zu ermitteln, stellt sich nach ersten Versuchen, die im Kapitel 6 diskutiert werden, heraus, dass die Datenmenge dafür zu gering ist. Die Datenbasis, auf deren Grundlage der Zusammenhang gefunden werden soll, wird demnach erweitert.

4.5. Erweiterung der Datenbasis

Die Vergrößerung der Datenbasis erfolgt nicht dadurch, dass weitere Szenarien von Grund auf neu modelliert werden. Dies wäre zu aufwendig. Vielmehr wird die Datenmenge auf Grundlage der bereits vorhandenen Raummodelle vergrößert. Dazu werden die Parameter Raumlänge l , Raumhöhe h , Fensterbreite b , Energiedurchlassfaktor der Fenster g und U-Wert der Fenster U der Raummodelle systematisch variiert. Diese Parameter wurden ausgewählt, weil so nur immer eine der Größen K , G und C in den Gleichungen 5.1 und 5.2 variiert wird und damit die Raumkenngrößen τ und γ unabhängig voneinander variiert werden können. Die durch die Variation der Parameter entstehenden neuen Raummodelle werden innerhalb ihrer Szenarien erneut optimiert. Jeder der Raumparameter wird einzeln variiert, d.h. die übrigen vier Parameter behalten ihren, durch das ursprüngliche Raummodell vorgegeben, Parameterwert bei. Die Parameter werden in folgenden Bereichen variiert:

- Raumlänge l in m im Bereich zwischen 3,0 und 10,0 mit Schritten der Größe 0,5 ([3,0:0,5:10,0])
- Raumhöhe h in m im Bereich [3,0:0,1:5,0]
- Fensterbreite b in m im Bereich [0,5:0,1:4,0]
- g-Wert der Fenster g im Bereich [0:0,1:1,0]
- U-Wert der Fenster U in $\frac{W}{m^2K}$ im Bereich [0,5:0,1:7,0]

Es werden demnach für die Raumlänge 15 Parameterwerte, für die Raumhöhe 21, die Fensterbreite 36, den g-Wert der Fenster elf und den U-Wert des Fensterglases 66 vorgegeben. Damit entstehen pro Szenario 149 neue Raummodelle, d.h. insgesamt werden, über alle Szenarien hinweg, 1192 Raummodelle erzeugt. Neben den Raummodellen hat auch das Umgebungsmodell Einfluss auf die Reglereignung. Dies wird bisher berücksichtigt, indem die Szenarien in unterschiedlichen Zeiträumen im Jahr definiert sind und somit, trotz Verwendung des gleichen Wettermodells für den Standort Chemnitz, unterschiedliche Wetterbedingungen vorherrschen. Um nun innerhalb eines Szenarios den Einfluss des Wettermodells auf die Reglereignung untersuchen zu können, werden unterschiedliche Umgebungsmodelle für die Standorte Helsinki und Moskau simuliert. Die für den Standort Chemnitz genutzten Zeiträume innerhalb der Szenarien bleiben bestehen. Für den Standort Helsinki wird die Raumlänge l und die Breite der Fenster b , für den Standort Moskau die Raumhöhe h variiert. So entstehen für den Standort Helsinki 408 und für die Standorte Moskau 168 weitere Raummodelle. Insgesamt stehen demnach nun 1768 Raummodelle zur Verfügung. Für diese Raummodelle werden je die drei Reglermodelle optimiert und deren Eignung nach Gleichung (4.14) festgestellt. Es sind also ca. 5300 Optimierungen durchzuführen (Abbildung 4.20).

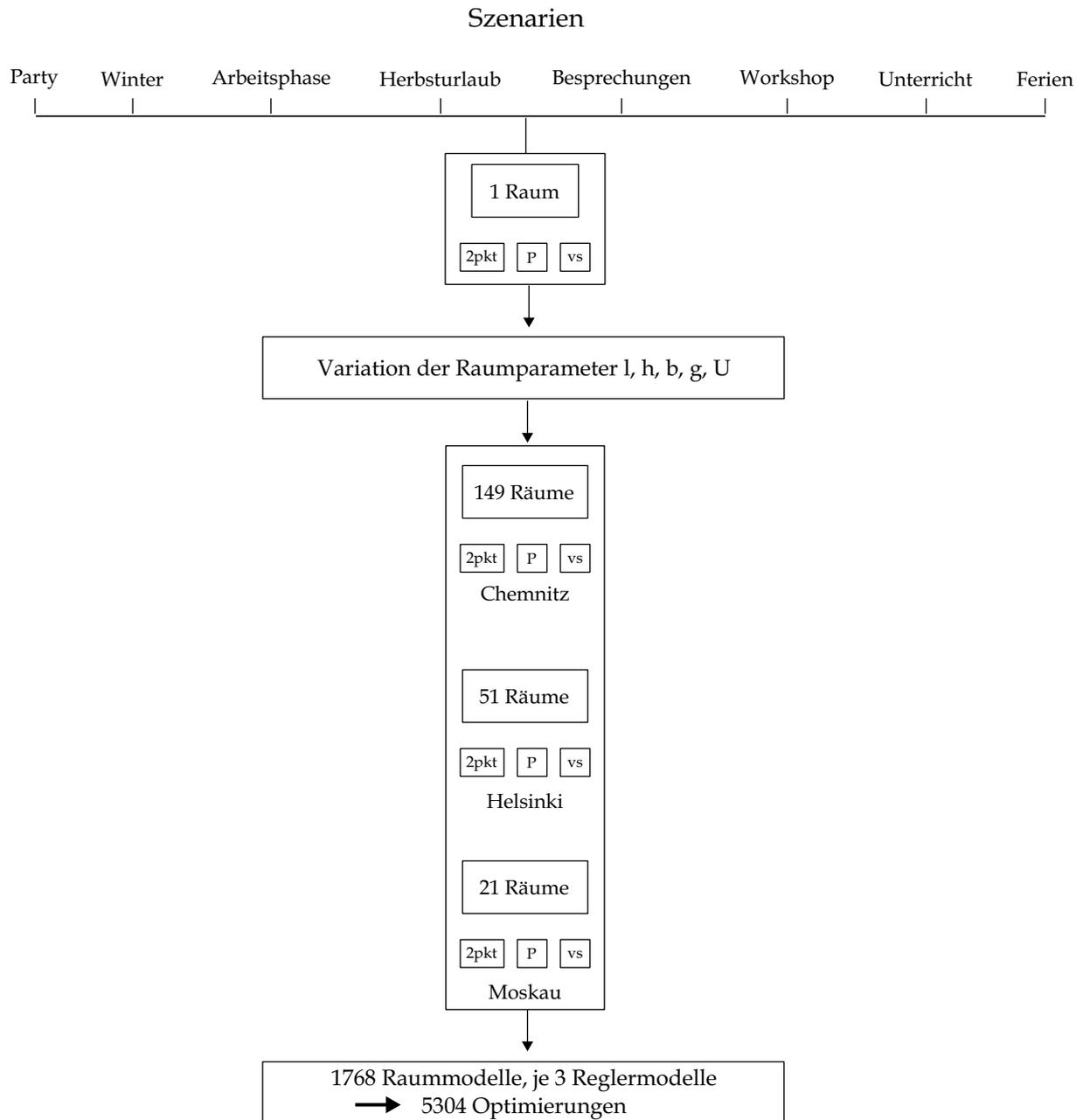


Abbildung 4.20. Zusammensetzung der erweiterten Datenbasis

Aufgrund der großen Anzahl an Optimierungen ist es notwendig, deren Ablauf zu automatisieren. Das heißt, dass die Raumparameter automatisch, nach fest vorgegebenen Regeln, variiert werden und dass nach jeder Variation die Optimierung der Reglerparameter automatisch gestartet wird. Anschließend müssen die optimierten Reglerparameter automatisch in einer Ergebnisdatei zusammengefasst werden (Abbildung 4.21).

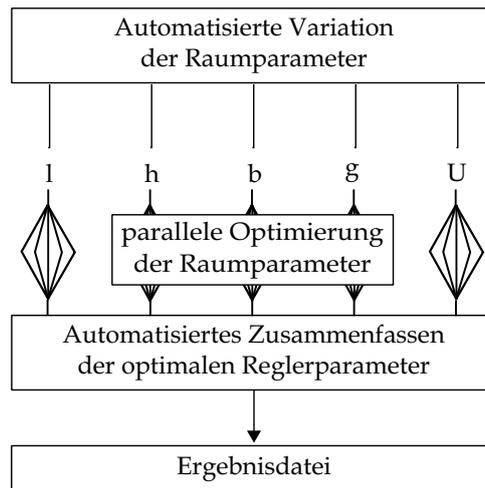


Abbildung 4.21. Schritte der Optimierung der Reglerparameter

Aufgrund der großen Datenmenge bietet sich eine parallele und damit zeitsparende Abarbeitung der Aufgaben in der Cloud an. Dazu wird das Werkzeug *GridWorker* ([Sch11]) genutzt, was zur Informationsverarbeitung in der Cloud vom IIS EAS entwickelt wurde. *GridWorker* ermöglicht es dem Anwender, Simulations-, Optimierungs- und Analyseaufgaben auf verfügbaren Backend-Ressourcen, wie Cluster-, Grid- oder Cloud-Computing durchzuführen. In Anhang F ist die Architektur, die Funktionsweise und die Bedienung von *GridWorker* dargestellt.

Nach Abschluss der Optimierungsarbeiten liegen für die Modelle des Zweipunktreglers, des P-Reglers sowie des vs-Reglers jeweils 1768 Datensätze vor, die ein konkretes Raummodell mit dem bzw. den optimalen Reglerparameter verknüpft. Auf Grundlage dieser Datenmenge werden dann in Kapitel 6.1 Zusammenhänge zwischen Raum- und optimalen Reglermodellen bestimmt.

4.6. Sensitivitätsanalyse

Die Optimierung liefert für jeden Datenpunkt der Datenbasis genau ein optimales Set an Reglerparametern, für welches die Zielfunktion minimal ist. Es ist jedoch denkbar, dass auch andere Parameter, die in der Nähe der optimalen liegen, zu keiner oder minimalen Änderung der Zielfunktion führen. Dieser Einfluss der optimalen Reglerparameter auf die Zielfunktion und damit auf die Reglereignung wird mittels einer Sensitivitätsanalyse ([RS87]) untersucht. Dabei wird eine zu betrachtende Systemgröße $\xi(t, P)$ in eine Taylorreihe um einen Nominalwert des Parameters P_{nom} entwickelt. Die partielle Ableitung $\frac{\partial \xi(t, P)}{\partial P}$ wird als Empfindlichkeit 1. Ordnung, $\frac{\partial^2 \xi(t, P)}{\partial P^2}$ als Empfindlichkeit 2. Ordnung bezeichnet.

$$\xi(t, P) \approx \tilde{\xi}(t, P) = \xi(t, P_{nom}) + \underbrace{\frac{\partial \xi(t, P)}{\partial P}}_{\substack{\text{Empfindlichkeit} \\ \text{1. Ordnung} \\ \text{bezüglich des} \\ \text{Parameters P} \\ \text{an der} \\ \text{Stelle } P_{nom}}} \Big|_{P_{nom}} (P - P_{nom}) + \frac{1}{2} \underbrace{\frac{\partial^2 \xi(t, P)}{\partial P^2}}_{\substack{\text{Empfindlichkeit} \\ \text{2. Ordnung} \\ \text{bezüglich des} \\ \text{Parameters P} \\ \text{an der} \\ \text{Stelle } P_{nom}}} \Big|_{P_{nom}} (P - P_{nom})^2 \quad (4.15)$$

Für verschiedene Parameterwerte P errechnet man so nach Gleichung (4.15) angenähert die Verläufe $\tilde{\xi}(t, P)$ der Systemgröße $\xi(t, P)$, ohne dass Simulationen des Systems erforderlich sind. Voraussetzung dafür ist die Kenntnis der Empfindlichkeiten, die durch Differenzenquotienten bestimmt werden können, wofür weitere Simulationen nötig sind. Die Größe der Empfindlichkeit, bildlich gesprochen also die Steilheit des Anstiegs der Systemgröße bezüglich des Parameters im Punkt P_{nom} (Abbildung 4.22), gibt wegen Gleichung (4.15) Aufschluss darüber, wie stark ein bestimmter Parameter die Systemgröße beeinflusst. Der Einfachheit halber wird die Taylorreihe (Gleichung (4.15)) üblicherweise nach dem linearen Glied abgebrochen.

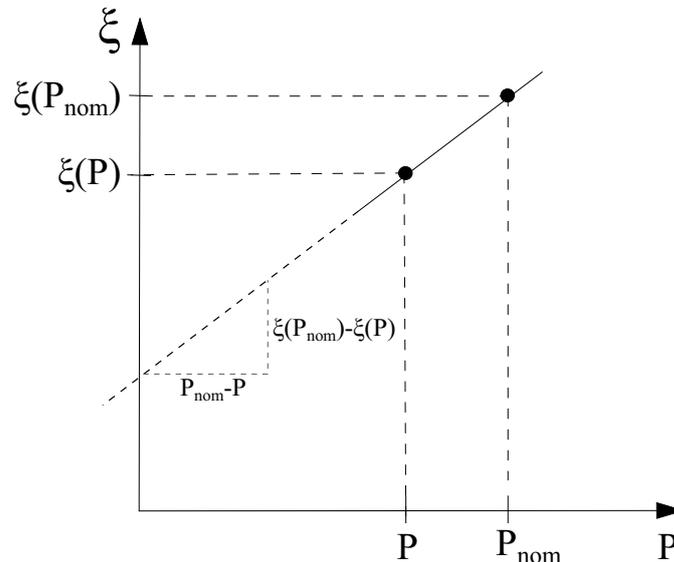


Abbildung 4.22. Empfindlichkeit 1. Ordnung der Systemgröße $\xi(t, P)$ bezüglich des Parameters P an der Stelle P_{nom}

Die Sensitivitätsanalyse wird exemplarisch für den Parameter T_{tol} des Zweipunktreglers im Szenario Arbeitsphase durchgeführt, indem der Einfluss von T_{tol} auf die Zielfunktion ZF untersucht wird. Die Empfindlichkeit 1. Ordnung wird durch einen Differenzenquotienten (Gleichung (4.16)) approximiert

$$\frac{\partial ZF(t, T_{tol})}{\partial T_{tol}} \approx \frac{ZF(t, T_{tol, nom} + \Delta T_{tol}) - ZF(t, T_{tol})}{\Delta T_{tol}} \quad (4.16)$$

und hat den in Abbildung 4.23 gezeigten Verlauf für $\Delta T_{tol} = 0, 2$.

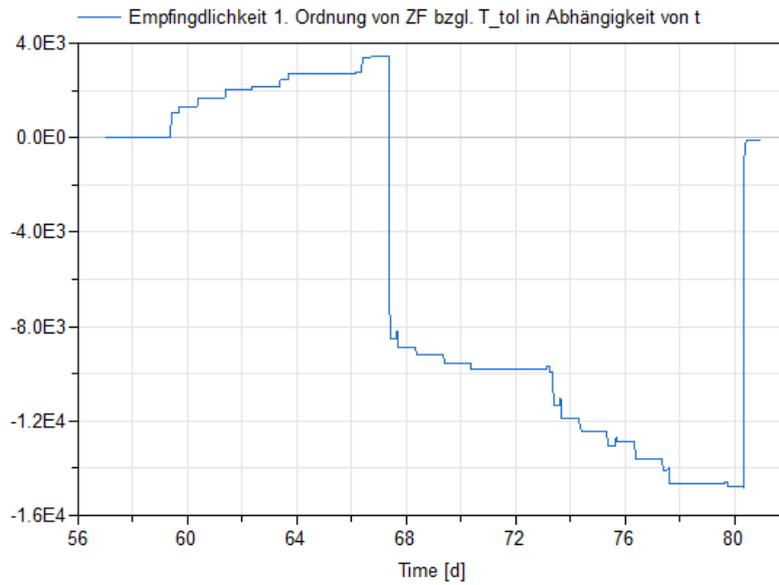


Abbildung 4.23. Empfindlichkeit 1. Ordnung von ZF bzgl. T_{tol} in Abhängigkeit von der Zeit t

Es ist zu erkennen, dass die Empfindlichkeit der ZF bzgl. T_{tol} innerhalb des Szenarios stark schwankt. Sie nimmt Werte in der Spanne von ca. 3400 bis ca. $-14660 \frac{1}{K}$ an. Das heißt, dass sich eine Änderung des Reglerparameters T_{tol} mit dem Faktor der zu jedem Zeitpunkt berechneten Empfindlichkeit auf den Verlauf von ZF auswirkt. Mit Abbildung 4.24 wird dies durch ein Beispiel verdeutlicht. Der Parameter T_{tol} wurde gegenüber seinem Nominalwert von 0,53 um 0,2 verkleinert. Abbildung 4.24 zeigt den Verlauf von ZF bei $T_{tol} = 0,53$ (blau, durchgehende Linie) und verändertem Parameter $T_{tolv} = 0,33$ (rot, markiert).

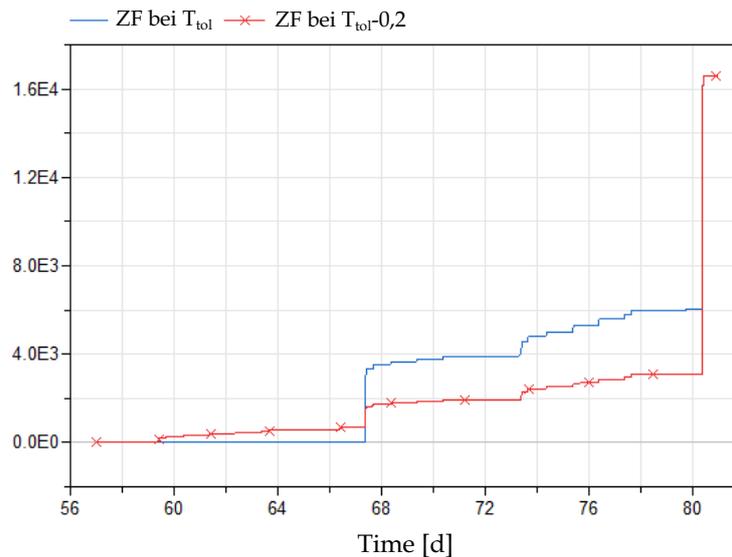


Abbildung 4.24. Änderung von ZF bei Subtraktion von 0,2 von T_{tol}

Die Empfindlichkeit zum letzten Zeitpunkt des Szenarios beträgt nahezu Null. Da der Wert der Zielfunktion nur zu diesem Zeitpunkt ausgewertet wird, zeigt sich für dieses Beispiel, dass eine Änderung des Reglerparameters T_{tol} von 0,53 auf 0,33 nur einen sehr geringen Einfluss auf die Reglereignung hat. Dies lässt vermuten, dass die Reglereignung nicht bei einem konkreten Parameter optimal ist, sondern vielmehr für einen bestimmten Parameterbereich akzeptable Werte annimmt. Um diese Vermutung zu bestätigen sind weitere Sensitivitätsanalysen für die anderen Szenarien und letztendlich für alle sich in der Datenbasis befindlichen Datenpunkte durchzuführen und auszuwerten.

5. Bestimmung und Berechnung von Kenngrößen und Gütemaßen

Der zu erforschende Zusammenhang zwischen Szenarien und passenden, optimalen Reglermodellen ist nur dann sinnvoll anwendbar, wenn er allgemeingültig ist. Das heißt zum einen, dass die Raum-, Nutzungs- und Standortmodelle quantitativ erfassbar sein müssen und zum anderen, dass der Zusammenhang auch für andere als die untersuchten Szenarien gelten muss. Es ist also notwendig, die Modelle innerhalb der Szenarien verallgemeinert zu beschreiben und den Zusammenhang zwischen den Reglermodellen und den allgemein beschriebenen Raum-, Nutzungs- und Standortmodellen zu quantifizieren. Diese allgemeine Beschreibung muss so gewählt sein, dass sie mit geringem Aufwand für beliebige Räume, Nutzungen und Wetterbedingungen anwendbar ist. In diesem Kapitel werden daher Kenngrößen bestimmt und beschrieben, die die Vielzahl von Parametern, welche die Eigenschaften der Modelle bestimmen, im Sinne der durchzuführenden Untersuchungen maßgeblich abbilden und so diese Modelle wesentlich charakterisieren. Diese Kenngrößen werden für die drei Standorte, alle Nutzungszeiträume und zunächst für die vier Demonstratorräume bestimmt. Anschließend werden die Kenngrößen zur Charakterisierung der Raummodelle auch für die durch Parametervariation erzeugten Raummodelle (Abschnitt 4.5) bestimmt. Die Kenngrößen dienen später gemeinsam mit den optimierten Reglerparametern als Grundlage für die Erforschung des Zusammenhangs zwischen Raum- und Reglermodellen.

5.1. Kenngrößen zur Beschreibung der Raummodelle

Raummodelle werden durch ihre Parameter, wie z.B. geometrische Abmessungen, Materialeigenschaften, Verhältnis zwischen opaken und transparenten Außenflächen uvm. bestimmt. Mit dieser Vielzahl an Parametern ist es schwierig, den gesuchten Zusammenhang zu charakterisieren. Daher ist es notwendig, aus der Menge an Parametern die wesentlichen, den Raum charakterisierenden, herauszuarbeiten. Dies wurde in den Arbeiten von Keller und seinen Co-Autoren [Kel97, KTM02, KM06] mit dem Ziel, den Leistungsbedarf für die Temperierung eines Raumes zu minimieren, bereits durchgeführt. Ein Ergebnis der Arbeiten von Keller ist die Bestimmung des Ankopplungsfaktors an das Klima γ und der Zeitkonstante des Raumes τ . Diese beiden Raumkenngrößen beschreiben nach [KM06] die thermische Reaktion eines Raumes auf ein Klima vollständig.

Es gilt:

$$\gamma = \frac{G}{K} \quad (5.1)$$

$$\tau = \frac{C}{K} \quad (5.2)$$

Die Größen K , G und C werden im Verlauf dieses Abschnittes beschrieben. Die Parameter γ und τ werden genutzt, um die Räume im Rahmen dieser Arbeit zu charakterisieren. Grund dafür ist, dass nach [KTM02] Räume, die die gleichen γ - und τ -Werte aufweisen, thermodynamisch ähnlich sind und sich diese Räume im gleichen Klima thermodynamisch genau gleich verhalten. Damit lassen sich Klassen von thermodynamisch ähnlichen Räumen finden, ohne genaue bauphysikalische Einzelheiten zu kennen. So lassen sich γ und τ leicht analytisch berechnen und erfordern kein aufwendiges Raummodell zu ihrer Bestimmung. Ihre Berechnung wird im Folgenden gezeigt.

γ ist nach [KM06] der Ankopplungsfaktor an das Klima. Er beschreibt die solare Temperaturkorrektur, die angibt, „inwieweit die Auswirkung der Außentemperatur im Rauminneren durch die solare Einstrahlung nach oben korrigiert wird.“¹ τ ist nach [KM06] die Zeitkonstante des Raumes. Sie beschreibt seine thermische Trägheit. Die Größe K in den Gleichungen (5.1) und (5.2) bezeichnet den thermischen Verlustfaktor eines Raumes durch Transmission durch die Baukonstruktion sowie den Luftwechsel mit der Gebäudeumgebung. Nach [KM06] und [Kel97] ist K ein Maß für die Dichtheit der äußeren Hülle. Die Außenfläche A_a des Raumes stellt die Energieaustauschfläche dar. Auf diese wird K normiert.

$$K = \frac{1}{A_a} \left(\sum_i (U_i \cdot A_i) \right) + n \cdot V_{\text{Raum}} \cdot \frac{(c \cdot \rho)_{\text{air}}}{3600 \text{ s}} \quad (5.3)$$

Dabei gilt:

A_a	gesamte Außenoberfläche in m^2
U_i	U-Wert des Außenelements i in $\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$
A_i	Fläche des Außenelements i in m^2
n	Luftwechselrate in $\frac{1}{\text{h}}$
V_{Raum}	Raumvolumen in m^3
$(c \cdot \rho)_{\text{air}}$	volumetrische Speicherkapazität der Luft in $\frac{\text{J}}{\text{K}}$

Die Größe G in Gleichung (5.1) ist nach [KM06] die mittlere Energie- oder auch Strahlungsdurchlässigkeit der Fassade für solare Einstrahlung. G ist ebenfalls auf die Außenfläche A_a des Raumes normiert. Es gilt:

$$G = \frac{1}{A_a} \cdot \sum_i (g_i \cdot A_{\text{transp } i}) \quad (5.4)$$

Dabei gilt:

g_i	Energiedurchlassgrad der transparenten Teilfläche i der Außenfläche
$A_{\text{transp } i}$	Fläche des transparenten Anteils i an der Außenfläche in m^2

¹KELLER, B.; MAGYARI, E.: Ein Design-Tool für den Entwurf von Niedrigenergiebauten. In: *Bauphysik* 28 (2006), Nr. 5, 321-329.

Der Energiedurchlassgrad g gibt den Anteil der Energie an, die aus senkrechter Gesamtsonnen- einstrahlung und sekundärer Wärmeabgabe von außen nach innen transportiert wird.

Die Größe C in Gleichung (5.2) ist die wirksame thermische Speicherkapazität des Raumes. Es gilt:

$$C = \frac{1}{A_a} \cdot \sum_i (A_{\text{opak } i} \cdot C_i) \quad (5.5)$$

mit

$$C_i = c_i \cdot \rho_i \cdot d_i \quad (5.6)$$

Dabei gilt:

- $A_{\text{opak } i}$ Fläche des opaken Anteils an der Begrenzungsfläche i in m^2
- C_i thermisch wirksame Wärmekapazität der Schicht i in $\frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{m}^2}$
- c_i spezifische Wärmekapazität der Schicht i in $\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
- ρ_i Dichte der Schicht i in $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
- d_i Dicke der Schicht i in m

Die Dicke d_i entspricht bei dickeren Schichten nicht der tatsächlichen Schichtdicke, sondern der thermisch wirksamen Schichtdicke, die ca. 10 cm beträgt. Die Nutzung der thermisch wirksamen Schicht in Gleichung (5.6) liefert die thermisch wirksame Speicherkapazität, welche das Vermögen von Bauteilen beschreibt, Wärme zu speichern und zeitversetzt wieder abzugeben. Eine oberflächennahe Schicht trägt insbesondere in der Kurzzeitdynamik, die in dieser Arbeit für die Regelung wichtig ist, erheblich mehr zur Speicherkapazität bei, als eine im Bauteilinneren liegende Schicht gleicher Dicke. Die in dieser Arbeit genutzten Schichtdicken liegen je nach Raummodell zwischen 16 cm und 30 cm und sind damit etwas zu dick im Sinne der thermisch wirksamen Kapazität. Dies führt dazu, dass die Raummodelle bei der Regelung der Raumtemperatur etwas zu träge reagieren. Methodisch ändert dies jedoch nicht die Ergebnisse der Arbeit.

Bestimmung der Raumkenngrößen für die Demonstratorräume

Um die Raumkenngrößen γ und τ für die Demonstratorräume zu berechnen, wurde ein *Modelica*-Modell namens **Raumdaten** entwickelt. Dieses wird innerhalb der Simulationsszenarien aufgerufen und liefert so neben γ und τ auch die zu ihrer Bestimmung notwendigen Parameter K , G , und C (Gleichungen ((5.3), (5.4), (5.5)). Für die Bestimmung der Raumkenngrößen für die Demonstratorraummodelle wäre ein einmaliger Aufruf des Modells **Raumdaten** ausreichend. Die Berechnung ist jedoch nicht aufwändig, hängt nicht von der Zeit ab und wird daher nach dem *Modelica* Konzept nur einmalig am Beginn der Simulation ausgeführt. So wird das Modell **Raumdaten** bei jeder Simulation der Szenarien aufgerufen. Dies bietet später bei der Berechnung der Raumkenngrößen für die durch Parametervariation entstandenen Raummodelle den Vorteil, dass für jedes dieser Raummodelle seine Raumkenngrößen γ und τ sowie K , G , und C gleich mitgeliefert werden.

Das Modell `Raumkenngrößen` besitzt zwei Eingangsgrößen, den Energiedurchlassgrad g der Fenster des betrachteten Raummodells und die Luftwechselrate h . Hier wird die Vereinfachung vereinbart, dass alle Fenster, die ein Raummodell besitzt, den gleichen Energiedurchlassgrad g aufweisen. Da die Raumkenngrößen zur Charakterisierung außerhalb der Nutzungszeiten berechnet werden sollen, wird die Mindestluftwechselrate h , die auch innerhalb der Szenarien herangezogen wird, genutzt. Die nach den Gleichungen (5.3), (5.4), (5.5) notwendigen Größen zur Berechnung von K , G und C und damit von γ und τ werden als Parameter in das Modell `Raumkennndaten` eingetragen. Diese Parameter sind:

- Breite des Raummodells b in m
- Länge des Raummodells l in m
- Höhe des Raummodells h in m
- Gesamtaußenfläche (identisch mit der Gesamtinnenoberfläche) A_a des Raummodells in m^2
- Information darüber, ob eine Begrenzungsfläche des Raummodells eine Außenwand ist. Dazu wurde für jede Begrenzungsfläche ein boolescher Parameter vereinbart, der den Wert `true` annimmt, wenn die betreffende Begrenzungsfläche eine Außenwand ist.

Folgende Parameter existieren je Begrenzungsfläche i des Raummodells im Modell `Raumdaten`:

- Breite $b_{\text{wand } i}$ in m
- Höhe $h_{\text{wand } i}$ in m
- Anzahl der Materialschichten $n_{\text{schichten_wand } i}$, aus denen die Begrenzungsfläche i aufgebaut ist
- spezifische Wärmekapazität $c_{\text{schichten_wand } i}$ in $\frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$ der am Aufbau der Begrenzungsfläche i beteiligten Schichten
- Dichte $\rho_{\text{schichten_wand } i}$ in $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ der am Aufbau der Begrenzungsfläche i beteiligten Schichten
- Dicke $d_{\text{schichten_wand } i}$ in m der am Aufbau der Begrenzungsfläche i beteiligten Schichten
- U-Wert $U_{\text{wand } i}$ in $\frac{\text{W}}{\text{m}^2\cdot\text{K}}$ der Begrenzungsfläche i
- Dicke $d_{\text{wand } i}$ in m der Begrenzungsfläche i

Ist ein Fenstermodell Bestandteil einer Begrenzungsschicht i , so existieren folgende, für das Fenstermodell relevante, Parameter.

- Breite $b_{\text{fenster } i}$ der transparenten Fläche i in m
- Höhe $h_{\text{fenster } i}$ der transparenten Fläche i in m
- U-Wert $U_{\text{fenster } i}$ der transparenten Fläche i in $\frac{\text{W}}{\text{m}^2\cdot\text{K}}$

Tabelle 5.1 fasst die Werte für die Raumkenngrößen γ und τ sowie K , G und C zusammen. Die Anwendung von Gleichung (5.2) mit den Werten für C und K aus Tabelle 5.1 liefert τ in Sekunden. In der Tabelle ist τ in Stunden angegeben.

Tabelle 5.1. Raumkenngrößen (gerundet) der Demonstratorräume

Raummodell	Kenngrößen				
	γ in $\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$	τ in h	K in $\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$	G	C in $\frac{\text{J}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$
Gartenhaus	0,058	104,5	0,31	0,02	1,15e5
Büro	0,258	206,9	1,04	0,27	1,21e6
Konferenzraum	0,198	260,3	2,04	0,40	1,91e6
Klassenraum	0,430	407,6	1,08	0,47	1,59e6

Das Gartenhaus weist den kleinsten Wert für γ auf. Die Auswirkung der Außentemperatur auf die Raumtemperatur wird demnach durch die Einstrahlung in den Raum wenig beeinflusst. Dies ist dadurch zu erklären, dass das Gartenhausmodell eine wesentlich größere Gesamtaußenfläche bezogen auf die transparente Außenfläche besitzt und demnach die mittlere Strahlungsdurchlässigkeit G der Fassade gering ist. Auch die Zeitkonstante τ des Gartenhausmodells ist im Vergleich zu den anderen Raummodellen am geringsten. Auch hier ist als Grund die vergleichsweise geringe Fensterfläche bezogen auf die große Außenfläche zu nennen. Somit ergibt sich die Speicherkapazität C des Raumes (Gleichung (5.5)) im Wesentlichen aus der Summe der Wärmekapazitäten der einzelnen Begrenzungsschichten. Die Modelle des Büro- und des Konferenzraumes weisen vergleichbare Raumkenngrößen γ und τ auf. Sie sind sich demnach thermodynamisch am ähnlichsten. Das Modell des Klassenraumes weist die größten Werte für γ auf. Der Grund dafür ist, dass die Fensterfläche bezogen auf die Gesamtaußenfläche vergleichsweise groß ist und damit die Strahlungsdurchlässigkeit G einen großen Wert annimmt, während K nahe eins liegt. Auch für τ besitzt das Modell des Klassenraumes den größten Wert. Zwar ist der thermische Verlustfaktor K ähnlich groß wie der des Büromodells, doch die Speicherkapazität C des Klassenraummodells ist größer als die des Büromodells.

Die Raumkenngrößen werden auch für die Raummodelle, welche durch Parametervariation aus den vier ursprünglichen Raummodellen entstanden sind, berechnet. In Abbildung 5.1 sind die Kombinationen von γ und τ dargestellt, die durch die Vielzahl der Raummodelle entstehen.

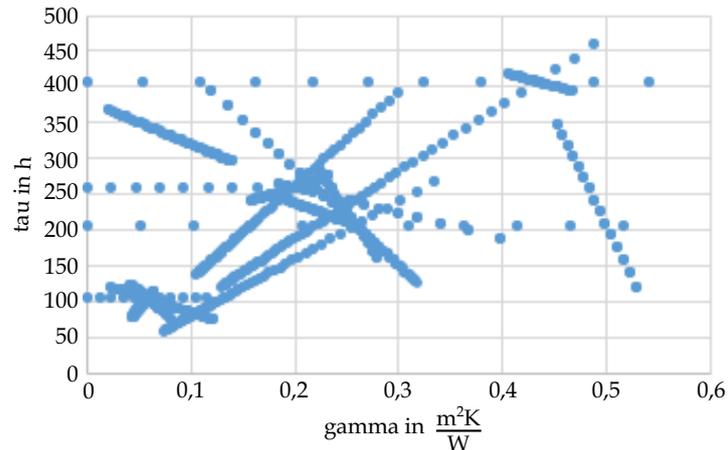


Abbildung 5.1. Durch Parametervariation entstandene Raummodelle, beschrieben durch ihre Raumparameter γ und τ

γ nimmt Werte im Bereich zwischen $0 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$ und $0,54 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$ und τ Werte im Bereich zwischen 60 h und 460 h an. Innerhalb dieser Bereiche sind die Werte nicht gleichmäßig verteilt. Datenpunkte, die Werte $\tau \geq 600$ h aufwiesen, wurden entfernt, da nach [KTM02] für die Zeitkonstante gilt:

$$50 \text{ h} \leq \tau \leq 400 \text{ h}$$

Der Minimalwert entspricht einem wenig gedämmten Leichtbau, der Maximalwert einem bestens gedämmten Schwerstbau aus Beton. Die wenigen Räume mit Werten der Zeitkonstante von $400 \text{ h} \leq \tau \leq 460 \text{ h}$ werden als Grenzfälle weiterhin in der Arbeit mit betrachtet. Die ursprünglich hohen Werte von $\tau \geq 600$ h entstanden durch die Variation der Fensterbreite des Klassenraummodells. Dieses besitzt ursprünglich ein 8,40 m breites Fenster. Die Fensterbreite wird jedoch nur im Bereich $0,5 \text{ m} \leq b \leq 4,0 \text{ m}$ variiert, was nach Analyse der Zeitkonstanten, zu ungebräuchlichen Räumen führt.

5.2. Kenngrößen zur Beschreibung der Klimamodelle

Die Raummodelle werden im Rahmen ihrer Simulationsszenarien an unterschiedlichen Standorten und damit unterschiedlichen Klimata betrachtet. Die Standorte müssen, genau wie die Raummodelle, durch ihre bestimmenden Kenngrößen charakterisiert werden. Die wesentlichen Einflussgrößen eines Klimas auf die Raumtemperatur sind nach [Kel97] die Außenlufttemperatur und die direkte solare Strahlung. Diese werden durch die vier Klimaparameter

- Mittelwert der Außenlufttemperatur $\bar{\vartheta}_a$
- Tagesamplitude der Außenlufttemperatur $\Delta\vartheta_a$
- Mittelwert der solaren Einstrahlung \bar{I}
- Tagesamplitude der solaren Einstrahlung ΔI

beschrieben. Nach [Kel97] sind diese Werte aufgrund des Jahresgangs je Ort für mindestens zwei Zeiträume, Sommer und Winter, zu bestimmen. In dieser Arbeit werden sie für die Zeiträume, in denen die Simulationsszenarien definiert sind, sowie vierteljährlich bestimmt:

- 29. bis 30. Dezember (Szenario Party)
- 03. bis 06. Januar (Szenario Winter)
- 27. Februar bis 21. März (Szenario Arbeitsphase)
- 02. bis 18. November (Szenario Herbsturlaub)
- 17. bis 24. Mai (Szenario Besprechungen)
- 06. bis 11. Juli (Szenario Workshop)
- 15. August bis 25. September (Szenario Unterricht)
- 15. Februar bis 14. März (Szenario Ferien)
- 01. Dezember bis 28. Februar
- 01. März bis 31. Mai
- 01. Juni bis 31. August
- 01. September bis 30. November

Die Klimaparameter werden für die drei Standorte Chemnitz, Moskau und Helsinki mittels einer Fast-Fourier-Transformation (FFT) der zeitlichen Verläufe der Außenlufttemperatur und der direkten Strahlung berechnet. Dazu wird das Simulationsprogramm Dymola (Version 2018) genutzt, da dieses ohnehin in der gesamten Arbeit zur Simulation eingesetzt wird und daher die zeitlichen Verläufe von Außentemperatur und direkter Strahlung vorliegen. Die Durchführung der FFT ist beispielhaft für die Außentemperatur am Standort Chemnitz im Szenario Party in Anhang G dargestellt. Tabelle 5.2 fasst die Klimaparameter zusammen.

Zeitraum und Standort	Klimaparameter			
	$\bar{\vartheta}_a$ in K	$\Delta\vartheta_a$ in K	\bar{I} in $\frac{W}{m^2}$	ΔI in $\frac{W}{m^2}$
29.-30. Dezember				
Chemnitz	275,8	1,14	22,7	43,4
Moskau	271,9	1,56	1,6	0
Helsinki	271,1	4,17	4,7	9,05
03.-06. Januar				
Chemnitz	278,66	0,34	7,6	14,4
Moskau	270,2	1,25	9,7	18,2
Helsinki	271,5	1,26	2,8	5,43
27. Februar bis 21. März				
Chemnitz	277,6	1,26	20,1	34,0

Zeitraum und Standort	Klimaparameter			
	$\bar{\vartheta}_a$ in K	$\Delta\vartheta_a$ in K	\bar{I} in $\frac{W}{m^2}$	ΔI in $\frac{W}{m^2}$
Moskau	269,0	2,56	40,6	68,8
Helsinki	270,2	3,32	45,1	76,2
02. bis 18. November				
Chemnitz	278,5	1,39	22,0	39,3
Moskau	274,1	1,72	8,5	15,5
Helsinki	275,4	1,87	4,8	8,7
17. bis 24. Mai				
Chemnitz	283,8	2,92	68,4	97,4
Moskau	274,7	5,49	147,2	202,6
Helsinki	285,7	4,69	98,2	134,1
06. bis 11. Juli				
Chemnitz	289,8	2,85	99,2	145,4
Moskau	275,1	3,62	71,4	90,9
Helsinki	291,4	4,31	126,0	162,0
15. August bis 25. September				
Chemnitz	287,6	3,17	84,3	132,0
Moskau	274,7	3,87	70,28	110,2
Helsinki	287,6	3,72	53,2	81,0
15. Februar bis 14. März				
Chemnitz	276,0	1,48	22,9	38,7
Moskau	269,0	2,4	32,6	57,1
Helsinki	268,9	3,2	32,1	55,8
Dezember-Februar				
Chemnitz	273,9	1,08	17,2	30,6
Moskau	264,8	1,44	10,4	18,69
Helsinki	269,7	1,82	5,61	10,23
März-Mai				
Chemnitz	281,5	2,26	56,28	87,05
Moskau	279,7	3,82	71,14	104,91
Helsinki	277,8	4,28	83,24	122,58
Juni-August				
Chemnitz	290,0	3,47	118,32	171,47
Moskau	291,1	4,19	96,15	130,5
Helsinki	289,7	4,44	107,87	139,84
September-November				
Chemnitz	281,9	1,92	41,68	70,22
Moskau	279,3	2,36	26,76	45,0
Helsinki	279,3	2,53	22,14	36,51

5.3. Kenngrößen zur Beschreibung des Nutzerverhaltens

Ausgehend vom zeitabhängigen Signal der Raumnutzung (vgl. Abschnitt 4.3.3) werden die Kenngrößen Anzahl der Personen n_{Pers} sowie durchschnittliche Dauer einer Belegung Δt_{Bel} zur Erfassung des Nutzerverhaltens festgelegt. n_{Pers} ist in vielen Fällen ein Durchschnittswert der Anzahlen von Personen im Raum. n_{Pers} kann durch Informationen aus Raumnutzungsplänen von z.B. Hörsälen, Klassenzimmern oder Konferenzräumen bekannt sein. In anderen Fällen muss die Anzahl geschätzt werden, was üblicherweise durch Kenntnis der Raumnutzung recht gut gelingt. Auch die durchschnittliche Gesamtdauer der Belegung Δt_{Bel} kann anhand typischer Raumnutzungen oder Belegungsplänen geschätzt werden. Dazu muss ein Zeitraum, für den Δt_{Bel} vorliegen soll, bestimmt werden. Für diese Arbeit werden dieselben Zeiträume zur Bestimmung von Δt_{Bel} festgelegt, für die auch die Wetterkenngrößen berechnet werden (vgl. Tabelle 5.2).

5.4. Gütemaß zur Bewertung der Reglereignung

In der Regelungstechnik ist die Regelgüte ein feststehender Begriff. Er fällt im Zusammenhang mit der Reglerentwurfsaufgabe, die nach [Lun16] zum Ziel hat, ein geeignetes Reglergesetz für eine gegebene Regelstrecke zu finden, sodass der geschlossene Regelkreis die Güteanforderungen erfüllt. Die Regelgüte bezieht sich demnach nicht auf den Regler selbst, sondern auf den gesamten Regelkreis. Der Standardregelkreis (Abbildung 5.2) besteht aus Regelstrecke, Regler, Führungs- ($w(t)$)- und Störgröße ($d(t)$) als Eingangsgrößen und einer Ausgangsgröße ($y(t)$).

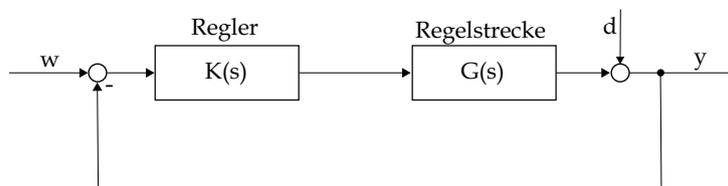


Abbildung 5.2. Regelkreis, eigene Darstellung nach [Lun16]

Die vier Güteforderungen für den gesamten Regelkreis nach [Lun16] sind:

- **Stabilitätsanforderung:** Der geschlossene Regelkreis muss asymptotisch stabil sein.
- **Forderung nach Störkompensation:** Für vorgegebene Klassen von Führungs- und Störsignalen soll die Regelgröße der Führungsgröße asymptotisch folgen.
- **Dynamikforderungen:** Der dynamische Zusammenhang zwischen der Führungsgröße $w(t)$ bzw. der Störgröße $d(t)$ und der Regelgröße $y(t)$ soll vorgegebene Güteforderungen erfüllen.
- **Robustheitsforderungen:** Die drei zuerst genannten Forderungen sollen trotz Unsicherheiten im Regelstreckenmodell erfüllt werden.

In der Praxis sind die Regelungsaufgaben oft nicht in Form des Regelkreises gegeben. Die Forderungen an eine Regelung beziehen sich oft auf praktische Fragestellungen, wie z.B. nach dem Energieverbrauch, der Ressourcenschonung oder der Qualität eines Produktes. Diese Fragestellungen müssen demnach zunächst in die regelungstechnischen Fragestellungen überführt werden.

Für die Regelkreise im Rahmen dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass die o.g. Güteanforderungen erfüllt sind. Es werden kein Aufschwingen und keine Instabilitäten beobachtet und es wird festgestellt, dass die Raumtemperatur mindestens grob der vorgegebenen Zieltemperatur folgt.

Zur Auswahl eines passenden Reglers für ein Raummodell innerhalb eines Szenarios muss jedoch ein Gütemaß gefunden werden, welches Vergleiche zwischen den Reglern erlaubt und nicht im o.g. regelungstechnischen Sinne verstanden werden darf. Dieses Gütemaß bewertet den Heizenergieverbrauch, der aufgrund der Anwendung des Reglers aufgewendet werden muss unter Beachtung der Einhaltung der vorgegebenen Komfortgrenztemperaturen. Zweckmäßig wird die zur Optimierung der Reglerparameter genutzte Zielfunktion (Gleichung (4.14)) als Gütemaß verwendet, da sie den Heizenergieverbrauch minimiert und die Einhaltung der Komfortgrenzen berücksichtigt.

In Kapitel 4 wurde die Datenbasis nach Abbildung 3.3 angelegt und mit Informationen über den Typ des Reglers und den optimalen Reglerparametern für 5304 Datensätzen gefüllt. In diesem 5. Kapitel wurden für alle Datensätze die Raum-, Nutzungs- und Klimaparameter sowie die Reglergüte ergänzt und damit die Datenbasis vervollständigt. Ein einzelner Eintrag in der Datenbasis umfasst nun folgende Größen:

- Reglertyp (Zweipunkt-, P- oder vs-Regler)
- optimierte Reglerparameter
- Gütemaß ZF des Reglers
- Raumkenndaten
- Nutzerkenndaten
- Standortkenndaten

Für das Szenario Party am Standort Chemnitz unter Verwendung des Zweipunktreglers beispielsweise zeigt Tabelle 5.3 den entsprechende Eintrag in der Datenbasis.

Tabelle 5.3. Kenngrößen für das Szenario Party am Standort Chemnitz mit Zweipunktregler

Typ	T_{tol}	$\frac{ZF}{t_{\text{sim}}}$	γ	τ	$\bar{\vartheta}_a$	\bar{I}	$\Delta\vartheta_a$	ΔI	H	n_{Pers}	Δt_{Bel}
Zweipunkt	0,5	1,17e-05	0,057744	104,5	2,67	22,7	1,14	43,35	1	15	28800

6. Ermittlung und Bewertung von Beziehungen zwischen Räumen und Reglern

In diesem Kapitel werden die bestehenden Beziehungen zwischen den optimal parametrisierten Reglern und den ermittelten Kenngrößen für Räume, deren Nutzung und Standorte ergründet und quantitativ beschrieben (Abbildung 6.1).

