

# **Flexibilisierungspotenziale von raumlufotechnischen Anlagen zur netzdienlichen Lastverschiebung**

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

vorgelegt von

**Matthias Eydner**

aus Albstadt

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. Konstantinos Stergiaropoulos

Mitberichter:

Prof. Dr.-Ing. Peter Radgen

Tag der Einreichung:

23.05.2022

Tag der mündlichen Prüfung:

16.02.2023



**Universität Stuttgart**



Institut für Gebäudeenergetik,  
Thermotechnik und Energiespeicherung

ISBN – 978 – 3 – 9823067 – 1 – 1

D93

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

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

Stuttgart, Februar 2023

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand am Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) der Universität Stuttgart. Gefördert wurde die Arbeit durch ein Promotionsstipendium der Graduierten- und Forschungsschule Effiziente Energienutzung Stuttgart (GREES), wofür ich mich recht herzlich bedanken möchte.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Konstantinos Stergiaropoulos für die Betreuung meiner Arbeit. Die stete Bereitschaft zur fachlichen Diskussion und die hilfreichen Vorschläge haben wesentlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen. Zudem danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Radgen für die Unterstützung während des Promotionsstipendiums, dem Interesse an dieser Arbeit und der Übernahme des Mitberichts.

Ebenfalls möchte ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Tobias Henzler bedanken, der mir während der Anfertigung dieser Arbeit als Mentor mit konstruktiver und fachlicher Unterstützung zur Seite stand und viele hilfreiche Hinweise gegeben hat. Ein besonderer Dank gilt Martina Ellinger, die mir bei offenen Fragen immer mit Rat und Tat zur Seite stand, viele organisatorische Dinge für mich auf unkomplizierte Art abgewickelt und schließlich bei der Veröffentlichung dieser Arbeit mitgeholfen hat.

Ich bedanke mich ganz herzlich bei allen KollegInnen und Studierenden des IGTE sowie der HLK Stuttgart GmbH für die schöne Zeit und die angenehme Zusammenarbeit.

Mein herzlicher Dank gilt meinen Eltern sowie meinem Bruder, die immer ein großer Rückhalt und Ratgeber waren und mich während des Studiums unterstützt haben. Schließlich möchte ich mich bei Youra für ihre motivierende, liebevolle und fürsorgliche Art bedanken sowie bei Lina für die angenehme Ablenkung in der Endphase.

Tübingen, im Februar 2023

Matthias Eydner

## Kurzfassung

Aufgrund des steigenden Anteils volatiler erneuerbarer Energieträger müssen insbesondere im Gebäudesektor alle Potenziale zur Flexibilisierung genutzt werden, um künftig eine sichere und stabile Stromversorgung zu gewährleisten. In dieser Arbeit werden Flexibilisierungspotenziale für die in Nichtwohngebäuden zahlreich eingesetzten RLT-Anlagen mittels thermisch-energetischer Simulation untersucht. Die Quantifizierung und energetische Bewertung der Flexibilisierungspotenziale erfolgt durch die Ableitung geeigneter Kennzahlen.

Für die Untersuchungen der raumseitigen Nutzenübergabe werden unterschiedliche RLT-Anlagenkonzepte im Referenzbetrieb (Nutzenanforderung) und flexiblen Betrieb verglichen. Hierbei werden Regel- und Betriebsstrategien eingesetzt, die sowohl eine bedarfsgerechte Raumluftkonditionierung als auch Sollwertänderungen der raumklimatischen Parameter im flexiblen Betrieb innerhalb eines für Nutzer behaglichen Bereichs erlauben. Eine Verschiebung thermischer Lasten im flexiblen Betrieb erfolgt somit durch eine Erhöhung bzw. Verringerung der Solltemperatur, wobei die Luft- bzw. Bauteilmasse des Gebäudes über unterschiedliche Zeiträume hinweg als Speicher genutzt wird (Zuschaltung), um im nachfolgenden Zeitraum eine Reduktion der erforderlichen thermischen Leistung zu ermöglichen (Abschaltung). Die Potenziale werden sowohl für charakteristische Typtage der Heiz- und Kühlperiode, welche unterschiedliche klimatische Bedingungen repräsentieren, als auch unterschiedlicher Gebäudeeigenschaften untersucht. Insbesondere die Gebäudeschwere stellt hierbei eine bedeutende Eigenschaft dar, da diese die Speicherfähigkeit der Gebäudemasse definiert. Mit einer leichten Gebäudehülle kann innerhalb desselben Tages ein großer Anteil der zugeschalteten Energie wiederum abgeschaltet werden, wohingegen mit der schweren Gebäudehülle das Abschaltpotenzial über einen längerfristigen Zeitraum (mehrere Tage) vorliegt. Vergleichend zum Nur-Luft-System wird ein komplementäres System mit thermischer Bauteilaktivierung untersucht, welches durch in den Betonkern eingebettete und mit Wasser durchströmte Rohre eine direkte Aktivierung der Gebäudemasse als Speicher im flexiblen Betrieb ermöglicht. Darüber hinaus wird die Flexibilisierung von stofflichen Lasten und Feuchtelasten untersucht, wobei die CO<sub>2</sub>-Konzentration durch zusätzliche Außenluftzufuhr zeitweise abgesenkt oder der Feuchtegehalt bei der Luftkonditionierung variiert wird. Im Vergleich zu den thermischen Lasten sind die Potenziale hierbei wesentlich geringer.

