

Netzdienlicher Betrieb von Nichtwohngebäuden durch modellgestützte prädiktive Regelung des Gebäudeenergiesystems

Von der Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik der
Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

vorgelegt von

Christian Igor Karczewski

aus Schwerte

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. Konstantinos Stergiaropoulos

Mitberichter:

Prof. Dr.-Ing. Peter Radgen

Tag der Einreichung:

21.02.2024

Tag der mündlichen Prüfung:

16.09.2024



Universität Stuttgart



Institut für Gebäudeenergetik,
Thermotechnik und Energiespeicherung

ISBN – 978 – 3 – 9823067 – 3 – 5

D93

Universität Stuttgart, **IGTE**
Institut für Gebäudeenergetik,
Thermotechnik und Energiespeicherung
Pfaffenwaldring 35
70569 Stuttgart

Tel.: 0711 / 685 - 62085
Fax.: 0711 / 685 - 52085

Stuttgart, September 2024

Vorwort

Die vorliegende Dissertation wurde während meiner Doktorandenzeit am Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) der Universität Stuttgart verfasst. Finanzielle Unterstützung erhielt ich durch ein Promotionsstipendium der Graduierten- und Forschungsschule "Effiziente Energienutzung" Stuttgart (GREES), wofür ich mich herzlich bedanke. Besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Konstantinos Stergiaropoulos für die Möglichkeit, meine Promotion am IGTE durchzuführen, für seine allzeit offene Tür sowie für die Freiheit, meine Ideen und Forschungsergebnisse auf Konferenzen zu präsentieren und mich mit der Fachwelt auszutauschen. Der Zusammenhalt des gesamten IGTE-Teams hat es mir ermöglicht, trotz widriger externer Einflüsse durch Kontaktbeschränkungen aufgrund der Corona-Pandemie, in einer kollegialen und produktiven Atmosphäre am IGTE zu arbeiten.

Ein großer Dank geht an den Vorstand der Graduiertenschule GREES Prof. Dr.-Ing. Peter Radgen für meine Aufnahme in die Graduiertenschule, die allzeitige Hilfsbereitschaft und vor allem für die Übernahme des Mitberichts.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Tobias Henzler für die direkte fachliche Betreuung, das Korrekturlesen der Dissertation und zahlreicher weiterer Texte. Seine Korrekturhinweise waren stets hilfreich, wofür ich sehr dankbar bin.

Ein großer Dank gilt meinem Bürokollegen Tim Jourdan für die unzähligen Stunden intensiver fachlicher Diskussion und das Korrekturlesen meiner Dissertation. Ebenso möchte ich Paula Wenzel für den regelmäßigen Austausch zum Fortschritt unserer Dissertationen danken. Die gegenseitige Unterstützung und Hilfe haben dazu beigetragen, die wesentlichen Ziele im Auge zu behalten. Ein besonderer Dank geht auch an Michael Hörner und Julian Bischof vom Institut für Wohnen und Umwelt in Darmstadt für ihre Forschungsdatenbank zum Nichtwohngebäudebestand, die ein zentrales Fundament meiner Arbeit bildet.

Zudem möchte ich meinen Studenten danken, da deren Arbeiten erheblich zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen haben: Hossein Rahmati für seinen großen Beitrag zum Simulationsmodell, Sebastian Wimmer für die Implementierung der Parameteridentifikation sowie Elias Almojahed und Mashhur Ghani für die umfangreichen Vorarbeiten zu den finalen Berechnungen.

Der größte Dank gebührt meiner Familie und meinen Freunden. Deren Unterstützung, Motivation und auch Verständnis haben mir den nötigen Rückhalt gegeben, um diese Arbeit zu verfassen.

Ditzingen, im September 2024

Christian Karczewski

Kurzfassung

Die zunehmende Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen und die Elektrifizierung des Wärmesektors führen im deutschen Stromnetz zu einem steigenden Bedarf an Lastmanagement. Unter der Prämisse, dass die Behaglichkeitskriterien eingehalten werden, besteht durch die Nutzung der Toleranzbänder der raumklimatischen Sollwerte sowie von thermischen Energiespeichern Potential zum netzdienlichen Betrieb der heiz- und raumluftechnischen Anlagen in Gebäuden.

Vor diesem Hintergrund werden in dieser Arbeit zwei Forschungsfragen bearbeitet. Die erste Frage befasst sich mit dem Potential zur Lastflexibilisierung der Anlagentechnik deutscher Nichtwohngebäude. Hierfür wird anhand des in DIN V 18599 beschriebenen Bilanzierungsverfahrens der monatliche Energiebedarf typischer Nichtwohngebäude bestimmt und darauf aufbauend die Leistungsreserven der elektrischen Wärme- und Kälteerzeuger. Die Betrachtung umfasst 33 Typgebäude mit drei Baualtersklassen und elf Gebäudehauptfunktionen, die aus der ersten statistischen Erfassung des deutschen Nichtwohngebäudebestands resultieren. Im Dezember, dem Monat mit der höchsten Heizlast, könnten Wärmepumpen die Leistungsaufnahme, bezogen auf die monatlich gemittelte Last, kurzfristig um 41% erhöhen. Im Juli, dem Monat mit der höchsten Kühllast, könnte die Leistungsaufnahme von Kälteanlagen kurzfristig um 118% erhöht werden.