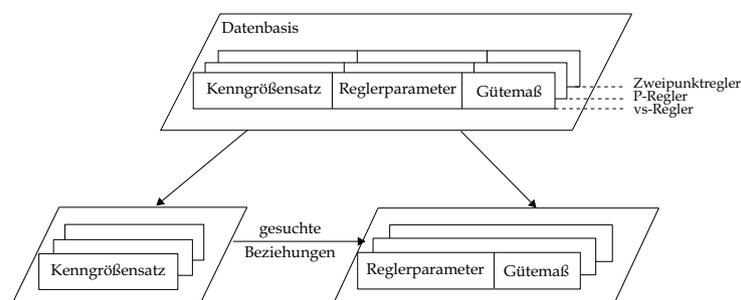


Abbildung 6.1. Ermittlung der Beziehungen zwischen Räumen und Reglern

Es wird so vorgegangen, dass die Beziehungen zunächst für jeden Regler einzeln ermittelt werden, d.h. es werden die Daten, die für einen konkreten Regler relevant sind, aus der Datenbasis herausgetrennt und den Analysen zugrunde gelegt.

Wenn die Beziehungen gefunden sind, werden sie für einen neuen Raum, der nicht Bestandteil der Datenbasis ist, angewendet. Dabei wird mittels aller erfassten Beziehungen geprüft, für welche der beste Wert für das Gütemaß der Reglereignung (Gleichung (4.14)) erreicht werden kann. Dieses Vorgehen ermöglicht es, das entwickelte Verfahren zur Wahl eines geeigneten Reglers leicht um weitere Regler zu erweitern. So müssen bei Hinzunahme eines neuen Reglers nicht alle Beziehungen zwischen Räumen und Reglern neu bestimmt werden, sondern nur die zwischen dem neu hinzugekommenen Regler und den Räumen.

6.1. Erfassung der Beziehungen zwischen Räumen und Reglern

Zur Analyse der Beziehungen werden bekannte Verfahren aus der Statistik eingesetzt. Diese dienen dazu, Zusammenhänge zwischen Variablen zu analysieren, um sie zu beschreiben, zu erklären oder mit ihrer Hilfe zukünftige Entwicklungen vorherzusagen. In Anhang H werden unterschiedliche Analysemethoden beschrieben. Als Grundlage für die dortigen Ausführungen

wird das Standardwerk [BEPW15] benutzt. Um aus der Vielzahl existierender Analyseverfahren anwendbare und geeignete auszuwählen, sind zunächst die Skalenniveaus der Daten der Datenbasis zu bestimmen. Dies ist notwendig, da das Skalenniveau die Anwendbarkeit vieler Analysemethoden einschränkt. Anschließend werden die zwei Gruppen von Analysemethoden, die struktur-prüfenden und struktur-erkennenden Verfahren beschrieben. Auf die Regressionsanalyse und Künstliche Neuronale Netze (KNN) wird genauer eingegangen, da diese beiden Verfahren schließlich genutzt werden, um die gesuchten Beziehungen zu ermitteln.

Im folgenden Abschnitt 6.1.1 wird zunächst untersucht, ob die Beziehungen zwischen optimal parametrisierten Reglern und Räumen mittels linearer Regressionsanalysen beschrieben werden können. Um sich dem Problem schrittweise anzunähern, werden zunächst einige Analysen unter Nutzung einer Teilmenge B der insgesamt zur Verfügung stehenden Daten, durchgeführt. Die Teilmenge besteht aus den Datensätzen, die durch Simulation der ursprünglichen 24 Szenarien entstanden sind. Das heißt, dass für jedes der drei Reglermodelle acht Datensätze vorliegen. Je zwei dieser Datensätze sind durch die Nutzung des gleichen Raummodells entstanden, d.h. sie besitzen die gleichen Raumkenngrößen γ und τ , unterscheiden sich jedoch in ihren Wetterbedingungen und ihrer Nutzung (siehe Abschnitt 4.3).

Der Analyse anhand einer Teilmenge der Daten folgen Untersuchungen am Gesamtdatensatz. Es werden wiederum zunächst lineare Regressionsanalysen durchgeführt. Anschließend wird in Abschnitt 6.1.2 untersucht, ob sich die Beziehungen mittels KNN beschreiben lassen.

6.1.1. Regressionsanalysen

Regressionsanalyse für den Zweipunktregler aus einer Teilmenge B des Gesamtdatensatzes

Der Reglerparameter T_{tol} des Zweipunktreglers soll mit Hilfe der multiplen linearen Regression geschätzt werden. Das dazu gewählte Regressionsmodell besitzt die Form nach Gleichung (6.1).

$$\widehat{T}_{\text{tol}} = b_0 + b_1\gamma + b_2\tau + b_3\bar{\vartheta}_a + b_4\bar{I} \quad (6.1)$$

Es wird angenommen, dass der Wert der Zielfunktion \widehat{ZF} von den Raumkenngrößen γ und τ sowie von den Wetterkenngrößen $\bar{\vartheta}_a$ (Mittelwert der Außenlufttemperatur) und \bar{I} (Mittelwert der solaren Einstrahlung) abhängt. Die Abhängigkeit von den Wetterkenngrößen $\Delta\vartheta_a$ (Tagesamplitude der Außenlufttemperatur) und ΔI (Tagesamplitude der solaren Einstrahlung) sowie vom Typ der Heizung H , der Anzahl der Personen der aktuellen Belegungsphase $Anz_Personen$ und der durchschnittlichen Dauer einer Belegungsphase Δt_{Bel} , wird der Einfachheit halber zunächst noch nicht untersucht. Die Schätzung der Koeffizienten b_0, b_1, b_2, b_3 und b_4 erfolgt mittels des Statistik Werkzeugs PSPP [PSP20]. Das Ergebnis der Analyse ist in Abbildung 6.2 gezeigt.

```

REGRESSION
/VARIABLES= gamma tau TA_mittel Dir_mittel
/DEPENDENT= T_tol
/METHOD=ENTER
/STATISTICS=COEFF R ANOVA.

```

Modellzusammenfassung (T_tol)

R	R-Quadrat	Korrigiertes R-Quadrat	Standardfehler des Schätzers
,75	,57	-,01	1,31

ANOVA (T_tol)

	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
Regression	6,70	4	1,67	,98	,529
Residual	5,14	3	1,71		
Gesamt	11,83	7			

Koeffizienten (T_tol)

	Unstandardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten		t	Sig.
	B	Standardfehler	Beta			
(Konstante)	-,61	1,87	,00		-,33	,761
gamma	-7,61	15,56	-,83		-,49	,658
tau	,01	,02	,58		,34	,757
TA_mittel	,05	,30	,20		,16	,881
Dir_mittel	,02	,05	,55		,44	,692

Abbildung 6.2. PSPP-Ausgabe der Regressionsanalyse für den Zweipunktregler zur Bestimmung von T_{tol}

Die Regressionskoeffizienten sind in der Tabelle *Koeffizienten (T_tol)* in Spalte *B* in Abbildung 6.2 notiert. Mit diesen Koeffizienten ergibt sich folgende Regressionsformel (Gleichung (6.2)):

$$\widehat{T}_{tol} = -0,61 - 7,61\gamma + 0,01\tau + 0,05\bar{\vartheta}_a + 0,02\bar{I} \quad (6.2)$$

Nach Tabelle *Modellzusammenfassung (T_tol)* in Abbildung 6.2 besitzt die ermittelte Regressionsgerade (Gleichung (6.2)) ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,57$. Da die Stichprobe nur aus acht Datensätzen besteht und so im Vergleich zur Anzahl der unabhängigen Variablen (vier) sehr klein ist, ist das korrigierte Bestimmtheitsmaß R_{kor}^2 aussagekräftiger als das reine Bestimmtheitsmaß R^2 (vgl. Anhang H). Mit $R_{kor}^2 = -0,01$ ist das korrigierte Bestimmtheitsmaß negativ, was auf eine sehr schlechte Anpassung des Modells an die beobachteten Daten schließen lässt. Das gewählte Regressionsmodell ist unbrauchbar.

Nun soll der Wert der Zielfunktion ZF mit Hilfe der multiplen linearen Regression aus der Teilmenge B des Gesamtdatensatzes ermittelt werden. Es wird ein Regressionsmodell der Form

$$\widehat{ZF} = b_0 + b_1\gamma + b_2\tau + b_3\bar{\vartheta}_a + b_4\bar{I} \quad (6.3)$$

gewählt. Die Abhängigkeit der ZF von den Wetterkenngrößen $\Delta\vartheta_a$ (Tagesamplitude der Außenlufttemperatur) und ΔI (Tagesamplitude der solaren Einstrahlung) sowie vom Typ der Heizung H , der Anzahl der Personen der aktuellen Belegungsphase $Anz_Personen$ und der durchschnittlichen Dauer einer Belegungsphase Δt_{Bel} , wird, wie bei der Bestimmung von T_{tol} , der Einfachheit halber zunächst noch nicht untersucht. Die Schätzung der Koeffizienten b_0, b_1, b_2, b_3 und b_4 er-

folgt wieder mittels des Statistik Werkzeugs PSPP [PSP20]. Das Ergebnis der Analyse ist in Abbildung 6.3 gezeigt.

```

REGRESSION
/VARIABLES= gamma tau TA_mittel Dir_mittel
/DEPENDENT= ZF
/METHOD=ENTER
/STATISTICS=COEFF R ANOVA.

```

Modellzusammenfassung (ZF)

R	R-Quadrat	Korrigiertes R-Quadrat	Standardfehler des Schätzers
,85	,72	,35	,19

ANOVA (ZF)

	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
Regression	,29	4	,07	1,95	,305
Residual	,11	3	,04		
Gesamt	,40	7			

Koeffizienten (ZF)

	Unstandardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	t	Sig.
	B	Standardfehler	Beta		
(Konstante)	,00	,27	,00	-,01	,995
gamma	3,70	2,28	2,21	1,62	,204
tau	,00	,00	-1,50	-1,10	,353
TA_mittel	,04	,04	,85	,85	,456
Dir_mittel	,00	,01	-,65	-,65	,564

Abbildung 6.3. PSPP-Ausgabe der Regressionsanalyse für den Zweipunktregler zur Bestimmung von ZF

Die Regressionskoeffizienten sind der Spalte B der Tabelle *Koeffizienten (ZF)* in Abbildung 6.3 notiert. Mit diesen Koeffizienten ergibt sich folgende Regressionsformel:

$$\widehat{ZF} = 3,7\gamma + 0,4\bar{\vartheta}_a \quad (6.4)$$

Die Koeffizienten b_0, b_2 und b_4 haben den Wert Null. Demnach liegt keine Abhängigkeit von τ und \bar{I} vor. Nach Tabelle *Modellzusammenfassung (ZF)* in Abbildung 6.3 besitzt die ermittelte Regressionsgerade (Gleichung (6.4)) ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,72$. Das korrigierte Bestimmtheitsmaß besitzt einen Wert von $R_{\text{kor}}^2 = 0,35$. Dieser Wert ist recht klein und lässt damit auf eine schlechte Anpassung des Modells an die beobachteten Daten schließen. Dennoch liegt er höher als der für T_{tol} ($R_{\text{kor}}^2 = -0,01$). Daher wird das Regressionsmodell im Folgenden weiter bewertet. Die Analyse des Modells mittels des F-Tests (vgl. Anhang H) ergibt einen empirischen Wert $F_{\text{emp}} = 1,95$. Dieser kann Spalte F der Tabelle *ANOVA (ZF)* in Abbildung 6.3 entnommen werden. Zum Testen der Nullhypothese ist dieser Wert mit dem theoretischen F-Wert F_{theo} zu vergleichen. F_{theo} nimmt für verschiedene Irrtumswahrscheinlichkeiten unterschiedliche Werte an. F_{theo} lässt sich aus Tabellenwerken für die F-Verteilung entnehmen (z.B. [BEPW15]). Dazu ist die Kenntnis der Freiheitsgrade der erklärten Streuung $df_{\text{Regression}} = J = 4$ sowie der nicht erklärten Streuung $df_{\text{Residual}} = K - J - 1 = 3$ notwendig. Beide Werte sind in Tabelle *ANOVA (ZF)* in Spalte df in Abbildung 6.3 angegeben. Folgende theoretische F-Werte wurden [BEPW15] entnommen:

$F_{\text{theo}} = 28,71$ für ein Signifikanzniveau von 1%

$F_{\text{theo}} = 9,12$ für ein Signifikanzniveau von 5%

$F_{\text{theo}} = 5,34$ für ein Signifikanzniveau von 10%

Der empirische F-Wert F_{emp} ist kleiner als die drei ermittelten Werte für F_{theo} . Damit wird die Nullhypothese, die besagt, dass alle Regressionskoeffizienten gleich Null sind, nicht verworfen (vgl. Anhang H).

Der Zusammenhang ist damit statistisch nicht signifikant und die ermittelte Regressionsgerade unbrauchbar. Dies bedeutet jedoch nicht, dass kein Zusammenhang besteht. Vielmehr ist es wahrscheinlich, dass eine Erweiterung der Stichprobenmenge ihn offenbart. Daher wird im Folgenden eine Regressionsanalyse unter Nutzung des Gesamtdatensatzes durchgeführt.

Regressionsanalysen für den Zweipunktregler unter Nutzung des Gesamtdatensatzes

Der Wert des Reglerparameters T_{tol} soll aus den bekannten Daten des Gesamtdatensatzes ermittelt werden. Zur Analyse wird wieder das Werkzeug PSPP eingesetzt. Es wird ein Regressionsmodell der Form

$$\hat{T}_{\text{tol}} = b_0 + b_1\gamma + b_2\tau + b_3\bar{\vartheta}_a + b_4\bar{I} + b_5\Delta\vartheta_a + b_6\Delta I \quad (6.5)$$

genutzt. Wie Gleichung (6.5) beschreibt, wird angenommen, dass der Wert des Reglerparameters \hat{T}_{tol} von den Raumkenngrößen γ und τ und von den Wetterkenngrößen $\bar{\vartheta}_a$, \bar{I} , $\Delta\vartheta_a$ und ΔI beeinflusst wird. Die Abhängigkeit von H , $Anz_Personen$ und Δt_{Bel} wird zunächst noch nicht berücksichtigt. Die Werte der Schätzung der Koeffizienten b_0 bis b_6 sind in Abbildung 6.4 in Spalte B der unteren Tabelle *Koeffizienten (T_{tol})* angegeben.

```

REGRESSION
/VARIABLES= gamma tau TA_m I_m delta_Ta delta_I
/DEPENDENT= T_tol
/METHOD=ENTER
/STATISTICS=COEFF R ANOVA.

```

Modellzusammenfassung (T_tol)

R	R-Quadrat	Korrigiertes R-Quadrat	Standardfehler des Schätzers
,46	,21	,21	,25

ANOVA (T_tol)

	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
Regression	26,11	6	4,35	69,23	,000
Residual	97,51	1551	,06		
Gesamt	123,63	1557			

Koeffizienten (T_tol)

	Unstandardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	t	Sig.
	B	Standardfehler	Beta		
(Konstante)	,97	,02	,00	48,63	,000
gamma	-,14	,07	-,06	-2,06	,039
tau	,00	,00	-,15	-4,57	,000
TA_m	,00	,00	-,07	-1,57	,117
I_m	,01	,00	,82	3,38	,001
delta_Ta	-,07	,01	-,33	-7,24	,000
delta_I	,00	,00	-,78	-3,52	,000

Abbildung 6.4. PSPP-Ausgabe der Regressionsanalyse für den Wert des Reglerparameters T_{tol} des Zweipunktreglers

Damit ergibt sich die in Gleichung (6.6) angegebene Regressionsgerade für den Wert des Reglerparameters.

$$\hat{T}_{tol} = 0,97 - 0,14\gamma + 0,01\bar{I} - 0,07\Delta\vartheta_a \quad (6.6)$$

Mit dieser Regressionsgeraden wird ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,21$ erreicht. Aufgrund der großen Anzahl an Stichproben von $K = 1557$ im Vergleich zur Anzahl der Variablen von $J = 6$ ergibt sich ein korrigiertes Bestimmtheitsmaß von ebenfalls $R_{\text{kor}}^2 = 0,21$. Der Wert für J kann in der zweiten Tabelle namens $ANOVA(T_{tol})$ in der ersten Zeile der Spalte df von Abbildung 6.4, der für K in der zweiten Zeile abgelesen werden. Die Werte für die Bestimmtheitsmaße sind sehr gering und lassen auf eine schlechte Anpassung der Daten an die Regressionsgerade schließen. Die Analyse der Regressionsfunktion mittels des F-Tests ergibt einen empirischen Wert $F_{\text{emp}} = 69,23$. Er wird in Spalte F der Tabelle $ANOVA(T_{tol})$ in Abbildung 6.4 abgelesen. Zum Vergleich wurde folgender theoretische F-Wert F_{theo} aus einer Tabelle für die F-Verteilung für eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 1% abgelesen:

$$F_{\text{theo}} \approx 2,82 \quad \text{für ein Signifikanzniveau von 1\%}$$

Der empirische F-Wert F_{emp} ist deutlich größer als der theoretische F_{theo} . Damit wird die Nullhypothese H_0 verworfen und der gefundene Zusammenhang kann als statistisch signifikant bewertet werden.

Zur Überprüfung des Einflusses der einzelnen Regressionskoeffizienten auf die abhängige Variable T_{tol} wird ein t-Test (vgl. Anhang H) durchgeführt. Dazu werden die p-Werte der einzelnen Regressionskoeffizienten aus der Spalte *Sig.* der letzten Tabelle *Koeffizienten (T_tol)* in Abbildung 6.4 genutzt. Sie sind für die Konstante und die unabhängige Variable ΔT_a Null und damit signifikant. Die Werte $p = 0,039$ für $\bar{\vartheta}_a$ (in Abbildung 6.4 als TA_m bezeichnet) und $p = 0,001$ für \bar{I} (in Abbildung 6.4 als I_m bezeichnet) liegen unter dem nach [BEPW15] üblicherweise geforderten Signifikanzniveau von 0,05 bzw. 5%. Damit sind auch diese beiden Variablen als signifikant für die Beschreibung der abhängigen Variable \hat{T}_{tol} zu bewerten.

Nachdem die ermittelte Regressionsgerade an dieser Stelle sowohl global bewertet ist, als auch deren Koeffizienten überprüft sind, folgt nun die Überprüfung der Modellannahmen (vgl. Anhang Abschnitt H.1). Dazu werden zunächst die Residuen $e_{\text{Zweipunktregler}_k}$ geprüft. Die Residuen (Anhang Gleichung (H.3)) der Regressionsgeraden berechnen sich aus der Differenz der tatsächlichen und der durch Regression bestimmten Werte für die abhängige Variable T_{tol} (Gleichung (6.7)).

$$e_{\text{Zweipunktregler}_k} = T_{\text{tol}} - \hat{T}_{\text{tol}} \quad (6.7)$$

Für die Darstellung der Residuen als Streudiagramm (Abbildung 6.5) werden sie standardisiert, in dem sie durch die Standardabweichung $\sigma = 0,25$ dividiert werden. σ kann der Spalte *Standardfehler des Schätzers* der ersten Tabelle in Abbildung 6.4 entnommen werden. Die standardisierten Residuen $e_{\text{Zweipunktregler}_{ks}}$ in Abbildung 6.5 sind auf der Ordinate, die standardisierten Werte der mittels Regressionsfunktion vorhergesagten Werte \hat{T}_{tol_s} auf der Abszisse abgetragen.

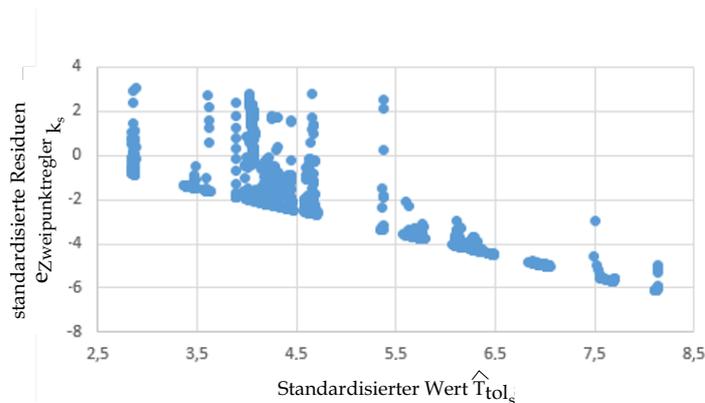


Abbildung 6.5. Streudiagramm der standardisierten Residuen

Nach [BEPW15] sollten die standardisierten Residuen nicht in einer systematischen Beziehung zu den unabhängigen Variablen (γ , τ , $\bar{\vartheta}_a$, \bar{I} , $\Delta\vartheta_a$, ΔI) stehen, da in diesem Fall die Modellannahme A3 (vgl. Anhang H) verletzt wird. Da die durch die Regressionsfunktion ermittelte abhängige Variable \hat{T}_{tol} eine Linearkombination aus den unabhängigen Variablen darstellt, sollte auch \hat{T}_{tol} bzw. die standardisierte Größe \hat{T}_{tol_s} keine systematische Abhängigkeit bezüglich $e_{\text{Zweipunktregler}_{ks}}$ aufweisen. In diesem Fall sollten die Werte für $e_{\text{Zweipunktregler}_{ks}}$ im Streudiagramm gleichmäßig um eine gedachte horizontale Linie durch den Nullpunkt der Ordinate streuen. Dies ist im Streudiagramm in Abbildung 6.5 nicht der Fall. Dort ist, abgesehen von einigen Ausreißern, ein

linearer Zusammenhang zu erkennen. Die Residuen sind demnach korreliert. Die Folge dieser Autokorrelation ist, dass es bei der Ermittlung der Regressionskoeffizienten zu Verzerrungen kommt und damit die Voraussetzungen für die Anwendung der linearen Regression nicht erfüllt sind und das ermittelte Regressionsmodell (Gleichung (6.6)) ungültig ist.

Es hat sich damit gezeigt, dass die lineare Regression nicht geeignet ist, um den Reglerparameter des Zweipunktreglers aus den unabhängigen Größen γ , τ , $\bar{\vartheta}_a$, \bar{I} , $\Delta\vartheta_a$, ΔI zu berechnen. Da die Berechnung des Wertes der Zielfunktion neben den genannten Größen auch vom Reglerparameter T_{tol} abhängig ist (Gleichung (6.8)), wird sie zwangsläufig inkorrekte Ergebnisse liefern, da die mittels linearer Regression berechneten Reglerparameter falsch sind. Daher wurde auf die Bestimmung des Wertes der Zielfunktion mit linearer Regression verzichtet.

$$\widehat{ZF} = f(T_{\text{tol}}, \gamma, \tau, \bar{\vartheta}_a, \bar{I}, \Delta\vartheta_a, \Delta I) \quad (6.8)$$

Regressionsanalysen für den P-Regler unter Nutzung des Gesamtdatensatzes

Aus dem Gesamtdatensatz soll mittels linearer Regressionsanalyse der Reglerparameter k für den P-Regler aus den Größen γ , τ , $\bar{\vartheta}_a$, \bar{I} , $\Delta\vartheta_a$ und ΔI ermittelt werden (Gleichung (6.9)).

$$\widehat{k} = b_0 + b_1\gamma + b_2\tau + b_3\bar{\vartheta}_a + b_4\bar{I} + b_5\Delta\vartheta_a + b_6\Delta I \quad (6.9)$$

Dazu wird, so wie für den Zweipunktregler beschrieben, vorgegangen. Die Analyse mittels PSPP ergibt die in Gleichung (6.10) angegebene Regressionsfunktion.

$$\widehat{k} = 763,25 - 251,45\gamma + 0,09\tau - 2,24\bar{\vartheta}_a - 7,26\bar{I} + 18,32\Delta\vartheta_a + 3,95\Delta I \quad (6.10)$$

Der geringe Wert des Bestimmtheitsmaßes von $R^2 = 0,12$ lässt auf eine schlechte Anpassung der Regressionsgeraden an die Daten schließen. Der F-Test ergibt, dass der gefundene Zusammenhang statistisch relevant ist. Die Auswertung des T-Tests ergibt, dass die p-Werte der unabhängigen Variablen τ und $\bar{\vartheta}_a$ über dem nach [BEPW15] angegebene geforderten Signifikanzniveau von 5% liegen. Damit sind diese beiden Variablen für die Erklärung des Zusammenhangs nach Gleichung (6.9) nicht signifikant und Gleichung (6.10) reduziert sich zu Gleichung (6.11)

$$\widehat{k} = 763,25 - 251,45\gamma - 7,26\bar{I} + 18,32\Delta\vartheta_a + 3,95\Delta I \quad (6.11)$$

Die Auswertung der standardisierten Residuen $e_{\text{P-Regler}_{ks}}$ (Gleichung (6.12))

$$e_{\text{P-Regler}_{ks}} = \frac{k - \widehat{k}}{\sigma} \quad (6.12)$$

mit

$$\sigma = 204,9 \text{ - Standardfehler des Schätzers}$$

im Residuendiagramm (Abbildung 6.6) zeigt eine leichte lineare Abhängigkeit der standardisierten Residuen von den standardisierten, durch Regression bestimmten Werten \hat{k}_s . Damit ist das Ergebnis im Vergleich zum Streudiagramm für den Zweipunktregler (Abbildung 6.5) wesentlich besser. Dennoch muss auch hier die Schlussfolgerung gezogen werden, dass die bestimmte Regressionsgleichung (6.11) nicht gültig ist.

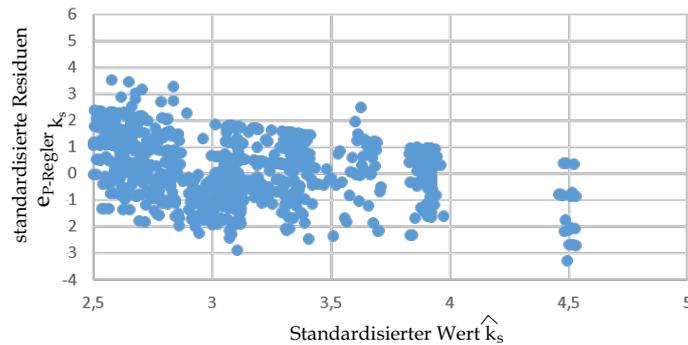


Abbildung 6.6. Streudiagramm der standardisierten Residuen für den Reglerparameter k des p-Reglers

Regressionsanalysen für den vs-Regler aus dem Gesamtdatensatz

Der vs-Regler besitzt zwei Reglerparameter Opt_{p1} und Opt_{p2} . Zunächst wird ein linearer Zusammenhang der Form nach Gleichung (6.13) für Opt_{p1} gesucht.

$$\widehat{Opt}_{p1} = b_0 + b_1\gamma + b_2\tau + b_3\bar{\vartheta}_a + b_4\bar{I} + b_5\Delta\vartheta_a + b_6\Delta I \quad (6.13)$$

Das zur Durchführung der Analyse genutzte Werkzeug PSPP liefert die in Gleichung (6.14) angegebene Regressionsformel.

$$\widehat{Opt}_{p1} = 0,5 - 0,32\gamma + 0,02\bar{\vartheta}_a + 0,6\Delta\vartheta_a \quad (6.14)$$

Der geringe Wert des Bestimmtheitsmaßes $R^2 = 0,23$ lässt auf eine schlechte Anpassung des Modells an die Daten, mit denen es ermittelt wurde, schließen. Der F-Test zeigt, dass das Modell signifikant ist. Ebenso sind die einzelnen Koeffizienten des Modells signifikant, was die Auswertung des T-Tests zeigt. Abbildung 6.7 zeigt das Streudiagramm der standardisierten Residuen für den Zusammenhang nach Gleichung (6.14)

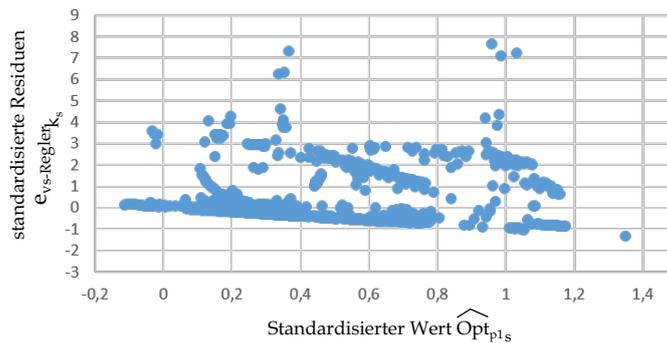


Abbildung 6.7. Streudiagramm der standardisierten Residuen für den Reglerparameter Opt_{p1} des vs-Reglers

Wie auch bei den für die Untersuchungen am Zweipunkt- und am P-Regler gezeigten Streudiagrammen, ist hier eine lineare Tendenz zu erkennen und eine völlige Unabhängigkeit der Residuen ist nicht gegeben. Dies, und der geringe Wert für R^2 führen zu dem Schluss, dass das gefundene Regressionsmodell nicht geeignet ist, um den Zusammenhang zwischen dem Reglerparameter Opt_{p1} und den unabhängigen Raum- und Wetterkenngrößen abzubilden.

Auf die Bestimmung der Zusammenhänge zwischen den Zielfunktionen und den unabhängigen Größen für den P- und den vs-Regler wurde verzichtet, weil die jeweiligen Reglerparameter als unabhängige Größe in die Bestimmung einfließen. Diese können jedoch mit den ermittelten Regressionsgleichungen (6.10) und (6.14) nicht bestimmt werden.

6.1.2. Künstliche Neuronale Netze zur Erfassung der Zusammenhänge zwischen Reglern und Räumen

Die Anwendung der linearen Regressionsanalyse zur Ermittlung der gesuchten Zusammenhänge zwischen Reglern und Räumen lieferte keine brauchbaren Ergebnisse. Daher wird in diesem Kapitel untersucht, ob die Zusammenhänge mittels Künstlicher Neuronaler Netze beschreibbar sind. Die KNN, die im Rahmen dieser Arbeit zum Einsatz kommen, werden in Python [Pad16] implementiert. Python bietet mit Scikit-Learn [Gér19] eine Open-Source-Werkzeugumgebung an, die Implementierungen von Machine-Learning-Algorithmen für überwachtes und nicht-überwachtes Lernen bereitstellt. Daneben werden Implementierungen u.a. für Model-fitting, Datenvorverarbeitung und Modellauswahl und -bewertung angeboten. Für die KNN dieser Arbeit wurde die Klasse **MLPRegressor** genutzt, welche ein MLP-Modell implementiert. Das Vorgehen zur Ermittlung der Beziehungen mittels KNN wird in diesem Abschnitt beschrieben.

Können die Beziehungen zwischen Räumen und Reglern mittels der KNN beschrieben werden, wird bewertet, wie gut die KNN diese Beziehungen abbilden. Schröder [Sch10] nennt drei Bewertungskriterien, die für „theoretische[...] Analysen und den praktischen Einsatz der Netze von Bedeutung sind.“¹

¹SCHRÖDER, D.: Intelligente Verfahren, S.42, Springer, 2010

- **Repräsentationsfähigkeit:** Der Netztyp und seine Topologie müssen die Regressionsaufgabe erfüllen.
- **Lernfähigkeit:** Es muss möglich sein, dass das KNN während des Lernvorgangs die Lern-
daten eintrainieren kann. Im Rahmen dieser Arbeit wird dies überprüft, in dem das Bestimmtheitsmaß R^2_{Training} für die Lerndaten berechnet und ausgewertet wird.
- **Verallgemeinerungsfähigkeit:** Das KNN muss in der Lage sein, ihm unbekannte Daten, die ihm während des Lernvorgangs nicht zur Verfügung standen, zu repräsentieren. Dazu wird das Bestimmtheitsmaß R^2_{Test} für einen Testdatensatz berechnet und ausgewertet.

Einige Grundlagen zu Künstlichen Neuronalen Netzen sind in Anhang H zusammengefasst.

6.1.2.1. Ablauf der Untersuchungen

Zur Implementierung der KNN wird das Python-Werkzeug Scikit-learn genutzt. Der Ablauf zur Ermittlung der Zusammenhänge ist für alle Untersuchungen gleich und wird daher im Folgenden zentral beschrieben.

Zunächst werden Vorarbeiten wie das Laden notwendiger Bibliotheken sowie das Einlesen und aufbereiten der Daten durchgeführt. Dazu gehört auch das Zusammenfassen der unabhängigen Variablen Raum-, Wetter- und Nutzungskenngrößen sowie Heizungstyp in einer Matrix. Anschließend wird der komplette Datensatz in einen Trainings- und einen Testdatensatz geteilt, da es sinnvoll ist, einige Datenpunkte des kompletten Datensatzes zum Testen der gefundenen Zusammenhänge zu nutzen. Dieser Testdatensatz darf dem Algorithmus während der Trainingsphase nicht zur Verfügung stehen. In der Arbeit wurden zwischen 10 % und 20 % des Gesamtdatensatzes zum Test genutzt. Da KNN in der Regel nicht zufriedenstellend arbeiten, wenn die Eingangsdaten deutlich unterschiedliche Größenordnungen besitzen [Gér19], werden diese entsprechend Gleichung (6.15) auf Werte zwischen Null und Eins normiert.

$$X_{\text{nor}} = \frac{(X - X_{\text{min}})}{(X_{\text{max}} - X_{\text{min}})} \quad (6.15)$$

Dabei gilt:

- X Originaldaten
- X_{nor} zwischen Null und Eins normierte Daten
- X_{min} minimaler Wert der Originaldaten
- X_{max} maximaler Wert der Originaldaten

Anschließend werden die Analysen der Beziehungen zwischen Räumen und Reglern mittels KNN unter Anwendung der Klasse `MLPRegressor` durchgeführt. Es werden jeweils Analysen für die drei Reglermodelle Zweipunkt-, P- und vs-Regler vorgenommen. Zur Durchführung der Regressionsanalyse wird zunächst das KNN spezifiziert. Dabei werden die Parameter, die in Tabelle 6.1 genannt sind, festgelegt. `MLPRegressor` besitzt weitere Parameter, die jedoch im Rahmen der Arbeit ihren Standardwert beibehalten. Die Parameter und deren Bedeutung können [Sci20] entnommen werden.

Tabelle 6.1. Ausgewählte Parameter der Klasse MLPRegressor

Parameter	Bedeutung
<code>solver</code>	Löser zur Anpassung der Gewichte während des Trainingsvorgangs
<code>activation</code>	Art der Aktivierungsfunktion
<code>alpha</code>	Strafterm um Überanpassung des Netzes auf die Lerndaten zu verhindern
<code>hidden_layer_size</code>	Anzahl und Größe der verdeckten Schichten
<code>random_state</code>	ermöglicht die Reproduktion der Ergebnisse

Die Parametrisierung der KNN erfolgt in zwei Schritten. Zunächst wird eine Rastersuche zur Ermittlung geeigneter Parameterwerte für die in Tabelle 6.1 angegebenen Parameter durchgeführt. Dabei werden nacheinander KNN mittels vorgegebener Kombinationen von Parameterwerten angeleert und das Bestimmtheitsmaß R^2 für die Trainingsdaten bestimmt. Nach der Berechnung aller KNN werden die Parameter desjenigen ausgewählt, das den höchsten Wert für R^2 erzielen konnte. Im zweiten Schritt der Parametrisierung des KNN wird auf Grundlage des Ergebnisses der Rastersuche durch manuelle Parametervariation geprüft, ob ein weiter verbessertes KNN gefunden werden kann. Dazu wird zusätzlich das Bestimmtheitsmaß R^2 für den Testdatensatz ausgewertet. Abschließend werden für die gefundenen KNN nach der Bestimmung der Zusammenhänge für die drei Regler die Bestimmtheitsmaße R^2 für den Lern- und den Testdatensatz berechnet. Die Durchführung der Analysen mittels KNNs und die Bestimmung der Gütemaße werden eingehend in den Abschnitten 6.1.2.2, 6.1.2.3 und 6.1.2.4 beschrieben. Anhang I erläutert den Ablauf der Untersuchungen zur Ermittlung der Beziehungen zwischen Räumen und Reglern eingehend anhand von Python-Codebeispielen.

6.1.2.2. KNN zur Erfassung der Zusammenhänge zwischen Räumen dem Zweipunktreglermodell

Die folgenden Analysen der Zusammenhänge ordnen sich im in Abschnitt 6.1.2.1 beschrieben Gesamttablauf der Untersuchungen in die Durchführung der Analysen und die Berechnung der globalen Gütemaße ein.

Für den Zweipunktregler wird ein KNN zur Bestimmung des optimalen Reglerparameters \hat{T}_{tol} (Gleichung (6.16)) und ein KNN zur Bestimmung der Reglergüte \widehat{ZF} (Gleichung (6.17)) angeleert.

$$\hat{T}_{\text{tol}} = f(\gamma, \tau, \bar{\vartheta}_{\text{aszen}}, \bar{I}_{\text{szen}}, \Delta\vartheta_{\text{aszen}}, \Delta I_{\text{szen}}, H, n_{\text{pers}}) \quad (6.16)$$

$$\widehat{ZF} = f(T_{\text{tol}}, \gamma, \tau, \bar{\vartheta}_{\text{aszen}}, \bar{I}_{\text{szen}}, \Delta\vartheta_{\text{aszen}}, \Delta I_{\text{szen}}, n_{\text{pers}}, \Delta t_{\text{Bel}}) \quad (6.17)$$

In der Analyse nach Gleichung (6.16) wird der Wert des Reglerparameters \hat{T}_{tol} für den Zweipunktregler aus den Eingangsgrößen γ , τ , $\bar{\vartheta}_{\text{aszen}}$, \bar{I}_{szen} , $\Delta\vartheta_{\text{aszen}}$ und ΔI_{szen} , sowie der durchschnittlichen Anzahl n_{pers} der sich während einer Belegungsperiode im Raum befindlichen Personen und der Art der Heizung H ermittelt. Für die Heizungsart werden die beiden Typen Radiatorheizung (Typ 1) und Flächenheizung (Typ 2) unterschieden. Die Wetterkenngrößen $\bar{\vartheta}_{\text{aszen}}$, \bar{I}_{szen} , $\Delta\vartheta_{\text{aszen}}$ und ΔI_{szen} umfassen den Zeitraum, in dem das jeweilige Szenario, aus dem die Wetterkenngrößen berechnet wurden, liegt. Dies bedeutet beispielsweise für das Szenario Party, dass der Mittelwert der Außentemperatur $\bar{\vartheta}_{\text{aszen}}$ für den Zeitraum 29.12. 0:00 Uhr bis 30.12. 24:00 Uhr berechnet wurde. Durch den Namenszusatz *szen* an den Bezeichnern der Wetterkenngrößen wird der Zeitraum ihrer Gültigkeit kenntlich gemacht. Zur Bestimmung geeigneter Werte für die Parameter des KNN (vgl. Tabelle 6.1) mittels Rastersuche werden die in Tabelle 6.2 angegebenen Parameterbereiche festgelegt. Die Python-Implementierung ist in Anhang I in Python-Code I.8 gezeigt.

Tabelle 6.2. Parameterbereiche für die Rastersuche

Parameter	Parameterbereich
<code>solver</code>	lbfgs
<code>activation</code>	relu, tanh
<code>alpha</code>	1e-4, 1e-5
<code>hidden_layer_size</code>	(50,25,17,5), (5,5,4), (100,100,100,100), (50,4)
<code>random_state</code>	1,2

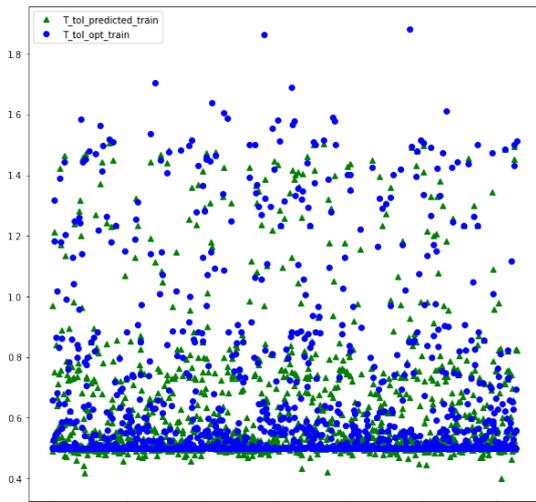
Die Rastersuche führt auf die in Tabelle 6.3 angegebenen Parameter. Der Python-Code des entsprechenden KNN ist in Anhang I in Python-Code I.9 gezeigt.

Tabelle 6.3. Durch Rastersuche bestimmte Parameter für das KNN

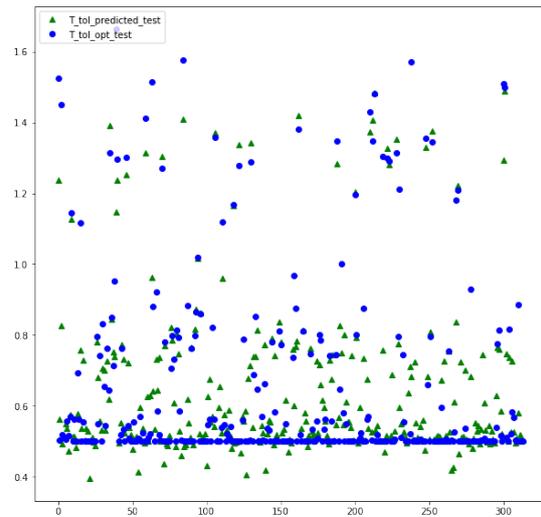
Parameter	Wert
<code>solver</code>	lbfgs
<code>activation</code>	relu
<code>alpha</code>	1e-4
<code>hidden_layer_size</code>	(100,100,100,100) d.h. vier Schichten mit je 100 Knoten
<code>random_state</code>	1

Anschließend wird das KNN mittels des Trainingsdatensatzes angelernet. Anhang I zeigt in Python-Code I.10 die entsprechende Implementierung. Das gelernte KNN wird nun eingesetzt, um aus den Trainingsdaten, die es bereits kennt, die Werte für den Parameter \hat{T}_{tol} des Zweipunktreglers zu bestimmen. Ebenso wird dies für den Testdatensatz, der dem KNN unbekannt ist, durchgeführt. Anhang I zeigt die entsprechende Python-Implementierung in Python-Code I.11. Zur Überprüfung des gelernten Netzes werden zur Beurteilung seiner Lern- und Verallgemeinerungsfähigkeit die Bestimmtheitsmaße R_{Training}^2 und R_{Test}^2 berechnet. Dies ist in Python-

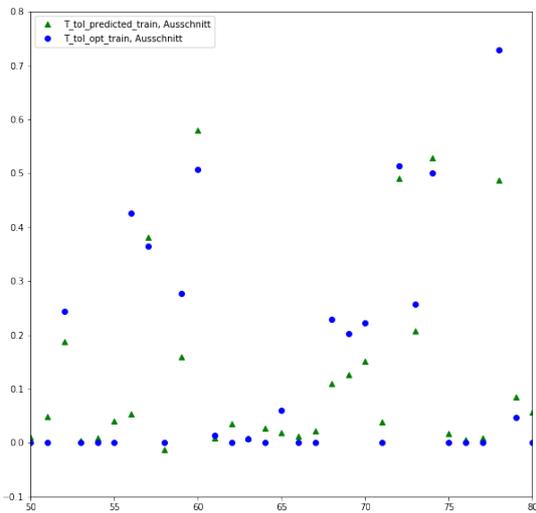
Code I.12 zeigt. Die Werte für die Bestimmtheitsmaße für \hat{T}_{tol} des Zweipunktreglers sind mit $R_{\text{Training},2\text{pkt}}^2 = 0,69$ und $R_{\text{Test},2\text{pkt}}^2 = 0,76$ akzeptabel und damit auch die Lern- und Verallgemeinerungsfähigkeit des KNN. Damit repräsentiert das gefundene Netz den Zusammenhang nach Gleichung (6.16) ausreichend gut im Vergleich zu der Annahme, dass gar keine Kenntnisse über den Zusammenhang vorliegen und der Parameter T_{tol} willkürlich gewählt wird. Zur grafischen Verdeutlichung der Bestimmtheitsmaße sind in Abbildung 6.8 die optimalen Parameterwerte (blaue Kreise) für T_{tol} und die durch das KNN bestimmten Parameterwerten (grüne Dreiecke) sowohl für den Trainings (a)- als auch für den Testdatensatz (b) dargestellt. Die Teilabbildungen (c) und (d) zeigen je einen Ausschnitt der Teilabbildungen (a) und (b)



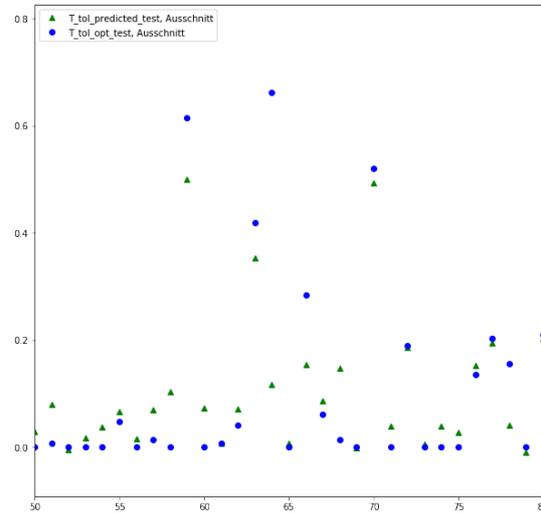
(a) Trainingsdaten, $R_{\text{Training},2\text{pkt}}^2 = 0,69$



(b) Testdaten, $R_{\text{Test},2\text{pkt}}^2 = 0,76$



(c) Trainingsdaten, Ausschnitt



(d) Testdaten, Ausschnitt

Abbildung 6.8. Vergleich der optimalen Werte (blaue Kreise) und der durch das KNN bestimmten Werte (grüne Dreiecke) für den Parameter \hat{T}_{tol}

In der Analyse nach Gleichung (6.17) soll aus den unabhängigen Variablen T_{tol} , γ , τ , $\bar{\vartheta}_{\text{aszen}}$, \bar{I}_{szen} , $\Delta\vartheta_{\text{aszen}}$ und ΔI_{szen} sowie n_{Pers} und Δt_{Bel} der Wert für das Gütemaß \widehat{ZF} des Reglers bestimmt werden. Die Größe Δt_{Bel} bezeichnet die Gesamtdauer der Belegung innerhalb eines Szenarios. Da die Werte des Gütemaßes ZF (Reglereignung) innerhalb des Testdatensatzes sehr weit streuen (im Bereich zwischen $4e-7$ und 70), wird ihr Wertebereich durch Logarithmieren verkleinert (Gleichung (6.18)).

$$ZF_{\text{ln}} = \ln(ZF \cdot 1e10) \quad (6.18)$$

Abbildung 6.9 zeigt in Grafik (a) die Gütemaße vor, in Grafik (b) nach der Logarithmierung.