Zudem werden die Potenziale für die Subsysteme Verteilung und Erzeugung unter Berücksichtigung der Stromnetzauslastung untersucht. Hierfür wird ein Modellansatz zur prädiktiven Lastplanung entwickelt, womit die Flexibilisierung der Wärmebereitstellung durch einen Wärmespeicher ermöglicht wird. Der Speicher wird hierfür in Abhängigkeit eines variablen Netz-Signals (Stromkosten und CO<sub>2</sub>-Emissionen) anhand eines Vorhersage- und Optimierungsmodells zu geeigneten Zeitpunkten im Tagesverlauf beladen. Hierzu wird eine exergiebasierte Regelstrategie eingesetzt, welche das transiente thermische Verhalten im Speicher berücksichtigt und durch die Bewertung der nutzbaren Energie eine effektive Lastverschiebung im flexiblen Betrieb ermöglicht. Der Modellansatz erlaubt durch die Speichernutzung im flexiblen Betrieb nicht nur die Verschiebung der elektrischen Leistungsaufnahme aus Zeiträumen mit hoher in Zeiträume mit niedriger Stromnetzauslastung, sondern ermöglicht zudem ein Potenzial für die Optimierung der Betriebsweise des Wärmeerzeugers sowie einer Reduzierung der Stromkosten bzw. CO<sub>2</sub>-Emissionen.

## Abstract

Due to the increasing share of volatile renewable energy generation in the grid, all flexibility potentials must be exploited, especially in the building sector, in order to ensure a reliable and stable electrical power supply in the near future. In this work, flexibility potentials for air handling units (AHU) commonly deployed in non-residential buildings are investigated by means of building energy simulation (BES). Relevant key performance indicators are introduced to quantify the flexibility potentials.

To investigate the potentials of air conditioning, different AHU concepts are compared in reference operation (occupant requirements) and in flexible operation. Control and operating strategies are applied, which allow both, demand-based room air conditioning as well as adjustment of the room climatic setpoint parameters during flexible operation, ensuring the thermal comfort of the occupants.

Thus, thermal loads are shifted in flexible operation by varying the setpoint temperatures, using the air and building mass as thermal storage over certain time durations (upward shifting) in order to allow a reduction of the required thermal power in the following time interval (downward shifting). The potentials are investigated for characteristic days of the heating and cooling period, representing different climatic conditions, and for different building characteristics. In this context, the heaviness of the building envelope is an important indicator, since it defines the storage capacity of the building mass. With a light building envelope, a large part of the stored energy can be shifted within a single day, while with the heavy building envelope the shifting potential exists over a longer period of time (several days). In comparison to the air-only-system, a complementary system with thermal component activation is examined, which provides high potentials for short-term activation of the building mass as thermal storage in flexible operation by embedded water flow pipes in the concrete core. In addition, the load shifting potentials of mechanical ventilation and air humidity are investigated, whereby the CO<sub>2</sub> concentration is temporarily lowered by supplying additional outdoor air and varying the air humidity during air conditioning. Compared to thermal load shifting, the flexibility potentials are significantly lower in these cases.

In a further step of the work, the potentials for thermal power distribution and generation are investigated taking into account the electricity grid utilization. For this purpose, a methodology for predictive scheduling of the heat generator is developed to examine the flexibility potentials of heating supply via thermal energy storage. Based on a prediction and optimization model, the thermal storage tank is charged at appropriate time durations during the day according to a varying grid signal (electricity costs and CO<sub>2</sub>-emissions). This is realized by an exergy-based MPC strategy, which accounts for the transient thermal behavior within the storage tank and allows effective load shifting during flexible operation by considering the usable energy. The methodology not only allows to shift electrical loads from time intervals with high to intervals with low grid utilization by using the thermal storage in flexible operation, but is also capable of optimizing the operational characteristics of the heat generator as well as reducing of electricity costs or CO<sub>2</sub> emissions.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>IV</b>
<b>Nomenklatur.....</b>	<b>VII</b>
<b>Abkürzungen.....</b>	<b>X</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Hintergrund und Motivation .....	1
1.2 Stand von Wissenschaft und Technik.....	3
1.2.1 Bedarfsentwicklung.....	3
1.2.2 Lastabfuhr.....	4
1.2.3 Flexibilität und Lastmanagement.....	7
1.2.4 Berücksichtigung der Stromnetzauslastung und Netzdienlichkeit.....	11
1.2.5 Simulationsmethoden .....	12
1.3 Zielsetzung und Fazit .....	16
<b>2 Modellbeschreibung.....</b>	<b>17</b>
2.1 Wärmeströme aufgrund von Konvektion und Strahlung im Multizonenmodell .....	17
2.1.1 Thermisch-energetische Bilanzierung .....	17
2.1.2 Instationäre Wärmeleitung außenorientierter Bauteile.....	18
2.2 Modellierung luftfremder Stoffe und der Luftfeuchte .....	19
2.3 Modellierung von Luftströmungen .....	19
2.4 RLT-Anlagenmodelle .....	20
2.4.1 Nutzenübergabe .....	20
2.4.2 Nur-Luft-System.....	20
2.4.3 Komplementärsystem .....	22
2.4.4 Luftzustandsänderungen.....	22
2.4.5 Thermische Bauteilaktivierung .....	25
2.4.6 Luftführung und -transport.....	25
2.5 Modellierung der Verteilung und Erzeugung.....	25
2.5.1 Speicherung.....	26
2.5.2 Wärmeerzeugung (Wärmepumpe).....	27
<b>3 Flexibilisierung .....</b>	<b>29</b>
3.1 Grundlagen und Kennzahlen.....	29
3.2 Energetische Bewertung einer Flexibilisierung .....	30
3.3 Potenziale .....	32
3.3.1 Bewertung der Nutzenübergabe .....	32
3.3.2 Bewertung eines thermischen Schichtspeichers .....	35
3.3.3 Bewertung der zeitlich veränderlichen Stromnetzauslastung .....	37
3.4 Regel- und Betriebsstrategien für die Nutzenübergabe .....	40