Zur Beantwortung der zweiten Forschungsfrage wird ein flexibilitätsgesteuerter Regelungsansatz für einen netzdienlichen Gebäudebetrieb entwickelt und mit dem gängigsten Ansatz zur Lastflexibilisierung, der kostenoptimalen Regelung, verglichen. Durch die Prädiktion zweier Grenzfälle, dem Aufheizen und Abkühlen des Gebäudes, wird ein Bereich ermittelt, in dem die Anlagentechnik flexibel betrieben werden kann. Der tatsächliche Betriebspunkt wird in Abhängigkeit von einem Netzsignal gewählt. Die entwickelte Regelstrategie wird anhand typischer Nichtwohngebäude untersucht, wobei das wärmetechnische Verhalten des Gebäudes zum einen in vereinfachter Form mit Widerstands-Kapazitäts-Netzwerken und zum anderen anhand eines detaillierten Gebäude- und Anlagenmodells abgebildet wird.

Durch eine Lastverschiebung in Zeiten niedriger Strompreise, können im Heizfall bei einem kostenoptimalen Betrieb der Anlagentechnik 20% der Kosten eingespart werden, trotz eines energetischen Mehraufwands von 6,5%. Die flexibilitätsgesteuerte Regelung stellt eine größere negative Flexibilität für das Stromnetz bereit und ermöglicht während der Heizperiode eine Absenkung der Wärmepumpenleistung um 14% über 24 Stunden und während der Kühlperiode um 8%. Dieser Bereitschaftsbetrieb bedingt höhere oder niedrigere Raumtemperaturen im Heiz- bzw. Kühlfall, was zu einem energetischen Mehraufwand von rund einem Drittel führt. Dieser Mehraufwand könnte netzseitig aus dem nicht genutzten Überschussstrom gedeckt werden. Seitens der Gebäudebetreiber ist jedoch davon auszugehen, dass diese nur dann zu einem netzdienlichen Betrieb der Anlagentechnik bereit sind, wenn ihnen aus dem energetischen Mehraufwand kein finanzieller Nachteil entsteht.

Abstract

The increasing electricity generation from renewable energies and the electrification of the heating sector lead to a rising demand for load management in the German electricity grid. Upon the condition, that comfort criteria are met, there is potential for a grid-friendly operation of the heating and ventilation systems in buildings by utilising the tolerance bands of the indoor climate setpoints and thermal energy storage systems.

Against this background, two research questions are addressed in this thesis. The first question is to determine the potential for load flexibilisation of the technical systems of German non-residential buildings. For this purpose, the monthly energy demand of typical non-residential buildings is determined using the balancing method described in DIN V 18599. Based on this, the power reserves of the electrical heating and cooling generators are determined. The analysis comprises 33 typical buildings with three construction periods and eleven main building functions, which result from the first statistical recording of the German non-residential building stock. In December, the month with the highest heating load, heat pumps could increase their electrical load in relation to the monthly average load by 41% in the short term. In July, the month with the highest cooling load, the electrical load of the cold generators could be increased by 118% in the short term.

As part of the second research question, a flexibility-driven control approach for grid-friendly building operation is developed and compared with the most common approach for load flexibilisation, the cost-optimal control. By predicting two limiting cases, the heating up and cooling down of the building, a range is determined within which the building's technical equipment can be operated flexibly. The actual operating point is selected as a function of a grid signal. The control strategy is investigated using typical non-residential buildings, whereby the thermal behaviour of the building is described by a simplified form using resistance-capacity networks on the one hand and by a detailed building and system model on the other.