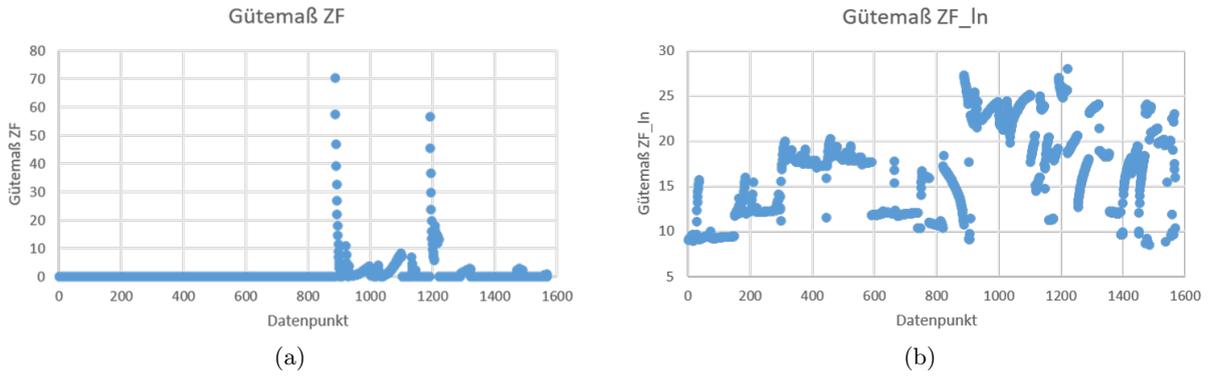


Abbildung 6.9. Gütemaße ZF des Zweipunktreglers; a) - original, b) - logarithmiert

Anschließend wird das KNN per Rastersuche parametrisiert und mittels des Trainingsdatensatzes angelernet. Die Werte der Bestimmtheitsmaße sind für den Trainingsdatensatz mit $R^2_{\text{Training,2pkt}} = 0,94$ und für den Testdatensatz mit $R^2_{\text{Test,2pkt}} = 0,93$ sehr gut. Die gefundenen Zusammenhänge nach Gleichung (6.16) und Gleichung (6.17) werden exemplarisch in einem Bewertungsszenario in Abschnitt 6.2 angewendet.

6.1.2.3. KNN zur Erfassung der Zusammenhänge zwischen Räumen und dem P- sowie vs-Reglermodell

Analog zur Vorgehensweise zur Bestimmung der KNN für den Zweipunktregler nach Gleichung (6.16) und Gleichung (6.17) wurden für den P-Regler zwei und für den vs-Regler drei Zusammenhänge bestimmt. Für den P-Regler sind die Zusammenhänge in den Gleichungen (6.19) und (6.20) angeben.

$$\hat{k} = f(\gamma, \tau, \bar{\vartheta}_{\text{aszen}}, \bar{I}_{\text{szen}}, \Delta\vartheta_{\text{aszen}}, \Delta I_{\text{szen}}, H, n_{\text{Pers}}) \quad (6.19)$$

$$\widehat{ZF} = f(k, \gamma, \tau, \bar{\vartheta}_{\text{aszen}}, \bar{I}_{\text{szen}}, \Delta\vartheta_{\text{aszen}}, \Delta I_{\text{szen}}, n_{\text{Pers}}, \Delta t_{\text{Bel}}) \quad (6.20)$$

Die zu analysierenden Zusammenhänge für den vs-Regler sind in Gleichung (6.21) und Gleichung (6.22) angegeben.

$$\hat{p}_1 = f(\gamma, \tau, \bar{\vartheta}_{\text{aszen}}, \bar{I}_{\text{szen}}, \Delta\vartheta_{\text{aszen}}, \Delta I_{\text{szen}}, H, n_{\text{Pers}}) \quad (6.21)$$

$$\hat{p}_2 = f(\gamma, \tau, \bar{\vartheta}_{\text{aszen}}, \bar{I}_{\text{szen}}, \Delta\vartheta_{\text{aszen}}, \Delta I_{\text{szen}}, H, n_{\text{Pers}})$$

$$\widehat{ZF} = f(p_1, p_2, \gamma, \tau, \bar{\vartheta}_{\text{aszen}}, \bar{I}_{\text{szen}}, \Delta\vartheta_{\text{aszen}}, \Delta I_{\text{szen}}, n_{\text{Pers}}, \Delta t_{\text{Bel}}) \quad (6.22)$$

Die berechneten Werte für die Bestimmtheitsmaße für die Lern- und die Verallgemeinerungsfähigkeit lauten für den Zusammenhang nach Gleichung (6.19) für den P-Regler $R_{\text{Training,p}}^2 = 0,42$ und $R_{\text{Test,p}}^2 = 0,40$. Diese Werte sind mäßig. Da jedoch keine gesicherten Erkenntnisse darüber vorliegen, wie stark die Reglereignung tatsächlich vom Parameter des Reglers abhängt, wird der Zusammenhang dennoch weiterverfolgt. Die Bestimmtheitsmaße für den Zusammenhang nach Gleichung (6.20) sind sehr hoch. Sie betragen $R_{\text{Training,p}}^2 = 0,96$ und $R_{\text{Test,p}}^2 = 0,92$. Da der vs-Regler zwei Reglerparameter besitzt, wurde zur Bestimmung für jeden dieser Parameter je ein KNN parametrisiert und trainiert. Die Bestimmtheitsmaße für die beiden Zusammenhänge nach Gleichung (6.21) lauten $R_{\text{Training,vs,p1}}^2 = 0,70$ und $R_{\text{Test,vs,p1}}^2 = 0,75$ und $R_{\text{Training,vs,p2}}^2 = 0,72$ und $R_{\text{Test,vs,p2}}^2 = 0,46$. Die Bestimmtheitsmaße, die sich für Vorhersage der Reglergüte (Gleichung (6.22)) ergeben, besitzen die Werte $R_{\text{Training,vs}}^2 = 0,89$ und $R_{\text{Test,vs}}^2 = 0,72$. Die Bestimmtheitsmaße, die die KNN des vs-Reglers zur Bestimmung der Reglerparameter erreichen, sind für p_1 gut und für p_2 akzeptabel. Die Bestimmtheitsmaße für die Reglergüte sind gut. Damit wird eingeschätzt, dass die KNN zur Wiedergabe der Zusammenhänge geeignet sind. In Tabelle 6.4 sind die Bestimmtheitsmaße der bisher entwickelten KNN zusammengefasst.

Tabelle 6.4. Zusammenfassung der Bestimmtheitsmaße

	Zweipunktregler		P-Regler		vorausschauender Regler	
	R_{Training}^2	R_{Test}^2	R_{Training}^2	R_{Test}^2	R_{Training}^2	R_{Test}^2
Reglerparameter	0,69	0,76	0,42	0,40	$p_1 : 0,70$ $p_2 : 0,72$	$p_1 : 0,75$ $p_2 : 0,46$
Reglergüte ZF	0,94	0,93	0,96	0,92	0,89	0,72

6.1.2.4. Untersuchungen für quartalsweise Wetterabschnitte

Ein entscheidender Nachteil der bisher bestimmten Zusammenhänge sind die Wetterkenngrößen, die für jeweils den Zeitraum, in dem ein Szenario definiert ist, gebildet wurden. Das bedeutet, dass die gefundenen Zusammenhänge streng genommen auch jeweils nur für diese Zeiträume gültig sind. Da jedoch die Zeiträume der Szenarien so gewählt wurden, dass sie über ein Jahr verteilt jede Jahreszeit abdecken (vgl. Abschnitt 4.3.7) sind sie auch für andere, nicht durch die Szenarien repräsentierte Zeiträume anwendbar. Dies wird für ein Beispiel im Abschnitt 6.2 demonstriert. Um dennoch die Gültigkeitsbereiche der Anwendung der KNN zu erweitern, wurden die Wetterkenngrößen quartalsweise (Abbildung 6.10) bestimmt (Namenszusatz *quart* an den Bezeichnungen der Wetterkenngrößen) und für alle zu findende Zusammenhänge erneut KNN parametrisiert und angelernt.

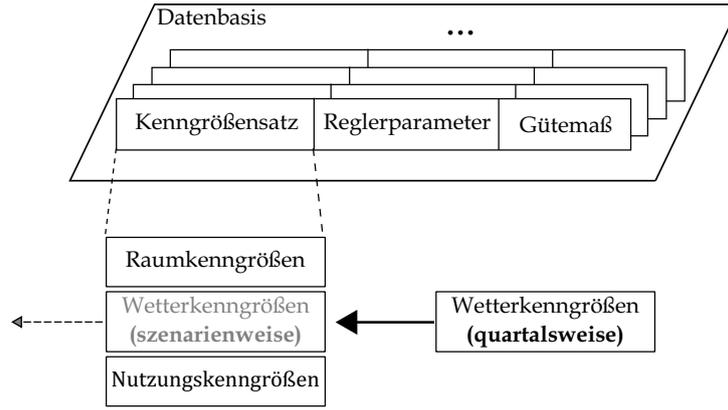


Abbildung 6.10. Ersetzen der szenarienspezifisch gebildeten Wetterkenngrößen durch quartalsweise gebildete

Damit sind in den Trainingsdaten für alle vier Quartale eines Jahres Wetterdaten enthalten. Für den Zweipunktregler lauten die Zusammenhänge nach Gleichung (6.23) und (6.24).

$$\widehat{T}_{\text{tol}} = f(\gamma, \tau, \bar{\vartheta}_{\text{aquarter}}, \bar{I}_{\text{quarter}}, \Delta\vartheta_{\text{aquarter}}, \Delta I_{\text{quarter}}, H, n_{\text{Pers}}) \quad (6.23)$$

$$\widehat{ZF} = f(T_{\text{tol}}, \gamma, \tau, \bar{\vartheta}_{\text{aquarter}}, \bar{I}_{\text{quarter}}, \Delta\vartheta_{\text{aquarter}}, \Delta I_{\text{quarter}}, n_{\text{Pers}}, \Delta t_{\text{Bel}}) \quad (6.24)$$

Die zu ermittelnden Zusammenhänge für den P-Regler lauten nach Gleichung (6.25) und (6.26).

$$\widehat{k} = f(\gamma, \tau, \bar{\vartheta}_{\text{aquarter}}, \bar{I}_{\text{quarter}}, \Delta\vartheta_{\text{aquarter}}, \Delta I_{\text{quarter}}, H, n_{\text{Pers}}) \quad (6.25)$$

$$\widehat{ZF} = f(k, \gamma, \tau, \bar{\vartheta}_{\text{aquarter}}, \bar{I}_{\text{quarter}}, \Delta\vartheta_{\text{aquarter}}, \Delta I_{\text{quarter}}, n_{\text{Pers}}, \Delta t_{\text{Bel}}) \quad (6.26)$$

Für den vs-Regler sind die Zusammenhänge in den Gleichungen (6.27) und (6.28) angegeben.

$$\widehat{p}_1 = f(\gamma, \tau, \bar{\vartheta}_{\text{aquarter}}, \bar{I}_{\text{quarter}}, \Delta\vartheta_{\text{aquarter}}, \Delta I_{\text{quarter}}, H, n_{\text{Pers}}) \quad (6.27)$$

$$\widehat{p}_2 = f(\gamma, \tau, \bar{\vartheta}_{\text{aquarter}}, \bar{I}_{\text{quarter}}, \Delta\vartheta_{\text{aquarter}}, \Delta I_{\text{quarter}}, H, n_{\text{Pers}})$$

$$\widehat{ZF} = f(p_1, p_2, \gamma, \tau, \bar{\vartheta}_{\text{aquarter}}, \bar{I}_{\text{quarter}}, \Delta\vartheta_{\text{aquarter}}, \Delta I_{\text{quarter}}, n_{\text{Pers}}, \Delta t_{\text{Bel}}) \quad (6.28)$$

Die Bestimmtheitsmaße, die sich für die mit quartalsweisem Wetter erstellten KNN ergeben, sind in Tabelle 6.5 zusammengefasst.

Tabelle 6.5. Zusammenfassung der Bestimmtheitsmaße für quartalsweise Wetterabschnitte

	Zweipunktregler		P-Regler		vorausschauender Regler	
	R^2_{Training}	R^2_{Test}	R^2_{Training}	R^2_{Test}	R^2_{Training}	R^2_{Test}
Reglerparameter	0,72	0,76	0,41	0,44	$p_1 : 0,69$	$p_1 : 0,76$
Reglergüte	0,91	0,91	0,96	0,91	$p_2 : 0,69$	$p_2 : 0,66$
					0,96	0,94

Die Bestimmtheitsmaße für die Reglerparameter sind denen, die für die szenarienweisen Wetterkenngrößen (Tabelle 6.4) gebildet wurden, sehr ähnlich, d.h. sie haben eine ähnliche Lern- und Verallgemeinerungsfähigkeit. Die Bestimmtheitsmaße nach Tabelle 6.5 liegen im guten bis akzeptablen Bereich. Daher werden die KNN, auch im Hinblick auf die praktische Anwendbarkeit der Ergebnisse, als gültig zur Beschreibung der Zusammenhänge nach den Gleichungen (6.23) bis (6.28) bewertet. Dies gilt jedoch nur für Räume, deren Kenngrößen innerhalb der in Kapitel 5 dargestellten Bereiche liegen. Hinsichtlich der Vollständigkeit dieser Bereiche sind weitere Untersuchungen notwendig. Ebenso muss das Verhalten der KNN außerhalb der Bereiche geprüft werden.

Die gefundenen KNN werden in Abschnitt 6.2 in einem Testszenario exemplarisch angewendet.

6.2. Exemplarische Anwendung der Zusammenhänge

Neben der Bewertung mittels der Bestimmtheitsmaße R_{Training}^2 und R_{Test}^2 werden die Zusammenhänge innerhalb eines neuen Testszenarios angewendet, um so deren Eignung exemplarisch zu zeigen. Dazu werden die optimalen Reglerparameter und die Reglergüte mittels der erforschten Zusammenhänge bestimmt und die Ergebnisse mit den durch Optimierung errechneten Parametern und Reglergüten verglichen (Abbildung 6.11).

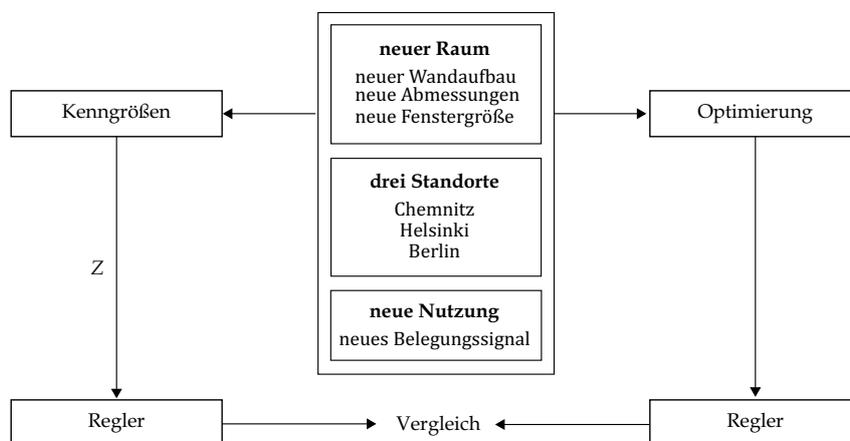


Abbildung 6.11. Exemplarische Anwendung der Zusammenhänge Z

Das Testszenario besteht aus den gleichen Teilmodellen, wie die in Abschnitt 4.3 beschriebenen Simulationsszenarien. Es wurde ebenfalls in der Sprache *Modelica* modelliert. Das Testszenario nutzt ein **Raummodell**, welches auf Grundlage des in der *BuildingSystems*-Bibliothek bereitgestellten Zonenmodells `Building1Zone1DBox` modelliert ist. Es besitzt eine rechteckige Nutzfläche von 4 m Breite und 6,5 m Länge. Es ist 2,5 m hoch. Der Raum besitzt eine nach Westen gerichtete Außenwand und drei innenliegende Wände, von denen je eine Richtung Norden, Süden und Osten gerichtet ist. Die Eigenschaften der Wände wurden durch das in der *BuildingSystems*-Bibliothek bereitgestellte Modell (`BuildingSystems.Buildings.Data.Constructions.Thermal`) festgelegt. Für die Außenwand wurde das Modell `OuterWallMultistorey1958to1968`,

für die Innenwände das Modell `IntermediateWallMultistorey1958to1968` genutzt. Die Begrenzungsfläche der Decke wurde durch `IntermediateCeilingMultistorey1958to1968` und die des Fußbodens durch `BasePlateMultistorey1958to1968` beschrieben. Das Raummodell besitzt ein Fenster in der Außenwand von 1,5 m Breite und 2,5 m Höhe. Der Rahmenanteil beträgt 20 %. Die Materialeigenschaften des Fensters werden durch das in der *BuildingSystems*-Bibliothek bereitgestellte Modell `BuildingSystems.Buildings.Data.Constructions.Transparent.DoubleGlazing` beschrieben. Zur **Beheizung des Raummodells** dient zum einen ein Modell einer wassergeführten Radiatorheizung, zum anderen ein Modell einer wassergeführten Fußbodenheizung. Die Radiatorheizung wird mittels des Modells `BuildingSystems.Fluid.HeatExchanger.Radiators.RadiatorEN442_2` beschrieben. Die im Modell erforderlichen Parameter orientieren sich an den typischerweise genutzten Heizkörperfabrikaten, die der europäischen Norm EN 442-2 entsprechen. Details zur Modellierung des Heizkörpers können der Modelldokumentation in der *BuildingSystems*-Bibliothek [Bui21b] entnommen werden. Die gewählten Parameterwerte sind in Tabelle A.12 im Anhang A bei der Beschreibung des Konferenzraummodells zusammengefasst. In dieser Tabelle sind nur die Parameter angegeben, die von ihrem im Modell vorgegebenen Standardwert abweichen. Sie können dem Modell des Heizkörpers entnommen werden. Die Fußbodenheizung wird durch das Modell `Buildings.Fluid.HeatExchangers.RadiantSlabs.SingleCircuitSlab` der *Modelica Buildings-Bibliothek* [Bui21a] beschrieben. Es wird das gleiche Modell wie im Büroraum genutzt. Die Parameter können Tabelle A.7 im Anhang A entnommen werden. Im **Beleuchtungsmodell** wird festgelegt, dass die Beleuchtung eine Leistung von 8,5 Watt verbraucht. Es wird angenommen, dass so der Wartungswert \bar{E}_m von 500 lx erreicht wird. Der **Zeitraum**, in dem das Testszenario definiert ist, erstreckt sich vom 04. Januar bis 14. Januar eines Jahres. Vom 04. bis 08. Januar und vom 11. bis 13. Januar ist der Raum täglich von 08:00 bis 17:00 Uhr belegt. Außerhalb dieser Zeiträume ist er nicht belegt. Während der Belegung soll eine Temperatur von 22 °C, andernfalls von 18 °C herrschen. Abbildung 6.12 zeigt den grafischen Verlauf der Zieltemperatur.

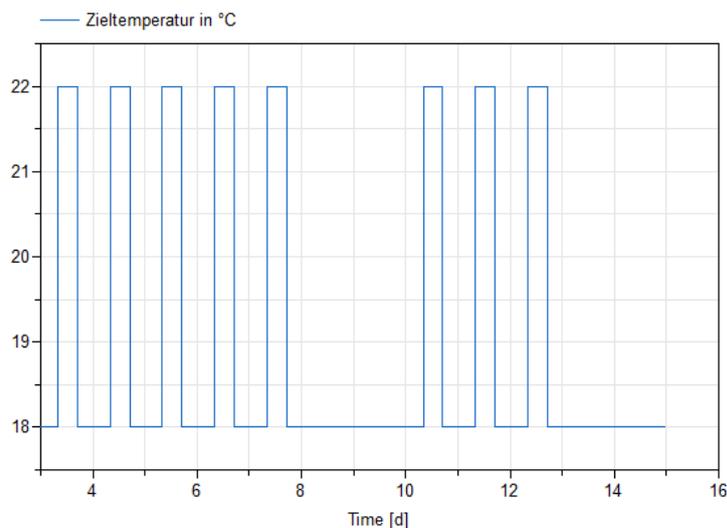


Abbildung 6.12. Zieltemperatur im Testszenario

Mit Ausnahme vom 05. Januar, an dem sich eine Person im Testraum befindet, sind während der Belegungsphasen zwei Personen anwesend. Weiterhin wird durch das Szenario festgelegt, dass pro Person 80 Watt Wärmeleistung in den Raum abgegeben werden. Zur Berechnung der minimal erforderlichen **Luftwechselrate** während der Belegungszeiten wird ein Außenluftvolumenstrom von $27 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ festgelegt. Damit ergibt sich eine Luftwechselrate von ca. $0,8 \frac{1}{\text{h}}$, wenn zwei Personen anwesend sind, und von $0,4 \frac{1}{\text{h}}$, wenn eine Person anwesend ist. Ist keine Person anwesend, gilt eine minimale Luftwechselrate von $0,1 \frac{1}{\text{h}}$.

Die Berechnung der **Raumkenngrößen** ergibt $\gamma = 0,17 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$ und $\tau = 160,5 \text{ h}$. Die Berechnung der **Wetterkenngrößen** wird für die drei Standorte Chemnitz, Helsinki und Berlin durchgeführt. Die Standorte Chemnitz und Helsinki werden gewählt, da sie bereits beim Anlegen der Datenbasis genutzt werden und somit nun ein unbekannter Testraum in bekannten klimatischen Bedingungen vorliegt. Der Standort Berlin wird als neuer, noch nicht in der Datenbasis vorhandener Standort gewählt. Damit steht ein Szenario mit unbekanntem Testraum in unbekanntenen klimatischen Bedingungen für Tests zur Verfügung. Die Klimaparameter werden für den **Zeitraum a** in dem die Testsznarien festgelegt sind, 04. bis 14. Januar, und für den **Zeitraum b** Dezember bis Februar eines Jahres bestimmt. Sie sind in Tabelle 6.6 zusammengefasst.

Tabelle 6.6. Klimaparameter ($\bar{\vartheta}_a$, $\Delta\vartheta_a$, \bar{I} , ΔI) der Standorte Chemnitz, Helsinki und Berlin für die Testsznarien

Zeitraum und Standort	Klimaparameter			
	$\bar{\vartheta}_a$ in K	$\Delta\vartheta_a$ in K	\bar{I} in $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	ΔI in $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$
04.-14. Januar				
Chemnitz	273,8	1,2	15,0	27,3
Helsinki	265,0	0,8	1,6	3,1
Berlin	274,4	1,7	2,0	12,7
Dezember-Februar				
Chemnitz	273,9	1,08	17,2	30,6
Helsinki	269,7	1,82	5,61	10,23
Berlin	271,4	6,02	1,72	11,0

Die Optimierung der Reglerkenngrößen wird für die drei Reglermodelle Zweipunktregler, P- und vs-Regler mit Hilfe des unter Punkt 4.5 beschriebenen Werkzeugs Gridworker durchgeführt. Tabelle 6.7 fasst die optimierten Parameter zusammen.

Tabelle 6.7. Optimale Reglerparameter für das Testsznario

Standort	Typ der Heizung	Zweipunktregler	P-Regler	vs-Regler	
		T_{tol}	k	Opt_{p1}	Opt_{p2}
Chemnitz	Radiatorheizung	0,50	1000	0,90	477,37
Helsinki	Radiatorheizung	0,56	296	0,92	479,76
Berlin	Radiatorheizung	0,53	688	0,91	438,21
Berlin	Fußbodenheizung	0,50	750	1,20	625,30

Für das Testszenario liegen nun für jede untersuchte Kombination aus Standort und Heizungstyp zwei Datenpunkte vor. Ein Datenpunkt enthält jeweils die Raumkenngrößen, die Wetterkenngrößen, für je einen der untersuchten Zeiträume, die durchschnittliche Anzahl der sich pro Belegungsperiode im Raum befindlichen Personen, die Art der Heizung, die Gesamtdauer der Belegung, die optimalen Reglerparameter sowie den Wert der Kostenfunktion. Damit sind alle erforderlichen Daten für die Anwendung der KNN vorhanden.

Bevor nun der optimale Regler für den Testraum gefunden werden kann, muss zunächst überprüft werden, ob die Raum- und Wetterkenngrößen im gültigen Bereich liegen (vgl. Kapitel 5). Dies ist für das Testszenario der Fall.

Bei der Anwendung der KNN für das Testszenario wird wie folgt vorgegangen:

1. Bereitstellung der Datensätze für die Testszenarien in Python:

Die Datensätze werden, wie im Abschnitt 6.1.2.1 beschrieben, aus Excel in eine Python-Umgebung geladen und für die Anwendung im KNN aufbereitet. Dazu werden sie in Felder umgewandelt. Die unabhängigen Größen werden in einer Matrix zusammengefasst und zwischen Null und Eins normiert. Die Daten der abhängigen Größe für die Reglereignung werden logarithmiert (vgl. Abschnitt 6.1.2.2).

2. Berechnung der Reglerparameter mittels der entsprechenden KNN für alle drei Regler:

Mit der Funktion `predict`, die von der Klasse `MLPRegressor` bereitgestellt wird, wird der Wert der Reglerparameter bestimmt. Für jeden Reglerparameter wird dazu das für ihn trainierte KNN genutzt. Die Bestimmung der Reglerparameter erfolgt für alle drei Standorte in denen das Testszenario definiert ist und für die beiden Zeiträume, für die die Wetterkenngrößen berechnet wurden. Beispielhaft wird dies in Python-Code 6.1 gezeigt.

```
y_pred_bRaum_chemnitz = reg_NN.predict(xdata_minmax_bRaum_chemnitz)
```

Python-Code 6.1 *Bestimmung des Reglerparameters T_{tol} mittels KNN für das Testszenario*

3. Berechnung der Reglereignung unter Nutzung der berechneten Reglerparameter mittels der entsprechenden KNN:

Auch die Werte für die Reglereignung für alle drei Standorte und die zwei Zeiträume a und b werden für das Testszenario mit den entsprechenden KNN vorhergesagt. Dabei wird für die erforderliche Angabe der Reglerparameter der aus dem KNN in Schritt 2 ermittelte Wert genutzt, da der optimale Wert des Reglerparameters im praktischen Einsatz nicht bekannt ist. Python-Code 6.2 zeigt die Bestimmung des Wertes für die Reglereignung exemplarisch für den Zweipunktregler.

```
ycost_pred_bRaum_chemnitz = reg_NNcost.predict(xcostdata_minmax_bRaum_chemnitz)
```

Python-Code 6.2 *Bestimmung der Reglereignung mittels KNN für das Testszenario*

4. Vergleich der Werte für die Reglereignung und Auswahl des Reglers mit dem geringsten Wert:

Tabelle 6.8 zeigt die Werte für die mittels der KNN berechneten Reglereignung (logarithmiert nach Gleichung (6.18)). Je niedriger ein Wert ist, desto besser ist der Regler geeignet. Der vs-Regler ist für den Testraum mit Fußbodenheizung am besten geeignet. Dies hat den Grund, dass der vorausschauende Regler speziell für die Regelung einer Flächenheizung und der daraus resultierenden größeren Trägheit des Raumes entwickelt wurde. Für die Standorte Chemnitz und Berlin (Radiatorheizung) besitzt der P-Regler den geringsten Wert und sollte demnach eingesetzt werden. Für den Standort Helsinki sollte der Zweipunktregler gewählt werden. Die geringsten Werte für die Reglergüte und damit die zu wählenden Regler sind in Tabelle 6.8 eingerahmt.

Tabelle 6.8. Aus KNN ermittelte Werte der Reglergüte für die Testszenarien im Zeitraum a

Standort	Typ der Heizung	Zweipunktregler	P-Regler	vs-Regler
Chemnitz	Radiatorheizung	17,81	17,40	17,70
Helsinki	Radiatorheizung	14,60	21,0	21,0
Berlin	Radiatorheizung	21,90	17,70	18,90
Berlin	Fußbodenheizung	21,90	17,80	16,80

In Tabelle 6.9 sind die durch die KNN berechneten Werte der Reglergüte (logarithmiert nach Gleichung (6.18)) für Zeitraum b zusammengefasst. Es werden dieselben Regler als geeignet bewertet wie in Zeitraum a.

Tabelle 6.9. Aus KNN ermittelte Werte der Reglergüte für die Testszenarien im Zeitraum b

Standort	Typ der Heizung	Zweipunktregler	P-Regler	vs-Regler
Chemnitz	Radiatorheizung	10,18	9,57	13,43
Helsinki	Radiatorheizung	15,50	18,57	26,49
Berlin	Radiatorheizung	14,0	10,26	14,56
Berlin	Fußbodenheizung	12,56	10,36	10,26

5. Prüfung, ob beim klassischen Vorgehen mittels Modellierung, Simulation und Optimierung der gleiche Regler gewählt worden wäre wie bei der Bestimmung mittels KNN:

In Tabelle 6.10 sind die durch Optimierung errechneten Werte für die Reglereignung für das Testszenario im Zeitraum a angegeben. Diese Berechnung erfolgt auf Grundlage der detaillierten Modelica-Modelle im Gegensatz zu den Modellen, die mittels der KNN erstellt wurden und auf die sich die Tabellen 6.8 und 6.9 beziehen. Die optimierten Werte wurden, damit ein Vergleich mit den durch die KNN ermittelten Werte möglich ist, nach Gleichung (6.18) logarithmiert.

Tabelle 6.10. Optimale Werte der Reglergüte für die Testszenarien im Zeitraum a

Standort	Typ der Heizung	Zweipunktregler	P-Regler	vs-Regler
Chemnitz	Radiatorheizung	10,56	10,21	14,96
Helsinki	Radiatorheizung	14,81	15,98	15,99
Berlin	Radiatorheizung	10,89	10,59	15,36
Berlin	Fußbodenheizung	21,79	20,58	14,38

Die eingerahmten Werte in den Tabellen 6.11 und 6.12 kennzeichnen die Regler, die sich am besten eignen. Es zeigt sich, dass die Werte teilweise erheblich von den durch die KNN bestimmten Werte der Reglergüte abweichen. Somit eignen sich die KNN zur Vorhersage konkreter Werte für die Reglergüte nicht, obwohl die Bestimmtheitsmaße sehr hoch sind (vgl. Tabellen 6.4 und 6.5). Die KNN zur Bestimmung der Reglergüte können dennoch zur Wahl des optimalen Reglers für die drei Standorte des Testszenarios herangezogen werden, da sie für beide Zeiträume den Regler mit dem geringsten Gütemaß richtig bestimmen. Dies zeigen die Gegenüberstellungen der Gütemaße (logarithmiert nach Gleichung (6.18)) in den Tabellen 6.11 und 6.12, welche durch Nutzung der optimalen Reglerparameter und der durch die KNN bestimmten Reglerparameter berechnet bzw. vorhergesagt werden.

Tabelle 6.11. Optimale (ZF) und durch die KNN ermittelte (\widehat{ZF}) Werte für die Reglergüte für Zeitraum a

Standort	Typ der Heizung	Zweipunktregler		P-Regler		vs-Regler	
		ZF	\widehat{ZF}	ZF	\widehat{ZF}	ZF	\widehat{ZF}
Chemnitz	Radiatorheizung	10,56	17,81	10,21	17,40	14,96	17,70
Helsinki	Radiatorheizung	14,81	14,60	15,98	21,0	15,99	21,0
Berlin	Radiatorheizung	10,89	21,9	10,59	17,70	15,36	18,90
Berlin	Fußbodenheizung	21,80	21,90	20,60	17,80	14,38	16,80

Tabelle 6.12. Optimale (ZF) und durch die KNN ermittelte (\widehat{ZF}) Werte für die Reglergüte für Zeitraum b

Standort	Typ der Heizung	Zweipunktregler		P-Regler		vs-Regler	
		ZF	\widehat{ZF}	ZF	\widehat{ZF}	ZF	\widehat{ZF}
Chemnitz	Radiatorheizung	10,56	10,18	10,21	9,57	14,96	13,43
Helsinki	Radiatorheizung	14,81	15,50	15,98	18,57	15,99	26,49
Berlin	Radiatorheizung	10,89	14,00	10,59	10,26	15,36	14,56
Berlin	Fußbodenheizung	21,80	12,56	20,60	10,36	14,38	10,26

6. Vergleich der Reglerparameter der durch Optimierung und durch die KNN bestimmten Regler:

Tabelle 6.13 stellt für Zeitraum a, Tabelle 6.14 für Zeitraum b, die Reglerparameter, die durch Optimierung berechnet wurden ($T_{\text{tol}}, k, \text{Opt}_{\text{p1}}, \text{Opt}_{\text{p2}}$), denen, die durch die Anwendung der KNN ermittelt wurden ($\widehat{T}_{\text{tol}}, \widehat{k}, \widehat{\text{Opt}}_{\text{p1}}, \widehat{\text{Opt}}_{\text{p2}}$), gegenüber. Für den Standort Chemnitz stimmen in beiden Zeiträumen die vorhergesagten und die optimierten Reglerparameter gut überein. Auch für die Standorte Berlin und Helsinki ist die Übereinstimmung akzeptabel. Jedoch sind die Abweichungen für den P-Regler am Standort Helsinki sehr groß. Es wird daher per Simulation überprüft, ob und inwieweit sich der durch das KNN ermittelte Reglerparameter überhaupt eignet. Für beide Zeiträume ergibt diese Überprüfung, dass die Verläufe der operativen Raumtemperaturen für den optimierten Reglerparameter und die durch die KNN ermittelten Reglerparameter sehr ähnlich und optisch nicht zu unterscheiden sind. Die Werte der Zielfunktion unterscheiden sich ebenfalls nur sehr gering. Sie betragen $ZF = 740$ bei optimalem Reglerparameter von $k = 296$, für Zeitraum a $ZF = 800$ (Reglerparameter $k = 553$) und für den Zeitraum b $ZF = 737$ (Reglerparameter $k = 885$). Der Wert der Verletzungsgröße „zu warm“ ist für alle drei Reglerparameter Null. Der Wert für „zu kalt“ beträgt für den optimalen Reglerparameter 92 Ks, für Zeitraum a 98 Ks und für Zeitraum b 91 Ks. Grafische Verläufe der operativen Raumtemperaturen, der Zielfunktionen sowie der Verletzungssignale sind im Anhang J dargestellt.

Tabelle 6.13. Optimale (T_{tol}) und mittels KNN berechnete (\widehat{T}_{tol}) Reglerparameter für Zeitraum a

Standort	Typ der Heizung	Zweipunktregler		P-Regler		vorausschauender Regler			
		T_{tol}	\widehat{T}_{tol}	k	\widehat{k}	Opt_{p1}	$\widehat{\text{Opt}}_{\text{p1}}$	Opt_{p2}	$\widehat{\text{Opt}}_{\text{p2}}$
Chemnitz	Radiatorheizung	0,50	0,49	1000	894	0,90	1,22	477	464
Helsinki	Radiatorheizung	0,56	0,37	296	553	0,92	1,29	480	400
Berlin	Radiatorheizung	0,53	1,70	688	873	0,91	1,23	438	480
Berlin	Fußbodenheizung	0,50	1,60	750	685	1,20	1,15	625	614

Tabelle 6.14. Optimale (T_{tol}) und mittels KNN berechnete (\widehat{T}_{tol}) Reglerparameter für Zeitraum b

Standort	Typ der Heizung	Zweipunktregler		P-Regler		vorausschauender Regler			
		T_{tol}	\widehat{T}_{tol}	k	\widehat{k}	Opt_{p1}	$\widehat{\text{Opt}}_{\text{p1}}$	Opt_{p2}	$\widehat{\text{Opt}}_{\text{p2}}$
Chemnitz	Radiatorheizung	0,50	0,57	1000	890	0,90	1,30	477	520
Helsinki	Radiatorheizung	0,56	0,51	296	885	0,92	1,11	480	520
Berlin	Radiatorheizung	0,53	0,56	688	861	0,91	1,24	438	488
Berlin	Fußbodenheizung	0,50	0,12	750	972	1,20	1,17	625	742

Die folgenden Abbildungen 6.13 bis 6.16 veranschaulichen die operativen Raumtemperaturen, die sich bei Anwendung der optimalen und der durch die KNN im Zeitraum b bestimmten Reglerparameter für die Szenarien ergeben. Die entsprechenden Grafiken für Zeitraum a, der in der Praxis weniger relevant ist, werden im Anhang K gezeigt. Die im folgenden Text und im Anhang K genannten Werte der Reglergüte ZF bzw. \widehat{ZF} sind nicht logarithmiert angegeben.

Die Simulation des Testszenarios am Standort Chemnitz mit dem durch das KNN für Zeitraum

b ermittelten Parameter $k = 890$ für den P-Regler, führt zum in Abbildung 6.13 gezeigten Verlauf für die operative Raumtemperatur T_{operativ} (vgl. Abschnitt 4.3.8). Ihr Verlauf orientiert sich am vorgegebenen Verlauf der Zieltemperatur T_{Ziel} und folgt dieser gut. Die vorgegebenen Komfortkriterien (Akzeptanz von zwei Kelvin ober- und unterhalb der Zieltemperatur) werden nicht verletzt. Auf die Darstellung des Verlaufs der operativen Raumtemperatur bei Verwendung des durch Optimierung bestimmten Parameters wird verzichtet, weil der Verlauf sich kaum sichtbar von dem in Abbildung 6.13 unterscheidet. Auch die Werte der Reglergüte, die sich durch Simulation des Testszenarios für den optimierten Reglerparameter und den durch das KNN ermittelten Reglerparameter ergeben, stimmen überein. Sie betragen $ZF = \widehat{ZF} = 2,6$.

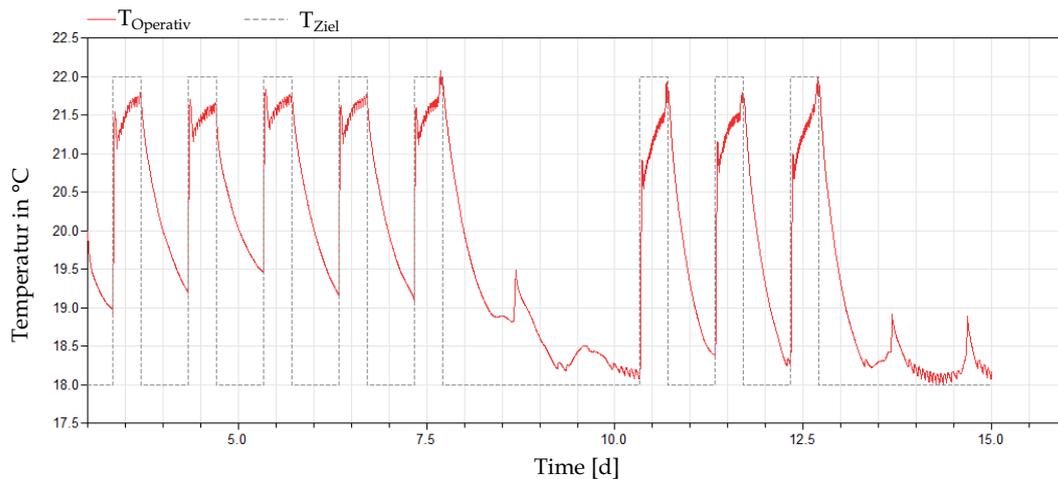


Abbildung 6.13. Operative Raumtemperatur und Zieltemperatur im Testszenario am Standort Chemnitz; Reglerparameter $k = 890$ mittels KNN für Zeitraum b bestimmt

Für das Testszenario am Standort Berlin und den Heizungstyp Radiatorheizung ergibt sich der in Abbildung 6.14 dargestellte Verlauf für die operative Raumtemperatur bei Nutzung des P-Reglers und des für diesen durch das KNN bestimmten Reglerparameter $k = 861$. Die Komfortgrenzen werden nicht verletzt. Auf die Darstellung der operativen Raumtemperatur, die sich unter Nutzung des optimalen Reglerparameters ergibt, wurde verzichtet, da sie sich optisch nicht vom Verlauf in Abbildung 6.14 unterscheidet. Die simulierten Werte der Gütemaße für die Reglereignung sind in beiden Fällen gleich. Sie betragen $ZF = \widehat{ZF} = 3,8$.

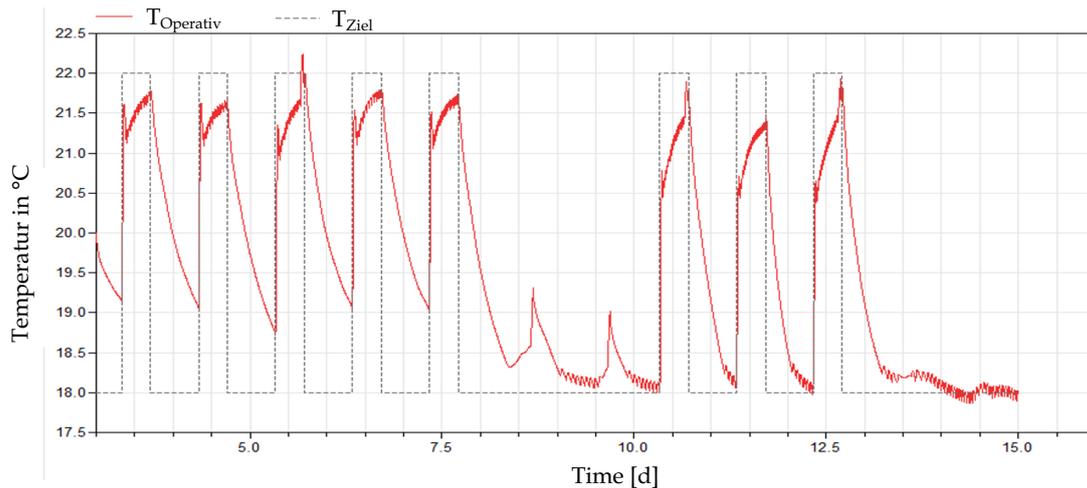


Abbildung 6.14. Operative Raumtemperatur und Zieltemperatur im Zeitraum b am Standort Berlin, Heizungstyp Radiatorheizung; Reglerparameter $k = 861$ mittels KNN bestimmt

Für den dritten untersuchten Standort, Helsinki, sollte nach Tabelle 6.12 der Zweipunktregler gewählt werden. In der oberen Grafik in Abbildung 6.15 sind die Verläufe der operativen Raumtemperaturen, die sich aus der Verwendung des durch das KNN bestimmten Reglerparameters $\hat{T}_{\text{tol}} = 0,51$ und des optimalen Reglerparameter $T_{\text{tol}} = 0,56$ ergeben, dargestellt. Die Verläufe ähneln einander stark. Die geringen Abweichungen sind in den unteren beiden Grafiken von Abbildung 6.15 exemplarisch für die beiden Zeiträume $t = 6$ d bis $t = 7$ d und $t = 8$ d bis $t = 10$ d vergrößert dargestellt. Die Komfortgrenzen werden in beiden Fällen leicht verletzt. Für $\hat{T}_{\text{tol}} = 0,51$ ist es 40,1 Ks zu kalt, der Energieverbrauch beträgt 10307 Wh. Für $T_{\text{tol}} = 0,56$ ist es 23,6 Ks zu kalt, der Energieverbrauch beträgt 10459 Wh. Diese kleinen Abweichungen resultieren in den Werten für die Güte der Regler für $\hat{T}_{\text{tol}} = 0,51$ von $\widehat{ZF} = 429$ und für $T_{\text{tol}} = 0,56$ von $ZF = 257$.

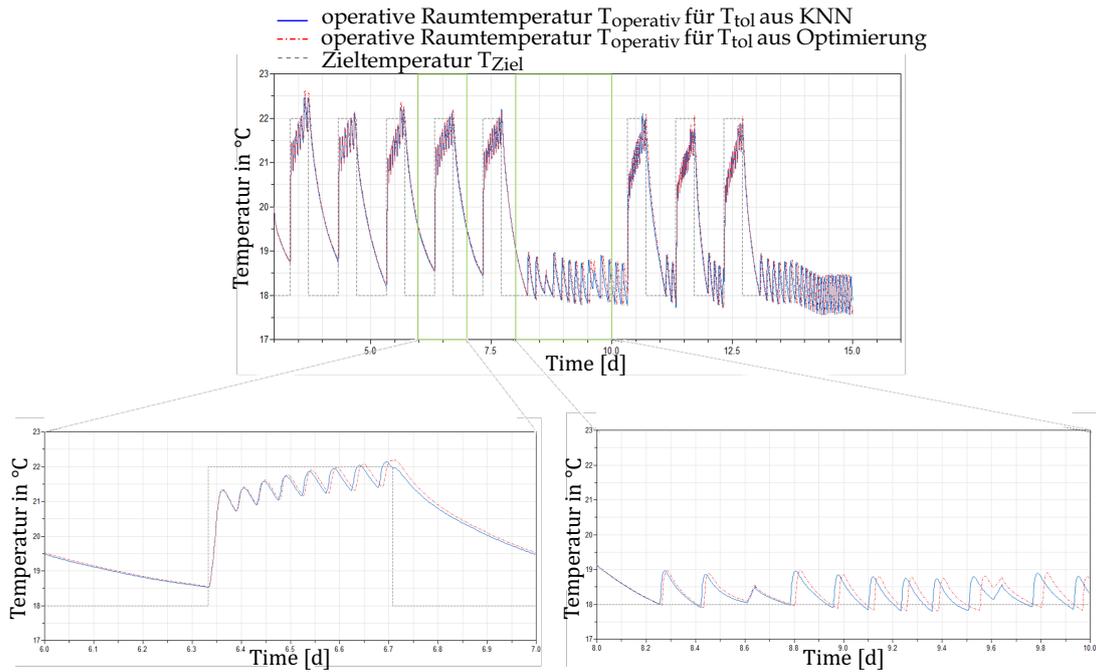


Abbildung 6.15. Operative Raumtemperatur für $\widehat{T}_{tol} = 0,51$ und $T_{tol} = 0,56$ sowie Zieltemperatur im Zeitraum b am Standort Helsinki

Für das Testszenario am Standort Berlin und den Heizungstyp Fußbodenheizung ergibt sich der in Abbildung 6.16 dargestellte Verlauf für die operative Raumtemperatur bei Nutzung des vs-Reglers und der für diesen durch das KNN bestimmten Reglerparameter $\widehat{Opt}_{p1} = 1,17$ und $\widehat{Opt}_{p2} = 742$. Der gleiche Verlauf ergibt sich für die optimalen Parameter von $Opt_{p1} = 1,2$ und $opt_{p2} = 625$. Es ist auffällig, dass die operative Raumtemperatur stetig sinkt und dass somit die Komfortgrenze „zu kalt“ deutlich verletzt wird. Der Wert für „zu kalt“ beträgt $40,9e4$ Ks. Da dieses Verhalten auch bei der Nutzung der durch Optimierung ermittelten Parameter zu beobachten ist, liegt die Ursache nicht in der Bestimmung der Reglerparameter durch das KNN sondern bereits bei der Optimierung des Reglers. Somit können durch das KNN also den optimalen Parametern entsprechende Reglerparameter ermittelt werden, auch wenn die operative Raumtemperatur der vorgegeben Zieltemperatur nicht gut folgt. Die simulierten Werte der Gütemaße für die Reglereignung sind für die optimierten als auch für die durch das KNN ermittelten Reglerparameter gleich. Sie betragen $ZF = \widehat{ZF} = 409$.