3.4.1	Abfuhr von thermischen Lasten.....	41
3.4.2	Abfuhr von stofflichen Lasten und Feuchtelasten.....	46
3.5	Modellansatz zur Flexibilisierung der Subsysteme Verteilung und Erzeugung ....	47
3.5.1	Modellübersicht.....	47
3.5.2	Regelungsalgorithmus zur Flexibilisierung der Verteilung und Erzeugung .....	48
3.5.3	Modelleingaben .....	52
<b>4</b>	<b>Randbedingungen und Simulationsvarianten .....</b>	<b>58</b>
4.1	Gebäudemodell und Varianten.....	58
4.1.1	Zonierung des betrachteten Modellgebäudes .....	58
4.1.2	Eigenschaften des Gebäudemodells.....	58
4.1.3	Wetterdaten und klimatische Außenbedingungen .....	59
4.1.4	Gebäudenutzung und raumklimatische Sollvorgaben .....	60
4.1.5	Solare Einstrahlung.....	61
4.2	Auslegung der RLT-Anlagenkonzeptionen .....	62
4.2.1	Heiz- und Kühllasten.....	62
4.2.2	Bemessung von Zulufttemperatur und Zuluftstrom.....	62
4.2.3	RLT-Gerätedaten und Betriebsweise .....	63
4.2.4	Aufbau des Luftverteilnetzes .....	64
4.2.5	Aufbau und Betriebsweise der TBA .....	65
4.2.6	Speicher- und Verteilsystem .....	66
4.2.7	Wärmepumpe zur Wärmeerzeugung .....	67
4.3	Aufbau des Knotenmodells .....	68
4.4	Datengrundlage des Prädiktionsmodells .....	68
4.5	Charakteristische Typtage.....	70
<b>5</b>	<b>Flexibilisierungspotenziale bei der Nutzenübergabe .....</b>	<b>71</b>
5.1	Zu- und Abschaltzeiten im flexiblen Betrieb.....	71
5.2	Referenzbetrieb .....	72
5.2.1	Dezentrales Nur-Luft-System.....	72
5.2.2	Zentrales Nur-Luft-System .....	82
5.2.3	Komplementärsystem .....	87
5.3	Flexibilisierung von thermischen Lasten.....	90
5.3.1	Flexibler Betrieb des Nur-Luft-Systems.....	90
5.3.2	Einfluss der Gebäudeschwere .....	104
5.3.3	Einfluss des Dämmstandards .....	109
5.4	Flexibler Betrieb des Komplementärsystems.....	110
5.5	Flexibilisierung der Feuchteconditionierung .....	112
5.6	Flexibilisierung von stofflichen Lasten .....	114
5.7	Untersuchung der thermischen und stofflichen Behaglichkeit.....	116

<b>6</b>	<b>Flexibilisierungspotenziale bei der Verteilung und Erzeugung.....</b>	<b>121</b>
6.1	Genauigkeit des Vorhersagemodells.....	121
6.2	Lastgang im flexiblen Betrieb .....	123
6.2.1	Einfluss des Wärmeerzeugers .....	127
6.2.2	Einfluss der Speichergröße .....	128
6.3	Berücksichtigung der CO <sub>2</sub> -Emission als Netz-Signal .....	130
6.4	Jahresbetrachtung des flexiblen Betriebs.....	132
6.4.1	Exergieanalyse und Heizenergieaufwand .....	132
6.4.2	Flexibilität und Strombedarf .....	134
6.4.3	Stromkosten und energiebedingte CO <sub>2</sub> -Emissionen .....	137
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>140</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>146</b>
<b>9</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>160</b>