By shifting the heating load to periods of low electricity prices, 20% of the costs can be saved with cost-optimised operation of the building technology, despite an increase in energy demand of 6,5%. The flexibility-driven control strategy provides greater negative flexibility for the electricity grid and enables the heat pump electrical load to be reduced by 14% over 24 hours during the heating period. The corresponding load reduction possibility of the cold generator is 8% during the cooling period. The flexibility-driven control results in a standby operation which requires higher or lower room temperatures when heating or cooling, leading to an additional effort of one third. This additional effort could be covered by the grid from the surplus of renewable electricity generation that would be curtailed. However, it can be assumed that building operators will only be motivated to operate the building technology in a grid-friendly manner if they do not suffer any financial disadvantages as a result of the additional energy expenses.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	IV
Nomenklatur	VIII
1 Einleitung	1
2 Stand des Wissens und Forschungsbedarf	4
2.1 Die Rolle energieflexibler Gebäude im deutschen Energiesystem	4
2.2 Regelungsansätze zur Flexibilisierung von Lasten in Gebäuden.....	7
2.3 Forschungsbedarf.....	10
3 Grundlagenteil.....	12
3.1 Modellierung des wärmetechnischen Verhaltens von Gebäuden und Anlagen ...	12
3.1.1 Energie.....	12
3.1.2 Wärmeübertragung	13
3.1.3 Modellbildungsansätze	14
3.1.4 Monatsbilanzverfahren zur energetischen Bewertung eines Gebäudes	15
3.1.5 Elektrisches Analogiemodell.....	17
3.1.6 Elektrische Wärme- und Kälteerzeugung.....	20
3.1.7 Unsicherheiten in der Modellierung und Bewertung von Gebäuden	21
3.2 Energiewirtschaft	24
3.2.1 Aufbau des deutschen Stromnetzes	24
3.2.2 Auswirkungen der Dekarbonisierung auf das Stromnetz.....	25
3.2.3 Mechanismus der Strompreisbildung	28
3.3 Energiemanagement in Gebäuden durch den Einsatz von Regelungstechnik	29
3.3.1 Hierarchischer Aufbau von Gebäudeenergiemanagementsystemen	30
3.3.2 Prinzipieller Aufbau eines Regelkreises.....	31
3.3.3 Modellgestützte prädiktive Regelung.....	32
3.3.4 Darstellung dynamischer Systeme	35

3.3.5 Zustandsbeobachtung	36
4 Methodisches Vorgehen.....	38
4.1 Analyse des Nichtwohngebäudebestands	38
4.1.1 Struktur des Nichtwohngebäudebestands.....	39
4.1.2 Bauphysikalische Eigenschaften des Nichtwohngebäudebestands	39
4.1.3 Anlagentechnik.....	41
4.1.4 Nutzung	43
4.2 Formulierung des Regelungsalgorithmus	45
4.2.1 Anforderungsanalyse und Regelungsaufgabe	45
4.2.2 Definition der Regel- und Stellgrößen	47
4.2.3 Reglerinternes Gebäudemodell	48
4.2.4 Energieoptimale Regelung	51
4.2.5 Kostenoptimale Regelung	52
4.2.6 Flexible Regelung.....	53
4.3 Vereinfachtes Modell zur Simulation des Nichtwohngebäudebestands.....	56
4.3.1 Bestimmung des monatlichen Energiebedarfs anhand von Mehrzonenmodellen	56
4.3.2 Simulation des Lastverhaltens deutscher Nichtwohngebäude mit Energieflussregelung	58
4.4 Detailliertes Modell zur Gebäude- und Anlagenmodellsimulation	62
4.4.1 Gruppenbüro.....	62
4.4.2 Anlagen- und Automationsschema.....	63
4.4.3 Wärme- und Kälteerzeuger.....	66
4.4.4 Programmtechnische Umsetzung	68
5 Ergebnisse und Analyse.....	70
5.1 Energiebedarf deutscher Nichtwohngebäude.....	70
5.1.1 Nutzenergiebedarf	70

5.1.2	Endenergiebedarf.....	74
5.1.3	Flexibilisierungspotential	78
5.1.4	Zwischenfazit	80
5.2	Lastverhalten des Nichtwohngebäudebestands mit prädiktiv geregelter Anlagentechnik.....	81
5.2.1	Randbedingungen	81
5.2.2	Energieoptimaler Betrieb.....	82
5.2.3	Netzdienlicher Betrieb.....	87
5.2.4	Diskussion	95
5.3	Lastverhalten eines Modellraums mit prädiktiv geregelter Anlagentechnik	97
5.3.1	Energieoptimaler Betrieb.....	97
5.3.2	Netzdienlicher Betrieb.....	101
5.3.3	Diskussion	106
6	Zusammenfassung und Ausblick	108
7	Literaturverzeichnis.....	112
8	Anhang	122
8.1	Nutzungsanteile der Typgebäude.....	122
8.2	Nutzungsrandbedingungen für Nichtwohngebäude	124
8.3	Detaillierte gebäudespezifische Eigenschaften des Nichtwohngebäudebestands	127
8.4	Detaillierte anlagentechnische Eigenschaften des Nichtwohngebäudebestands	131
8.4.1	Aufwandszahlen	131
8.4.2	Gebäudegeometrie	132
8.4.3	Struktur der Wärmeerzeugung	133
8.5	Modell der Außenwand.....	133
8.6	Flächenverhältnis zwischen äußerer Gebäudehülle und inneren Bauteilen.....	135
8.7	Detaillierte Gebäudedaten – TRNSYS Modell	136
8.8	Parameteridentifikation des reglerinternen Gebäudemodells	137

8.9	Eigenschaften der anlagentechnischen Komponenten.....	138
8.10	Erstellung des Preissignals zur Lastflexibilisierung.....	141
8.11	Steuerung der thermischen Leistung der Wärme- und Kälteerzeuger	143