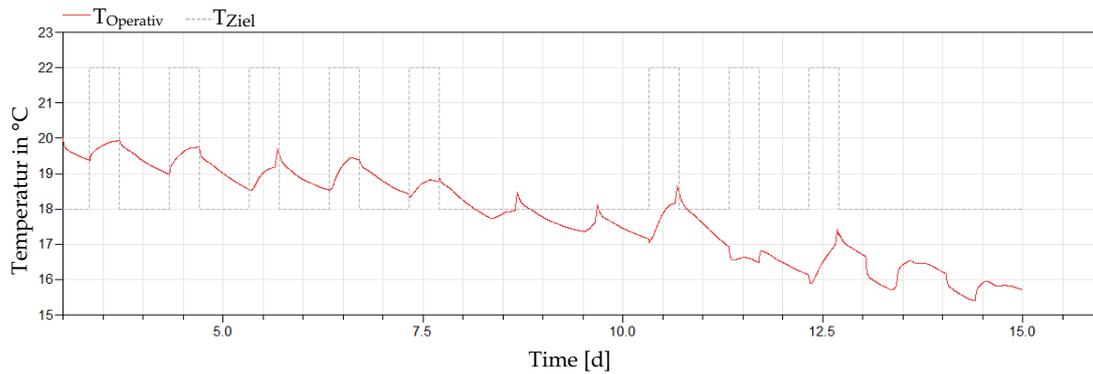


Abbildung 6.16. Operative Raumtemperatur und Zieltemperatur im Zeitraum b am Standort Berlin, Heizungstyp Fußbodenheizung; Reglerparameter $\widehat{Opt}_{p1} = 1, 17$, $\widehat{Opt}_{p2} = 742$ mittels KNN bestimmt

Die Anwendung der KNN wurde am Testszenario demonstriert. Die Auswertung der Ergebnisse zeigt, dass die gefundenen Zusammenhänge für die vier untersuchten Standorte gute Ergebnisse erzielen. In jedem der drei Fälle wird der Regler gewählt, der sich auch durch Simulation des Szenarios und der Optimierung der Reglerparameter ergeben hätte. Allerdings kann die Güte der Regler mit den entsprechenden KNN für die drei Standorte nicht vorhergesagt werden. Die Werte weichen deutlich von den durch Optimierung bestimmten Gütewerten ab (vgl. Tabellen 6.13 und 6.14). Hier ist weitere Forschungsarbeit nötig. Dennoch kann anhand der vorhergesagten Güte der geeignetste Regler gewählt werden.

6.3. Praktischer Einsatz der Zusammenhänge

Im Abschnitt 6.1 wurden Zusammenhänge zwischen Raum-, Klima- und Nutzungskenngrößen und Reglerparametern ermittelt und mittels konkret parametrisierter KNN erfasst, um für einen gegebenen Raum einen passend parametrisierten Regler auszuwählen. Wie diese Auswahl praktisch erfolgen kann, wird in diesem Abschnitt beschrieben. Abbildung 6.17 gibt einen Überblick über den Ablauf.

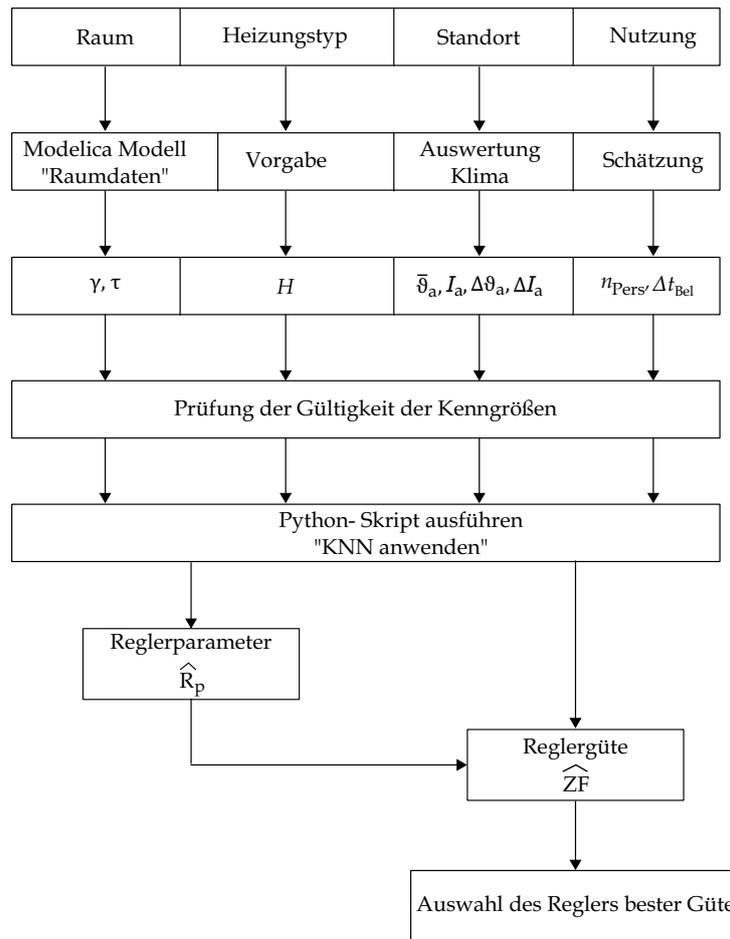


Abbildung 6.17. Praktische Anwendung der KNN im Überblick

Ausgangspunkt ist ein Raum an einem bestimmten Standort, der einer bestimmten Nutzung unterliegt. Es gilt, die notwendigen Kenngrößen, also die Raum (γ, τ) - und Wetterkenngrößen $(\bar{\vartheta}_a, \Delta\vartheta_a, \bar{I}, \Delta I)$ sowie den Typ der Heizung H , die sich durchschnittlich während einer Belegungsperiode im Raum befindliche Personenzahl n_{Pers} sowie die Gesamtdauer der Belegung Δt_{Bel} zu ermitteln. Die Kenngrößen γ und τ sind nach den Gleichungen (5.1) und (5.2) zu bestimmen. Dazu kann beispielsweise das in dieser Arbeit erstellte *Modelica*-Modell `Raumdaten` (vgl. Abschnitt 5.1) genutzt werden. 6.18 zeigt exemplarisch die Angabe der Parameter von Wand 1 des Testraumes im Modell `Raumdaten.mo`.

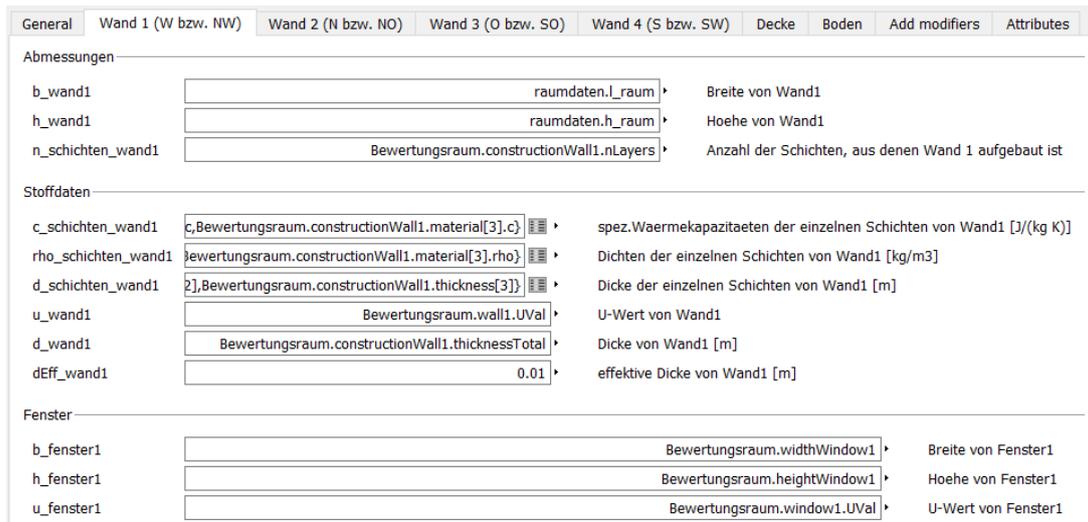


Abbildung 6.18. Exemplarische Parametrisierung des Modells `Raumdaten.mo`

Die Werte der Wetterkenngrößen (vgl. Abschnitt 5.2) müssen quartalsweise ermittelt werden. Dazu kann beispielsweise auf Datenbanken wie Meteonorm [Met20a] oder dem Climate Data Center des Deutschen Wetterdienstes [CDC20] zurückgegriffen werden. Alternativ könnten die Kenngrößen auch für ein Testreferenzjahr berechnet werden. Die Zahl der Personen, die sich durchschnittlich während einer Belegungsphase im Raum befindet, muss in vielen Fällen geschätzt werden. Dies gelingt üblicherweise durch Kenntnis der Raumnutzung recht gut. Bei öffentlich genutzten Räumen wie z.B. Hörsälen, kann die Zahl der Personen oft anhand von Belegungsplänen bestimmt werden. Auch die durchschnittliche Gesamtdauer der Belegung, die quartalsweise vorliegen muss, kann anhand typischer Raumnutzungen oder mit Hilfe von Belegungsplänen geschätzt werden.

Für die konkreten Anwendungsfälle zur Vorhersage der passenden Regler für das Testszenario am Standort Chemnitz mit Radiatorheizung und am Standort Berlin mit Fußbodenheizung sind die notwendigen Kenngrößen in Tabelle 6.15 angegeben.

Tabelle 6.15. Angabe der notwendigen Kenngrößen

Kenngröße	Standort Chemnitz, Radiatorheizung	Standort Berlin, Fußbodenheizung
γ	0,166 $\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$	0,166 $\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$
τ	160,47 h	160,47 h
$\bar{\vartheta}_a$	0,75 K	-1,76 K
\bar{I}	17,2 $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	15,0 $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$
$\Delta\vartheta_a$	1,08 K	1,27 K
ΔI	30,6 $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	33,9 $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$
n_{Pers}	2	2
H	1	2
Δt_{Bel}	259200 s	259200 s

Nun werden die unabhängigen Größen (Raum-, Wetter und Nutzungskenngröße) zwischen Null und Eins skaliert und anschließend die Vorhersage der Reglerparameter und der Reglergüte mit den KNN durchgeführt. Jetzt muss der Regler mit dem geringsten Gütewert ausgewählt werden. Der Ablauf des praktischen Einsatzes der entwickelten Methode ist in Abbildung 6.19 exemplarisch dargestellt.

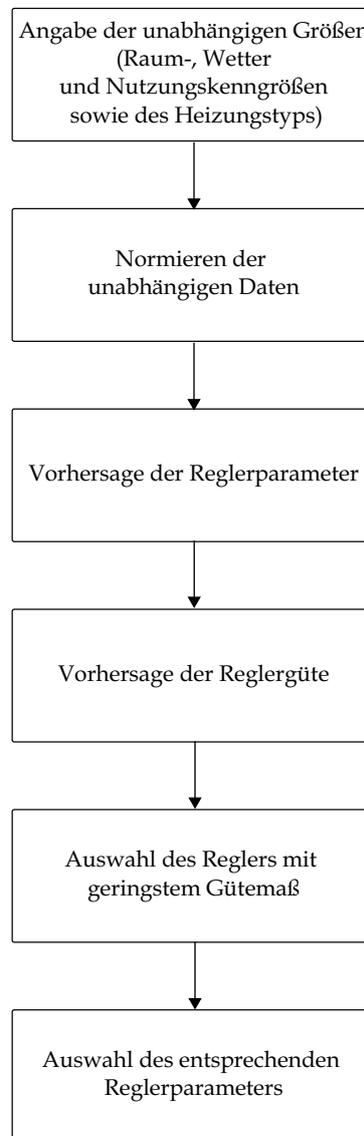


Abbildung 6.19. Ablauf zum praktischen Einsatz der Zusammenhänge

Eine beispielhafte Implementierung des Ablaufs ist in Anhang L gezeigt. Der vollständige Quellcode zur praktischen Anwendung der Zusammenhänge und die benötigten Python-Modelle der KNN und der `scaler`-Modelle sind im digitalen Anhang DA beigefügt. Das *Modelica*-Modell `Raumdaten` kann dem digitalen Anhang DB entnommen werden.

7. Zusammenfassung und Ausblick

7.1. Zusammenfassung der Arbeit

Ziel dieser Arbeit war es, einen einfachen Weg zur Wahl eines geeigneten Reglers einschließlich seiner Parametrisierung für die Temperaturregelung eines Einzelraumes zu finden. Dazu sollten Zusammenhänge zwischen optimal parametrisierten Reglern und Räumen, einschließlich deren Standort und Nutzung, erfasst und geeignet beschrieben werden. Diese Aufgabe wurde im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit gelöst, indem empirisch eine neue Methode zur Bestimmung eines geeigneten Raumreglers für einen Einzelraum entwickelt wurde, deren wesentlicher Bestandteil ein Künstliches Neuronales Netz ist, welches die Reglerparametrisierung aus einigen wenigen Raum- und Wetterkenngrößen berechnet, die vom Gebäudeplaner, -betreiber oder -nutzer vorzugeben sind. Die Entwicklung geschah im Hinblick auf eine einfache, praxisorientierte Anwendung, bei der dann keine Simulationsmodelle der Räume oder Regler notwendig sind.

Die Regelung von Einzelräumen wird bis heute wissenschaftlich eingehend untersucht. Eine Vielzahl von Veröffentlichungen zeigt, dass unterschiedliche Ansätze, Regler und Regelkonzepte entwickelt und bewertet wurden (vgl. Abschnitt 2.1.1). Dennoch werden in der Praxis aufgrund ihrer einfachen und leicht nachvollziehbaren Arbeitsweise meist einfache Regler wie Zweipunkt-, P-, PI- oder PID-Regler eingesetzt und oft „nach Gefühl“ parametrisiert. Dies führt zu Energieverschwendung und Komforteinbußen (vgl. Abschnitt 2.2). Es ist daher notwendig, eine Methode verfügbar zu machen, die zum einen die Wahl des günstigsten Reglers für einen Raum erlaubt, zum anderen optimale Parameter für diesen Regler liefert. Dieser Fragestellung widmete sich die vorliegende Forschungsarbeit.

Die Arbeit gliedert sich im Wesentlichen in zwei Teilaufgaben. Zum einen wurden als Grundlage zur Bestimmung der Zusammenhänge sehr viele Einzelmodelle simuliert und optimiert und in einer umfangreichen Datenbasis zusammengefasst. Zum anderen galt es, aus dieser Datenbasis gültige Zusammenhänge zwischen Räumen und für sie günstigen Raumreglern zu erforschen und zu implementieren.

Die Datenbasis wurde auf Grundlage einer weitreichenden Simulationsstudie erstellt. Dazu wurden vier Räume und drei Regler in Modelica implementiert. Dies erforderte die Modellierung der Räume an sich, wozu das Modelltemplate `Building1Zone1DBox` der *BuildingSystems*-Bibliothek genutzt wurde, aber auch des Nutzerverhaltens, der Luftwechselrate und der Heiz- sowie der Beleuchtungsvorrichtung. In festgelegten Simulationsszenarien wurde jedes Raum- mit jedem Reg-

lermodell kombiniert, simuliert und optimiert sowie ausgewertet, ob das Reglermodell mit den optimierten Parametern zu den für den Raum gewünschten Komfortkriterien führt. Nach Auswertung des Heizenergieverbrauchs, der sich in den jeweiligen Raummodellen durch Anwendung der Reglermodelle ergab, war als Zwischenergebnis bekannt, welches Reglermodell für welches Raummodell am geeignetsten ist. Um die Fülle an Räumen und klimatischen Bedingungen erfassen zu können, wurden aus der Literatur bekannte Kenngrößen zur Charakterisierung verwendet und auf die Simulationsmodelle angewendet. Die Klimakenngrößen wurden sowohl für die Zeiträume, die durch die Simulationsszenarien festgelegt sind, als auch quartalsweise berechnet. Im Verlauf der Untersuchungen stellte sich heraus, dass die Anzahl der ursprünglich gewählten Räume nicht ausreichend war und daher eine Vergrößerung der Datenbasis nötig wurde, um belastbare Ergebnisse zu erhalten. Daher wurden zum Erzeugen neuer Räume die Parameter der vorhandenen Raummodelle (Raumlänge, Raumhöhe, Fensterbreite, Energiedurchlassfaktor sowie U-Wert der Fenster) variiert. Für jeden der so entstandenen Räume wurden die Raum- und Standortkenngrößen bestimmt und die Reglerparameter aller Reglermodelle optimiert. Mittels des in der Arbeit definierten Gütemaßes zur Reglereignung wurde festgestellt, inwieweit die einzelnen optimal parametrisierten Regler für die Raummodelle tauglich sind. Nach Abschluss der Modellierungs-, Simulations- und Optimierungsaufgaben enthält die vollständige Datenbasis ca. 5300 Einträge, bestehend aus Raum- und Wetterkenngrößen, dem besten Regler samt seiner optimalen Parametrisierung, der Reglergüte, dem Heizungstyp, der durchschnittlichen Anzahl von Personen je Belegungszeitraum und der Gesamtdauer der Belegung.

Auf Grundlage dieser Datenbasis wurden nun Zusammenhänge zwischen den charakteristischen Kenngrößen der Raummodelle einschließlich ihrer Standorte und der Reglermodelle untersucht. Es stellte sich als zweckmäßig heraus, die Zusammenhänge für jedes Reglermodell separat zu bestimmen. Nach einer Analyse dazu geeigneter Methoden wurde zunächst versucht, einen Zusammenhang mittels linearer Regressionsanalyse für den Zweipunktregler und die Raummodelle zu ermitteln. Diese Untersuchungen erfolgten zunächst der Einfachheit halber an einer Teilmenge der Gesamtdaten, anschließend, da kein Zusammenhang ermittelt werden konnte, am kompletten Datensatz. Auch für den P- und den vorausschauenden Regler wurden lineare Regressionsanalysen am Gesamtdatensatz durchgeführt. Nach Auswertung der für die Regressionsanalyse typischen Maßzahlen stellte sich heraus, dass die Regression keine brauchbaren Zusammenhänge lieferte. Es wurde daher im Folgenden untersucht, inwiefern sich Künstliche Neuronale Netze eignen. Je Reglermodell wurde ein KNN zur Bestimmung des Wertes des Gütemaßes der Reglereignung und ein KNN zur Bestimmung des optimalen Reglerparameters identifiziert und in Python mit Hilfe der Werkzeugumgebung Scikit-Learn implementiert. Die Güte der Netze wurde sowohl durch ihre Lern- als auch durch ihre Verallgemeinerungsfähigkeit bewertet. Die KNN wurden für zwei unterschiedliche Zeitabschnitte - szenarienweise und, weniger detailliert, quartalsweise - der Bestimmung der Wetterkenngrößen identifiziert.

Zur Überprüfung ihrer Eignung wurden die ermittelten Zusammenhänge exemplarisch angewendet. Dazu wurde ein neues Simulationsszenario mit einem für die KNN „unbekannten“ Testraum angelegt und die Raumkenngrößen für diesen Testraum bestimmt. Die Wetterkenngrößen wurden für drei Standorte jeweils sowohl szenarien- als auch quartalsweise berechnet. Anschließend

wurde mittels der KNN für jedes Reglermodell dessen Eignung durch das Gütemaß ermittelt und für jeden Standort bestimmt, welches der drei Reglermodelle das beste Gütemaß aufweist. Ebenso wurden die optimalen Reglerparameter mittels der dafür gültigen KNN für die drei Reglermodelle ermittelt. Das gleiche Szenario wurde auch simuliert und die Reglerparameter durch Optimierung berechnet. Beim Vergleich zeigte sich, dass die Reglerparameter durch die KNN recht gut vorhergesagt wurden. Sie wichen nur moderat von den durch Optimierung bestimmten Reglerparametern ab. Der Wert der Reglergüte konnte mit den KNN nicht vorhergesagt werden. Die Abweichungen zur Simulation waren erheblich. Dennoch können die durch die KNN bestimmten Werte der Reglergüte dazu genutzt werden, den besten Regler auszuwählen. Abschließend werden in der Arbeit einige Hinweise zur Anwendung der Methodik in der Praxis gegeben.

7.2. Ausblick

Die entwickelte Methodik scheint durchführbar und erfolgversprechend anwendbar zu sein. Um sie in der Breite nutzbar zu machen, ist sie weiter abzusichern. Dazu sind mindestens die nachfolgend aufgeführten Untersuchungen erforderlich.

Gültigkeitsbereich der Künstlichen Neuronalen Netze

Zunächst sind die vorhandenen KNN weiteren Tests und Anwendungsfällen zu unterziehen. Insbesondere muss ihr Gültigkeitsbereich genauer charakterisiert werden. Es gilt zu spezifizieren, für welche Art Räume und für welche Standorte die Zusammenhänge anwendbar sind. Dazu sind die Arbeiten, die in Kapitel 6.1 begonnen wurden, auszubauen.

Erweiterung der Anwendbarkeit der entwickelten Methode

Die in dieser Arbeit entwickelte Methode zur Wahl eines passenden Raumreglers ist so angelegt, dass sie erweitert werden kann. So könnten beispielsweise weitere Raummodelle einbezogen und so die Datenbasis vergrößert werden. Um den notwendigen Modellierungsprozess zu beschleunigen, sollten Möglichkeiten zur automatischen Parametrisierung der Modelle, beispielsweise durch BIM-Daten ([TMB⁺17], [Wim20]), geschaffen werden. Naheliegend ist auch, weitere Raumregler aufzunehmen, da momentan nur aus der Menge Zweipunkt-, P- und vorausschauender Regler gewählt werden kann. Dazu müssten in der Datenbasis Einträge für neue Regler ergänzt werden. Dafür notwendig ist ein Modell des Reglers und seine Simulation innerhalb der definierten Szenarien. Für jedes vorhandene Raummodell müsste das neue Reglermodell optimiert werden. Anschließend identifizierte man pro Regler zwei KNN, eines zur Bestimmung der Reglergüte und eines zur Bestimmung des oder der optimalen Reglerparameter. Erste Schritte zur Aufnahme neuer Regler in die Datenbasis wurden bereits gegangen. So liegen für einen PI-Regler, einen Statechart-Regler und einen Regler, der den in der Arbeit genutzten vs-Regler mit einem Zweipunktregler kombiniert, Erkenntnisse darüber vor, wie gut sie sich für die vier beschriebenen Raummodelle eignen. Dazu wurden die Regler modelliert, innerhalb der Szenarien simuliert und

deren Reglerparameter optimiert. Die Ergebnisse sind, als Erweiterung zu Tabelle 4.11 und 4.13, in Tabelle 7.1 für das in Abschnitt 4.4 beschriebene strenge Bewertungsmaß $T_{\text{cold}} + T_{\text{warm}} = 0\text{Ks}$ und in Tabelle 7.2 für das abgeschwächte Bewertungsmaß ($T_{\text{cold}} + T_{\text{warm}} \leq 3600\text{Ks}$) dargestellt. Diese Regler werden jedoch noch nicht in die Ermittlung der Zusammenhänge zwischen Räumen und Reglern einbezogen, da als Voraussetzung für jeden Regler eine immense Zahl an Optimierungen (vgl. Abschnitt 4.5) durchgeführt werden muss. Dies überstieg die zeitliche Kapazität dieser Forschungsarbeit.

Tabelle 7.1. Zusammenfassung der Eignung der optimierten Regler hinsichtlich der Raummodelle

Raummodell	Regler					
	Zweipunkt	vs	P	PI	Statechart	Kombination
Gartenhaus	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Büro	x	✓	x	x	x	✓
Konferenzraum	x	x	x	x	x	x
Klassenzimmer	x	x	x	x	x	x

Tabelle 7.2. Zusammenfassung der Eignung der optimierten Regler hinsichtlich der Raummodelle (Bewertungskriterium abgeschwächt)

Szenario	Regler					
	Zweipunkt	vs	P	PI	Statechart	Kombination
Gartenhaus	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Büro	x	✓	x	x	□	✓
Konferenzraum	□	□	□	□	□	□
Klassenzimmer	x	x	x	x	x	□

Anwendungsfelder der Methode

Weiterhin ist es denkbar, das Anwendungsfeld der Methode um Lüftung und Kühlung zu erweitern. Dazu ist der Ausbau der Raummodelle um Lüftungs- und Kühlungseinrichtungen vorzunehmen. Dies erfordert einen vergleichsweise geringen Aufwand, da es zum einen bereits Modelle bzw. Modellbestandteile von Lüftungs- und Kühlungsanlagen gibt ([MSL20], [NGHLR12], [WZNP14]), und zum anderen die Raummodelle durch ihre objektorientierte Implementierungsweise leicht erweiterbar sind. Auch die Hinzunahme weiterer, auch extremerer Standorte wie beispielsweise aus den Subtropen, ist eine denkbare Erweiterung des Anwendungsfeldes der Methode.

Test der Methode im praktischen Einsatz

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die entwickelte Methode nur anhand von einem Raummodell überprüft, jedoch nicht an einem realen Raum getestet. Im Hinblick auf die praktische Anwendbarkeit könnten sich einige Schwierigkeiten ergeben, weswegen der praktische Einsatz untersucht werden muss. So sind eventuell nicht alle Werte zur Bestimmung der Raumkenngrößen

verfügbar. Besonders in Bestandsgebäuden kann es ferner zu Einschränkungen in der Reglerwahl kommen, da u. U. die vorhandenen Regler nicht ohne weiteres ersetzt werden können. In diesem Fall kann die Methode zwar nicht dazu genutzt werden, den günstigsten Regler für den Raum zu bestimmen, wohl aber um den fest vorgegebenen Regler optimal zu parametrisieren. Auch sind möglicherweise nicht alle Eingangsgrößen für die Regler verfügbar. Der vs-Regler benötigt beispielsweise Informationen über die kommende Belegung des Raumes. Zu untersuchen ist auch, wie sich die Anwendung der Methode in die Planungs- und Bau- bzw. Umbauphase eines Gebäudes integrieren lässt.

Regleroptimierung

Ein weiterer Themenkomplex, der eingehender untersucht werden muss, ist die Optimierung der Reglermodelle. Es muss sichergestellt werden, dass die optimalen Reglerparameter gefunden werden. Dies ist besonders im Hinblick auf die in der Arbeit genutzte automatisierte Vorgehensweise bestehend aus Parametervariation und anschließender Optimierung notwendig, da aufgrund der Fülle der Optimierungen der Verlauf der Zielfunktion nicht mehr manuell überprüft werden kann. Auch zur Wahl der Zielfunktion selbst könnten weitere Untersuchungen durchgeführt werden. Eine weitere Fragestellung, die mit der der Optimierung verknüpft ist, ist die nach der Sensitivität der Reglereignung bezüglich der Reglerparameter. Es ist also zu analysieren, ob und wie stark sich eine Änderung der Reglerparameter weg vom Optimum auf die Reglereignung auswirkt. Erste grafische Analysen der Reglereignung (vgl. Gleichung (4.14) zeigen, dass es durchaus Fälle gibt, bei denen die Abweichung der Reglerparameter vom Optimum nicht zu einer wesentlichen Veränderung des Wertes der Reglereignung führt. Abbildung 7.1 zeigt beispielsweise die Funktion der Reglereignung für den vs-Regler in Abhängigkeit von den beiden Reglerparametern Opt_{p1} und Opt_{p2} für das Szenario Besprechungen am Standort Chemnitz. Es ist ersichtlich, dass eine Variation des Parameters Opt_{p1} zwischen 0 und 0,1 kaum Einfluss auf die Reglereignung hat. Bewegt sich der Parameter Opt_{p2} zusätzlich noch im Bereich zwischen 5 und 10, ändert sich der Wert der Reglereignung überhaupt nicht. Es wird demnach vermutlich so sein, dass die Eignung des Reglers nicht von konkreten optimalen Parametern, sondern vielmehr von einem optimalen Bereich abhängt. Diese Vermutung wird auch durch die in Kapitel 4 im Abschnitt 4.6 dargestellte Sensitivitätsanalyse mittels Differenzenquotient bestätigt.

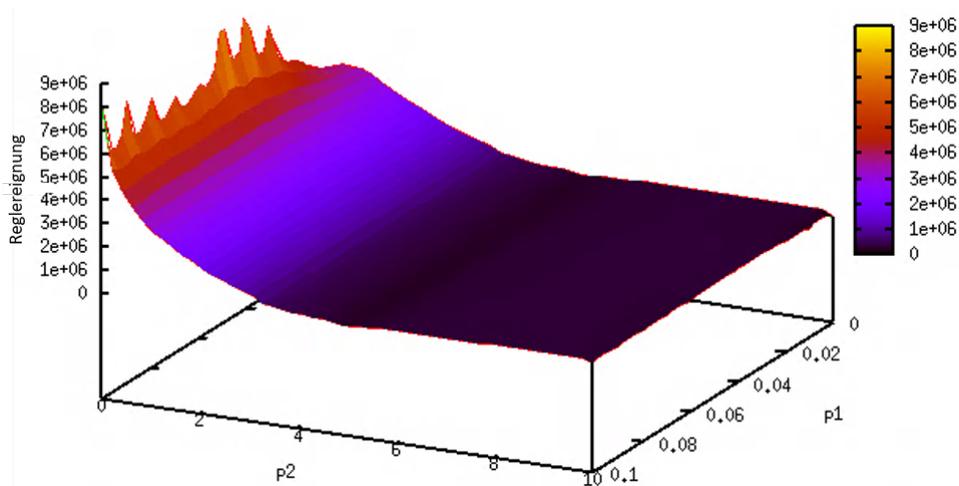


Abbildung 7.1. Reglereignung des vs-Reglers in Abhängigkeit der Reglerparameter Opt_{p1} und Opt_{p2}

Charakterisierung der Räume

Weitere notwendige Untersuchungen beziehen sich auf die Charakterisierung der Räume. In der Arbeit werden die Raummodelle durch die Kenngrößen γ und τ beschrieben. Es wurde nicht untersucht, ob diese Reduktion auf lediglich zwei Parameter die Modelle ausreichend beschreibt. Zum einen könnte die Herleitung der Kenngrößen [Kel97] analysiert werden, zum anderen wäre ein Ansatz zur Untersuchung dieses Sachverhalts, zwei Raummodelle zu erstellen, die die gleichen Raumkenngrößen besitzen, jedoch beispielsweise eine unterschiedliche Geometrie aufweisen. Für diese Modelle wäre dann zu überprüfen, ob sie unter gleichen Simulationsbedingungen das gleiche thermische Verhalten zeigen. Die Bestimmung des Energieverbrauchs bei Anwendung der Regler gelingt durch die gefundenen Zusammenhänge nicht. Hier liegt die Vermutung nahe, dass die Reduktion der Räume auf die beiden Kenngrößen zu drastisch ist. In diesem Zusammenhang müssen weitere Untersuchungen erfolgen und die Ursachen gefunden werden. Dazu ist weitere Forschungsarbeit, auf deren Notwendigkeit auch in [Kel97] hingewiesen wird, zu leisten.

Alternative Ansätze zur Ermittlung der Zusammenhänge zwischen Räumen und Reglern

Um die Zusammenhänge zwischen Räumen und Reglern zu ermitteln wäre weiterhin zu prüfen, welche alternativen Ansätze möglich sind. Eine einfach umzusetzende Variante bestünde darin, in der Datenbasis nach den Raum- und Wetterkenngrößen des mit einem Regler auszustattenden Raumes zu suchen und den passenden Regler direkt abzulesen. Vor allem im Hinblick auf eine mögliche Erweiterung der Datenbasis mit anderen Raum- und Reglermodellen steigt die Wahrscheinlichkeit, die gesuchten Raumkenngrößen direkt in der Datenbasis zu finden. Sollte ein direktes Ablesen nicht möglich sein, kann weiterhin überprüft werden, ob mittels Interpolation innerhalb der Datenbasis die gewünschte Kombination aus Raum- und Wetterkenngrößen gefunden und der passende Regler sowie der optimale Parameter abgelesen werden können. Ferner sollte untersucht werden, ob andere Lernverfahren, wie nichtlineare Regression, Support-Vektor-Maschinen oder stochastischer Gradientenabstieg die Zusammenhänge beschreiben können. Auch die Parameter der in der Arbeit gewählten KNN könnten im Hinblick auf

noch bessere Werte für die erreichbaren Bestimmtheitsmaße optimiert werden. In diesem Zusammenhang sollte generell geprüft werden, wie ein KNN am günstigsten zu parametrisieren ist.

Rechentechnische Umsetzung der Methode

Die rechentechnische Umsetzung der Bestimmung der Zusammenhänge bedarf einer Überarbeitung, um Fehlerquellen zu minimieren, Speicherplatz zu sparen und den Code effizienter zu gestalten. So wird momentan für jeden Regler und für jedes Vorhersageziel (Reglerparameter und Energieverbrauch) ein separates Python-File angelegt. In jedem dieser Files werden im Wesentlichen die gleichen Schritte, wie Daten Einlesen, Vorverarbeiten und Skalieren, Grundstruktur der KNN anlegen und diese parametrisieren, Durchführen des Lernvorgangs und Auswerten anhand der Bestimmtheitsmaße und des Testraumes, durchgeführt. Diese Python-Skripte sollten zusammengeführt und sich unterscheidende Schritte beispielsweise mit Switch-Case-Anweisungen behandelt werden. Auch die Datenhaltung muss sicherer gestaltet werden. Momentan wird die gesamte Datenbasis in einer Excel-Tabelle gespeichert, von welcher die Python-Skripte lesen. Dies ist sehr fehleranfällig, denn es muss sichergestellt werden, dass die Tabelle in der richtigen Version vorliegt und dass keine ungewollten Änderungen an ihr durchgeführt wurden. Daher sollte die Datenbasis besser in einer Datenbank abgelegt werden. Weiterhin wäre es wünschenswert, wenn die ermittelten KNN plattformunabhängig sowie unabhängig von der Python-Version, mit der sie erstellt worden sind, anwendbar wären. Auch ist zu prüfen, ob die KNN durch Nutzung anderer verfügbarer Werkzeuge zum maschinellen Lernen, wie Keras ([Ker20]), im Hinblick auf Performance und Nutzerfreundlichkeit parametrisiert und implementiert werden sollten.

Komfortbestimmung und Bewertung der Reglergüte

In die Bewertung der Reglergüte gehen in dieser Arbeit der Energieverbrauch der Heizung sowie die Zeiten und die Höhe der Komfortverletzung ein. Dies wäre ausbaufähig, indem beispielsweise der Komfort durch etablierte Modelle bestimmt würde. Für Räume ohne maschinelle Kühlung käme das adaptive Komfortmodell zum Einsatz, was sowohl eine Änderung des Außenklimas als auch die Einflussnahme des Nutzers berücksichtigt ([Bin20]). Der Komfort von Räumen und Gebäuden, die durch Klimaanlage oder thermoaktive Bauteile klimatisiert werden, sollte durch den *Predicted-Mean-Vote-Index* (PMV) ([Fan70]) bestimmt werden. Für den PMV-Index liegt mit der *HumanComfort*-Bibliothek ([Hum20]) bereits eine Modelica-Bibliothek vor, die direkt genutzt werden könnte.

Die Auswahl und Parametrisierung von Reglern zur Einzelraumregelung ist, so einfach es klingen mag, nicht trivial. Viele Untersuchungen und Forschungsansätze haben wertvolle Beiträge auf diesem Gebiet geliefert. Auch der vorliegende Ansatz kann, besonders bei der Wahl eines passenden Reglers, hilfreich sein. Es ist deutlich geworden, dass der beschriebene empirische Weg zur Ermittlung von Zusammenhängen zwischen Räumen und Reglern gegangen werden kann und zum Ziel führt. Jedoch ist mit Unsicherheiten bzgl. der Modellbildung, der Optimierung und der Beschreibung der Räume und des Klimas durch Kenngrößen umzugehen. Zukünftig gilt es, den gefundenen Weg auszubauen und seine Anwendung auf komplette Gebäude und Quartiere inklu-

sive ihrer Anlagentechnik zu erweitern, sodass innerhalb des Planungsprozesses von Gebäuden „per Knopfdruck“ für alle zu regelnden Einrichtungen ein passender, optimal parametrisierter Regler gefunden werden kann.

Literaturverzeichnis

- [AAPZU⁺04] AL-ASSADI, S. A. K.; PATEL, R. V.; ZAHEER-UDDIN, M.; VERMA, M. S.; BREITINGER, J.: Robust decentralized control of HVAC systems using H_∞ -performance measures. In: *Journal of the Franklin Institute* 341 (2004), Nr. 7, S. 543–567
- [ÅH84a] ÅSTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T.: Automatic tuning of simple regulators. In: *IFAC Proceedings Volumes* 17 (1984), Nr. 2, S. 1867–1872
- [ÅH84b] ÅSTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T.: Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins. In: *Automatica* 20 (1984), Nr. 5, S. 645–651
- [AJS14] AFRAM, A.; JANABI-SHARIFI, F.: Theory and applications of HVAC control systems – A review of model predictive control (MPC). In: *Building and Environment* 72 (2014), S. 343–355
- [AKLM14] ADOLPH, M.; KOPMANN, N.; LUPULESCU, B.; MÜLLER, D.: Adaptive control strategies for single room heating. In: *Energy and Buildings* 6 (2014), S. 771 – 778
- [ALKM12] ADOLPH, M.; LUPULESCU, B.; KOPMANN, N.; MÜLLER, D.: VERGLEICH VON ALGORITHMEN ZUR ADAPTIVEN EINZELRAUMREGELUNG. In: *Fourth German-Austrian IBPSA Conference*, 2012, S. 234–239
- [alp20a] *Webseite des Raumreglers alphaEOS DRIVE der alphaINSIDE GmbH.* <http://alphaeos.com/heizkoerper>. Version: 2020, Abruf: 22.05.2020
- [alp20b] *Webseite des Raumreglers alphaEOS FLOOR der alphaINSIDE GmbH.* <http://alphaeos.com/fussbodenheizung>. Version: 2020, Abruf: 22.05.2020
- [ASVR99] ARGUELLO-SERRANO, B.; VELEZ-REYES, M.: Nonlinear control of a heating, ventilating, and air conditioning system with thermal load estimation. In: *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 7 (1999), Nr. 1, S. 56–63
- [ÅW97] ÅSTRÖM, K. J.; WITTENMARK, B.: *Computer-controlled Systems: Theory and Design*. Prentice Hall, 1997 (Prentice-Hall information and system sciences series)

- [BCJ⁺15] BAETENS, R.; CONINCK, R. D.; JORISSEN, F.; PICARD, D.; HELSEN, L.; SAELENS, D.: OPENIDEAS - AN OPEN FRAMEWORK FOR INTEGRATED DISTRICT ENERGY SIMULATIONS. In: *Proceedings of the 14th Conference of International Building Performance Simulation Association*, 2015, S. 347–354
- [BCW⁺00] BI, Q.; CAI, W.-J.; WANG, Q.-G.; HANG, C.-C.; LEE, E.-L.; SUN, Y.; LIU, K.-D.; YONG, Y. Z.; ZOU, B.: Advanced controller auto-tuning and its application in HVAC systems. In: *Control Engineering Practice* 8 (2000), Nr. 6, S. 633–644
- [BEOM02] BRÜCK, D.; ELMQVIST, H.; OLSSON, H.; MATTSSON, S.-E.: Dymola for Multi-Engineering Modeling and Simulation. In: *Proceedings of the 2nd International Modelica Conference*, 2002, S. 55–1 – 55–8
- [BEPW15] BACKHAUS, K.; ERICHSON, B.; PLINKE, W.; WEIBER, R.: *Multivariate Analysemethoden*. Springer Gabler, 2015
- [Bin20] *Webseite des BINE Informationsdienstes.* <http://www.bine.info/publikationen/themeninfos/publikation/nichtwohngesbaeude-effizient-heizen-kuehlen/nutzerzufriedenheit-und-raumkomfort/?cHash=d801e38ad17fef17cd241d8cb4ffcd91&type=333>. Version: 2020, Abruf: 29.06.2020
- [BKS10] BERKENKAMP, F.; KRAUSE, A.; SCHOELLIG, A. P.: Bayesian optimization with safety constraints: safe and automatic parameter tuning in robotics. In: *arXiv:1602.04450v3* (2010), S. 1–22
- [BMH91] BEKKER, J. E.; MECKEL, P. H.; HITTLE, D. C.: A tuning method for first-order processes with PI controllers. In: *ASHRAE Trans* 97 (1991), Nr. 2, S. 19–23
- [BMW15a] *Energieeffizienzstrategie Gebäude.* <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienzstrategie-gebaeude.html>. Version: 2015, Abruf: 22.06.2020. – Bundesamt für Wirtschaft und Energie (BMWi)
- [BMW15b] *Innovation durch Forschung - Erneuerbare Energien und Energieeffizienz: Projekte und Ergebnisse der Forschungsförderung 2015.* <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/innovation-durch-forschung-2015.html>. Version: 2015, Abruf: 22.06.2020. – Bundesamt für Wirtschaft und Energie (BMWi)
- [Bui21a] *lbl-srg/modelica-buildings.* <https://github.com/lbl-srg/modelica-buildings>. Version: 2021, Abruf: 08.02.2021
- [Bui21b] *UdK-VPT/BuildingSystems.* <https://github.com/UdK-VPT/BuildingSystems>. Version: 2021, Abruf: 21.01.2021

- [But93] Schutzrecht UNITED STATES PATENT OFFICE 510,889 (Dec. 1893). BUTZ, A. M. (Erfinder).
- [BWZ08] BAI, J.; WANG, S.; ZHANG, X.: Development of an adaptive Smith predictor-based self-tuning PI controller for an HVAC system in a test room. In: *Energy and Buildings* 40 (2008), Nr. 12, S. 2244 – 2252
- [CDC20] *Climate Data Center*. https://www.dwd.de/DE/leistungen/cdc_portal/cdc_portal.html?nn=17626. Version: 2020, Abruf: 11.05.2020
- [DB91] DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A.: *Solar engineering of thermal processes*. Wiley New York, 1991
- [Des20] *Webseite der Desigo™Raumautomation der Siemens Aktiengesellschaft*. <https://new.siemens.com/de/de/produkte/gebaeudetechnik/automation/designo/raum-automation.html>. Version: 2020, Abruf: 24.05.2020
- [DIN11] Norm DIN EN 12464-1 2011. *Licht und Beleuchtung - Beleuchtung von Arbeitsstätten - Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen*
- [DIN12] Norm DIN EN 15251 2012. *Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumluft, Temperatur, Licht und Akustik*
- [DIN15] Norm DIN EN 442-2 2015. *Radiatoren und Konvektoren - Teil 2: Prüfverfahren und Leistungsangabe*
- [DIN17] Norm DIN EN 16798-3 2017. *Energetische Bewertung von Gebäuden – Lüftung von Gebäuden – Teil 3: Lüftung von Nichtwohngebäuden – Leistungsanforderungen an Lüftungs- und Klimaanlageanlagen und Raumkühlssysteme (Module M5-1, M5-4)*
- [Dri99] DRIES, C Van d.: The advance of ‘OpenTherm‘. A new market standard for the control of modulating heating systems; Opmars van OpenTherm in volle gang. Steeds meer fabrikanten van cv-toestellen en regelapparatuur sluiten zich aan bij succusvolle marktstandaard. In: *Verwarming en Ventilatie* Bd. 56, 1999
- [Eas20] *Webseite des Einzelraumreglers Easy Control der Firma Bosch*. <https://www.bosch-easycontrol.com/de/de/easycontrol/startseite/>. Version: 2020, Abruf: 22.05.2020
- [eco20] *Webseite Raumregler ecos311 der Sauter Controls GmbH*. <https://www.sauter-controls.com/produkt/raumregler-ecos311/>. Version: 2020, Abruf: 24.05.2020

- [EK95] EBERHART, R.; KENNEDY, J.: A new optimizer using particle swarm theory. In: *MHS'95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science* Ieee, 1995, S. 39–43
- [Eke95] Schutzrecht UNITED STATES PATENT OFFICE 543,929 (Aug. 1895). EKEHORN, S. A. (Erfinder).
- [Elm78] ELMQVIST, H.: A Structured Model Language for Large Continuous Systems / Department of Automatic Control, Lund Institute of Technologie. 1978. – Dissertation, Report CODEN:LutFD2/(TFRT-1015)
- [ene16] *Entwurfsverfahren für ganzheitliche Energiemanagementsysteme in Gebäuden (ENERMAT): Gemeinsamer Abschlussbericht - Version 1.0.* <https://www.tib.eu/de/suchen/id/TIBKAT:865215499/Entwurfsverfahren-f%C3%BCr-ganzheitliche-Energiemanagementsysteme?noCHash=c6e9321903a1bc8893d93d94f15de477>. Version: 2016, Abruf: 22.06.2020. – Leibniz-Informationszentrum Technik und Naturwissenschaften Universitätsbibliothek (TIB)
- [EnE17] *EnEff:Schule.* <https://www.eneff-schule.de/index.php/demonstrationsobjekte/plusenergieschulen/hohen-meuendorf.html>. Version: 2017, Abruf: 10.09.2020
- [enk20] *Webseite des Raumreglers en:key der Kieback&Peter GmbH & Co. KG.* <https://www.kieback-peter.com/de/produkte/sensoren/>. Version: 2020, Abruf: 22.05.2020
- [EnO15] *EnOB/EnBop-Verbundvorhaben: Entwurfsverfahren für ganzheitliche Energiemanagementsysteme in Gebäuden - enerMAT.* <https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/?op=enargus.eps2&q=enerMAT&v=10&s=1&id=342749>. Version: 2015, Abruf: 22.06.2020. – Bundesamt für Wirtschaft und Energie (BMWi)
- [ER320] *Beschreibung des Einzelraumreglers ER3000 der Neuberger Gebäudeautomation GmbH.* <http://www.neuberger.net/produkte-1/raumautomation>. Version: 2020, Abruf: 24.05.2020
- [Fan70] FANGER, P. O.: Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. In: *Dissertation at Technical University Denmark* (1970)
- [FAP⁺06] FRITZSON, P.; ARONSSON, P.; POP, A.; LUNDVALL, H.; NYSTRÖM, K.; SALDAMLI, L.; BROMAN, D.; SANDHOLM, A.: OpenModelica - A free open-source environment for system modeling, simulation, and teaching. In: *Proceedings of the 2006 IEEE Conference on Computer Aided Control Systems Design*, 2006, S. 1588–1595
- [FCL94] FRUEHAUF, P. S.; CHIEN, I.-L.; LAURITSEN, M. D.: Simplified IMC-PID tuning rules. In: *ISA Transactions* 33 (1994), Nr. 1, S. 43–59

- [FCS⁺19] FIDUCIOSO, M.; CURI, S.; SCHUMACHER, B.; GWERDER, M.; KRAUSE, A.: Safe contextual bayesian optimization for sustainable room temperature pid control tuning. In: *arXiv preprint arXiv:1906.12086* (2019)
- [Fri10] FRITZSON, P.: *Principles of Object-Oriented Modeling and Simulation with Modelica 2.1*. John Wiley & Sons, 2010
- [FTKB95] FIKSEL, A.; THORNTON, J. W.; KLEIN, S. A.; BECKMAN, W. A.: Developments to the TRNSYS simulation program. In: *Solar Energy Engineering* 117 (1995), Nr. 2, S. 123–127
- [GDU06] GOUDA, M. M.; DANAHER, S.; UNDERWOOD, C. P.: Quasi-adaptive fuzzy heating control of solar buildings. In: *Building and Environment* 41 (2006), Nr. 12, S. 1881–1891
- [GEG20] *Webseite des Gebäudeenergiegesetzes.* [https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBl&bk=Bundesanzeiger_BGBl&start=//*\[@attr_id=%27bgbl107s1519.pdf%27\]#__bgbl__%2F%2F*%5B%40attr_id%3D%27bgbl120s1728.pdf%27%5D__1609701787966](https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBl&bk=Bundesanzeiger_BGBl&start=//*[@attr_id=%27bgbl107s1519.pdf%27]#__bgbl__%2F%2F*%5B%40attr_id%3D%27bgbl120s1728.pdf%27%5D__1609701787966). Version: 2020, Abruf: 03.01.2020
- [Gér19] GÉRON, A.: *Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow*. OReilly Media Inc., 2019
- [GOJ13] GONDHALEKAR, R.; OLDEWURTELE, F.; JONES, C. N.: Least-restrictive robust periodic model predictive control applied to room temperature regulation. In: *Automatica* 49 (2013), Nr. 9, S. 2760–2766
- [HA88] HANG, C. C.; ASTRÖM, K. J.: Practical Aspects of PID Auto-Tuners Based on Relay Feedback. In: *IFAC Proceedings Volumes* 21 (1988), Nr. 7, S. 153 – 158. – 2nd International IFAC Symposium on Adaptive Control of Chemical Processes 1988 (ADCHEM '88), Lyngby, Copenhagen, Denmark, 17-19 August
- [Hau20] *Webseite „Das Haus“.* <https://www.haus.de/smart-home/auf-dem-pruefstand-wie-sicher-ist-smart-home>. Version: 2020, Abruf: 22.06.2020
- [HL98] HAMDİ, M.; LACHIVER, G.: A fuzzy control system based on the human sensation of thermal comfort. In: *1998 IEEE International Conference on Fuzzy Systems Proceedings. IEEE World Congress on Computational Intelligence (Cat. No. 98CH36228)* Bd. 1 IEEE, 1998, S. 487–492
- [HSAN12] HOMOD, R. Z.; SAHARI, K. S. M.; ALMURIB, H. A. F.; NAGI, F. H.: Gradient auto-tuned Takagi–Sugeno Fuzzy Forward control of a HVAC system using predicted mean vote index. In: *Energy and Buildings* 49 (2012), S. 254 – 267

- [HTS07] Schutzrecht UNITED STATES PATENT 7,216,497 B2 (May 2007). HULL, G. G.; TOM, S. T.; SAAR, R. L. (Erfinder).
- [Hua11] HUANG, G.: Model predictive control of VAV zone thermal systems concerning bi-linearity and gain nonlinearity. In: *Control Engineering Practice* 19 (2011), Nr. 7, S. 700 – 710
- [Hum20] *Webseite der HumanComfort-Bibliothek der XRG Simulation GmbH.* <https://www.xrg-simulation.de/de/produkte/xrg-library/humancomfort>. Version: 2020, Abruf: 29.06.2020
- [HX11] HU, W.; XIAO, G.: Analytical Proportional- Integral (PI) Controller Tuning Using Closed-Loop Setpoint Response. In: *Industrial & engineering chemistry research* 50 (2011), Nr. 4, S. 2461–2466
- [IBP21] *Webseite des Forschungsprojekts IBPSA Project 1.* <https://ibpsa.github.io/project1/>. Version: 2021, Abruf: 04.01.2021
- [Idr15] IDRIS, I.: *Numpy*. PACKT Publishing, 2015
- [inn20] *Webseite des Raumthermostats SmartHome der Firma Innogy SE.* <https://www.innogy.com/smartstore/SmarthomeCatalog/Einzelgeraete/SmartHome-Raumthermostat-zid10267400>. Version: 2020, Abruf: 24.05.2020
- [Jen39] Schutzrecht UNITED STATES PATENT OFFICE 2,176,002 (Oct. 1939). JENNINGS, I. C. (Erfinder).
- [JH20] JIANG, D.; HONGSHE, C.: Study on Fuzzy Control for Air-To-Water Heat Pumps Connected to a Residential Floor Heating System. In: *Mathematical Problems in Engineering* 2020 (2020)
- [Jup20] *Jupyter.* <https://jupyter.org/>. Version: 2020, Abruf: 11.05.2020
- [JZUF98] JETTÉ, I.; ZAHEER-UDDIN, M.; FAZIO, P.: PI-control of dual duct systems: manual tuning and control loop interaction. In: *Energy Conversion and Management* 39 (1998), Nr. 14, S. 1471–1482
- [KABG08] KURIAN, C. P.; AITHAL, R. S.; BHAT, J.; GEORGE, V.: Robust control and optimisation of energy consumption in daylight—artificial light integrated schemes. In: *Lighting Research & Technology* 40 (2008), Nr. 1, S. 7–24
- [Kel97] KELLER, B.: *Klimagerechtes Bauen: Grundlagen - Dimensionierung - Beispiele*. B. G. Teubner Stuttgart, 1997
- [Ker20] *Webseite des Keras Python Frameworks.* <https://keras.io/>. Version: 2020, Abruf: 06.07.2020

- [kli19] *Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050.* <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975226/1679914/e01d6bd855f09bf05cf7498e06d0a3ff/2019-10-09-klima-massnahmen-data.pdf>. Version: 2019, Abruf: 29.12.2020
- [KM06] KELLER, B.; MAGYARI, E.: Ein Design-Tool für den Entwurf von Niedrigenergiebauten. In: *Bauphysik* 28 (2006), Nr. 5, S. 321–329
- [KPT⁺06] KAFETZIS, G.; PATELIS, P.; TRIPOLITAKIS, E.; STAVRAKAKIS, G.; KOLOKOTSA, D.; KALAITZAKIS, K.: PID controller tuning and implementation aspects for building thermal control. In: *WSEAS Transactions on Circuits and Systems* 5 (2006), 07, S. 1016–1020
- [KTM02] KELLER, B.; TIAN, Y.; MAGYARI, E.: Klimatisch angepasstes Bauen: Eine allgemeingültige Methode. In: *Tagungsband des 11. Symposiums for Building Physics*, 2002
- [Lü11] LÜTKEMEYER, I.: *Plusenergie-Grundschule Hohen Neuendorf*. URL: https://www.zukunftsraum-schule.de/pdf/information/energieeffiziente/06_Luetkemeyer_Plusenergieschule-Hohen-Neuendorf.pdf, 11 2011
- [LD05] LIANG, J.; DU, R.: Thermal comfort control based on neural network for HVAC application. In: *Proceedings of 2005 IEEE Conference on Control Applications, 2005. CCA 2005*. IEEE, 2005, S. 819–824
- [Lin11] LIN, H.: A kind of intelligent temperature controller use PID algorithm to realize. In: *2011 International Conference on Electrical and Control Engineering*, 2011, S. 2838–2840
- [LL00] LEITH, D. J.; LEITHEAD, W. E.: Survey of gain-scheduling analysis and design. In: *International journal of control* 73 (2000), Nr. 11, S. 1001–1025
- [LSH10] LI, X.; SHI, Z.; HU, S.: A novel control method of a variable volume air conditioning system for indoor thermal environment. In: *2010 2nd International Conference on Computer Engineering and Technology* Bd. 2 IEEE, 2010, S. V2–566
- [Lun16] LUNZE, J.: *Regelungstechnik 1*. Springer Vieweg, 2016
- [Mat20] *Webseite der MathWorks, Inc.* <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>. Version: 2020, Abruf: 23.09.2020
- [MCH⁺15a] MAJETTA, K.; CLAUSS, C.; HAUFE, J.; SEIDEL, S.; BLOCHWITZ, T.; LIEBOLD, E.; HINTZEN, U.; KLOSTERMANN, V.: Design and Optimization of an Energy Manager for an Office Building. In: *Präsentationsfolien im Workshop der ASIM/GI-Fachgruppen Simulation technischer Systeme Grundlagen und Methoden in Modellbildung und Simulation*, 2015, S. 289–298

- [MCH⁺15b] MAJETTA, K.; CLAUSS, C.; HAUFE, J.; SEIDEL, S.; BLOCHWITZ, T.; LIEBOLD, E.; HINTZEN, U.; KLOSTERMANN, V.: Design and Optimization of an Energy Manager for an Office Building. In: *Simulation Notes Europe (SNE)* 25(2) (2015), S. 99–108
- [MCNG17] MAJETTA, K.; CLAUSS, C.; NYTSCH-GEUSEN, C.: Investigation of the Influence of Controller Types on Room Thermal Behaviour - A Simulation Study. In: *Proceedings of the 12th International Modelica Conference*, Modelica Association, 2017, S. 161–169
- [Met20a] *Meteonorm*. <https://meteonorm.com/>. Version: 2020, Abruf: 11.05.2020
- [met20b] *Webseite der Metasys Automationsstation* [®] *Automationsstation der Johnson Controls Systems & Service GmbH*. https://www.johnsoncontrols.com/de_de/buildings/building-management-system/metasys. Version: 2020, Abruf: 24.05.2020
- [MLC⁺16] MÜLLER, D.; LAUSTER, M.; CONSTANTIN, A.; FUCHS, M.; REMMEN, P.: AixLib - An Open-Source Modelica Library within the IEA-EBC Annex 60 Framework. In: *Proceedings of BauSIM 2016*, 2016, S. 3–9
- [MMN14] MARVUGLIA, A.; MESSINEO, A.; NICOLOSI, G.: Coupling a neural network temperature predictor and a fuzzy logic controller to perform thermal comfort regulation in an office building. In: *Building and Environment* 72 (2014), S. 287–299
- [Mod17] *Modelica A Unified Object-Oriented Language for Systems Modeling*. Language Specification, April 2017
- [Mol19] MOLIN, S.: *Hands-On Data Analysis with Pandas*. PACKT Publishing, 2019
- [MSL20] *Online Dokumentation der Modelica-Standard-Bibliothek (MSL)*. <https://doc.modelica.org/>. Version: 2020, Abruf: 25.06.2020
- [MSL21] *modelica/ ModelicaStandardLibrary*. <https://github.com/modelica/ModelicaStandardLibrary>. Version: 2021, Abruf: 25.01.2021
- [Nes20] *Webseite „Das intelligente Haus“*. <https://www.homeandsmart.de/nest-das-intelligente-thermostat>. Version: 2020, Abruf: 22.05.2020
- [NG15] NYTSCH-GEUSEN, C.: *Gebäudetechnik I, Grundlagen Klima II*. Vorlesungsunterlagen, 2015. – durch Prof. Nytsch-Geusen im persönlichen Gespräch zur Verfügung gestellt
- [NGHLR12] NYTSCH-GEUSEN, C.; HUBER, J.; LJUBIJANKIC, M.; RÄDLER, J.: Modelica BuildingSystems - Eine Modellbibliothek zur Simulation komplexer energietechnischer Gebäudesysteme. In: *Tagungsband der BauSIM 2012, IBPSA Germany*, 2012

- [Ope20] Webseite des Einzelraumreglers OPEN SRU der DEOS Aktiengesellschaft. <https://www.deos-ag.com/de/produkte/raumautomation/raumcontroller/opensru/>. Version: 2020, Abruf: 24.05.2020
- [Ott94] OTTER, M.: Objektorientierte Modellierung mechatronischer Systeme am Beispiel geregelter Roboter / VDI Fortschrittberichte, Reihe 20: Rechnergestützte Verfahren. 1994 (147). – Dissertation
- [OWC19] OLESEN, B. W.; WANG, H.; COAKLEY, O. B. Kazanci D.: The effect of room temperature control by air-or operative temperature on thermal comfort and energy use. In: *16th IBPSA International Conference & Exhibition Building Simulation 2019*, 2019
- [Pad16] PADMANABHAN, T. R.: *Programming with Python*. Springer, 2016
- [Pes94] PESSEN, David W.: A new look at PID-controller tuning. In: *Journal of DYNAMIC SYSTEMS, MEASUREMENT AND CONTROL* 116 (1994), Nr. 3, S. 553–557
- [PFH16] PASCHKE, F.; FRANKE, M.; HAUFE, J.: Modellprädiktive Einzelraumregelung auf Basis empirischer Modelle. In: *CESBP Central European Symposium on Building Physics and BauSIM 2016*, 2016, S. 405–411
- [PM08] PAL, A. K.; MUDI, R. K.: Self-tuning fuzzy PI controller and its application to HVAC systems. In: *International journal of computational cognition* 6 (2008), Nr. 1, S. 25–30
- [PSP20] Webseite der Software GNU PSPP. <https://www.gnu.org/software/pspp/>. Version: 2020, Abruf: 06.03.2020
- [PZ18] PASCHKE, F.; ZAICZEK, T.: Identification of dynamic models for the short-term temperature prediction in a single room. In: *IFAC-PapersOnLine* 51 (2018), Nr. 2, S. 79 – 84. – 9th Vienna International Conference on Mathematical Modelling
- [RA09] RASMUSSEN, B. P.; ALLEYNE, A. G.: Gain scheduled control of an air conditioning system using the Youla parameterization. In: *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 18 (2009), Nr. 5, S. 1216–1225
- [RHW86] RUMELHART, D. E.; HINTON, G. E.; WILLIAMS, R. J.: Learning internal representations by error propagation. In: RUMELHART, D. E. (Hrsg.); MCCCELLAND, J. L. (Hrsg.): *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition* Bd. 1, 1986
- [Rod94] RODUNER, Ch.: Die Riccati-Gleichung. In: *ETH Zürich, Institut für Mess-und Regeltechnik IMTR-Bericht* 26 (1994)

- [RS87] REINSCHKE, K.; SCHWARZ, P.: Empfindlichkeit dynamischer Systeme. In: *E. Phillipow: Taschenbuch Elektrotechnik 2* (1987), S. 872–916
- [RSC14] RANJAN, S.; SHARMA, A.; CHAUDHARY, P.: An effective temperature controller system using PID mechanism. In: *2014 Innovative Applications of Computational Intelligence on Power, Energy and Controls with their impact on Humanity (CIPECH)*, 2014, S. 182–185
- [RW11] REY, G. D.; WENDER, K. F.: *Neuronale Netze*. Verlag Hans Huber, 2011
- [SC03] SREE, R. P.; CHIDAMBARAM, M.: A simple method of tuning PI controllers for unstable systems with a zero. In: *Chemical and biochemical engineering quarterly* 17 (2003), Nr. 3, S. 207–212
- [Sch10] SCHRÖDER, D.: *Intelligente Verfahren*. Springer, 2010
- [Sch11] SCHNEIDER, A.: Variantensimulation mit GridWorker. In: *Tagungsband der ASIM-Konferenz STS/GMM, Simulation technischer Systeme, Grundlagen und Methoden in Modellbildung und Simulation ASIM*, 2011, S. 59–70
- [Sci20] *Webseite der Python-Bibliothek Scikit-learn*. <https://scikit-learn.org/stable/>. Version: 2020, Abruf: 25.03.2020
- [sen20] *Webseite des Einzelraumreglers sensoHOME der Firma Vaillant*. <https://www.vaillant.de/heizung/produkte/raumtemperaturregler-sensohome-200512.html#productdetail--how-to-get>. Version: 2020, Abruf: 22.05.2020
- [Sim17] *Webseite des Simulationsprogramms SimulationX*. <https://www.simulationx.de/>. Version: 2017, Abruf: 05.09.2020
- [SKYL08] SEMSAR-KAZEROONI, E.; YAZDANPANA, M. J.; LUCAS, C.: Nonlinear control and disturbance decoupling of HVAC systems using feedback linearization and backstepping with load estimation. In: *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 16 (2008), Nr. 5, S. 918–929
- [Sma20] *Webseite Smartes Thermostat Starter Kit V3+ der tado GmbH*. <https://www.tado.com/de-de/smarteres-thermostat>. Version: 2020, Abruf: 22.05.2020
- [SS10] SHAMSUZZOHA, M.; SKOGESTAD, S.: The setpoint overshoot method: A simple and fast closed-loop approach for PID tuning. In: *Journal of Process control* 20 (2010), Nr. 10, S. 1220–1234
- [SSB01] SCHNEIDER, A.; SCHNEIDER, P.; BASTIAN, J.: MOSCITO - Ein modulares, internetbasiertes Programmsystem für die Optimierung von Mikrosystemen. In: *Statusseminar zum Verbundprojekt OMID Optimierung von Mikrosystemen für Diagnose- und Überwachungsanwendung* (2001)

- [SSB⁺02] SCHNEIDER, P.; SCHNEIDER, A.; BASTIAN, J.; REITZ, S.; SCHWARZ, P.: MOSCITO: a program system for MEMS optimization. In: *Design, Test, Integration, and Packaging of MEMS/MOEMS 2002* Bd. 4755 International Society for Optics and Photonics, 2002, S. 248–257
- [SSC04] SREE, R. P.; SRINIVAS, M. N.; CHIDAMBARAM, M.: A simple method of tuning PID controllers for stable and unstable FOPTD systems. In: *Computers & chemical engineering* 28 (2004), Nr. 11, S. 2201–2218
- [SSW⁺15] SHAHRIARI, B.; SWERSKY, K.; WANG, Z.; ADAMS, R. P.; FREITAS, N. D.: Taking the human out of the loop: A review of Bayesian optimization. In: *Proceedings of the IEEE* 104 (2015), Nr. 1, S. 148–175
- [STL12] SHEIN, W. W.; TAN, Y.; LIM, A. O.: PID controller for temperature control with multiple actuators in cyber-physical home system. In: *2012 15th International Conference on Network-Based Information Systems* IEEE, 2012, S. 423–428
- [SU16] SCHWAN, T.; UNGER, R.: Holistic district heating grid design with SimulationX/Green City. In: *Proceedings of the SimulationX User Forum*, 2016
- [syn20] *Webseite des Systems Synco Living der Siemens Aktiengesellschaft.*
<https://www.downloads.siemens.com/download-center/Download.aspx?pos=download&fct=getasset&id1=A6V10325643>. Version: 2020, Abruf: 24.05.2020
- [T7620] *Beschreibung des Einzelraumreglers T7600 der Johnson Controls Systems & Service GmbH.* https://www.johnsoncontrols.com/de_de/-/media/jci/be/germany/files/controls/be_t7672_de.pdf?la=de&hash=99532753C8406040E551244C3C96B1DDC268368B. Version: 2020, Abruf: 24.05.2020
- [TMB⁺17] TREECK, C. van; MÜLLER, D.; BOTH, P. von; NYTSCH-GEUSEN, C.; MAILE, T.; WIMMER, R.: *EnEff-BIM: Planung, Auslegung und Betriebsoptimierung von energieeffizienten Neu- und Bestandsbauten durch Modellierung und Simulation auf Basis von Bauwerkinformationsmodellen: Abschlussbericht.* Institute of Energy Efficiency and Sustainable Building (E3D), RWTH Aachen, 2017
- [Tob79] TOBIAS, J. R.: Design considerations for adaptive control of buildings. In: *1978 IEEE Conference on Decision and Control including the 17th Symposium on Adaptive Processes* IEEE, 1979, S. 214–216
- [UBRP16] ULPANI, G.; BORGOGNONI, M.; ROMAGNOLI, A.; PERNA, C. D.: Comparing the performance of on/off, PID and fuzzy controllers applied to the heating system of an energy-efficient building. In: *Energy and Buildings* 116 (2016), S. 1 – 17

- [Unb01] *Kapitel 10*. In: UNBEHAUEN, H.: *Regelungstechnik I. Studium Technik*. Vieweg+Teubner Verlag, 2001. – Wiesbaden
- [Wet16a] WETTER, M.: *GenOpt - Generic Optimization Programm*. <https://simulationresearch.lbl.gov/G0/overview.html#optalg>. Version: 2016, Abruf: 16.06.2020
- [Wet16b] WETTER, M.: *GenOpt - Generic Optimization Programm*. <https://simulationresearch.lbl.gov/G0/>. Version: 2016, Abruf: 20.08.2019
- [Wet16c] WETTER, M.: *GenOpt - Generic Optimization Programm*. <https://simulationresearch.lbl.gov/G0/summary.html>. Version: 2016, Abruf: 16.06.2020
- [Wet16d] WETTER, M.: *GenOpt - Generic Optimization Programm*. <https://simulationresearch.lbl.gov/G0/download/manual-3-1-1.pdf>. Version: 2016, Abruf: 22.08.2020
- [WHZ00] WANG, Q.-G.; HANG, C.-C.; ZOU, B.: Multivariable process identification and control from decentralized relay feedback. In: *International Journal of Modelling and Simulation* 20 (2000), Nr. 4, S. 341–348
- [Wim20] WIMMER, R.: BIM-Informationsmanagement bei der thermisch-energetischen Simulation von gebäudetechnischen Anlagen / Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen. 2020. – Forschungsbericht
- [WJA06] WANG, J.; JING, Y.; AN, D.: Study of Neuron Adaptive PID Controller in a Single-zone HVAC System. In: *First International Conference on Innovative Computing, Information and Control - Volume I (ICICIC'06)* Bd. 2, 2006, S. 142–145
- [WSC01] WANG, Y.-G.; SHI, Z.-G.; CAI, W.-J.: PID autotuner and its application in HVAC systems. In: *Proceedings of the 2001 American Control Conference. (Cat. No.01CH37148)* Bd. 3, 2001, S. 2192–2196 vol.3
- [WZJ07] WANG, J.; ZHANG, C.; JING, Y.: Hybrid CMAC-PID Controller in Heating Ventilating and Air-Conditioning System. In: *2007 International Conference on Mechatronics and Automation*, 2007, S. 3706–3711
- [WZNP14] WETTER, M.; ZUO, W.; NOUIDUI, T.; PANG, X.: Modelica Buildings library. In: *Building Performance Simulation* (2014)
- [XCA02] XUE, D.; CHEN, Y.; ATHERTON, D. P.: Linear feedback control. In: *Analysis and design with Matlab*, Springer (2002)

- [XYL10] XING, L.; YANG, S.; LU, Q.: Self-tuning fuzzy PID controller for temperature control in Variable Air Volume air conditioning systems. In: *The 2010 IEEE International Conference on Information and Automation*, 2010, S. 2117–2120
- [YYKK11] *Kapitel 11*. In: YAMAZAKIAND, T.; YAMAKAWA, Y.; KAMIMURA, K.; KUROSU, S.: *Air-Conditioning PID Control System with Adjustable Reset to Offset Thermal Loads Upsets*. 2011, S. 209–228
- [Zad65] ZADEH, L. A.: Fuzzy sets. In: *Information and control* 8 (1965), Nr. 3, S. 338–353
- [ZC12] ZHOU, John Q.; CLARIDGE, David E.: PI tuning and robustness analysis for air handler discharge air temperature control. In: *Energy and Buildings* 44 (2012), S. 1 – 6
- [Zha11] ZHANGJUN, Z. K.: A particle swarm optimization approach for optimal design of PID controller for temperature control in HVAC. In: *2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation* Bd. 1 IEEE, 2011, S. 230–233
- [Zie20] *Webseite der Zukunft ERDGAS GmbH*. <https://zukunft.erdgas.info/themen-ziele/wege-zur-dekarbonisierung/ziele-der-energiewende/energiekonzept>. Version: 2020, Abruf: 22.05.2020
- [ZN⁺42] ZIEGLER, J. G.; NICHOLS, N. B. u. a.: Optimum settings for automatic controllers. In: *trans. ASME* 64 (1942), Nr. 11
- [ZPS20] ZÁČEKOVÀ, E.; PČOLKA, M.; SEBEK, M.: Zone MPC with guaranteed identifiability in presence of predictable disturbances. In: *Journal of the Franklin Institute* 357 (2020), Nr. 2, S. 978 – 1001
- [ZU92] ZAHEER-UDDIN, M.: Optimal control of a single zone environmental space. In: *Building and Environment* 27 (1992), Nr. 1, S. 93 – 103
- [ZUZ00] ZAHEER-UDDIN, M.; ZHENG, G. R.: Optimal control of time-scheduled heating, ventilating and air conditioning processes in buildings. In: *Energy conversion and Management* 41 (2000), Nr. 1, S. 49–60

Anhang

A. Parametrisierung der Raummodelle

Die Parametrisierung der Raummodelle, die in Kapitel 4 beschrieben werden, wird hier detaillierter dargestellt. Es werden die Parameter der Materialien, aus denen die Begrenzungsflächen aufgebaut sind, angegeben. Ebenso werden die Parameter der Fenstermodelle genannt und für jedes Raummodell ein Überblick über sonstige genutzte Parameter gegeben.

Gartenhausmodell

Tabelle A.1 listet die Parameterwerte der Materialien, aus denen die Begrenzungsflächen aufgebaut sind, für das Gartenhaus auf.

Tabelle A.1. Materialien der Begrenzungsflächen des Gartenhausmodells

Material	spezifische Wärmekapazität c in $\frac{\text{J}}{\text{kgK}}$	Wärmeleitfähigkeit λ in $\frac{\text{W}}{\text{mK}}$	Dichte ρ in $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Putz	1000	0,87	1800
Styropor	1250	0,035	17
Beton	1000	2,1	2400
Tondachsteine	900	0,96	2200
Steinwolle	840	0,03	100

Tabelle A.2 fasst die Parameter, die die Fenster des Gartenhausmodells beschreiben, zusammen.

Tabelle A.2. Parameter der Fenster des Gartenhausmodells

Parameter	Wert	Beschreibung
nPanels	1	Anzahl der Schichten, aus denen die Fensterscheibe zusammengesetzt ist
thickness	2,5 mm	Dicke des Fensters
UValGla	$1,1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$	U-Wert des Glases
UValFra	$2,8 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$	U-Wert des Fensterrahmens
g	0,5	Energiedurchlassgrad

Tabelle A.3 fasst die zur Modellierung des Gartenhauses genutzten Parameter zusammen.

Tabelle A.3. Parameter des Modells Gartenhaus

Parametername	Parameterwert	Beschreibung
Generell		
angleDegAziBuilding	35 °	Ausrichtung des Gebäudes bezogen auf Himmelsrichtung
heatSources	true	stellt Anschluss für externe Heizquelle zur Verfügung
width	5 m	Breite der thermischen Zone
length	6 m	Länge der thermischen Zone
height	3,5 m	Höhe der thermischen Zone
Begrenzungsflächen		
constructionWall 1-4	} siehe Tabelle A.1	Aufbau der Begrenzungsflächen (Wände, Decke, Fußboden)
constructionCeiling		
constructionBottom		
constructionWindow	siehe Tabelle A.2	Beschreibung der Fenstereigenschaften
Heizung		
QHeat_Heizung	2000 W	Wärmeleistung der Heizung

Büromodell

Tabelle A.4 gibt einen Überblick über die am Aufbau der Begrenzungsflächen des Büromodells genutzten Parameter und ihrer Werte. Da die einzelnen Schichten, aus denen die Begrenzungsflächen (Wände, Decke, Fußboden) aufgebaut sind, nicht bekannt sind, werden in Tabelle A.4 die Materialparameter für die kompletten Begrenzungsflächen mit den Bezeichnungen „Wand West“, „Wand Ost“, „Wände Nord, Süd“, „Decke“ und „Fußboden“ angegeben.

Tabelle A.4. Materialien der Begrenzungsflächen des Büromodells

Begrenzungsfläche	Dicke d in m	spezifische Wärmekapazität c in $\frac{\text{J}}{\text{kgK}}$	Wärmeleitfähigkeit λ in $\frac{\text{W}}{\text{mK}}$	Dichte ρ in $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Wand West	0,315	1165	0,076	258
Wand Ost	0,2	1000	0,467	2400
Wände Nord, Süd	0,1	1600	0,097	600
Decke	0,06	1600	0,09	600
Fußboden	0,26		siehe Tabelle A.5	

Die Parametrisierung der Schichten des Fußbodens des Büromodells ist in Tabelle A.5 angegeben.

Tabelle A.5. Materialien der Schichten, aus denen der Fußboden des Büromodells aufgebaut ist

Begrenzungsfläche	spezifische Wärmekapazität c in $\frac{\text{J}}{\text{kgK}}$	Wärmeleitfähigkeit λ in $\frac{\text{W}}{\text{mK}}$	Dichte ρ in $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Industrieparkett	750	0,2	2000
Sichtestrich	1000	1,4	2000
Dünnheizestrich	1000	1,4	2000
Tackerplatte_FBH	1450	0,045	30
Polysterolschaum	1450	0,038	35

Tabelle A.6 listet die Parameter und deren Werte zur Charakterisierung des Fenstermodells auf.

Tabelle A.6. Parameter der Fenster des Büroraummodells

Parameter	Wert	Beschreibung
nPanee	1	Anzahl der Schichten, aus denen die Fensterscheibe zusammengesetzt ist
thickness	2,5 mm	Dicke des Fensters
UValGla	$1,05 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$	U-Wert des Glases
UValFra	$2,8 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$	U-Wert des Fensterrahmens
g	0,5	Energiedurchlassgrad

Die zur Modellierung der Heizung des Büroraummodells genutzten Parameterwerte sind zusammengefasst in Tabelle A.7 angegeben. Dort nicht genannte Parameter erhalten die im Modell standardmäßig vergebenen Parameterwerte. Die Parameter `pipe` und `layers` sind keine skalaren Größen, sondern eine Sammlung von Parametern. Diese werden in der Modelica Klasse `Record` zusammengefasst. Tabelle A.8 zeigt den `Record` für `pipe`, Tabelle A.9 den für `layers`.

Tabelle A.7. Parameter des Büroraummodells

Parametername	Parameterwert	Beschreibung
Generell		
angleDegAziBuilding bezogen	0 °	Ausrichtung des Gebäudes auf Himmelsrichtung
heatSources	true	stellt Anschluss für externe Heizquelle zur Verfügung
width	2,9 m	Breite der thermischen Zone
length	5,35 m	Länge der thermischen Zone
height	2,7 m	Höhe der thermischen Zone
Begrenzungsflächen		
constructionWall 1-4 constructionCeiling	siehe Tabelle A.4	Aufbau der Begrenzungsflächen (Wände, Decke)
constructionBottom		
constructionWindow	siehe Tabelle A.6	Beschreibung der Fenstereigenschaften
Heizung		
sysTyp	Buildings.Fluid. HeatExchangers.RadiantSlabs. Types.SystemType.Floor	Typ der Strahlungsheizung
disPip pipe	0,1 m siehe Tabelle A.8	Abstand der Rohrleitungen Record mit Geometrie und Material der Rohrleitungen
Medium	Wasser	Medium, welches die Fußbodenheizung durchströmt
layers	siehe Tabelle A.9	Definition der Schichten des Fußbodens
iLayPip	3	Schicht des Fußbodens, in der die Rohrleitungen verlegt sind
A	15,52 m ²	Oberfläche Fußbodenheizung
m_flow_nominal	0,167 $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$	Wärmeleistung der Heizung

Tabelle A.8. Parameter des Modelica Records pipe des Modells SingleCircuitSlab

Parameter	Wert	Beschreibung
dOut	2,5 cm	äußerer Rohrdurchmesser
dIn	2,0 cm	innerer Rohrdurchmesser
roughness	0,007e-3 m	Oberflächenrauigkeit im Rohrinernen
d	983 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Massendichte
k	0,35 $\frac{\text{W}}{\text{mK}}$	thermische Leitfähigkeit

Tabelle A.9. Parameter des Modelica Records Layers

Parameter	Wert	Beschreibung
nLay	5	Anzahl der Schichten
material	siehe Tabelle A.5	Deklaration der Materialien jeder Schicht
absIR_a	0,9	Absorptionsvermögen der Oberfläche a für Infrarotstrahlung
absIR_b	0,9	Absorptionsvermögen der Oberfläche b für Infrarotstrahlung
absSOL_a	0,5	Absorptionsvermögen der Oberfläche a für Solarstrahlung
absSOL_b	0,5	Absorptionsvermögen der Oberfläche b für Solarstrahlung
roughness_a	medium rough	Rauigkeit der Außenseite

Konferenzraummodell

Die Parameterwerte der Materialien aus denen die Begrenzungsflächen des Konferenzraumes aufgebaut sind, werden in Tabelle A.10 angegeben.

Tabelle A.10. Materialien der Begrenzungsflächen

Material	spezifische Wärmekapazität c in $\frac{J}{kgK}$	Wärmeleitfähigkeit λ in $\frac{W}{mK}$	Dichte ρ in $\frac{kg}{m^3}$
Putz	1000	0,87	1800
Vollklinker	850	0,81	1800
Leichtbeton	850	0,81	1800
Teppichboden	1300	0,06	200

Die Parameter des Fenstermodells sind in Tabelle A.11 angegeben.

Tabelle A.11. Parameter der Fenster des Konferenzraummodells

Parameter	Wert	Beschreibung
nPanee	1	Anzahl der Schichten, aus denen die Fensterscheibe zusammengesetzt ist
thickness	5 mm	Dicke des Fensters
UValGla	$2,3 \frac{W}{m^2K}$	U-Wert des Glases
UValFra	$2,9 \frac{W}{m^2K}$	U-Wert des Fensterrahmens
g	0,85	Energiedurchlassgrad

Die für das Konferenzraummodell gewählten Parameterwerte sind in Tabelle A.12 zusammengefasst. Nicht geänderte Standardparameter werden nicht genannt.

Tabelle A.12. Parameter des Modells Konferenzraum

Parametername	Parameterwert	Beschreibung
Generell		
angleDegAziBuilding	0 °	Ausrichtung des Gebäudes bezogen auf Himmelsrichtung
heatSources	true	stellt Anschluss für externe Heizquelle zur Verfügung
width	5,7 m	Breite der thermischen Zone
length	9,1 m	Länge der thermischen Zone
height	3,7 m	Höhe der thermischen Zone
Begrenzungsflächen		
constructionWall 1-4	} siehe Tabelle A.10	Aufbau der Begrenzungsflächen (Wände, Decke, Fußboden)
constructionCeiling		
constructionBottom		
constructionWindow	siehe Tabelle A.11	Beschreibung der Fenstereigenschaften
Heizung		
Medium	BuildingSystems. Media.Water	das die Komponente durchströmende Medium
nEle	5	Anzahl der Diskretisierungselemente
fraRad	0.5	Anteil der Übertragung der Strahlungswärme
n	1.3	Exponent für die Wärmeübertragung
m_flow_nominal	0.016 $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$	nominaler Massenstrom
Q_flow_nominal	2000 W	nominale Wärmeenergie
T_a_nominal	343.15 K	Vorlauftemperatur bei Nominalbedingungen
T_b_nominal	313.15 K	Rücklauftemperatur bei Nominalbedingungen
TAir_nominal	293.15 K	Raumtemperatur bei Nominalbedingungen
VWat	0.027 m ³	Volumen des Wassers innerhalb des Heizkörpers
mDry	0.0001 kg	Trockenmasse des Heizkörpers, die zur Wärmekapazität des Wassers hinzugenommen wird

Der Wert von 0,0001 kg für den Parameter mDry ist sehr klein gewählt und ein Parametrisierungsfehler. Dies führt dazu, dass das Modell des Heizkörpers die Wärme zu schnell an den Raum abgibt. Die Durchführbarkeit der entwickelten Methodik beeinträchtigt dieser Parametrisierungsfehler nicht.

Klassenraummodell

Die Parameterwerte der Materialien der Begrenzungsflächen des Klassenraummodells sind in Tabelle A.13 angegeben, die des Fensters in Tabelle A.14.

Tabelle A.13. Materialien der Begrenzungsflächen

Material	spezifische Wärmekapazität c in $\frac{J}{kgK}$	Wärmeleitfähigkeit λ in $\frac{W}{mK}$	Dichte ρ in $\frac{kg}{m^3}$
Wood	830	0,13	650
MineralWool032	830	0,032	100
Gipskartonplatte	1000	0.21	1000
ConcreteReinforced	1000	2,1	2240
Brick	790	0,115	1920
AirGapVertical	1,005	0,07	1,204
Ethafoam	650	0,04	650
PE_Folie	1000	0,35	620
Bitumen	1000	0,17	1050
ExpandedPlasticSlab	1400	0,035	30
CementFloor	1000	1,4	3000
Linoleum	1500	0,17	1200

Tabelle A.14. Parameter der Fenster des Klassenraummodells

Parameter	Wert	Beschreibung
nPanee	5	Anzahl der Schichten, aus denen die Fensterscheibe zusammengesetzt ist
thickness	jede Schicht 0,5 mm	Dicke des Fensters
UValGla	$0,8 \frac{W}{m^2K}$	U-Wert des Glases
UValFra	$2,8 \frac{W}{m^2K}$	U-Wert des Fensterrahmens
g	0,5	Energiedurchlassgrad

Die gewählten Parameterwerte sind in Tabelle A.15 zusammengefasst. Auch hier werden nicht geänderte Standardparameter nicht genannt. Bei Bedarf können sie dem Modell [Bui21b] entnommen werden.

Tabelle A.15. Parameter des Modells Klassenraum

Parametername	Parameterwert	Beschreibung
Generell		
angleDegAziBuilding	0 °	Ausrichtung des Gebäudes bezogen auf Himmelsrichtung
heatSources	true	stellt Anschluss für externe Heizquelle zur Verfügung
width	7,7 m	Breite der thermischen Zone
length	12,7 m	Länge der thermischen Zone
height	4,1 m	Höhe der thermischen Zone
Begrenzungsflächen		
constructionWall 1-4	siehe Tabelle A.13	Aufbau der Begrenzungsflächen (Wände, Decke, Fußboden)
constructionCeiling		
constructionBottom		
constructionWindow	siehe Tabelle A.14	Beschreibung der Fenstereigenschaften
Heizung		
Medium	BuildingSystems. Media.Water	das die Komponente durchströmende Medium
nEle	5	Anzahl der Diskretisierungselemente
fraRad	0.5	Anteil der Übertragung der Strahlungswärme
n	1.3	Exponent für die Wärmeübertragung
m_flow_nominal	0.016 $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$	nominaler Massenstrom
Q_flow_nominal	2000 W	nominale Wärmeenergie
T_a_nominal	343.15 K	Vorlauftemperatur bei Nominalbedingungen
T_b_nominal	313.15 K	Rücklauftemperatur bei Nominalbedingungen
TAir_nominal	293.15 K	Raumtemperatur bei Nominalbedingungen
VWat	0.027 m ³	Volumen des Wassers innerhalb des Heizkörpers
mDry	52 kg	Trockenmasse des Heizkörpers, die zur Wärmekapazität des Wassers hinzugenommen wird

B. Funktionsweise und Anwendung des vs-Reglers

Der vs-Regler wurde im Rahmen des Forschungsprojektes enerMAT [ene16] entwickelt. Seine Funktionsweise basiert auf der Annahme, dass die Temperaturentwicklung im Raum ab einem bestimmten Zeitpunkt einer Exponentialfunktion folgt (Gleichung (B.1)).

$$h(t) = g_E - (g_E - s)e^{\frac{-a_0}{g_E - s}t} \quad (\text{B.1})$$

Es wird angenommen, dass die Parameter g_E und a_0 der Exponentialfunktion linear von den Größen $T_A(t)$ (Außentemperatur), $T_N(t)$ (Temperatur der Nachbarräume), $T_R(t_{\text{start}})$ (Raumtemperatur zum Beginn des Aufheiz- bzw. Abkühlvorgangs) und, im Falle der Betrachtung des Aufheizvorgangs, $T_S(t)$ (Vorlauftemperatur der Heizung) abhängen (Gleichung (B.2)).

$$\begin{pmatrix} g_E(t) \\ a_0(t) \\ s(t) \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} T_S(t) \\ T_R(t) \\ T_A(t) \\ T_N(t) \end{pmatrix} \quad (\text{B.2})$$

mit

$$M = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ y_1 & y_2 & y_3 & y_4 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (\text{B.3})$$

Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf den Aufheizvorgang. Sie vereinfachen sich für den Abkühlvorgang derart, als dass eine Abhängigkeit von g_E und a_0 von $T_S(t)$ nicht gegeben ist (Gleichung (B.4)).

$$\begin{pmatrix} g_E(t) \\ a_0(t) \\ s(t) \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} T_R(t) \\ T_A(t) \\ T_N(t) \end{pmatrix} \quad (\text{B.4})$$

mit

$$U = \begin{pmatrix} z_1 & z_2 & z_3 \\ w_1 & w_2 & w_3 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (\text{B.5})$$

Der angenommene lineare Zusammenhang, d.h. die Bestimmung der Matrix M bzw. U nach den Gleichungen (B.2) und (B.4), wird für jeden konkreten Raum einmalig durch Probesimulationen ermittelt. Diese erfolgen unter definierten Bedingungen für die Größen $T_A(t)$, $T_N(t)$, $T_R(t_{\text{start}})$ und $T_S(t)$, sodass sinnvolle, für den jeweiligen Raum zu erwartende Verhältnisse eintreten. Die sich dabei ergebenden Werte für g_E und a_0 werden bisher durch Ablesen aus den Simulationsergebnissen bestimmt. Eine Automatisierung wurde noch nicht realisiert. Da der stationäre Endwert der Temperatur g_E nicht von der Starttemperatur des Raumes $T_R(t_{\text{start}})$ abhängt, braucht diese bei der Bestimmung von g_E nicht berücksichtigt werden. Die Ergebnisse der $n = 10$ Probesimulationen lassen sich für den Aufheizvorgang eines Raumes wie folgt zusammenfassen:

$$\begin{pmatrix} g_{E_1} \\ \vdots \\ g_{E_n} \end{pmatrix} = T_{g_E} \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \quad (\text{B.6})$$

mit

$$T_{g_E} = \begin{pmatrix} T_{S,1} & T_{A,1} & T_{N,1} \\ T_{S,2} & T_{A,2} & T_{N,2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ T_{S,n} & T_{A,n} & T_{N,n} \end{pmatrix} \quad (\text{B.7})$$

$$\begin{pmatrix} a_{0,1} \\ a_{0,2} \\ \vdots \\ a_{0,n} \end{pmatrix} = T_{a_0} \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} \quad (\text{B.8})$$

mit

$$T_{a_0} = \begin{pmatrix} T_{S,1} & T_{R,1} & T_{A,1} & T_{N,1} \\ T_{S,2} & T_{R,2} & T_{A,2} & T_{N,2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ T_{S,n} & T_{R,n} & T_{A,n} & T_{N,n} \end{pmatrix} \quad (\text{B.9})$$

Es werden mehr Probesimulationen durchgeführt, als für die Bestimmung der Vektoren x und y notwendig sind. Der Grund dafür ist, dass die Temperaturentwicklung im Raum nicht vollständig der idealen Exponentialfunktion (Gleichung (B.1)) entspricht, weil weitere Einflüsse auf die Raumtemperatur existieren. Es entstehen damit zwei überbestimmte Gleichungssysteme zur Bestimmung der Vektoren x und y , d.h. der Matrix M (Gleichungssysteme (B.6), (B.8)). Um die überbestimmten Gleichungssysteme (B.6), (B.8) zu lösen, werden sie mit der transponierten Matrix $T_{g_E}^T$ bzw. $T_{a_0}^T$ multipliziert. Daraus ergibt sich ein quadratisches System nach Gleichung (B.10) (nur für g_E angegeben) mit der Minimaleigenschaft nach Gleichung (B.11), welches gelöst wird.

$$T^T g_E = T_{g_E}^T T_{g_E} x \quad (\text{B.10})$$

$$\sum_{i=1}^n (g_{E_i} - T_{\text{zeile } i} x)^2 \rightarrow \text{Min} \quad (\text{B.11})$$

Ein Aufheizvorgang unter definierten Bedingungen hat beispielsweise für das Model des Büroraumes den in Abbildung B.1 gezeigten Verlauf für $T_A(t) = 20^\circ\text{C}$, $T_N(t) = 18^\circ\text{C}$, $T_R(t_{\text{start}}) = 18^\circ\text{C}$ und $T_S(t) = 29^\circ\text{C}$. Die zur Bestimmung von M abzulesenden Größen g_E und a_0 sind in Abbildung B.1 gekennzeichnet.

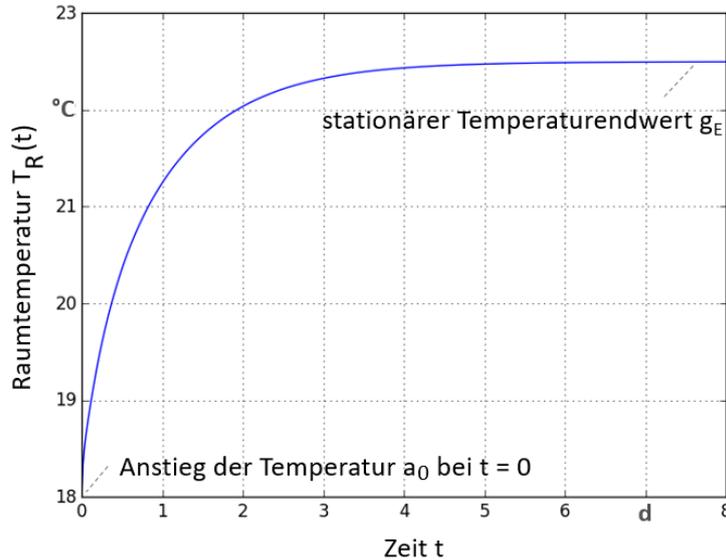


Abbildung B.1. Ablesen der Größen g_E und a_0

Die Kenntnis der Matrix M erlaubt es, während der Simulation die charakteristischen Größen $g_E(t)$, $a_0(t)$ und $s_0(t)$ (Gleichung (B.1)) aus den Größen $T_s(t)$, $T_r(t)$, $T_A(t)$ und $T_N(t)$ nach Gleichung (B.2) mit zu berechnen. Der Startwert $s_0(t)$ ist dabei die aktuelle Raumtemperatur $T_R(t)$.

Wenn nun zu einem Zeitpunkt t_{Ziel} eine Temperatur T_{Ziel} erreicht werden soll, kann über eine Umformung der Gleichung (B.1)) (siehe auch Gleichung (4.8)) ständig die Dauer $dauer(t)$ ermittelt werden, die dafür zum Aufheizen oder Abkühlen erforderlich ist (Gleichung (B.12)).

$$dauer(t) = \frac{s_0(t) - g_E(t)}{a_0(t)} \ln \left(\frac{T_{\text{Ziel}} - g_E(t)}{g_E(t) - s_0(t)} \right) \quad (\text{B.12})$$

Sobald $t > t_{\text{Ziel}} - dauer(t)$ erfüllt ist, wird die Heizung ein- bzw. abgeschaltet. Ab $t > t_{\text{Ziel}}$ wird dann die Dauer $dauer(t)$ für das nächste Temperaturziel ermittelt.

C. Beschreibung der Simulationsszenarien

In Kapitel 4 wird die Modellierung der Räume, Nutzungsprofile, Standorte und Regler innerhalb von Simulationsszenarien durchgeführt. Dieser Anhang beschreibt die Simulationsszenarien detailliert. Tabelle C.1 gibt zunächst einen Überblick.

Tabelle C.1. Übersicht über Simulationsszenarien

Simulationsszenario	Raummodell	Zeitspanne	Dauer
Party	Gartenhaus	29.-30.12.	2 Tage
Winter	Gartenhaus	03.-06.01.	4 Tage
Arbeitsphase	Büro	27.02.-21.03.	24 Tage
Herbsturlaub	Büro	02.-18.11.	17 Tage
Besprechungen	Besprechungsraum	17.-24.05.	8 Tage
Workshop	Besprechungsraum	06.-11.07.	6 Tage
Unterricht	Klassenzimmer	15.08.-25.09.	42 Tage
Ferien	Klassenzimmer	15.02.-14.03.	28 Tage

Simulationsszenario Party

Das Simulationsszenario Party nutzt das Raummodell des Gartenhauses (Einzelraum) und legt fest, dass 15 Personen vom 29. Dezember 19.00 Uhr bis 30. Dezember 03.00 Uhr eines Testreferenzjahres im Raum anwesend sind. Abbildung C.1 zeigt das Nutzerprofil.

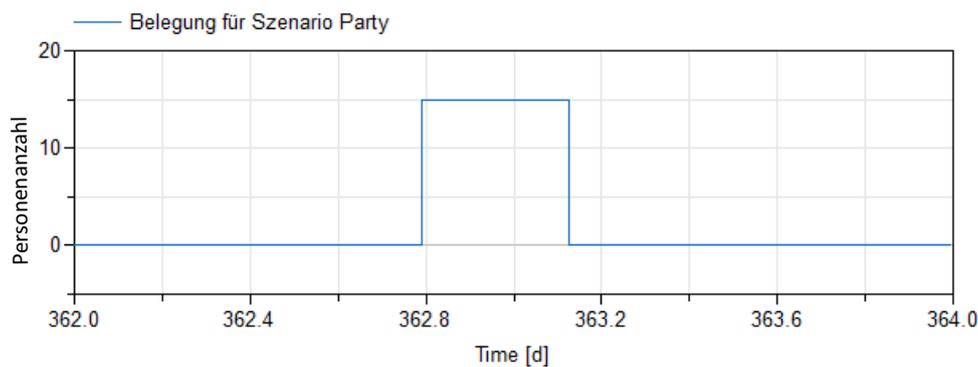


Abbildung C.1. Nutzungsprofil des Szenarios Party

Ferner legt das Szenario Party fest, dass bei Anwesenheit von Personen eine Zielraumtemperatur von 22 °C und bei Abwesenheit von 18 °C herrschen soll. Sind Personen im Raum anwesend wird angenommen, dass jede einen Wärmestrom von 100 W erzeugt. Dieser wird zu gleichen Teilen als Strahlung und durch Konvektion in den Raum abgegeben. Auf Grundlage dieser Daten ergab sich für das Szenario Party ein Außenluftvolumenstrom je Person von $27 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ und damit eine minimale Luftwechselrate von $3,0 \text{ h}^{-1}$.

Der Wartungswert der Beleuchtungsstärke \bar{E}_m wurde nach Tabelle 5.25 in der DIN EN 12464-1, welche die Beleuchtung von Arbeitsstätten regelt [DIN11], mit 300 lx festgelegt. Dabei wurde angenommen, dass die genutzte LED-Beleuchtung eine Leistung von $P_{LED} = 6,5 \text{ W}$ besitzt.

Simulationsszenario Winter

Das Simulationsszenario Winter nutzt ebenfalls das Modell des Gartenhauses und umfasst den Zeitraum vom dritten bis zum sechsten Januar eines Testreferenzjahrs. Es legt fest, dass am fünften Januar von zehn bis zwölf Uhr eine Person anwesend ist (Abbildung C.2). In diesem Zeitraum soll eine Zielraumtemperatur von 17 °C herrschen. Im übrigen Simulationszeitraum des Szenarios soll zum Frostschutz eine Zieltemperatur von mindestens 4 °C sichergestellt sein.

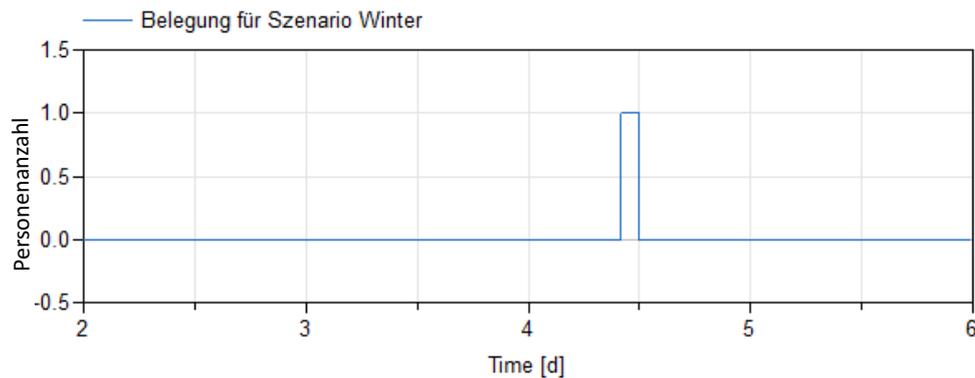


Abbildung C.2. Nutzungsprofil des Szenarios Winter

Es wird wieder angenommen, dass pro Person im Raum ein Wärmestrom von 100 W erzeugt wird. Die benötigte Mindestluftwechselrate beträgt während der Anwesenheit der Person $0,39 \frac{1}{\text{h}}$. Der zur Berechnung dieses Wertes angenommene Mindestaußenluftbedarf beträgt pro Person $30 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ [NG15].

Der Wartungswert der Beleuchtungsstärke \bar{E}_m wurde nach Tabelle 5.25 in [DIN11] mit 300 lx festgelegt.

Simulationsszenario Arbeitsphase

Das Simulationsszenario Arbeitsphase nutzt das Modell des Einzelbürraumes. Das Szenario umfasst den Zeitraum vom 27. Februar bis 21. März und somit 24 Tage eines Testreferenzjahres. Innerhalb dieses Zeitraumes legt das Szenario fest, dass an fünf aufeinanderfolgenden Werktagen (Montag bis Freitag) eine Person von 08:00 Uhr bis 17:00 Uhr anwesend ist. In den restlichen Zeiten ist niemand anwesend. Es wird angenommen, dass der 28. Februar ein Montag ist und dass es sich um kein Schaltjahr handelt. Abbildung C.3 zeigt das Nutzerprofil des Szenarios Arbeitsphase.

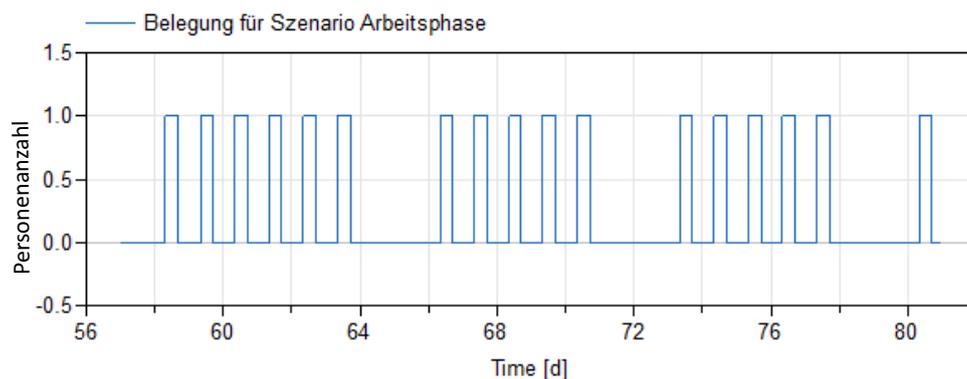


Abbildung C.3. Nutzungsprofil des Szenarios Arbeitsphase

Während der Anwesenheit der Person soll eine Zielraumtemperatur von 22 °C, während ihrer Abwesenheit eine Temperatur von 18 °C herrschen. Das Szenario legt außerdem fest, dass jede Person einen Wärmestrom von 80 W, es wird ruhige Tätigkeit im Sitzen angenommen, an den Raum abgibt. Die Luftwechselrate bei Anwesenheit beträgt $0,43 \text{ h}^{-1}$. Der genutzte Mindestaußenluftbedarf sollte nach [NG15] $14 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ betragen. Es wurde im Modell jedoch versehentlich mit $40 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ gerechnet, was eher einem Außenluftbedarf von zwei Personen bei mittlerem Aktivitätsgrad entspricht.

Der Wartungswert der Beleuchtungsstärke wurde nach Tabelle 5.26 in [DIN11] mit 500 lx festgelegt. Dabei wurde angenommen, dass die genutzte LED-Beleuchtung eine Leistung von $P_{LED} = 8,5 \text{ W}$ besitzt.

Simulationsszenario Herbsturlaub

Das Simulationsszenario Herbsturlaub nutzt ebenfalls das Modell des Einzelbüros. Das Szenario umfasst einen Zeitraum von 17 Tagen, den 2. bis 18. November eines Testreferenzjahres. Es legt fest, dass bis zum 13. November keine Personen anwesend sind und ab 14. November täglich eine Person von 08.00 Uhr bis 17.00 Uhr anwesend ist (Abbildung C.4).

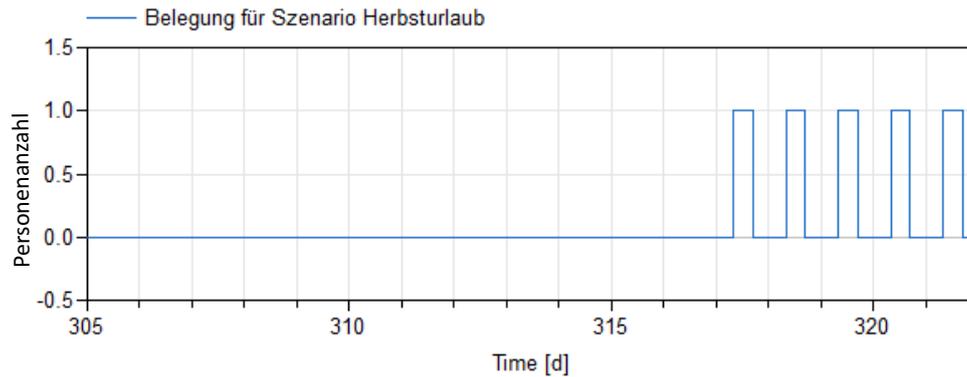


Abbildung C.4. Nutzungsprofil des Szenarios Herbsturlaub

Es soll so eine Urlaubsphase, in der der Raum aufgrund einer niedrigen Zielraumtemperatur von 18 °C auskühlt, gefolgt von einer Arbeitswoche, in der während der Anwesenheit der Person eine Raumzieltemperatur von 22 °C vorgegeben ist, simuliert werden. Der durch Personen erzeugte Wärmestrom wird analog zur Beschreibung im Szenario Arbeitsphase berechnet, ebenso die Berechnung der Luftwechselrate zur Sicherstellung einer ausreichenden Luftqualität. Die Wärmemenge Q_{flow} , die durch die Beleuchtung in den Raum abgegeben wird, wie im Abschnitt 4.3.4 beschrieben, berechnet.

Simulationsszenario Besprechungen

Das Szenario Besprechungen nutzt das Modell des Besprechungsraumes, der im Rahmen der Arbeit auch als kleiner Konferenzraum bezeichnet wird. Das Szenario umfasst den Zeitraum 17.05. bis 24.05., d.h. acht Tage eines Testreferenzjahres. Innerhalb des genannten Zeitraumes legt es folgende Belegung fest:

- 18.05.: 08:35-9:50 21 Personen und 11:20-13:20 7 Personen
- 19.05.: 09:15-11:15 12 Personen und 13:25-16:25 3 Personen
- 20.05.: 08:00-15:00 23 Personen
- 21.05.: 07:30-10:30 10 Personen
- 22.05.: 08:00-12:00 18 Personen

Während der restlichen Zeiten im genannten Zeitraum ist der Besprechungsraum nicht belegt. Die grafische Darstellung der Belegung ist in Abbildung C.5 dargestellt.

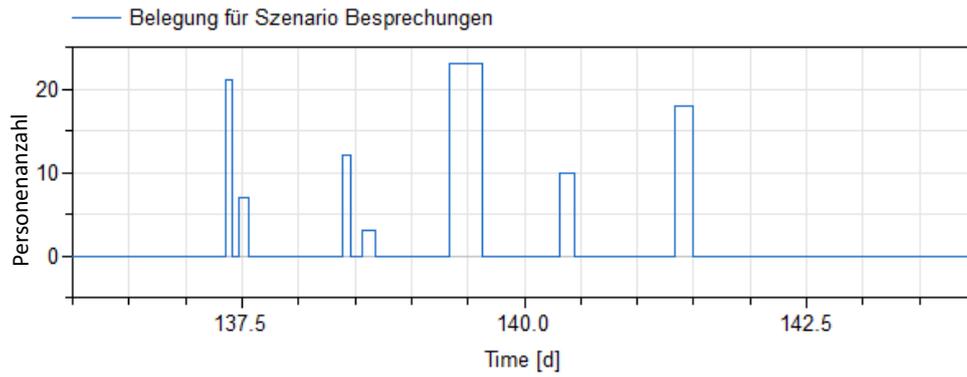


Abbildung C.5. Nutzungsprofil des Szenarios Besprechungen

Mit der gewählten Belegung wird in diesem Szenario berücksichtigt, dass durch die unterschiedliche Anzahl von Personen im Raum auch die durch diese Personen in den Raum eingebrachten Wärmeströme unterschiedlich hoch sind. Dies könnte für die zu untersuchenden Raumregler eine höhere Schwierigkeit darstellen. Es wird festgelegt, dass je Person ein Wärmestrom von 80 W erzeugt wird. Durch das Szenario wird ferner festgelegt, dass während der Anwesenheit von Personen eine Zielraumtemperatur von 22 °C, bei Abwesenheit von 18 °C herrschen soll. Zur Berechnung der Mindestluftwechselrate wird je Person ein Außenluftvolumenstrom von 20 $\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ angenommen. Da die Anzahl der Personen, die gleichzeitig im Raum sind, variiert, ergibt sich der in Abbildung C.6 gezeigte Verlauf der Luftwechselrate. Der Wartungswert der Beleuch-

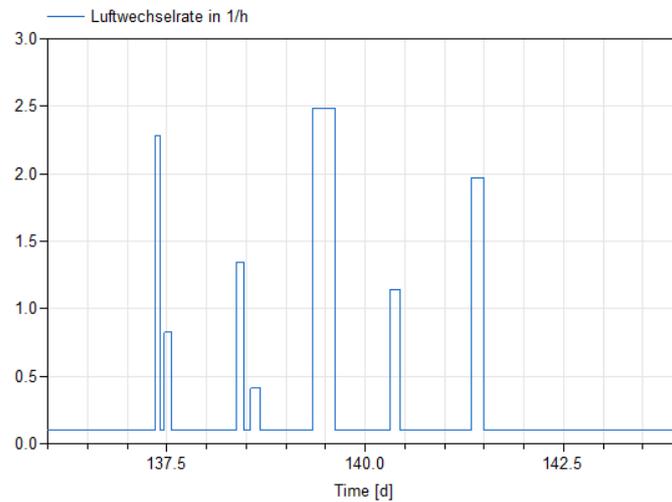


Abbildung C.6. Luftwechselrate im Szenario Besprechungen

tungsstärke wurde nach Tabelle 5.26 nach [DIN11] auf 500 lx festgelegt. Im Szenario wurde angenommen, dass die verwendete LED-Beleuchtung eine Leistung von $P_{LED} = 8,5 \text{ W}$ besitzt.

Szenario Workshop

Das Szenario Workshop nutzt ebenfalls das Modell des Besprechungsraumes. Es wird ein dreitägiger Workshop mit, im Vergleich zu den anderen Szenarien, hoher Teilnehmerzahl simuliert. Das Szenario umfasst den Zeitraum vom sechsten bis zum elften Juli, d.h. sechs Tage eines Testreferenzjahres. Vom siebenten bis zum neunten Juli sind je von 09:00 bis 17:00 Uhr 20 Personen im Raum anwesend (Abbildung C.7).

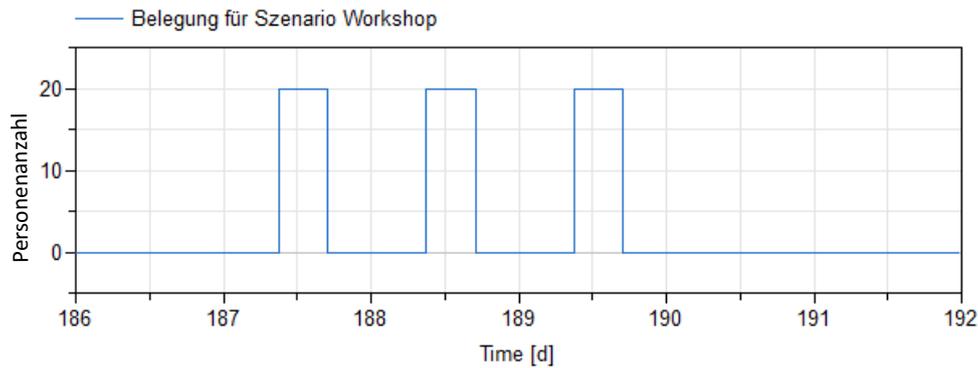


Abbildung C.7. Nutzungsprofil des Szenarios Workshop

Während der Anwesenheit der Personen soll wieder eine Raumtemperatur von 22 °C, andernfalls von 18 °C herrschen. Pro Person wird ein Wärmestrom von 80 W erzeugt. Zur Berechnung der Luftwechselrate wird je Person ein Außenluftvolumenstrom von $30 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ angenommen. Damit ergibt sich eine Luftwechselrate bei Anwesenheit der 20 Personen von ca. $3,1 \frac{1}{\text{h}}$.

Szenario Unterricht

Das Simulationsszenario Unterricht nutzt das Modell eines Klassenraumes. Das Szenario umfasst den Zeitraum vom 15.08. bis 25.09. eines Testreferenzjahres und damit 42 Tage. Das Szenario legt fest, dass während der Werkzeuge Montag bis Freitag 25 Personen in der Zeit von 08:00 Uhr bis 17:00 Uhr anwesend sind. Am Wochenende sollen keine Personen anwesend sein (Abbildung C.8).

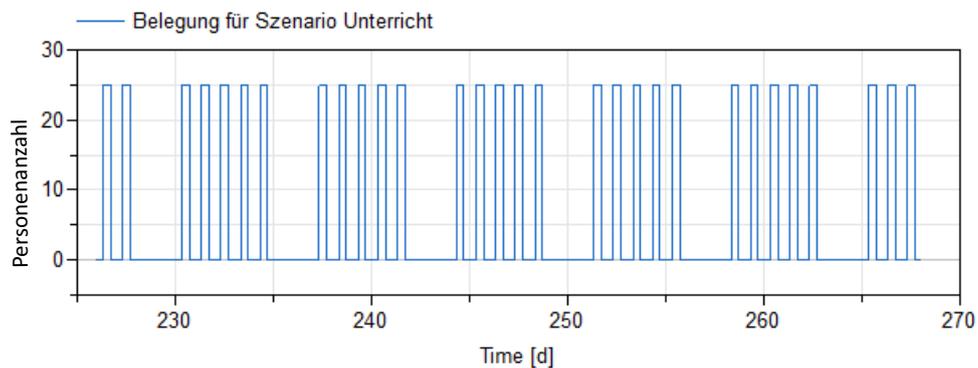


Abbildung C.8. Nutzungsprofil des Szenarios Unterricht

Während der Anwesenheit von Personen in den Zeiträumen vom 15.08. bis 01.09. und vom 07.09. bis 25.09. soll eine Raumtemperatur von 24 °C herrschen. Im Zeitraum vom 02.09. bis 06.09. soll eine Raumtemperatur von 23 °C herrschen. Sind keine Personen anwesend, beträgt die Zieltemperatur im Raum 18 °C. Das Szenario gibt ferner vor, dass jede Person einen Wärmestrom von 50 Watt erzeugt. Dieser Wert ist etwas geringer als in den anderen Szenarien, da angenommen wird, dass es sich bei den Personen um Kinder handelt. Zur Berechnung der Luftwechselrate wird ein Außenluftvolumenstrom pro Person von $30 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ angenommen. Damit ergibt sich eine Mindestluftwechselrate bei Anwesenheit von Personen von $0,83 \frac{1}{\text{h}}$.

Der Wartungswert der Beleuchtungsstärke \bar{E}_m wird nach Tabelle 5.36 in [DIN11] mit 300 lx angenommen. Ferner legt das Szenario fest, dass LED-Beleuchtung zum Einsatz kommt, die für einen erzeugten Lichtstrom von $\Phi_{vLED} = 300 \text{ lm}$ eine Leistung von $P_{LED} = 6,5 \text{ W}$ verbraucht.

Szenario Ferien

Das Simulationsszenario Ferien nutzt auch das Modell des Klassenraumes. Das Szenario umfasst den Zeitraum vom 15.02. bis 14.03. eines Testreferenzjahres und damit 28 Tage. Während der ersten zwei Wochen im Simulationszeitraum (15.02. bis 28.02.) werden Schulferien simuliert. Somit sind keine Personen anwesend. In dieser Zeit soll eine Raumtemperatur von 10 °C herrschen. In den folgenden zwei Wochen (01.03. bis 14.03.) soll Unterrichtsbetrieb herrschen und werktags (01.03. bis 05.03. und 08.03. bis 12.03.) sollen von 08:00 bis 17:00 Uhr 25 Personen im Raum anwesend sein. In dieser Zeit soll eine Raumtemperatur von 22 °C herrschen. Sind keine Personen anwesend, sollen 18 °C herrschen. Abbildung C.9 zeigt das Nutzungsprofil für das Szenario Ferien.

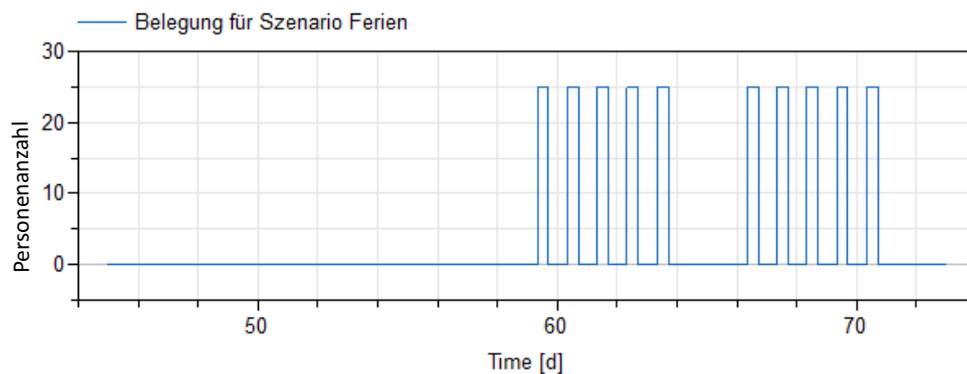


Abbildung C.9. Nutzungsprofil des Szenarios Ferien

Das Szenario legt außerdem fest, dass pro Person ein Wärmestrom von 70 W erzeugt wird. Der Außenluftvolumenstrom beträgt $20 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$. Damit ergibt sich eine Mindestluftwechselrate bei Anwesenheit von Personen von $1,3 \frac{1}{\text{h}}$. Die Werte und Berechnungen bzgl. der Beleuchtung erfolgen analog zu denen für das Szenario Unterricht.

D. Heizenergieverbrauch und Komfortverletzung

Die folgenden Tabellen D.1 bis D.7 geben für jedes Simulationsszenario einen Überblick über den Einfluss der unoptimierten sowie der optimierten Reglermodelle auf den Heizenergieverbrauch E_{heat} und die Komfortverletzungsgrößen T_{warm} und T_{cold} .

Tabelle D.1. Szenario Party

	Parameterwert		E_{heat}		T_{cold}		T_{warm}	
	unopt.	opt.	unopt.	opt.	unopt.	opt	unopt.	opt
Zweipunktregler			4430 Wh	2967 Wh	0 Ks	0 Ks	0 Ks	0Ks
T_{tol}	2	0,102						
P-Regler			6113 Wh	2766 Wh	0 Ks	0 Ks	0 Ks	0 Ks
k	0,5	968,3						
vs-Regler			26052 Wh	3607 Wh	27769 Ks	0 Ks	0 Ks	0 Ks
Opt_{p1}	1	0,15						
Opt_{p2}	1	30472,5						

Tabelle D.2. Szenario Winter

	Parameterwert		E_{heat}		T_{cold}		T_{warm}	
	unopt.	opt.	unopt.	opt.	unopt.	opt	unopt.	opt
Zweipunktregler			418 Wh	355 Wh	0 Ks	0 Ks	0 Ks	0Ks
T_{tol}	2	0,114						
P-Regler			641 Wh	372 Wh	0 Ks	0 Ks	0 Ks	0 Ks
k	0,5	9,994						
vs-Regler			19201 Wh	0 Wh	0 Ks	0 Ks	4611 Ks	0 Ks
Opt_{p1}	1	0,0112						
Opt_{p2}	1	464,2						

Tabelle D.3. Szenario Herbsturlaub

	Parameterwert		E_{heat}		T_{cold}		T_{warm}	
	unopt.	opt.	unopt.	opt.	unopt.	opt.	unopt.	opt.
Zweipunktregler			8640 Wh	5469 Wh	0 Ks	0 Ks	29858 Ks	1640 Ks
T_{tol}	2	0,48						
P-Regler			13994 Wh	131884 Wh	0 Ks	0 Ks	0 Ks	0 Ks
k	0,5	0,1						
vs-Regler			159668 Wh	314 Wh	0 Ks	0 Ks	85547 Ks	0 Ks
Opt_{p1}	1	0,021						
Opt_{p2}	1	399,8						

Tabelle D.4. Szenario Besprechungen

	Parameterwert		E_{heat}		T_{cold}		T_{warm}	
	unopt.	opt.	unopt.	opt.	unopt.	opt.	unopt.	opt.
Zweipunktregler			13169 Wh	8965 Wh	0 Ks	0 Ks	0 Ks	0 Ks
T_{tol}	2	0,12						
P-Regler			15194 Wh	8401 Wh	0 Ks	0 Ks	0 Ks	0 Ks
k	0,5	830,6						
vs-Regler			38700 Wh	28417 Wh	0 Ks	0 Ks	7424 Ks	584 Ks
Opt_{p1}	1	2,05e-3						
Opt_{p2}	1	3,316						

Tabelle D.5. Szenario Workshop

	Parameterwert		E_{heat}		T_{cold}		T_{warm}	
	unopt.	opt.	unopt.	opt.	unopt.	opt.	unopt.	opt.
Zweipunktregler			3120 Wh	3939 Wh	0 Ks	0 Ks	110 Ks	3,58 0Ks
T_{tol}	2	4,3						
P-Regler			3660 Wh	3660 Wh	0 Ks	0 Ks	106 Ks	106 Ks
k	0,5	0,5						
vs-Regler			40381 Wh	85 Wh	0 Ks	0 Ks	81678 Ks	27 Ks
Opt_{p1}	1	0,407						
Opt_{p2}	1	447,0						

Tabelle D.6. Szenario Unterricht

	Parameterwert		E_{heat}		T_{cold}		T_{warm}	
	unopt.	opt.	unopt.	opt.	unopt.	opt.	unopt.	opt.
Zweipunktregler			391827 Wh	339823 Wh	1022 Ks	1018 Ks	7040 Ks	5624 Ks
T_{tol}	2	0,372						
P-Regler			371876 Wh	371876 Wh	1137 Ks	1137 Ks	4637 Ks	4637 Ks
k	0,5	0,5						
vs-Regler			41627 Wh	403458 Wh	424948 Ks	255 Ks	0 Ks	30087 Ks
Opt_{p1}	1	4,77e-4						
Opt_{p2}	1	17,5						

Tabelle D.7. Szenario Ferien

	Parameterwert		E_{heat}		T_{cold}		T_{warm}	
	unopt.	opt.	unopt.	opt.	unopt.	opt	unopt.	opt
Zweipunktregler			166286 Wh	142271 Wh	3306 Ks	3400 Ks	0 Ks	0 Ks
T_{tol}	2	0,112						
P-Regler			167024 Wh	143000 Wh	3538 Ks	3356 Ks	0 Ks	0 Ks
k	0,5	92,7						
vs-Regler			234182 Wh	192788 Wh	1230 Ks	124 Ks	53605 Ks	467 Ks
Opt_{p1}	1	7,2e-3						
Opt_{p2}	1	5,62						

E. Optimierung mit GenOpt

In diesem Anhang wird die Funktionsweise und Bedienung von GenOpt zur Optimierung von Reglerparametern beschrieben. Zur Durchführung einer Optimierung generiert GenOpt eine Inputdatei, welche von einem Simulationsprogramm, in dieser Arbeit Dymola [BEOM02], gelesen wird. Diese Datei wird auf Basis einer Input-Template-Datei für das jeweilige Simulationsprogramm erstellt. GenOpt startet das Simulationsprogramm, überprüft, ob Simulationsfehler vorliegen, liest den Wert der Kostenfunktion, welcher in der durch die Simulation generierten Ergebnisdatei abgespeichert ist, und ermittelt neue Eingangsparameter für den nächsten Optimierungsdurchlauf. Dieser Prozess wird solange wiederholt, bis ein Minimum der Kostenfunktion gefunden wurde. Abbildung E.1 zeigt schematisch die Schnittstelle zwischen GenOpt und dem Simulationsprogramm sowie die von GenOpt geforderten Dateien zur Initialisierung, zur Wahl der Parameter der Optimierungsalgorithmen, zur Konfiguration der Simulation sowie zur Spezifizierung der Simulationseingangsgrößen.

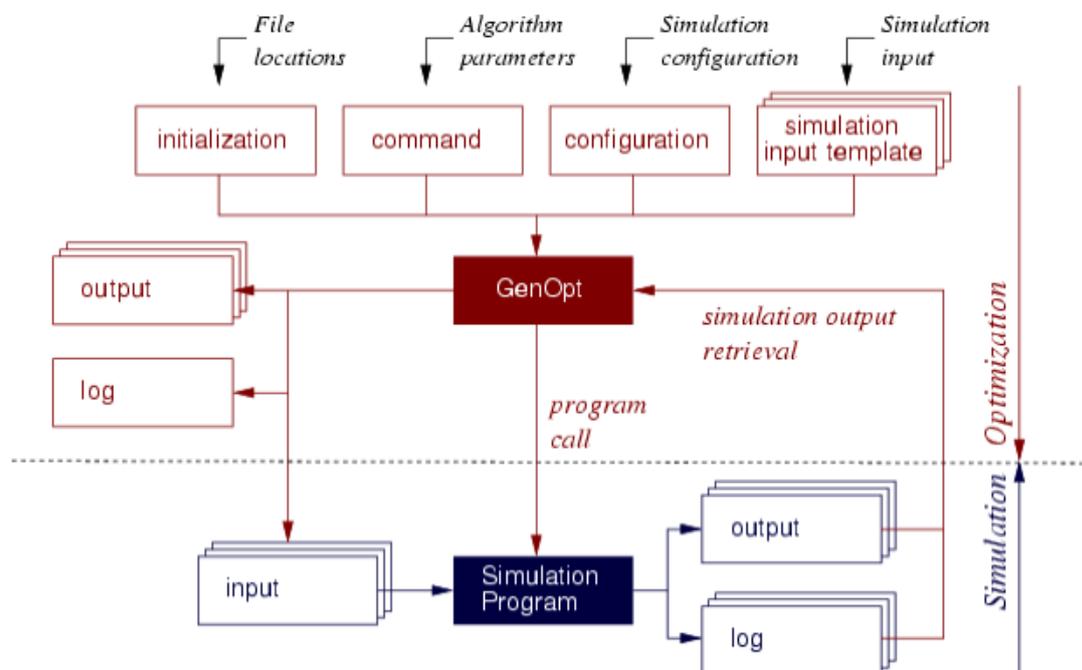


Abbildung E.1. Schnittstelle zwischen GenOpt und Simulationsprogramm (Quelle: [Wet16a])

Initialisierungsdatei Die Initialisierungsdatei legt fest, welches Simulationsprogramm genutzt wird, wo die am Optimierungsproblem beteiligten weiteren Dateien abgespeichert sind und welche Ergebnisdateien gespeichert werden sollen. Sie gibt außerdem an, mit welchem Befehl das Simulationsprogramm gestartet wird und welche Größe in der Ergebnisdatei ein Wert der Kostenfunktion ist. Weiterhin wird in der Initialisierungsdatei angegeben, ob und wie die Ergebnisse der Kostenfunktion weiter verarbeitet werden. Die Initialisierungsdatei für die Optimierung der Parameter des Zweipunktreglers im Szenarios Party ist im Codebeispiel E.1 angegeben. Nach einem Kommentar zwischen den Zeichen `/* */` folgen die Angaben für die Simulation innerhalb geschweifter Klammern. Diese Angaben umfassen für die Files `Template`, `Input`, `Log`, `Output` und `Configuration` jeweils ihren Dateinamen. Da alle Dateien in einem Verzeichnis liegen, konnte auf die Angabe eines Dateipfades verzichtet werden. Lediglich bei der Angabe des Speicherortes für die Zwischenergebnisse der Optimierung (`SavePath1 =`) war die Angabe des Ordners, in den gespeichert werden soll, erforderlich. Die `Configurations`-Datei beinhaltet den Befehl zum Starten der Simulation mit Dymola. Die Angabe des Namens der Kostenfunktion ist in `ObjectiveFunctionLocation` angegeben. Im zweiten Teil der Initialisierungsdatei ist der Name der Datei, in der die Optimierung spezifiziert wird, angegeben (`command_2pktController_party.txt`). Weiterführende Informationen zur Initialisierungsdatei sowie detaillierte Beschreibungen zur Syntax und der Bedeutung der Einträge innerhalb der Datei können den Seiten 78 bis 84 in [Wet16d] entnommen werden.

```

/* GenOpt Initialisierungsdatei für das Szenario
Party und den Zweipunktregler
*/
Simulation {
  Files {
    Template {
      File1 = Template_2pktController_party.txt;
      File2 = dsin.txt;
    }
    Input {
      File1 = modelicaSchedule_2pktController_party.txt;
      SavePath1 =
        "D:\repositories\rct_promotion\trunk\scripts\optimierung\GenOpt\Gartenhaus
        .Party2pktController";
      File2 = dsin.txt;
    }
    Log {
      File1 = dslog.txt;
    }
    Output {
      File1 = result_2pktController_party.txt;
    }
    Configuration {
      File1 = "..\..\..\..\cfg\DymolaWin.cfg";
    }
  }
  ObjectiveFunctionLocation{
    Delimiter1 = "f(x) =" ;
    Name1      = "f(x)";
  }
} // end of section Simulation
Optimization {
  Files {
    Command {
      File1 = command_2pktController_party.txt;
    }
  }
}
}

```

Code-Beispiel E.1 *Initialisierungsdatei für GenOpt zur Optimierung des Zweipunktreglers im Szenario Party*

Konfigurationsdatei Die Konfigurationsdatei enthält Angaben zum genutzten Simulationsprogramm Dymola. Da diese Datei keine Informationen zum Optimierungsproblem enthält, muss sie nur einmal erstellt werden, solange innerhalb eines Betriebssystems simuliert wird. Der Inhalt der Konfigurationsdatei für Dymola unter Windows ist im Code-Beispiel E.2 gezeigt. Der Eintrag `SimulationError` erfordert einen String, welcher eine Fehlermeldung beinhaltet, die durch Dymola generiert wird. Anhand dieser Meldung überprüft GenOpt, ob die Simulation erfolgreich verlaufen ist. Der Eintrag `IO` legt das Zahlenformat der Parameter fest, die während des Optimierungsvorgangs variiert werden. Diese Parameter werden mit dem festgelegten Zahlenformat in die zur Simulation generierte Inputdatei geschrieben. Laut der Nutzeranleitung [Wet16d] wird das Zahlenformat `Double` empfohlen. Innerhalb des Eintrages `SimulationStart` wird durch das Schlüsselwort `command` der Befehl zum Starten von Dymola festgelegt. Wie dies genau funktioniert, kann der GenOpt-Nutzeranleitung entnommen werden.

```

/* GenOpt Konfigurationsdatei für
   Dymola unter Windows
*/
SimulationError
{
    ErrorMessage = "Integration terminated before reaching";
}
IO
{
    NumberFormat = Double;
}
SimulationStart
{
    Command = "\"%Simulation.Files.Template.Path1%\\dymosim.exe\" dsin.txt" ;
}

```

Code-Beispiel E.2 *Konfigurationsdatei für GenOpt zur Nutzung von Dymola unter Windows*

Command-Datei Die Command-Datei beinhaltet alle für GenOpt relevanten Informationen zum Optimierungsproblem. So wird beispielsweise festgelegt, welcher Optimierungsalgorithmus genutzt werden soll und welche Parameter dazu variiert werden sollen. Codebeispiel E.3 zeigt beispielsweise die Command-Datei für die Optimierung des Zweipunktreglers im Szenario Party. Im Bereich `Vary` ist der zu variiierende Parameter `hysteressController.temperature.tolerance` in der Form angegeben, wie Dymola ihn benennt. Die Größen `Min` und `Max` legen die Grenzen fest innerhalb derer der Parameter variiert werden darf. Sein Startwert wird durch die Größe `Ini` und die Schrittgröße zwischen zwei Werten des Parameters durch `Step` festgelegt. Im Bereich `OptimizationSettings` werden allgemeine Einstellungen für die Optimierung, etwa die maximale Anzahl an Iterationen, festgelegt. Im Bereich `Algorithm` wird der Optimierungsalgorithmus festgelegt. Im vorliegenden Beispiel handelt es sich um einen Schwarmalgorithmus. Ferner werden Optimierungsalgorithmus-spezifische Parameter eingestellt. Welche dies für jeden in GenOpt verfügbaren Optimierungsalgorithmus sind, kann, ebenso wie weitere Einstellungen im Bereich `OptimizationSetting`, der Nutzeranleitung entnommen werden [Wet16d].

```

/* GenOpt Command Datei */
Vary{
  Parameter{ Name = hysteresisController.temperature_tolerance; Min = 0.1; Ini =
    2; Max = 4; Step = 0.1; }
}
OptimizationSettings{
  MaxIte = 10000;
  MaxEqualResults = 100;
  WriteStepNumber = false;
}
Algorithm{
Main = PSOIW;
NeighborhoodTopology = vonNeumann;
NeighborhoodSize = 1;
NumberOfParticle = 20;
NumberOfGeneration = 15;
Seed = 1;
CognitiveAcceleration = 1;
SocialAcceleration = 1;
MaxVelocityGainContinuous = 1;
MaxVelocityDiscrete = 1;
InitialInertiaWeight = 1;
FinalInertiaWeight = 1;
}

```

Code-Beispiel E.3 *Command-Datei für GenOpt zur Optimierung des Zweipunktreglers im Szenario Party*

Template-Datei zur Generierung der Eingangsdateien für die Simulationen Nach jedem Optimierungsdurchlauf wird ein unabhängiger Parameter variiert und eine neue Simulation gestartet. Dazu ist eine Template-Datei notwendig, die einen Platzhalter für den zu variierenden Parameter bereit stellt. Dieser Platzhalter wird für jede Simulation durch einen konkreten Parameter ersetzt. Codebeispiel E.4 zeigt die Template-Datei für die Optimierung des Zweipunktreglers im Szenario Party. Der Platzhalter `hysteresesController.temperature_tolerance` gibt den zu variierenden Parameter vor.

```

#1
double tab1(1,2) # comment line
0 %hysteresisController.temperature_tolerance%

```

Code-Beispiel E.4 *Template-Datei zur Optimierung des Zweipunktreglers im Szenario Party*

Die genannten Eingangsdateien - Initialisierungsdatei, Konfigurationsdatei, Command-Datei und Template-Datei - wurden für alle 24 Simulationsszenarien erstellt.

F. Variantensimulation und Optimierung mit Gridworker

Im folgenden werden die Architektur, die Funktionsweise und die Bedienung des Werkzeugs *GridWorker* dargestellt, welches zur Informationsverarbeitung in der Cloud entwickelt wurde.

Nach [Sch11] besitzt GridWorker eine aus drei Hauptkomponenten aufgebaute Architektur. Sie ist in Abbildung F.1 dargestellt. „Der Splitter liest die Problembeschreibung ein und zerlegt das Problem in die gewünschte Anzahl an Teilproblemen. Konkret werden dabei die vom Anwender erstellten Dateien `configuration` und `parameters` ausgewertet. Pro Teilproblem (Job) wird ein Unterverzeichnis angelegt, in das wiederum zwei Dateien `configuration` und `parameters` kopiert werden, die diesmal nur das Teilproblem charakterisieren. Im Anschluss wird der Mapper aktiv. Diese Komponente ist jeweils auf eine bestimmte Middleware abgestimmt. Sie generiert aus der Problembeschreibung ein oder mehrere Job-Templates, die als Einzel- oder Array-Job an das lokale oder im Netzwerk erreichbare Cluster-, Grid- oder Cloud-Management-System übergeben werden. [...] Der Mapper ermöglicht den Zugriff auf die lokalen oder entfernten Hardwareresourcen und verbirgt dabei die Komplexität der einzelnen Middleware-Komponenten hinter einer einheitlichen, einfachen Schnittstelle. Er bildet die eingangsseitig formulierte Problembeschreibung auf Ergebnisse ab, die zunächst pro Teilproblem separat in den Dateien `results.jar` und `logs.jar` gekapselt werden. In der dritten und letzten Komponente Reducer werden alle Teilergebnisse zu einem Gesamtergebnis zusammengefasst. Die Datei `results.jar` enthält alle numerischen Simulationsergebnisse in einem vordefinierten Format. Die Datei `logs.jar` enthält in gepackter Form alle Log-Daten, die beim Ausführen der einzelnen Simulationen protokolliert worden sind. Zusätzlich werden Statistikinformationen wie Zeit- und Speicherbedarf der einzelnen Jobs in der Datei `summary` zusammengefasst.“¹

¹Schneider, A.: Variantensimulation mit GridWorker. ASIM-Workshop „Simulation technischer Systeme und Grundlagen und Methoden in Modellbildung und Simulation“, Krefeld, 24.-25. Februar 2011

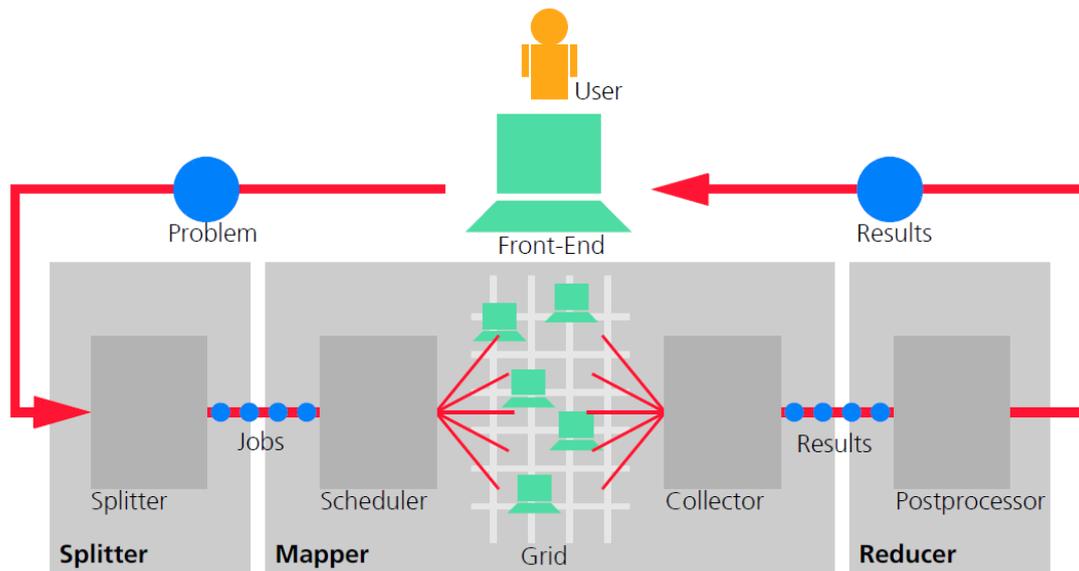


Abbildung F.1. Architektur der GridWorker-Software (Quelle: Bild 2 aus [Sch11])

Für Optimierungsaufgaben im Rahmen dieser Arbeit wurden pro Optimierung ein Verzeichnis angelegt, welches die vom Nutzer zu erstellenden Dateien `configuration` und `parameters` sowie ein Unterverzeichnis `inputs` beinhaltet. Die Datei `configuration` legt bestimmte Einstellungen für GridWorker fest. Unter anderem wird hier angegeben, dass zur Optimierung das Tool `Moscito` [SSB01] genutzt wird. `Moscito` ist ein Simulations-Optimierungssystem, was am Fraunhofer IIS EAS entwickelt wurde. Es integriert das Optimierungsmodul `OPAL`, welches eine Reihe von Optimierungsalgorithmen zur Verfügung stellt [SSB⁺02]. Diese Informationen werden in der Datei `parameters` angegeben. Ferner werden hier bestimmte, durch den Optimierungsalgorithmus geforderte Parameter, wie z.B. Toleranzen und Anzahl von Iterationen, festgelegt. Innerhalb der Datei `parameters` wird auch spezifiziert, welcher Parameter im Raummodell variiert werden soll und welche Werte er annehmen soll. Für den Parameter `Raumhöhe` beispielsweise sieht diese Anweisung wie folgt aus:

$$h = \{3.0 : 0.1 : 5.0\}$$

Der von Nutzer gewählte Parametername für die Raumhöhe lautet h . Sein Wert soll beginnend beim Minimum von 3.0 in Schritten von 0.1 bis 5.0 ansteigen. Der Parametername h wird als Platzhalter in das Modell des jeweiligen Szenarios in der Form @ h @ eingetragen. Bei jedem Aufruf des Modells durch GridWorker wird anschließend der Platzhalter durch einen konkreten Parameterwert ersetzt. Anschließend wird die Optimierung gestartet, die, auf der Suche nach einem Minimum, die Reglerparameter variieren soll. Dazu werden im Modell auch die Reglerparameter durch einen Platzhalter ersetzt. In welchen Grenzen sich der Reglerparameter während der Optimierung ändern darf, wird im Unterverzeichnis `inputs` innerhalb der Datei `Controller.simon.generic` durch Angabe einer oberen und unteren Grenze sowie eines Startwertes festgelegt. Die Optimierungsergebnisse werden in eine Textdatei geschrieben. Dort wird festgehalten, für welchen Wert des variierten Raumparameters welcher Reglerparameter optimal ist. Ferner werden für jeden Wert des Raumparameters der Wert der Kostenfunktion, des Heizenergieverbrauchs und der Verletzungsgrößen sowie bestimmte, den Raum sowie das Wetter charakterisierende Parameter, angegeben. Eine solche Ergebnisdatei für die Variation des Parameters Raumhöhe h hat beispielsweise das in Tabelle F.1 gezeigt Aussehen. Sie beinhaltet 21 Datensätze (eine Zeile entspricht einem Datensatz), die je ein konkretes, durch die Variation der Raumhöhe erzeugtes Raummodell mit dem optimalen Reglerparameter des Modells des Zweipunktreglers in Verbindung setzt.

Tabelle F.1. Ergebnisdatei einer Optimierung mit GridWorker

h (Raumhöhe)	T_tol (opt.)	Algorithmus	cost	energy	zuKalt	zuWarm	gamma	tau	K	C	G	K'	C'	G'
3	1,01E+00	POWELL	0,254034	254,034	0	0	0,063395	113,449	0,310554	126835	0,019688	29,8132	1,22E+07	1,89
3,1	9,15E-01	POWELL	0,266777	266,777	0	0	0,062178	111,522	0,309538	124273	0,019246	30,3967	1,22E+07	1,89
3,2	1,02E+00	POWELL	0,290009	290,009	0	0	0,061007	109,667	0,308567	121823	0,018825	30,9802	1,22E+07	1,89
3,3	1,10E+00	POWELL	0,313192	313,192	0	0	0,059879	107,882	0,307638	119479	0,018421	31,5637	1,23E+07	1,89
3,4	1,20E+00	POWELL	0,339089	339,089	0	0	0,058792	106,161	0,306748	117232	0,018034	32,1472	1,23E+07	1,89
3,5	1,23E+00	POWELL	0,36247	362,47	0	0	0,057744	104,501	0,305894	115078	0,017664	32,7307	1,23E+07	1,89
3,6	1,24E+00	POWELL	0,385109	385,109	0	0	0,056733	102,899	0,305075	113011	0,017308	33,3142	1,23E+07	1,89
3,7	1,35E+00	POWELL	0,415948	415,948	0	0	0,055756	101,353	0,304288	111026	0,016966	33,8977	1,24E+07	1,89
3,8	1,37E+00	POWELL	0,44227	442,27	0	0	0,054813	99,859	0,303531	109117	0,016637	34,4812	1,24E+07	1,89
3,9	1,42E+00	POWELL	0,472874	472,874	0	0	0,0539	98,4147	0,302804	107281	0,016321	35,0647	1,24E+07	1,89
4	1,47E+00	POWELL	0,505381	505,381	0	0	0,053018	97,0177	0,302103	105514	0,016017	35,6482	1,25E+07	1,89
4,1	1,51E+00	POWELL	0,53884	538,84	0	0	0,052164	95,6656	0,301428	103811	0,015724	36,2317	1,25E+07	1,89
4,2	1,56E+00	POWELL	2,16282	575,714	2,75197	0	0,051338	94,3565	0,300778	102169	0,015441	36,8152	1,25E+07	1,89
4,3	1,58E+00	POWELL	8,02288	611,078	12,1092	0	0,050537	93,0881	0,30015	100585	0,015169	37,3987	1,25E+07	1,89
4,4	1,58E+00	POWELL	18,8195	646,867	28,0499	0	0,04976	91,8588	0,299544	99056,7	0,014905	37,9822	1,26E+07	1,89
4,5	1,58E+00	POWELL	35,25	684,604	50,4159	0	0,049007	90,6666	0,298959	97580,1	0,014651	38,5657	1,26E+07	1,89
4,6	1,57E+00	POWELL	58,1564	723,968	79,2207	0	0,048277	89,51	0,298393	96153	0,014406	39,1492	1,26E+07	1,89
4,7	1,60E+00	POWELL	89,5381	774,674	114,434	0	0,047568	88,3874	0,297846	94773	0,014168	39,7327	1,26E+07	1,89
4,8	1,58E+00	POWELL	128,406	817,749	155,834	0	0,046879	87,2972	0,297317	93437,8	0,013938	40,3162	1,27E+07	1,89
4,9	1,54E+00	POWELL	175,938	858,7	203,652	0	0,046211	86,2381	0,296805	92145,2	0,013716	40,8997	1,27E+07	1,89
5	1,51E+00	POWELL	235,283	907,771	257,904	0	0,045561	85,2089	0,296309	90893,2	0,0135	41,4832	1,27E+07	1,89

G. Durchführung einer Fouriertransformation mittels Dymola

Die Klimaparameter

- Mittelwert der Außenlufttemperatur $\bar{\vartheta}_a$
- Tagesamplitude der Außenlufttemperatur $\Delta\vartheta_a$
- Mittelwert der solaren Einstrahlung \bar{I}
- Tagesamplitude der solaren Einstrahlung ΔI

werden mittels einer Fast-Fourier-Transformation (FFT) aus den zeitlichen Verläufen der Außentemperatur und der direkten solaren Strahlung berechnet. Dazu wird das Programm Dymola 2018 genutzt. Im Folgenden wird für die Außenlufttemperatur beschrieben, wie die FFT durchgeführt wird. Auf die gleiche Art wird auch das Signal für die direkte Solarstrahlung ausgewertet.

Zunächst wird ein Simulationsszenario simuliert und das Signal für die Außenlufttemperatur grafisch angezeigt. Abbildung G.1 zeigt die Außenlufttemperatur für das Gartenhaus im Szenario Party für den Standort Chemnitz.

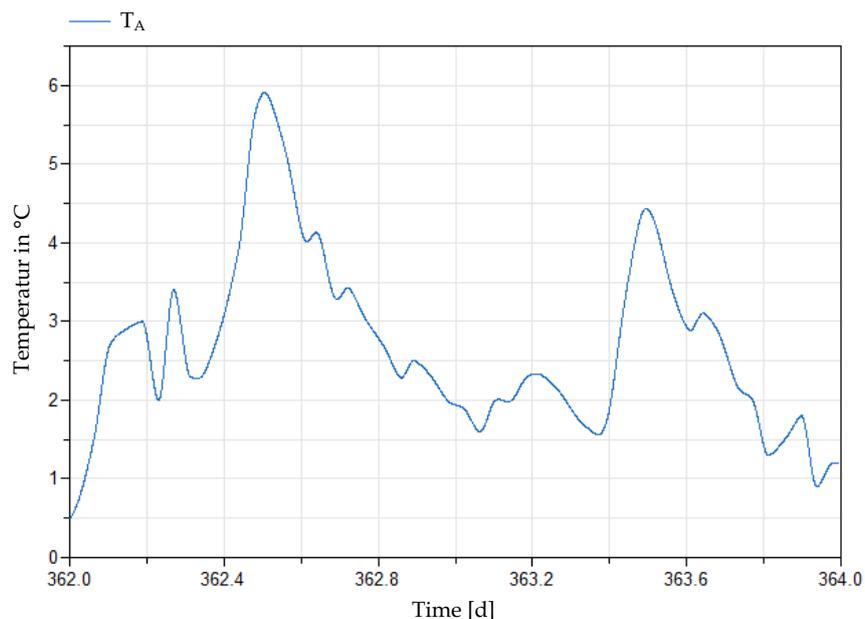


Abbildung G.1. Temperatur der Außenluft am Standort Chemnitz im Szenario Party

Anschließend kann innerhalb des geöffneten grafischen Fensters in Dymola durch rechts-klick auf den dargestellten Graph im Menüpunkt „Signal Operators“ die Auswahl „FFT...“ getroffen werden. In Abbildung G.2 ist dies für die Temperatur der Außenluft dargestellt.

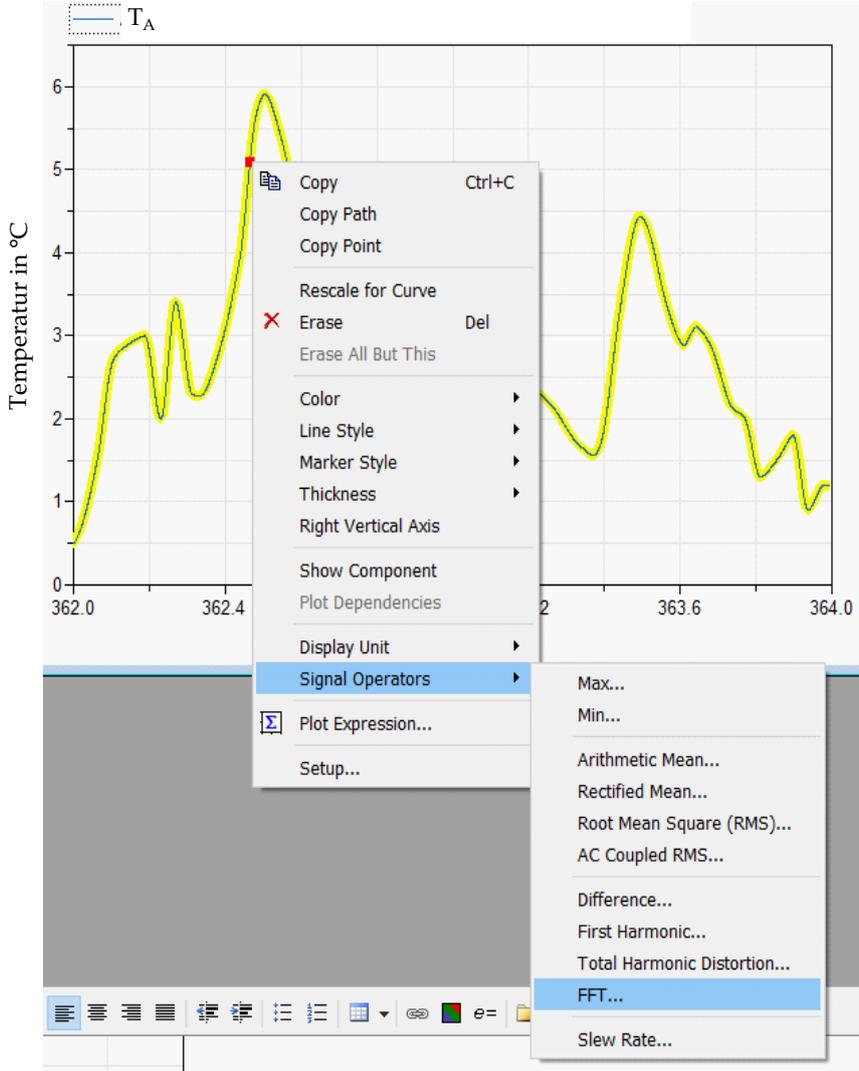


Abbildung G.2. Navigation zum Menü zur Durchführung der FFT

Nun wird im unteren Teil des geteilten Grafkfensters in Dymola das Fourierspektrum dargestellt. Der Mittelwert der Außentemperatur $\bar{\vartheta}_a$ entspricht dem Wert der FFT zum Zeitpunkt $t = 0$ s und kann im Graph abgelesen werden. Für die hier beispielhaft betrachtete Außentemperatur beträgt der Mittelwert 275,8 K (rot umrandeter Wert in Abbildung G.3).

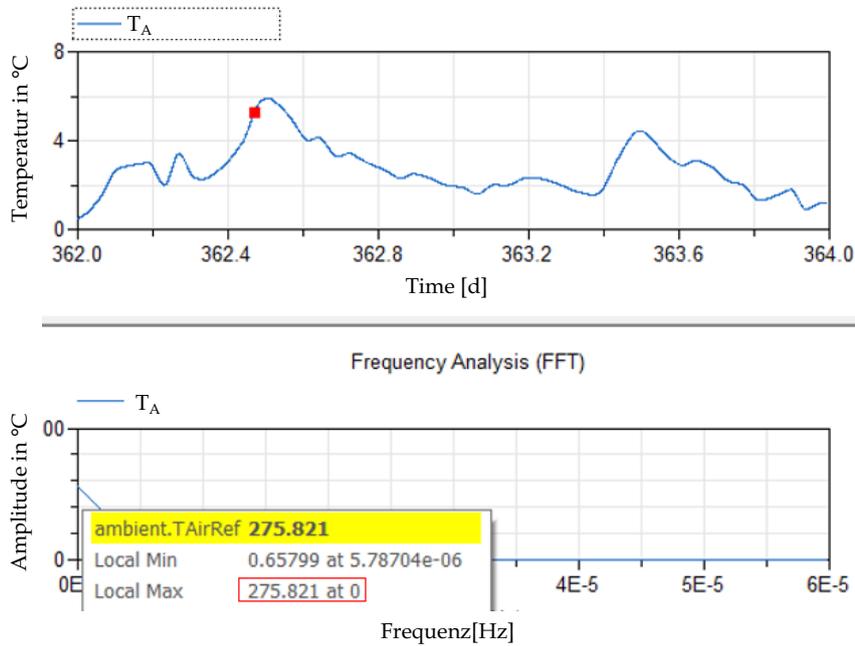


Abbildung G.3. Mittelwert der Außenlufttemperatur am Standort Chemnitz im Szenario Party

Die Tagesamplitude wird bei der Frequenz $f = 1,157e - 5$ Hz, die der 24 h-Periode entspricht, abgelesen. In Abbildung G.4 ist dies dargestellt. Die Tagesamplitude beträgt $\Delta\vartheta_a = 1,14$ $^{\circ}\text{C}$ (rot umrandeter Wert).

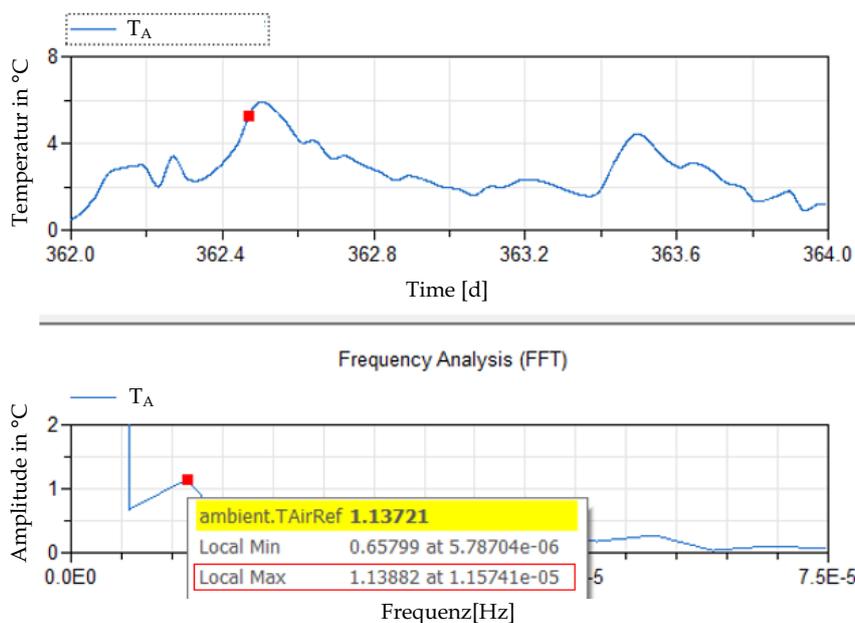


Abbildung G.4. Tagesamplitude der Außenlufttemperatur am Standort Chemnitz im Szenario Party

H. Auswahl von Analysemethoden

Zur Analyse der Beziehungen zwischen Räumen und Reglern werden bekannte Verfahren aus der Statistik eingesetzt. Diese dienen dazu, Zusammenhänge zwischen Variablen zu analysieren, um sie zu beschreiben, zu erklären oder mit ihrer Hilfe zukünftige Entwicklungen vorherzusagen. Als Grundlage für die folgenden Ausführungen wird das Standardwerk [BEPW15] benutzt. Um aus der Vielzahl existierender Analyseverfahren anwendbare und geeignete auszuwählen, sind zunächst die Skalenniveaus der Daten der Datenbasis zu bestimmen. Dies ist notwendig, da das Skalenniveau die Anwendbarkeit vieler Analysemethoden einschränkt.

Skalenniveau

Das Skalenniveau bedingt den Informationsgehalt der Daten sowie die Anwendbarkeit von Rechenoperationen. Es werden vier Skalenniveaus unterschieden:

- Nominalskala
- Ordinalskala
- Intervallskala
- Ratioskala

Einen zusammenfassenden Überblick liefert Tabelle H.1.

Tabelle H.1. Skalenniveaus (Quelle [BEPW15], Seite 11)

Skala		Merkmale	Mögliche rechnerische Handhabung
nicht-metrische Skalen (kategorial)	Nominalskala	Klassifizierung qualitativer Eigenschaftsausprägungen	Bildung von Häufigkeiten
	Ordinalskala	Rangwert mit Ordinalzahlen	Median, Quantile
metrische Skalen (kardinal)	Intervallskala	Skala mit gleichgroßen Abschnitten ohne natürlichen Nullpunkt	Subtraktion, Mittelwert
	Ratioskala	Skala mit gleichgroßen Abschnitten und natürlichem Nullpunkt	Division, Multiplikation

Das niedrigste Skalenniveau besitzt die **Nominalskala**. Sie stellt Klassifizierungen qualitativer Eigenschaftsausprägungen dar, z.B. das biologische Geschlecht. Die **Ordinalskala** besitzt das nächsthöhere Skalenniveau. Sie ermöglicht die Beschreibung einer Rangordnung. Beispielsweise könnte festgestellt werden, dass Person eins größer ist als Person zwei und diese wiederum größer ist als Person drei. Es kann jedoch keine Aussage über die Abstände zwischen den angeordneten Merkmalen gemacht werden. Die **Intervallskala** stellt wiederum das nächsthöhere Messniveau dar. Sie weist gleich große Skalenabschnitte auf und erlaubt Summen- und Differenzbildung. Ein klassisches Beispiel für eine Intervallskala ist die Celsius-Skala. Das höchste Skalenniveau stellt die **Ratio- oder Verhältnisskala** auf. Sie besitzt zusätzlich zu den Eigenschaften der Intervallskala einen Nullpunkt. Ein Beispiel ist die Kelvin-Skala. Aufgrund der Existenz des Nullpunktes erlauben ratioskalierte Daten zusätzlich zur Addition und Subtraktion die Anwendung der arithmetischen Operationen Multiplikation und Division. Man bezeichnet Nominal- und Ordinalskala als nicht-metrische Skalen, Intervall- und Ratioskala als metrische Skalen. Je höher das Niveau einer Skala ist, desto höher ist der Informationsgehalt der entsprechenden Daten. Es ist zulässig, Daten eines höheren Skalenniveaus auf ein niedrigeres abzubilden. Dabei geht jedoch Information verloren.

Analysemethoden

In der Statistik existiert eine Vielzahl von multivariaten Analysemethoden. Sie lassen sich in zwei Gruppen einteilen, struktur-prüfende und struktur-erkennende Verfahren. Struktur-prüfende Verfahren besitzen das primäre Ziel, Zusammenhänge zwischen Variablen zu überprüfen. „Dabei wird überwiegend die kausale Abhängigkeit einer interessierenden Variablen von einer oder mehreren sog. unabhängigen Variablen (Einflussfaktoren) betrachtet.“¹ Die Anwendung dieser Verfahren basiert auf sachlogischen oder theoretischen Überlegungen des Nutzers über die Zusammenhänge zwischen Variablen. Diese Überlegungen sollen mit Hilfe multivariater Verfahren überprüft werden. Zu den struktur-prüfenden Verfahren gehören beispielsweise folgende multivariate Analysemethoden:

- lineare Regression (Einfachregression und multiple Regression)
- nichtlineare Regression
- Zeitreihenanalyse
- Varianzanalyse
- Diskriminanzanalyse
- Kontingenzanalyse
- logistische Regression
- Strukturgleichungsanalyse
- Conjoint-Analyse

¹BACKHAUS, K., ERICHSON, B., PLINKE, W., WEIBER, R.: Multivariate Analysemethoden. Springer Gabler, 2015

Zur Anwendung eines struktur-prüfenden Verfahrens werden die Variablen in abhängige und unabhängige Variablen eingeteilt. Welche der Verfahren auf ein Problem angewendet werden können, hängt im Wesentlichen vom Skalenniveau der Variablen ab. Tabelle H.2 gibt dazu einen Überblick.

Tabelle H.2. Struktur-prüfende Verfahren

		unabhängige Variable	
		metrisches Skalenniveau	nicht-metrisches Skalenniveau
abhängige Variable	metrisches Skalenniveau	Regressionsanalyse, Zeitreihenanalyse	Varianzanalyse, Regression mit Dummies
	nicht-metrisches Skalenniveau	Diskriminanzanalyse, Logistische Regression	Kontingenzanalyse, Auswahlbasierte Conjoint-Analyse

Struktur-erkennende Verfahren haben die Entdeckung von Zusammenhängen zwischen Variablen oder Objekten zum Ziel. Der Anwender besitzt zu Beginn der Analyse noch keine Vorstellung darüber, welche Beziehungszusammenhänge in einem Datensatz existieren. Beispielsweise gehören folgende Verfahren zu den Struktur-erkennenden:

- Faktorenanalyse
- Clusteranalyse
- multidimensionale Skalierung
- Korrespondenzanalyse
- Neuronale Netze

Informationen zu den genannten Verfahren können beispielsweise [BEPW15] entnommen werden. Dort sind auch Hinweise zu weiterführender Literatur gegeben.

Mit den zu findenden Beziehungen zwischen Raum und passendem Raumregler sollen der Wert der Zielfunktion ZF und die optimalen Reglerparameter bestimmt werden können. Sie sind also die abhängigen Variablen. Die Daten beider Größen sind verhältnisskaliert. Die unabhängigen Variablen sind die Raumkenngrößen γ und τ sowie die Klimaparameter Mittelwert der Außenlufttemperatur $\bar{\vartheta}_a$, Tagesamplitude der Außenlufttemperatur $\Delta\vartheta_a$, Mittelwert der solaren Einstrahlung \bar{I} und Tagesamplitude der solaren Einstrahlung ΔI . Diese Größen sind ebenfalls verhältnisskaliert. Die unabhängigen Größen, Anzahl der Personen im Raum n_{Pers} und durchschnittliche Dauer der Belegung Δt_{Bel} können auf einer Ordinalskala abgetragen werden, der Typ der Heizung H ist nominal-skaliert.

H.1. Regressionsanalyse zur Ermittlung von Beziehungen zwischen Räumen und Reglern

Zunächst wird untersucht, ob Zusammenhänge zwischen Raum und optimalem Regler mittels Regressionsanalyse zu finden sind. Vorerst werden nur die Raum- und Wetterkenngrößen betrachtet. Für diese ist die formale Voraussetzung zur Anwendung der Regressionsanalyse erfüllt, da sowohl die abhängigen, als auch die unabhängigen Variablen metrisches Skalenniveau aufweisen. Die Regressionsanalyse ist ein weit verbreitetes multivariates Analysewerkzeug, das sich zur „Erklärung von Zusammenhängen“² sehr gut eignet. Sie kann insbesondere dann angewendet werden, wenn Wirkbeziehungen zwischen der abhängigen Größe und der bzw. den unabhängigen Größen analysiert werden sollen. Hypothesen über diese Wirkbeziehungen lassen sich mittels Regressionsanalyse überprüfen. Ferner wird sie zur Schätzung von Werten der abhängigen Größe eingesetzt. Wird die abhängige Variable Y durch mehrere Größen X_n beeinflusst, muss die multiple Regression eingesetzt werden. Es gilt:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (\text{H.1})$$

Zur Anwendung der Regressionsanalyse muss vom Nutzer im Vorfeld eine Annahme über die Wirkbeziehung (Hypothese) getroffen worden sein. Diese muss nach erfolgter Regression auf Plausibilität geprüft werden. Die Durchführung einer Regressionsanalyse erfordert die Abarbeitung festgelegter Schritte. Es wird zunächst die durch das Problem vorgegebene Ursache-Wirkungs-Beziehung in Form einer Regressionsfunktion abgebildet. Diese wird anschließend mittels der gewonnenen Daten geschätzt und im Hinblick auf ihre Eignung geprüft. Im Einzelnen erfolgen:

1. Modellformulierung
2. Schätzung der Regressionsfunktion
3. Prüfung der Regressionsfunktion
4. Prüfung der Regressionskoeffizienten
5. Prüfung der Modellprämissen

Modellformulierung

Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit kommt die multiple lineare Regression zum Einsatz, da die gesuchten Größen von mehreren Variablen abhängen. Das Regressionsmodell besitzt nach Gleichung (H.2) die Form:

$$\hat{Y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_jx_j + \dots + b_Jx_J \quad (\text{H.2})$$

²BACKHAUS, K., ERICHSON, B., PLINKE, W., WEIBER, R.: Multivariate Analysemethoden. Springer Gabler, 2015

mit

- \hat{Y} - Schätzung der abhängigen Variablen Y
- b_0 - konstantes Glied
- b_j - Regressionskoeffizienten
- x_j - unabhängige Variablen

Schätzung der Regressionsfunktion

Ziel der Schätzung der Regressionsfunktion ist die Bestimmung des konstanten Gliedes sowie der Regressionskoeffizienten. Im Allgemeinen wird es keine Regressionsgerade geben, die durch alle Datenpunkte verläuft. Vielmehr ist es Ziel eine Gerade zu finden, die die Abweichung e_k der Datenpunkte von ihrem Verlauf minimiert. Das in der Regressionsanalyse vorherrschende Kriterium zur Minimierung der Abweichungen ist nach [BEPW15] das Kleinst-Quadrate-Kriterium (auch Methode der kleinsten Quadrate). Dabei werden nicht die Abweichungen nach Gleichung (H.3)

$$e_k = y_k - \hat{y}_k \quad (\text{H.3})$$

mit

- y_k - Beobachtungswerte der abhängigen Variablen Y für x_k
- \hat{y}_k - ermittelter Schätzwert von Y für x_k
- $k = 1 \dots K$ - Zahl der Beobachtungen

minimiert, sondern deren Quadrate (Gleichung (H.4)):

$$\sum_{k=1}^K e_k^2 \rightarrow \min! \quad (\text{H.4})$$

Für die hier betrachtete multiple lineare Regression ergibt sich nach [BEPW15] Gleichung (H.5) als Zielfunktion für das Optimierungsproblem:

$$\sum_{k=1}^K e_k^2 = \sum_{k=1}^K [y_k - (b_0 + b_1 x_{1k} + b_2 x_{2k} + \dots + b_j x_{jk} + \dots + b_J x_{Jk})]^2 \rightarrow \min! \quad (\text{H.5})$$

mit

- e_k - Werte der Residualgröße ($k = 1, 2, \dots, K$)
- y_k - Werte der abhängigen Variablen ($k = 1, 2, \dots, K$)
- b_0 - konstantes Glied
- b_j - Regressionskoeffizienten ($j = 1, 2, \dots, J$)
- x_{jk} - unabhängige Variablen ($j = 1, 2, \dots, J, k = 1, 2, \dots, K$)
- J - Zahl der unabhängigen Variablen
- K - Zahl der Beobachtungen

Gleichung (H.5) ist eine Funktion der Regressionsparameter b_0 und b_j . Durch Lösen dieser Gleichung erhält man die Regressionsgerade (und damit festgelegte b_0 und b_j), die die optimale Anpassung an die Datenpunkte (Beobachtungen) besitzt.

Prüfung der Regressionsfunktion

Die gefundene Regressionsfunktion muss zur Beurteilung, wie gut sie die Realität abbildet, auf ihre Güte hin überprüft werden. Diese Überprüfung erfolgt zweigeteilt:

1. Globale Überprüfung der Regressionsfunktion

Es wird geprüft, ob die abhängige Variable Y durch die in das Modell einbezogenen Variablen x_{jk} erklärt wird. Globale Gütemaße sind:

- das Bestimmtheitsmaß R^2
- die F-Statistik und
- der Standardfehler.

2. Prüfung der Regressionskoeffizienten

Es wird untersucht, wie gut einzelne Variablen x_{jk} des Modells zur Erklärung der abhängigen Variable Y beitragen. Maße sind:

- der t-Wert und
- der Beta-Wert.

Es ist zweckmäßig, zunächst die globale Güte der Regressionsfunktion zu prüfen. Sollte sich das Modell als unbrauchbar erweisen, erübrigt sich die Überprüfung der Regressionskoeffizienten.

Globale Überprüfung der Regressionsfunktion:

Bestimmtheitsmaß: Das Bestimmtheitsmaß R^2 drückt aus, wie gut sich eine Regressionskurve an die beobachteten Daten anpasst. Es beschreibt das Verhältnis von erklärter Streuung SSE zur Gesamtstreuung SST.

$$R^2 = \frac{\text{SSE}}{\text{SST}} = \frac{\sum_{k=1}^K (\hat{y}_k - \bar{y})^2}{\sum_{k=1}^K (y_k - \bar{y})^2} \quad (\text{H.6})$$

R^2 ist eine normierte Größe, deren Wertebereich zwischen Null und Eins liegt. Wird die gesamte Streuung durch das Regressionsmodell erklärt, gilt für das Bestimmtheitsmaß $R^2 = 1$. Erklärt das Regressionsmodell keinen Streuungsanteil, gilt $R^2 = 0$. Besitzt eine Regressionsfunktion beispielsweise den Wert 0,6, so werden 60 % der Gesamtstreuung durch die unabhängigen Variablen erklärt, 40 % bleiben unerklärt. Die Gesamtstreuung SST ergibt sich nach [BEPW15] aus der Summe aus erklärter Streuung SSE und nicht erklärter Streuung SSR (Gleichung (H.7)).

$$\begin{array}{lcl}
 \text{Gesamtstreuung} & \text{erklärte Streuung} & \text{nicht erklärte Streuung} \\
 \sum_{k=1}^K (y_k - \bar{y})^2 & = \sum_{k=1}^K (\hat{y}_k - \bar{y})^2 & + \sum_{k=1}^K (y_k - \hat{y}_k)^2 \\
 \text{SST} & \text{SSE} & \text{SSR}
 \end{array} \quad (\text{H.7})$$

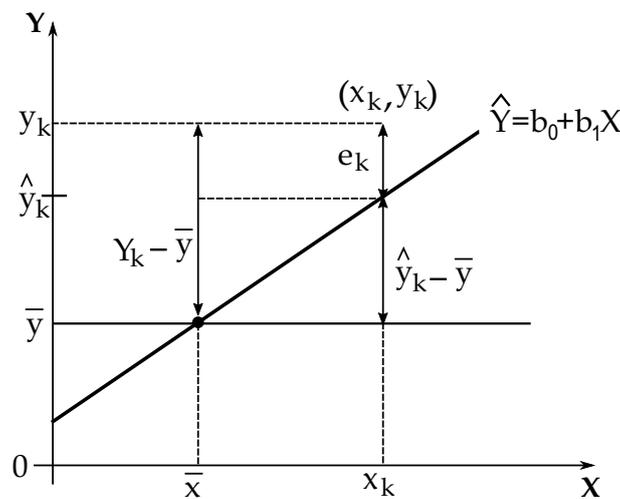


Abbildung H.1. Zerlegung der Gesamtstreuung (eigene Darstellung nach [BEPW15], Seite 83)

Abbildung H.1 veranschaulicht die Streuungszerlegung der Einfachheit halber für den Fall der einfachen Regression. Das heißt, dass nur eine unabhängige Variable betrachtet wird. Die Abweichung $y_k - \bar{y}$ eines Punktes (x_k, y_k) vom Mittelwert \bar{y} wird als Gesamtabweichung bezeichnet. Der Teil der Abweichung $\hat{y}_k - \bar{y}$ lässt sich durch die Regressionsgerade erklären, die oberhalb des Mittelwertes \bar{y} liegt. Die restliche Abweichung e_k (Residuum) kann dagegen nicht durch die Regressionsgerade erklärt werden. Es gilt also:

$$(y_k - \bar{y}) = (\hat{y}_k - \bar{y}) + e_k \quad (\text{H.8})$$

Die Zerlegung für die Gesamtstreuung (Gleichung (H.7)) ergibt sich durch Quadrieren der Elemente von Gleichung (H.8) und deren Summierung über die Anzahl der Beobachtungen K .

Das Bestimmtheitsmaß berücksichtigt nicht die Anzahl K der Beobachtungen. Im Extremfall ist $K = 2$ und demzufolge $R^2 = 1$, da sich eine Gerade immer exakt durch zwei Punkte legen lässt. Ein solches Modell ist jedoch nicht nutzbar, da es die anderen Beobachtungswerte nicht berücksichtigt.

Korrigiertes Bestimmtheitsmaß: Die Komplexität eines Modells wird bei dessen Bewertung durch das Bestimmtheitsmaß nicht berücksichtigt. Mit steigender Anzahl an unabhängigen Variablen J wird die Anpassung an die Daten immer besser. Dennoch werden nicht unbedingt bessere Schätzwerte erreicht, da mit steigendem J die Anzahl der Freiheitsgrade $df = K - J - 1$ für die Schätzung sinkt. Durch Hinzunahme weiterer unabhängiger Variablen steigt also der Wert von R^2 obwohl die Variablen möglicherweise irrelevant für den gesuchten Zusammenhang sind. Es wird daher das sog. korrigierte Bestimmtheitsmaß R_{kor}^2 nach Gleichung (H.9)

$$R_{\text{kor}}^2 = R^2 - \frac{J \cdot (1 - R^2)}{K - J - 1} \quad (\text{H.9})$$

mit

- K - Zahl der Beobachtungswerte
- J - Zahl der unabhängigen Variablen (Regressoren)
- $K - J - 1$ - Zahl der Freiheitsgrade

eingeführt.

Das einfache Bestimmtheitsmaß R^2 wird nach Gleichung (H.9) um einen Korrekturfaktor verringert. Dieser ist umso größer, je größer die Anzahl der unabhängigen Variablen J ist.

F-Statistik: Das Bestimmtheitsmaß R^2 liefert einen Wert für die Anpasstheit der Regressionsfunktion an beobachtete Daten. Es liefert jedoch keine Informationen darüber, ob und wie gut das geschätzte Modell über die Stichprobe hinaus geeignet ist. Es ist daher notwendig, die Signifikanz des Modells zu bestimmen. Dazu kommt die F-Statistik zum Einsatz. Sie berücksichtigt zusätzlich zur beschriebenen Streuungszerlegung den Umfang der Stichprobe und die Zahl der Regressoren.

Die nach Gleichung (H.2) geschätzte Regressionsfunktion lässt sich als eine Realisierung der wahren Funktion mit den unbekanntem Parametern $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_J$ auffassen. Diese Funktion wird als stochastisches Modell der Regressionsanalyse bezeichnet, da es neben dem Einfluss der Variablen $X_1, X_2, X_3, \dots, X_J$ auf Y auch eine Zufallsgröße, die Störgröße u , enthält. Es gilt nach Gleichung (H.10)

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_j X_j + \dots + \beta_J X_J + u \quad (\text{H.10})$$

mit

- Y - abhängige Variable
- β_0 - konstantes Glied
- β_j - Regressionskoeffizient ($j = 1, 2, \dots, J$)
- X_j - unabhängige Variablen ($j = 1, 2, \dots, J$)
- u - Störgröße

Die Störgröße u fasst alle zufälligen Einflüsse, die auf Y wirken, zusammen. Sie ist demnach eine Zufallsgröße und nicht beobachtbar. Sie zeigt sich aber in den Residuen e_k . Die Größe Y ist nun ebenfalls eine Zufallsgröße, da u in ihrer Berechnung enthalten ist. Durch den gewählten Modellansatz (Gleichung (H.10)) wird vorausgesetzt, dass ein Zusammenhang zwischen X_j und Y besteht. Die Koeffizienten β_j sollten also einen Wert ungleich Null besitzen. Um die zu prüfen, wird die sogenannte Nullhypothese (H_0) erstellt, die besagt, dass kein Zusammenhang zwischen X_j und Y besteht und somit alle Regressionskoeffizienten β_j gleich Null sind (Gleichung (H.11)).

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_J = 0 \quad (\text{H.11})$$

Zur Überprüfung der Nullhypothese kann ein F-Test verwendet werden. Er vergleicht einen empirischen F-Wert F_{emp} (F-Statistik) mit einem theoretischen Wert F_{theo} . Bei Gültigkeit der Nullhypothese wäre zu erwarten, dass der F-Wert Null ist. Ist er jedoch signifikant groß, d.h. größer als der theoretische Wert, steht fest, dass die Nullhypothese widerlegt wurde und ein Zusammenhang zwischen X_j und Y besteht. Es sind dann nicht alle β_j Null. Nach [BEPW15] gehen in die Berechnung der F-Statistik die Streuungsanteile (Gleichung (H.7)), der Stichprobenumfang K sowie der Anzahl der Regressoren J (erklärte Streuung) ein. Die nicht erklärte Streuung ergibt sich aus $K - J - 1$. Der empirische F-Wert F_{emp} berechnet sich nach Gleichung (H.12).

$$F_{\text{emp}} = \frac{\sum_{k=1}^K (\hat{y}_k - \bar{y})^2 / J}{\sum_{k=1}^K (y_k - \hat{y}_k)^2 / (K - J - 1)} \quad (\text{H.12})$$

Ein F-Test läuft folgendermaßen ab:

1. Berechnung des empirischen F-Wertes F_{emp}
2. Vorgabe eines Signifikanzniveaus:

Es wird eine Vertrauenswahrscheinlichkeit vorgegeben, mit welcher die Nullhypothese angenommen wird, wenn diese korrekt ist, d.h. kein Zusammenhang besteht. Die Vertrauenswahrscheinlichkeit beträgt üblicherweise 95% oder 99%. Bei einer Vertrauenswahrscheinlichkeit von 99% wird die Nullhypothese demnach mit einer Wahrscheinlichkeit von $\alpha = 1 - 0,99 = 1\%$ abgelehnt, obwohl sie richtig ist. α ist die Irrtumswahrscheinlichkeit des Tests und wird als Signifikanz bezeichnet.

3. Ermittlung eines theoretischen F-Wertes F_{theo}

Der theoretische F-Wert F_{theo} ergibt sich aus der F-Verteilung für das gewählte Signifikanzniveau. Er kann einer F-Tabelle entnommen werden, die in der Literatur (beispielsweise [BEPW15]) zu finden ist.

4. Vergleich des empirischen F-Wertes F_{emp} mit dem theoretischen F-Wert F_{theo} :

$$\begin{aligned} F_{\text{emp}} > F_{\text{theo}} &\rightarrow H_0 \quad \text{wird verworfen} && \rightarrow \text{Zusammenhang ist signifikant} \\ F_{\text{emp}} \leq F_{\text{theo}} &\rightarrow H_0 \quad \text{wird nicht verworfen} && \rightarrow \text{Zusammenhang nicht signifikant} \end{aligned}$$

Für eine detaillierte Beschreibung des Ablaufs des F-Tests sei auf [BEPW15] verwiesen.

Der F-Test kann auch unter Nutzung eines sog. p-Wertes durchgeführt werden. Somit entfielen die Ermittlung des theoretischen F-Wertes F_{theo} mittels Tabellen. Der p-Wert der F-Statistik ist die Wahrscheinlichkeit, dass eine F-verteilte Zufallsvariable größer ist als der empirische F-Wert F_{emp} . Das Entscheidungskriterium mit der Irrtumswahrscheinlichkeit α für den F-Test lautet:

$$p < \alpha \rightarrow H_0 \quad \text{wird verworfen}$$

Der p-Wert wird üblicherweise durch Statistik-Programme im Rahmen einer Regressionsanalyse berechnet und ausgegeben. Im in dieser Arbeit genutzten Statistik-Werkzeug PSPP ist der p-Wert in der Spalte *Sig.* der Ausgabetafeln zu finden.

Standardfehler der Schätzung: Ein drittes Gütemaß zur globalen Bewertung der Regressionsfunktion ist der Standardfehler σ der Schätzung. Er gibt an, welcher mittlere Fehler bei der Verwendung der Regressionsfunktion zur Schätzung von Y gemacht wird. Er berechnet sich nach Gleichung (H.13).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum e_k^2}{K - J - 1}} \quad (\text{H.13})$$

Prüfung der Regressionskoeffizienten: Ergibt die Auswertung der F-Statistik, dass ein Zusammenhang zwischen X_j und Y besteht, d.h. dass nicht alle Regressionskoeffizienten β_j Null sind, werden nun die Regressionskoeffizienten einzeln überprüft. Dazu kann die t-Statistik angewendet werden. Auch dazu wird üblicherweise wieder die Nullhypothese getestet. Die t-Statistik berechnet sich nach Gleichung (H.14)

$$t_{\text{emp}} = \frac{b_j}{\sigma_{b_j}} \quad (\text{H.14})$$

mit

- t_{emp} - empirischer t-Wert für den j-ten Regressor
- b_j - Regressionskoeffizient des j-ten Regressors
- σ_{b_j} - Standardfehler von b_j

Die Durchführung des t-Tests erfolgt analog zum F-Test in den Schritten:

1. Berechnung des empirischen t-Wertes t_{emp}
2. Vorgabe eines Signifikanzniveaus
3. Ablesen eines theoretischen t-Wertes t_{theo} aus einer entsprechenden Tabelle
4. Vergleich des empirischen und des theoretischen t-Wertes:

Da der t-Wert auch negativ werden kann, ist sein absoluter Betrag zu nutzen.

$|t_{\text{emp}}| > t_{\text{theo}} \rightarrow H_0$ wird verworfen \rightarrow Zusammenhang ist signifikant

$|t_{\text{emp}}| \leq t_{\text{theo}} \rightarrow H_0$ wird nicht verworfen \rightarrow Zusammenhang nicht signifikant

Analog zum F-Test kann auch der t-Test mittels p-Werten durchgeführt werden.

Hinweise zu Modellannahmen: Zur Durchführung der linearen Regressionsanalyse werden folgende Modellannahmen getroffen:

A1: Das Modell ist linear in den Parametern β_0 und β_j . Es enthält alle erklärenden Variablen und die Zahl der zu schätzenden Parameter ($J+1$) ist kleiner als die Zahl der vorliegenden Beobachtungen.

$$y_k = \beta_0 + \sum_{j=1}^J \beta_j \cdot x_{jk} + u_k \text{ mit } k = 1, 2, \dots, K \text{ und } K > J + 1$$

Da nur Linearität in den Parametern β_0 und β_j gefordert ist, kann in vielen Fällen eine Transformation von Nichtlinearitäten in den Variablen zu linearen Beziehungen führen und die lineare Regressionsanalyse kann angewendet werden.

A2: Die Störgröße u_k hat den Erwartungswert Null ($\text{Erw}(u_k) = 0$).

A3: Es besteht keine Korrelation zwischen den erklärenden Variablen X_j und der Störgröße u_k ($\text{Cov}(u_k, x_{jk}) = 0$)

A4: Die Störgrößen u_k haben eine konstante Varianz σ^2 . Es gilt: $\text{Var}(u_k) = \sigma^2$

A5: Die Störgrößen u_k sind unkorreliert. Es gilt: $\text{Cov}(u_k, u_{k+r}) = 0$ mit $r \neq 0$

A6: Zwischen den unabhängigen Variablen X_j besteht keine lineare Abhängigkeit

Weiterführende Informationen zu den Modellprämissen sind der Literatur, beispielsweise [BEPW15], zu entnehmen.

H.2. Künstliche Neuronale Netze zur Ermittlung von Beziehungen zwischen Räumen und Reglern

Eine allgemein anerkannte Definition zu KNN gibt es nach [RW11] nicht. Alle KNN haben jedoch gemein, dass sie Informationen aufnehmen, verarbeiten und ausgeben. Während dieses Prozesses kann sich das KNN umstrukturieren. Das Konstruktionsprinzip von KNN beruht nach [BEPW15] auf dem Vorbild der Abläufe im Nervensystem des Menschen und versucht biologische Lernprozesse mit geeigneten mathematischen Methoden nachzubilden. Warren McCulloch und Walter Pitts, die zu den ersten Wissenschaftlern auf dem Gebiet der Neuronalen Netze gehörten, entwickelten ein Formalmodell eines Neurons ([RW11]). Seit ca. 1986 haben die Arbeiten im Themenfeld der KNN stark zugenommen. So existieren mittlerweile zahlreiche wissenschaftliche Zeitschriften, die sich vorrangig mit KNN beschäftigen, wie z.B. „IEEE Transactions on Neural Networks“ ([RW11]).

KNN bestehen aus mehreren miteinander verbundenen Knoten (auch als Units, Einheiten, Neuronen bezeichnet). Diese dienen dazu, Informationen in Form von Zahlenwerten aus der Umwelt oder von anderen Knoten aufzunehmen, zu modifizieren und weiterzuleiten. Es werden drei Arten von Knoten unterschieden ([RW11, BEPW15]):

- Eingabeknoten: Knoten, die von der Außenwelt Signale in Form von Zahlen erhalten und eine Aktivierung der verdeckten Knoten bewirken.
- verdeckte Knoten: Knoten, die sich zwischen Eingabe- und Ausgabeknoten befinden.
- Ausgabeknoten: Knoten, die die berechneten Signale als Zahlenwerte an die Außenwelt geben.

Jedes KNN besteht aus einer Eingabeschicht (Gesamtheit der Eingabeknoten), keiner, einer oder mehreren verdeckten Schichten (bestehend aus den verdeckten Knoten) und einer Ausgabeschicht (Gesamtheit der Ausgabeknoten). Abbildung H.2 zeigt beispielhaft ein KNN mit zwei verdeckten Schichten.

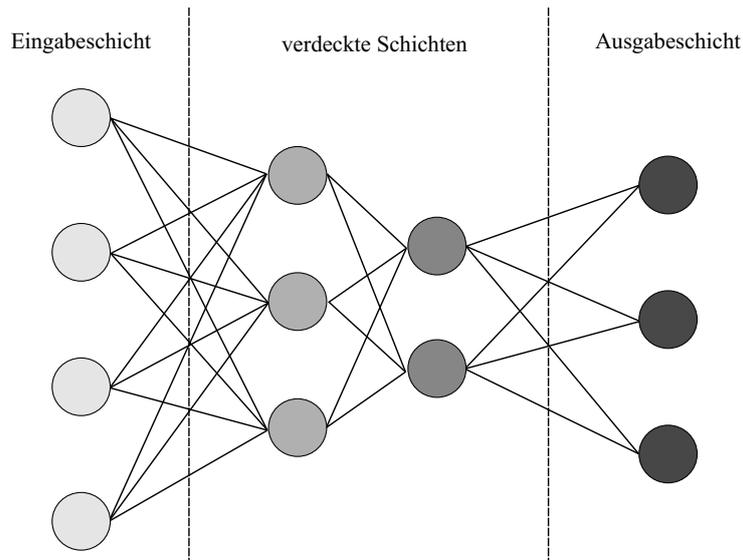


Abbildung H.2. Schematische Darstellung eines KNN

Die Knoten sind untereinander durch Kanten verbunden. Nach [RW11] wird die Stärke einer solchen Verbindung durch ein Gewicht w_{ij} ausgedrückt. Je größer der Betrag eines solchen Gewichtes ist, desto größer ist der Einfluss eines Knotens auf einen anderen. Ein positives Gewicht besagt, dass ein Knoten eine anregende Wirkung auf einen anderen Knoten hat. Ein negatives Gewicht bringt zum Ausdruck, dass die Beeinflussung hemmend ist. Ein Gewicht von Null bedeutet, dass ein Knoten keinen Einfluss auf einen anderen hat. Die Informationsverarbeitung in den Neuronen der verdeckten Schicht erfolgt in mehreren Schritten. Zunächst werden die auf ein Neuron j treffenden Eingangssignale mittels einer Propagierungsfunktion zu einem Netzinput (net_j) zusammengefasst. Dieser wird innerhalb des Neurons durch eine Aktivierungsfunktion verarbeitet. Damit bestimmt sich der Aktivierungsgrad (auch Aktivierungszustand genannt) $a(net_j)$ des Neurons. Für die Propagierungsfunktion wird üblicherweise die Summe der gewichteten Eingangssignale nach Gleichung (H.15)

$$net_j = \sum w_{ij} a_i \quad (\text{H.15})$$

mit

a_i - Eingabewerte der Eingabeneuronen für die aktuell betrachtete Schicht

genutzt.

Für die Aktivierungsfunktion wird nach [BEPW15] im einfachsten Fall eine Schwellenwertfunktion mit dem Schwellwert Θ_j genutzt (H.16). Diese lässt für den Aktivierungszustand des Neurons zwei Möglichkeiten - aktiviert/ nicht aktiviert - zu (Gleichung (H.16)).

$$a(net_j) = \begin{cases} 1 & \text{falls } net_j > \Theta_j \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (\text{H.16})$$

Weitere gebräuchliche Aktivierungsfunktionen sind beispielsweise ([RW11]):

- Lineare Aktivierungsfunktion
- Lineare Aktivierungsfunktion mit Schwellwert
- Logistische Aktivierungsfunktion
- Tangens-Hyperbolicus-Aktivierungsfunktion
- Normalverteilte Aktivierungsfunktion

Um ein KNN mit Informationen zu versehen, wird es trainiert. Dazu werden dem KNN Trainingsdaten zur Verfügung gestellt. Während des Trainingsprozesses (auch bezeichnet als Lernprozess) werden die Gewichte w_{ij} der einzelnen Kanten modifiziert. Durch Lernregeln ist festgelegt, wie diese Modifikation erfolgt. Nach [RW11] unterscheidet man grundsätzlich vier Lernverfahren:

- Überwachtes Lernen: Die korrekten Ausgabewerte sind dem KNN bekannt. An diesen werden die Gewichte optimiert.
- Bestärkendes Lernen: Dem KNN wird mitgeteilt, ob sich eine Veränderung der Gewichte positiv oder negativ auf die Ausgangsgrößen auswirkt.
- Nicht überwachtes Lernen: Es werden keine Ausgangswerte vorgegeben. Die Veränderung der Gewichte basiert auf der Ähnlichkeit der Eingangsreize.
- Direkte Designmethoden: Die Gewichte werden vorab festgelegt. Eine Veränderung ihrer Werte erfolgt nicht.

Der Trainingsphase schließt sich die Testphase des KNN an. Dabei werden dem Netz Eingangsgrößen bereitgestellt und überprüft, welche Ausgangswerte dadurch erzielt werden. Als Eingangswerte kommen sowohl die Daten aus der Trainingsphase, als auch unbekannte Reize in Frage. Im ersten Fall wird überprüft, ob das KNN die Trainingsdaten korrekt erfasst hat. Im zweiten Fall wird geprüft, ob das KNN auch über die bekannten Daten hinaus in der Lage ist, gute Ausgangsdaten zu berechnen. Für diese Überprüfung müssen die korrekten Ausgangsdaten bekannt sein.

Ein wichtiger Spezialtyp eines KNN ist ein Multi-Layer-Perceptron (MLP). Bei diesem KNN findet überwachtes Lernen mittels des Backpropagation-Algorithmus ([RHW86], [RW11]) statt. Die Informationsverarbeitung im Netz erfolgt streng von der Eingabe- hin zur Ausgabeschicht ([BEPW15]). Ein MLP besitzt mindestens eine verdeckte Schicht. Zwischen den Knoten innerhalb einer Schicht besteht keine Verbindung.

I. Ablauf der Untersuchungen zur Bestimmung der KNN

Die Erläuterungen des Ablaufs der Untersuchungen zur Bestimmung der KNN (Abschnitt 6.1.2.1) werden in diesem Anhang um konkrete Python-Codebeispiele erweitert und vertieft.

1. Python-Bibliotheken:

Zunächst werden alle notwendigen Python-Bibliotheken geladen. Sie sind im Python-Code I.1 angegeben.

```
1 import numpy as np
2 from openpyxl import Workbook
2 from openpyxl.reader.excel import load_workbook
4 from sklearn.metrics import r2_score
5 import pandas as pd
6 from sklearn.preprocessing import MinMaxScaler
7 from sklearn.model_selection import train_test_split
8 from sklearn.neural_network import MLPRegressor
```

Python-Code I.1 *Laden der Python-Bibliotheken für Regression mittels KNN*

Das Paket *NumPy*, welches in der 1. Zeile von Python-Code I.1 eingelesen wird und im nachfolgenden Programmcode als `np` bezeichnet wird, ist eine Bibliothek, welche eine nutzerfreundliche Handhabung von Vektoren, Matrizen und anderen mehrdimensionalen Feldern bietet ([Idr15]). Die Python-Bibliothek *openpyxl* in Zeile 2 und 3 ermöglicht das Lesen und Schreiben von Excel Dateien (Excel Version 2010). In der 4. Zeile wird die Methode `r2_score` aus der Bibliothek Scikit-learn geladen. Diese Methode dient später der Berechnung des Bestimmtheitsmaßes R^2 für die gefundenen Zusammenhänge. In der 5. Zeile wird die Python-Bibliothek *Pandas* geladen und im nachfolgenden Quellcode als `pd` bezeichnet. *Pandas* bietet Werkzeuge zur Verwaltung und Analyse von Daten ([Mol19]). In der 6. Zeile wird die Klasse `MinMaxScaler`, die die Skalierung von Daten zwischen den Werten 0 und 1 ermöglicht, geladen ([Gér19]). Durch den Befehl in Zeile 7 wird die Funktion `train_test_split` geladen, welche vorhandene Daten in Trainings- und Testdaten aufteilt ([Gér19]). In Zeile 8 wird die Klasse `MLPRegressor` geladen, die zur Durchführung der Regression mittels KNN genutzt wird. Diese Klasse implementiert ein Multi-Layer-Perceptron. Für weiterführende Informationen zu den Funktionen und Klassen der Bibliothek Scikit-learn sei [Sci20] empfohlen.

2. Einlesen der Daten in Python:

Die Daten der Datenbasis, welche in Form einer Excel-Tabelle vorliegt, werden nun spaltenweise in sogenannte Python-Listen eingelesen. Der entsprechende Programmcode ist beispielsweise für die Spalte, in der die Werte für den Parameter T_{tol} des Zweipunktreglers stehen, in Python-Code I.2 gezeigt.

```
T_tol_opt_list = loadData.laden(begin_line = line_start_chemnitz , end_line =  
line_end_moskau , nr_spalte=4, name="T_tol_opt")
```

Python-Code I.2 *Laden der Daten für T_{tol} des Zweipunktreglers*

Die Funktion `loadData.laden` erfordert die Angabe der ersten und letzten Zeile des Datenbereichs in der Excel-Datei, der geladen werden soll. Ferner muss die Nummer der zu ladenden Spalte und der Name der Größe, die geladen werden soll, angegeben werden.

3. Umwandeln der Daten in Felder:

Anschließend werden die Listen in die von Scikit-learn geforderten `numpy` Felder umgewandelt. Python-Code I.3 vermittelt an einem Beispiel, wie komfortabel dies in Python möglich ist.

```
T_tol_opt_np = np.array(T_tol_opt_list)
```

Python-Code I.3 *Umwandeln einer Liste in ein Feld in Python am Beispiel von T_{tol}*

4. Zusammenfügen aller unabhängigen Variablen in einer Matrix:

Die Anwendung der Klasse `MLPRegressor` erfordert, dass die unabhängigen Variablen in einer Matrix zusammengefasst sind. Diese wird spaltenweise aus den die unabhängigen Variablen beinhaltenden Listen mittels der Funktion `numpy.column_stack()` erstellt. Python-Code I.4 zeigt dies für die Variable `Xdata`, die aus den Raum-, Wetter- und Nutzungskenngrößen sowie dem Heizungstyp zusammengesetzt wird.

```
Xdata = np.column_stack(gamma_np , tau_np , TA_mittel_szen_np ,  
DirStr_mittel_szen_np , TA_Tag1_szen_np , Str_Tag1_szen_np ,  
Typ_Heizung_szen_np , Anz_Pers_szen_np)
```

Python-Code I.4 *Erstellen einer Matrix `Xdata` aus den Feldern der unabhängigen Variablen*

5. Teilen des kompletten Datensatzes in Trainings- und Testdaten:

Es ist sinnvoll, einige Datenpunkte des kompletten Datensatzes zum Testen der gefundenen Zusammenhänge zu nutzen. Dieser Testdatensatz darf dem Algorithmus während der Trainingsphase nicht zur Verfügung stehen. Daher wird der Gesamtdatensatz in einen Trainings- und einen Testdatensatz aufgeteilt. Dazu wird, wie in Python-Code I.5 gezeigt, die Funktion `scikit-learn.model_selection.train_test_split()` genutzt.

```
X_train , X_test , y_train , y_test = train_test_split(Xdata , ydata , test_size  
=0.2)
```

Python-Code I.5 *Aufteilen des Gesamtdatensatzes in Trainings- und Testdaten*

Der Parameter `test_size=0,2` gibt an, dass 20% des Gesamtdatensatzes auf die Testdaten entfällt.

6. Normieren der Daten:

In der Regel arbeiten KNN nicht zufriedenstellend, wenn die Eingangsdaten deutlich unterschiedliche Größenordnungen besitzen [Gér19]. Daher werden sie mittels der Funktion `MinMaxScaler`, die im Werkzeug Scikit-learn angeboten wird, zwischen Null und Eins normiert. Python-Code I.6 zeigt dies exemplarisch für die unabhängige Variablen `X_train` und `X_test` des Trainings- bzw. Testdatensatzes.

```
x_scaler = MinMaxScaler()
x_scaler.fit(X_train)
X_train = x_scaler.transform(X_train)
X_test = x_scaler.transform(X_test)
```

Python-Code I.6 *Normieren der Daten zwischen Null und Eins*

7. Durchführung der Analysen:

Die Analysen der Beziehungen zwischen Räumen und Reglern mittels KNN werden unter Anwendung der Klasse `MLPRegressor` durchgeführt. Es werden jeweils Analysen für die drei Reglermodelle Zweipunkt- P- und vs-Regler durchgeführt.

Zur Durchführung der Regressionsanalyse mittels der Klasse `MLPRegressor` wird zunächst das KNN spezifiziert. Dabei werden die Parameter, die in Tabelle I.1 genannt sind, festgelegt. `MLPRegressor` besitzt weitere Parameter, die jedoch im Rahmen der Arbeit ihren Standardwert beibehalten. Die Parameter und deren Bedeutung können [Sci20] entnommen werden.

Tabelle I.1. Ausgewählte Parameter der Klassen `MLPRegression`

Parameter	Bedeutung
<code>solver</code>	Löser zur Anpassung der Gewichte während des Trainingsvorgangs
<code>activation</code>	Art der Aktivierungsfunktion
<code>alpha</code>	Strafterm um Überanpassung des Netzes auf die Lerndaten zu verhindern
<code>hidden_layer_size</code>	Anzahl und Größe der verdeckten Schichten
<code>random_state</code>	ermöglicht die Reproduktion der Ergebnisse

Die Parametrisierung der KNN erfolgt im Rahmen der Arbeit in zwei Schritten. Zunächst wird eine Rastersuche zur Ermittlung geeigneter Parameterwerte für die in Tabelle I.1 angegebenen Parameter durchgeführt. Dazu wird die in Scikit-learn verfügbare Klasse `GridSearchCV` genutzt. Dabei werden nacheinander KNN mittels vorgegebener Kombinationen von Parameterwerten angelernet und das Bestimmtheitsmaß R^2 für die Trainingsdaten bestimmt. Nach der Berechnung aller KNN werden die Parameter desjenigen ausgewählt, das den höchsten Wert für R^2 erzielen konnte. Python-Code I.7 zeigt beispielhaft die Implementierung der Rastersuche.

```

#GridSearch
#Angabe der Klasse, für die die Rastersuche durchgeführt werden soll:
reg_NN_GS = MLPRegressor()
#Spezifizierung der Parameterbereiche:
parameters = {'solver':['lbfgs'],
              'activation':['relu','tanh'],
              'alpha':[1e-5],
              'hidden_layer_sizes':[(256,256,256),(6,2),(6,6,5),(6,6,4),(5,4,5),
                                     (5,5,4),(50,50,50,20),(50,25,17,5),(5,4),(50,4)]}
#Durchführung der Rastersuche:
gs = GridSearchCV(reg_NN_GS, param_grid=parameters, scoring='r2', cv=10)
#Anlernen eines KNN:
gs.fit(X_train, y_train)
#Ermitteln des Bestimmtheitsmaßes:
print("Best score: %0.4f" % gs.best_score_)
#Ausgeben der Parameter, des KNN mit dem höchsten Bestimmtheitsmaß:
print("Using the following parameters:")
print(gs.best_params_)

```

Python-Code I.7 Durchführung der Rastersuche mittels der Klasse *GridSearchCV*

Im zweiten Schritt der Parametrisierung des KNN wird auf Grundlage des Ergebnisses der Rastersuche durch manuelle Parametervariation geprüft, ob ein weiter verbessertes KNN gefunden werden kann. Dazu wird zusätzlich das Bestimmtheitsmaß R^2 für den Testdatensatz ausgewertet.

8. Berechnung der globalen Gütemaße:

Das Bestimmtheitsmaß R^2 (vgl. Abschnitt H.1) wird für den Lern- und den Testdatensatz für alle gefundenen KNN berechnet.

Die Schritte 7 und 8 werden eingehend in den Abschnitten 6.1.2.2, 6.1.2.3 und 6.1.2.4 beschrieben.

KNN zur Erfassung der Zusammenhänge zwischen Räumen und dem Zweipunktreglermodell

Zur Bestimmung geeigneter Werte für die Parameter des KNN (vgl. Tabelle 6.1) mittels Rastersuche werden die in Python-Code I.8 angegebenen Parameterbereiche festgelegt.

```

#Spezifizierung der Parameterbereiche
parameters = {'solver':['lbfgs'],
              'activation':['relu','tanh'],
              'alpha':[1e-4,1e-5],
              'hidden_layer_sizes':[(50,25,17,5),(5,5,4),(100,100,100,100),
                                     (50,4)],
              (5,5,4),(50,50,50,20),(50,25,17,5),(5,4),(50,4)],
              'random_state':[1,2]}

```

Python-Code I.8 Durchführung der Rastersuche mittels der Klasse *GridSearchCV* für \hat{T}_{tol} des Zweipunktreglers

Die Rastersuche führt auf das in Python-Code I.9 angegebene KNN.

```
reg_NN = MLPRegressor(solver='lbfgs',
                      activation='relu', alpha=1e-4, hidden_layer_sizes=(100,100,100,100),
                      random_state=1)
```

Python-Code I.9 *Parametrisiertes KNN für \hat{T}_{tol} des Zweipunktreglers*

Mit der Funktion `fit` der Klasse `MLPRegressor` wird das KNN nun mittels des Trainingsdatensatzes angelernt (Python-Code I.10).

```
reg_NN.fit(X_train, y_train)
```

Python-Code I.10 *Lernen des KNN*

Das gelernte KNN wird nun eingesetzt, um aus den Trainingsdaten, die es bereits kennt, die Werte für den Parameter \hat{T}_{tol} des Zweipunktreglers zu bestimmen. Ebenso wird dies für den Testdatensatz, der dem KNN unbekannt ist, durchgeführt. Die entsprechende Python-Implementierung ist in Python-Code I.11 gezeigt.

```
#Vorhersage von T_tol für den Trainingsdatensatz
y_pred_train = reg_NN.predict(X_train)

#Vorhersage von T_tol für den Testdatensatz
y_pred_test = reg_NN.predict(X_test)
```

Python-Code I.11 *Bestimmung des Parameters \hat{T}_{tol} des Zweipunktreglers aus Trainings- und Testdatensatz*

Zur Überprüfung des gelernten Netzes werden zur Beurteilung seiner Lern- und Verallgemeinerungsfähigkeit die Bestimmtheitsmaße R_{Training}^2 und R_{Test}^2 berechnet. Dies ist in Python-Code I.12 gezeigt.

```
#Bestimmung für Trainingsdaten
r_quad_train = performance_metric(y_train, y_pred_train)
print("R_quad fuer Trainingsdaten: ", r_quad_train)

#Bestimmung für Testdaten
r_quad_test = performance_metric(y_test, y_pred_test)
print("R_quad fuer Testdaten: ", r_quad_test)
```

Python-Code I.12 *Berechnung der Bestimmtheitsmaße*

J. Vergleich von Ergebnissen am Standort Helsinki unter Verwendung des P-Reglers

In Abschnitt 6.2 werden die gefundenen Zusammenhänge angewendet und mittels der KNN passende Regler einschließlich ihrer optimalen Parameter für ein Testszenario für drei verschiedene Standorte und zwei Heizungstypen bestimmt. Für den P-Regler am Standort Helsinki zeigt sich, dass die durch die KNN bestimmten Reglerparameter sowohl für Zeitraum a als auch für Zeitraum b weit vom durch Optimierung bestimmten Reglerparameter abweichen. Daher wird mittels Simulation überprüft, inwieweit sich die durch die KNN bestimmten Reglerparameter für den P-Regler für die beiden Zeiträume dennoch eignen. Die diesem Vergleich zugrunde liegenden Zeitverläufe für die operativen Raumtemperaturen, die Zielfunktionen und die Verletzungsgrößen „zu kalt“, sind in den folgenden Abbildungen J.1 bis J.6 dargestellt. Auf die Darstellung der Verletzungsgrößen „zu warm“ wurde verzichtet, weil sie in allen Fällen Null betragen.

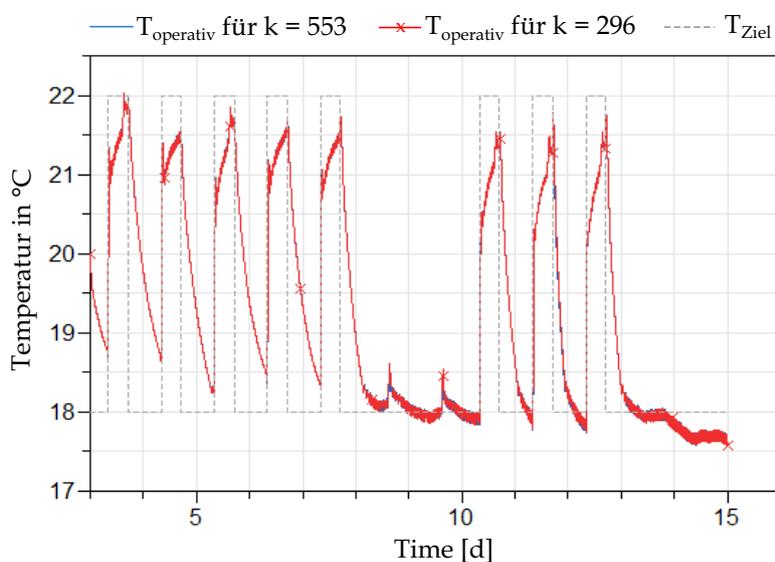


Abbildung J.1. Operative Raumtemperaturen und Zieltemperatur im Testszenario am Standort Helsinki für Zeitraum a; Reglerparameter des p-Reglers $k = 296$ durch Optimierung bestimmt, Reglerparameter des p-Reglers $k = 553$ mittels KNN bestimmt

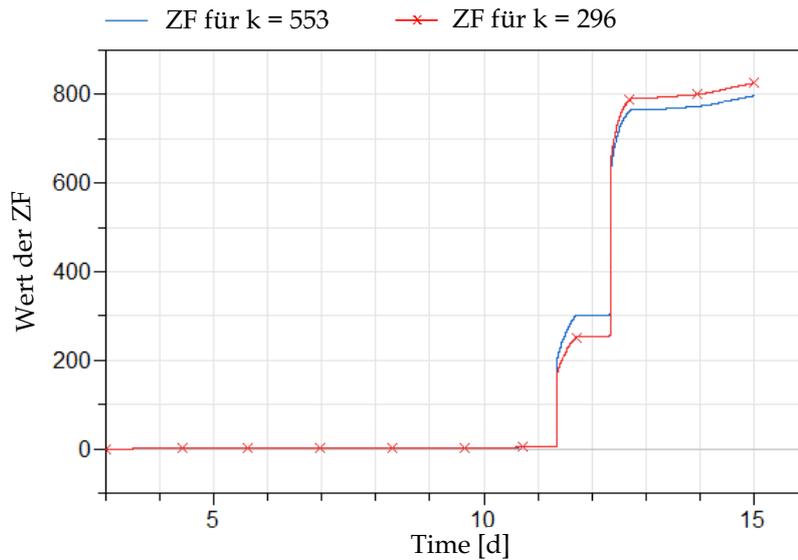


Abbildung J.2. Zielfunktionen im Testszenario am Standort Helsinki für Zeitraum a; Reglerparameter des p-Reglers $k = 296$ durch Optimierung bestimmt, Reglerparameter des p-Reglers $k = 553$ mittels KNN bestimmt

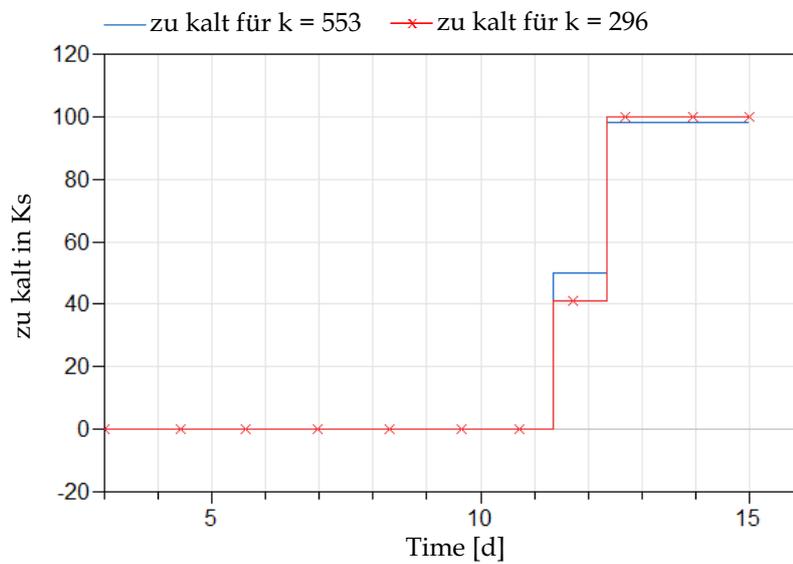


Abbildung J.3. Signale „zu kalt“ im Testszenario am Standort Helsinki für Zeitraum a; Reglerparameter des p-Reglers $k = 296$ durch Optimierung bestimmt, Reglerparameter des p-Reglers $k = 553$ mittels KNN bestimmt

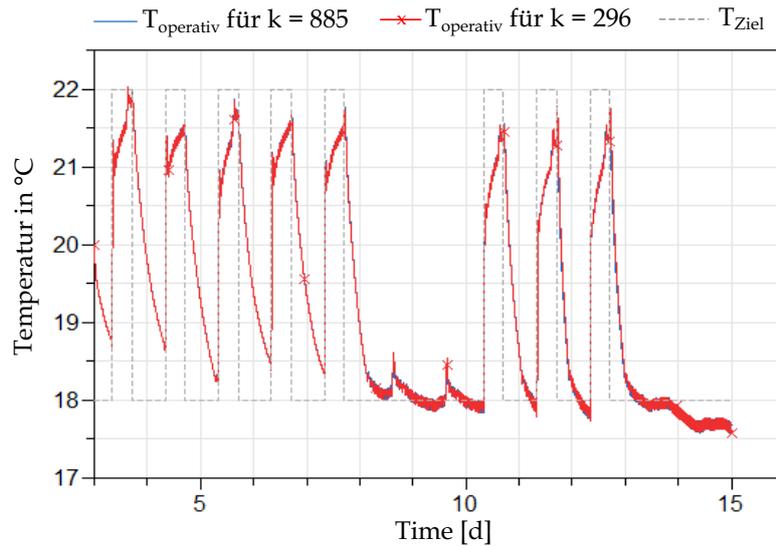


Abbildung J.4. Operative Raumtemperaturen und Zieltemperatur im Testszenario am Standort Helsinki für Zeitraum b; Reglerparameter des p-Reglers $k = 296$ durch Optimierung bestimmt, Reglerparameter des p-Reglers $k = 885$ mittels KNN bestimmt

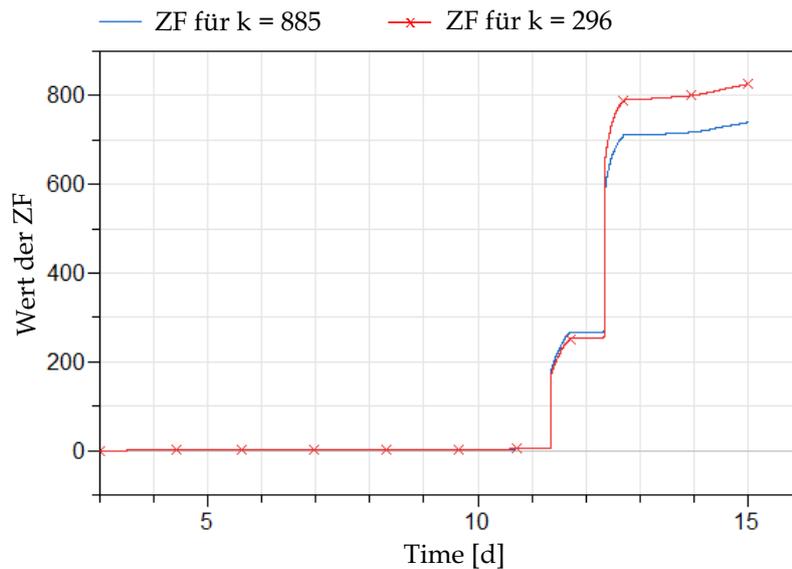


Abbildung J.5. Zielfunktionen im Testszenario am Standort Helsinki für Zeitraum b; Reglerparameter des p-Reglers $k = 296$ durch Optimierung bestimmt, Reglerparameter des p-Reglers $k = 885$ mittels KNN bestimmt

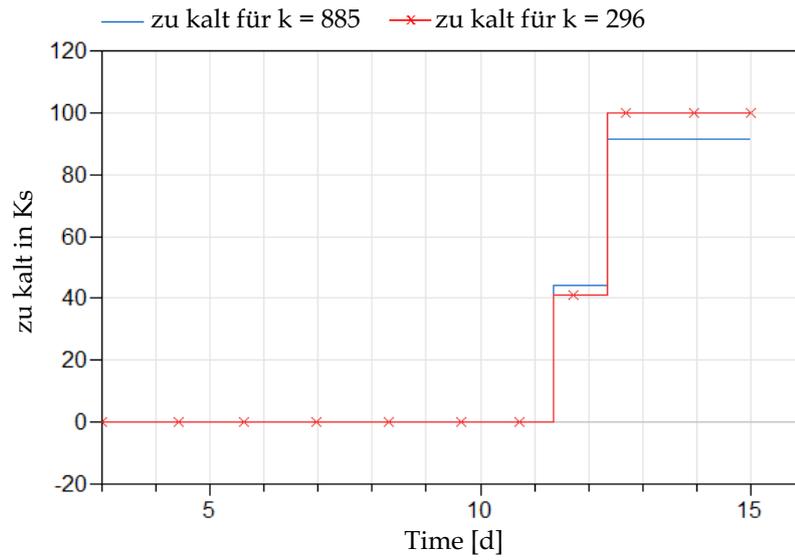


Abbildung J.6. Signale „zu kalt“ im Testszenario am Standort Helsinki für Zeitraum b; Reglerparameter des p-Reglers $k = 296$ durch Optimierung bestimmt, Reglerparameter des p-Reglers $k = 885$ mittels KNN bestimmt

K. Ergebnisse der Anwendung der Zusammenhänge für das Testszenario für szenarienweise gebildete Wetterkenngrößen

Im Abschnitt 6.2 werden die gefundene Zusammenhänge zwischen Raum- und Reglermodellen exemplarisch an einem Testszenario angewendet. Die Ermittlung der passenden Regler durch Auswertung ihrer Gütemaße wird dort für zwei Zeiträume vorgenommen. Die Ergebnisse für Zeitraum b, der sich über ein Quartal von Dezember bis Februar erstreckt, sind in Kapitel 6.2 dargestellt. Die Ergebnisse für Zeitraum a, der vom 04. bis zum 14. Januar festgelegt ist unterscheiden sich kaum von der Ergebnissen für Zeitraum b. Der Vollständigkeit halber werden in diesem Anhang die Ergebnisse für den Zeitraum a dennoch gezeigt. Dazu werden die sich ergebenden operativen Raumtemperaturen des Raumes im Testszenario abgebildet, die sich bei der Anwendung des für den jeweiligen Standort besten Reglers ergeben. Für die Standorte Chemnitz und Berlin mit Typ Radiatorheizung ist das der P-Regler, für den Standort Helsinki der Zweipunktregler, für den Standort Berlin mit Typ Fußbodenheizung der vs-Regler.

Die Simulation des Testszenarios am Standort Chemnitz für Zeitraum a mit dem durch das KNN ermittelten Parameter $k = 905$ für den P-Regler führt zum in Abbildung K.1 gezeigten Verlauf für die operative Raumtemperatur T_{operativ} . Ihr Verlauf orientiert sich am vorgegebenen Verlauf der Zieltemperatur T_{Ziel} und folgt dieser gut. Auch die vorgegebenen Komfortkriterien werden nicht verletzt. Auf die Darstellung des Verlaufs der operativen Raumtemperatur bei Verwendung des durch Optimierung bestimmten Parameters $k = 1000$ wird verzichtet, weil der Verlauf sich kaum sichtbar vom dem in Abbildung K.1 unterscheidet. Auch die Werte der Reglergüte, die sich durch Simulation des Testszenarios für den optimierten Reglerparameter und den durch das KNN ermittelten Reglerparameter ergeben, stimmen überein. Sie betragen $ZF = \widehat{ZF} = 2,6$.

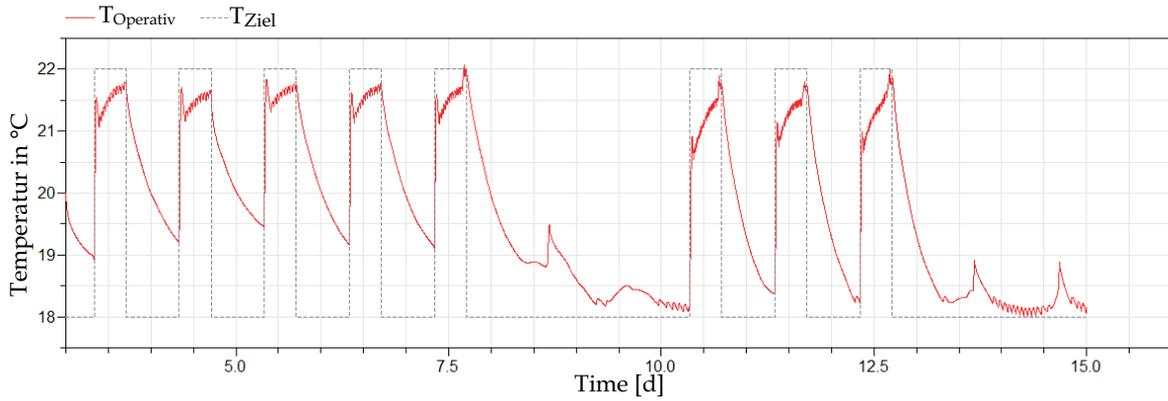


Abbildung K.1. Operative Raumtemperatur und Zieltemperatur im Testszenario am Standort Chemnitz; Reglerparameter $k = 905$ mittels KNN für Zeitraum a bestimmt

Für das Testszenario am Standort Berlin und den Heizungstyp Radiatorheizung ergibt sich der in Abbildung K.2 dargestellte Verlauf für die operative Raumtemperatur bei Nutzung des P-Reglers und des für diesen durch das KNN bestimmten Reglerparameters $k = 883$. Die Komfortgrenzen werden nicht verletzt. Auf die Darstellung der operativen Raumtemperatur, die sich unter Nutzung des optimalen Reglerparameters $k = 688$ ergibt, wurde verzichtet, da sie sich optisch nicht vom Verlauf in Abbildung K.2 unterscheidet. Die simulierten Werte der Gütemaße für die Reglereignung sind in beiden Fällen gleich. Sie betragen $ZF = \widehat{ZF} = 3,8$

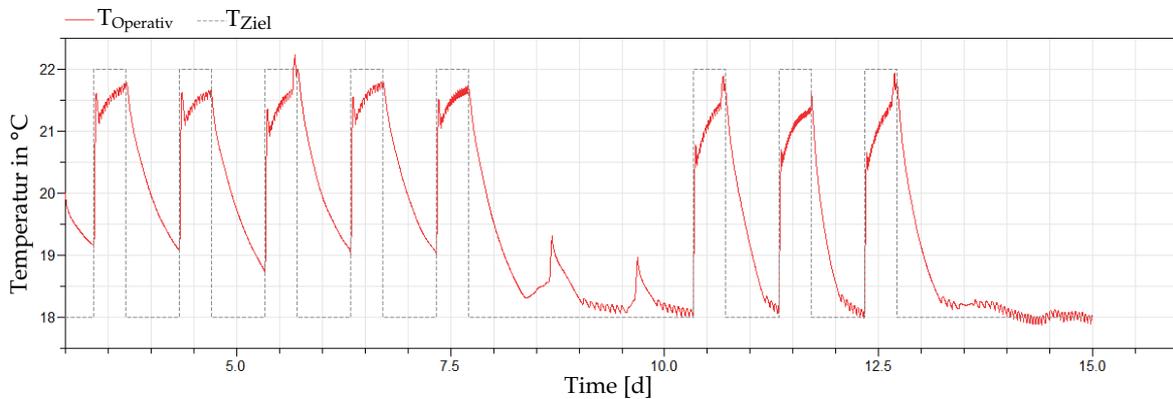


Abbildung K.2. Operative Raumtemperatur und Zieltemperatur im Zeitraum a am Standort Berlin; Reglerparameter $k = 883$ mittels KNN bestimmt

Für den dritten untersuchten Standort, Helsinki, sollte nach Tabelle 6.12 der Zweipunktregler gewählt werden. In Abbildung K.3 sind die Verläufe der operativen Raumtemperaturen, die sich aus der Verwendung des durch das KNN bestimmten Reglerparameters $\widehat{T}_{tol} = 0,37$ und des optimalen Reglerparameter $T_{tol} = 0,56$ ergeben, dargestellt. Die Verläufe ähneln einander stark. Die Komfortgrenzen werden in beiden Fällen leicht verletzt. Für $\widehat{T}_{tol} = 0,37$ ist es 48,6 Ks zu kalt, der Energieverbrauch beträgt 9946 Wh. Für $T_{tol} = 0,56$ ist es 23,6 Ks zu kalt, der Energieverbrauch beträgt 10459 Wh. Diese kleinen Abweichungen resultieren in den Werten für die Güte der Regler für $\widehat{T}_{tol} = 0,37$ von $\widehat{ZF} = 493$ und für $T_{tol} = 0,56$ von $ZF = 257$.

L. Praktische Anwendung der KNN zur Ermittlung des besten Reglers und seiner optimalen Parameter - Beispielimplementierung

Die in Abschnitt 6.3 beschriebene praktische Anwendung der KNN ist im folgenden beispielhaft an einer Pythonimplementierung dargestellt.

Für die Anwendung der KNN ist eine Pythonumgebung wie z.B. Jupyter [Jup20] erforderlich. Zunächst müssen die in Python-Code L.1 genannten Pakete geladen werden. Das Modul `pickle` ermöglicht Serialisierung und Deserialisierung von Pythoncode und erlaubt so das Speichern und Laden von Pythonobjekten wie z.B. den ermittelten KNN.

```
import numpy as np
import pickle
```

Python-Code L.1 *Laden der Python Bibliotheken*

Anschließend werden die `scaler`-Modelle geladen, die beim Ermitteln der KNN zur Normierung der Daten zwischen Null und Eins genutzt wurden. Sie sind notwendig, weil die Raum-, Wetter und Nutzungskenngrößen des in der praktischen Anwendung befindlichen Raumes ebenfalls skaliert werden müssen. Python-Code L.2 zeigt das Laden der `scaler`-Modelle beispielhaft. Der Parameter `rb` öffnet die `scaler`-Modelle zum Lesen im Binärformat.

```
filename_Ttol = 'Scaler_2pkt_Ttol_quart_final_an.sav'
scaler_model_Ttol = pickle.load(open(filename_Ttol, 'rb'))
```

Python-Code L.2 *Laden eines scaler-Modells*

Nun werden die ermittelten Raum,- Wetter und Nutzungskenngrößen den vorgegebenen Variablen

gamma	-	Raumkenngröße γ
tau	-	Raumkenngröße τ
TA_m	-	Mittelwert der Außentemperatur $\bar{\vartheta}_a$
I_m	-	Mittelwert der solaren Einstrahlung \bar{I}
dTA	-	Tagesamplitude der Außenlufttemperatur $\Delta\vartheta_a$
dI	-	Tagesamplitude der solaren Einstrahlung ΔI
Anz.Pers	-	Anzahl der Personen je Belegungsphase n_{Pers}
Typ.H	-	Typ der Heizung H
Dauer.Belegung	-	Gesamtdauer der Belegung Δt_{Bel} über ein Quartal hinweg

zugeordnet. Python-Code L.3 zeigt dies für den Testraum aus Abschnitt 6.2 an den Standorten Chemnitz und Berlin.

```
#Raumkenngrößen des Bewertungsraumes und Wetterkenngrößen für den Standort
  Chemnitz
gamma = 0.166
tau = 160.47
TA_m = 0.75
I_m = 17.2
dTA = 1.08
dI = 30.6
Anz.Pers = 2
Typ.H = 1 #Radiatorheizung
Dauer.Belegung = 259200

#Standort Berlin
TA_m_berlin = -1.76
I_m_berlin = 15
dTA_berlin = 1.27
dI_berlin = 33.9
Typ.FBH = 2 #Fussbodenheizung
```

Python-Code L.3 *Angabe der notwendigen Kenngrößen*

Nun werden die unabhängigen Größen (Raum,- Wetter und Nutzungskenngröße) in einer Matrix zusammengefasst und je nach Regler mit dem entsprechenden `scaler`-Modell skaliert. Dies ist in Python-Code L.4 gezeigt.

```

Xdata_Param = np.column_stack((gamma, tau, TA_m, I_m, dTA, dI, Typ_H, Anz_Pers
))
Xdata_Param_FBH = np.column_stack((gamma, tau, TA_m_berlin, I_m_berlin,
dTA_berlin, dI_berlin, Typ_FBH, Anz_Pers))

Xdata_Ttol = xscaler_model_Ttol.transform(Xdata_Param)
Xdata_k = xscaler_model_k.transform(Xdata_Param)
Xdata_p1 = xscaler_model_p1.transform(Xdata_Param)
Xdata_p2 = xscaler_model_p2.transform(Xdata_Param)
#Bewertungsraum mit Fussbodenheizung
Xdata_p1_FBH = xscaler_model_p1.transform(Xdata_Param_FBH)
Xdata_p2_FBH = xscaler_model_p2.transform(Xdata_Param_FBH)

```

Python-Code L.4 Zusammenfassen der unabhängigen Größen in einer Matrix und Skalieren dieser je nach Reglertyp

Anschließend werden die Reglerparameter mit dem Befehl `predict()` vorhergesagt und auf der Konsole mit dem Befehl `print()` ausgegeben (Python-Code L.5).

```

y_pred_Ttol = loaded_model_Ttol.predict(Xdata_Ttol)
print("y_pred_Ttol: ", y_pred_Ttol)

y_pred_k = loaded_model_k.predict(Xdata_k)
y_pred_k_nonscaled = yscaler_model_k.inverse_transform(y_pred_k.reshape(-1,1))
print("y_pred_k: ", y_pred_k_nonscaled)

y_pred_p1= loaded_model_p1.predict(Xdata_p1)
y_pred_p1_nonscaled = yscaler_model_p1.inverse_transform(y_pred_p1.reshape
(-1,1))
print("y_pred_p1: ", y_pred_p1_nonscaled)
y_pred_p2= loaded_model_p2.predict(Xdata_p2)
y_pred_p2_nonscaled = yscaler_model_p2.inverse_transform(y_pred_p2.reshape
(-1,1))
print("y_pred_p2: ", y_pred_p2_nonscaled)

y_pred_p1_FBH= loaded_model_p1.predict(Xdata_p1_FBH)
y_pred_p1_nonscaled_FBH = yscaler_model_p1.inverse_transform(y_pred_p1_FBH.
reshape(-1,1))
print("y_pred_p1_FBH: ", y_pred_p1_nonscaled_FBH)
y_pred_p2_FBH= loaded_model_p2.predict(Xdata_p2_FBH)
y_pred_p2_nonscaled_FBH = yscaler_model_p2.inverse_transform(y_pred_p2_FBH.
reshape(-1,1))
print("y_pred_p2_FBH: ", y_pred_p2_nonscaled_FBH)

#Ausgabe:
#y_pred_Ttol: 0.56578406
#y_pred_k: 889.85517335
#y_pred_p1: 1.29824783
#y_pred_p2: 519.56176507
#y_pred_p1_FBH: 1.17116718
#y_pred_p2_FBH: 742.18673303

```

Python-Code L.5 Vorhersage und Ausgabe der Reglerparameter

Nun werden die Werte der Güte der Regler vorhergesagt. Dazu müssen für jeden Regler Vektoren, die die unabhängigen Größen zusammenfassen, angelegt werden. Diese Vektoren enthalten für alle Regler den jeweils aus dem KNN ermittelten Reglerparameter sowie die Raum-, Wetter-, und Nutzungskenngrößen. Für den Zweipunkt-, den P- sowie den vs-Regler sind die Vektoren in Python-Code L.6 angegeben. Anschließend werden die Elemente der Vektoren zwischen Null und Eins skaliert. Dazu werden die zuvor geladenen `scaler`-Modelle genutzt. Dies wird ebenfalls in Python-Code L.6 gezeigt.

```
Xdata_cost_2pkt = np.column_stack((y_pred_Ttol, gamma, tau, TA_m, I_m, dTA, dI,
    Anz_Pers, Dauer_Belegung))
Xdata_cost_p = np.column_stack((y_pred_k_nonscaled, gamma, tau, TA_m, I_m, dTA,
    dI, Anz_Pers, Dauer_Belegung))
Xdata_cost_vs = np.column_stack((y_pred_p1_nonscaled, y_pred_p2_nonscaled, gamma
    , tau, TA_m, I_m, dTA, dI, Anz_Pers, Dauer_Belegung))
Xdata_cost_vs_FBH = np.column_stack((y_pred_p1_nonscaled_FBH,
    y_pred_p2_nonscaled_FBH, gamma, tau, TA_m_berlin, I_m_berlin, dTA_berlin,
    dI_berlin, Anz_Pers, Dauer_Belegung))

Xdata_2pkt_cost = scaler_model_2pkt_cost.transform(Xdata_cost_2pkt)
Xdata_p_cost = scaler_model_p_cost.transform(Xdata_cost_p)
Xdata_vs_cost = scaler_model_vs_cost.transform(Xdata_cost_vs)
Xdata_vs_cost_FBH = scaler_model_vs_cost.transform(Xdata_cost_vs_FBH)
```

Python-Code L.6 *Anlegen und Skalieren der Vektoren mit den unabhängigen Variablen zur Vorhersage der Reglergüte*

Abschließend erfolgt die Vorhersage der Reglergüte, indem die entsprechenden KNN aus dem Dateisystem geladen werden und die Vektoren mit den unabhängigen Größen an die `predict()`-Methode der KNN übergeben werden. Mit dem `print()`-Befehl werden die Gütewerte ausgegeben (Python-Code L.7).

```
cost_pred_2pkt = loaded_model_2pkt_cost.predict(Xdata_2pkt_cost)
print("y_pred_2pkt_cost: ", cost_pred_2pkt)

cost_pred_p = loaded_model_p_cost.predict(Xdata_p_cost)
print("y_pred_p_cost: ", cost_pred_p)

cost_pred_vs = loaded_model_vs_cost.predict(Xdata_vs_cost)
print("y_pred_vs_cost: ", cost_pred_vs)

cost_pred_vs_FBH = loaded_model_vs_cost.predict(Xdata_vs_cost_FBH)
print("y_pred_vs_cost: ", cost_pred_vs_FBH)

#Ausgabe:
#y_pred_2pkt_cost:  10.18144809
#y_pred_p_cost:    9.57277813
#y_pred_vs_cost:   13.43043652
#y_pred_vs_cost_FBH: 10.25870319
```

Python-Code L.7 *Vorhersage der Reglergüte*

Nun muss der Regler mit dem geringsten Gütewert ausgewählt werden. Im Beispiel ist dies der P-Regler mit einer Güte von $y_{\text{pred_p_cost}} = 9,57$. Der dazugehörige optimale Reglerparameter kann Python-Code L.5 entnommen werden. Er beträgt $y_{\text{pred_k}} = 889,9$.