

BestMasters

Vanessa Hagedorn

# Wohnquartiere mit einem Niedrig- Temperatur-Wärmenetz

Eine modellgestützte Analyse  
zentraler und dezentraler  
Energieversorgungssysteme



Springer Spektrum

---

# BestMasters

Mit „**BestMasters**“ zeichnet Springer die besten Masterarbeiten aus, die an renommierten Hochschulen in Deutschland, Österreich und der Schweiz entstanden sind. Die mit Höchstnote ausgezeichneten Arbeiten wurden durch Gutachter zur Veröffentlichung empfohlen und behandeln aktuelle Themen aus unterschiedlichen Fachgebieten der Naturwissenschaften, Psychologie, Technik und Wirtschaftswissenschaften. Die Reihe wendet sich an Praktiker und Wissenschaftler gleichermaßen und soll insbesondere auch Nachwuchswissenschaftlern Orientierung geben.

Springer awards “**BestMasters**” to the best master’s theses which have been completed at renowned Universities in Germany, Austria, and Switzerland. The studies received highest marks and were recommended for publication by supervisors. They address current issues from various fields of research in natural sciences, psychology, technology, and economics. The series addresses practitioners as well as scientists and, in particular, offers guidance for early stage researchers.

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/13198>

---

Vanessa Hagedorn

# Wohnquartiere mit einem Niedrig- Temperatur-Wärmenetz

Eine modellgestützte Analyse  
zentraler und dezentraler  
Energieversorgungssysteme

Mit einem Geleitwort von  
Herrn Prof. Dr. Russell McKenna

 Springer Spektrum

Vanessa Hagedorn  
Rottweil, Deutschland

ISSN 2625-3577

ISSN 2625-3615 (electronic)

BestMasters

ISBN 978-3-658-25992-1

ISBN 978-3-658-25993-8 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-658-25993-8>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Spektrum

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2019

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer Spektrum ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Für meine Mutter,  
welche immer an mich glaubt und  
mir stets den Rücken freihält.

## **Danksagung**

Ich möchte mich hiermit bei Prof. Dr. Russell McKenna für seine hervorragende Betreuung der Masterarbeit herzlichst bedanken. Durch seine Unterstützung und Anleitung habe ich im Laufe der Masterarbeit viel lernen können.

Auch geht mein Dank an die Kollegen des Lehrstuhls für Energiewirtschaft des Karlsruher Instituts für Technologie für Ihre Unterstützung und anregenden Diskussionen.

Gerne möchte ich mich zudem bei den Stadtwerken Karlsruhe und den Stadtwerken Böblingen für die zur Verfügung gestellten Informationen und den unkomplizierten Austausch bedanken.

Ebenfalls gilt mein Dank meiner Familie für ihren Rückhalt und ihre Ermutigung.

Abschließend möchte ich mich bei meinem Freund bedanken, der mir während des Verfassens stets mit Tipps und aufmunternden Worten unterstützend zur Seite stand.

## Geleitwort

Die vorliegende Arbeit wurde im Wintersemester 2017/2018 im Rahmen des Masterstudiengangs für Wirtschaftsingenieurwesen am Lehrstuhl für Energiewirtschaft des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) unter meiner Betreuung durchgeführt.

In ihrer Masterarbeit adressierte Frau Hagedorn eine wichtige Thematik im Rahmen der Energiewende, nämlich die Dekarbonisierung der Quartierswärmeversorgung durch effizientere Technologien und die Integration erneuerbarer Wärmequellen. Der Ausbau der Erneuerbaren Energietechniken erfolgt weitgehend dezentral und Investitionen werden vor allem von Privatpersonen, Landwirten und Energiegenossenschaften getätigt. Diese Akteure investieren überwiegend in stromerzeugende Technologien, welche die sogenannte Stromwende stark vorantreiben und dazu führen, dass aktuell etwa 36% des deutschen Bruttostromverbrauchs aus erneuerbaren Quellen stammt. Andererseits liegt die Wärmewende, also die Umstellung der Wärmeerzeugung auf erneuerbare Energiequellen, mit aktuell etwa 13% des deutschen Wärmeverbrauchs aus erneuerbaren Quellen, weit dahinter. Eine zentrale daraus resultierende Frage, der in dieser Arbeit nachgegangen wird, ist wie die Kombination zentraler und dezentraler auf erneuerbaren Energiequellen basierten Quartiersenergieversorgungssysteme eine wirtschaftliche, umweltverträgliche und zuverlässige Option darstellen können.

In ihrer Masterarbeit erweiterte Frau Hagedorn ein bestehendes Optimierungsmodell auf Gebäudeebene dahingehend, dass einzelne Gebäude und deren Energieflüsse in einem Wohnquartier abgebildet werden können. Des Weiteren wurde das Modell ebenfalls um ein Niedrig-Temperatur-Wärmenetz von ihr erweitert, wobei das Modell in der Lage ist, sowohl dessen Betriebsweise als auch die Netzdimensionierung zu optimieren. Anhand des Modells können für städtebaulich unterschiedliche Wohnquartiere sowohl dezentrale als auch zentrale Energieversorgungssysteme hinsichtlich verschiedener Kriterien, wie beispielsweise ökonomische oder ökologische Aspekte miteinander verglichen werden. Die wissenschaftliche Innovation der Masterarbeit liegt in der Optimierung dezentraler Energiesysteme auf Gebäude- sowie Quartiersebene, die bisher in vielen Modellen nur getrennt umgesetzt wurden. Im Gegensatz zu anderen Veröffentlichungen, die sich mit dieser Thematik befassen, hat Frau Hagedorn sowohl eine detaillierte Modellierung durchgeführt als auch die entwickelte Methodik auf reale Daten angewandt und somit validiert. Dies macht die Arbeit im wissenschaftlichen Kontext einzigartig. Die Arbeit ist sowohl für Wissenschaftler als auch Entscheidungsträger im Bereich der Quartiersenergieversorgung relevant.

Prof. Dr. Russell McKenna

Lyngby, Dänemark, Januar 2019



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation	1
1.2	Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	1
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1	Definition Energieautarkie	3
2.2	Entwicklung des Wärmesektors	5
2.3	Wärmetransport durch Wärmenetze	7
2.3.1	Definition und Entwicklung von Wärmenetzen	7
2.3.2	Dimensionierung von Wärmenetzen	10
2.4	Einordnung der Arbeit in die Literatur	14
<b>3</b>	<b>Modellierung eines Wärmenetzes</b>	<b>19</b>
3.1	Ausgangsbasis des Modells zur Auslegung und Einsatzplanung	19
3.2	Zielsetzung der Modellerweiterung um ein Wärmenetz	23
3.3	Vorgehen zur Abbildung des Wärmenetzes	23
3.4	Dimensionierungsmöglichkeiten der Netzleitungen	24
3.4.1	Berechnung der Wärmeverluste pro Trassenmeter	26
3.4.2	Berechnung der Druckverluste pro Trassenmeter	27
3.5	Nennleistung & Einsatzplanung der Wärmeerzeugungsanlage	27
3.6	Bestimmung der Nennleistung & Einsatzplanung der Förderpumpe	30
3.6.1	Ermittlung der Förderhöhe und des Volumenstroms	30
3.6.2	Linearisierung der Nennleistung & Einsatzplanung	32
3.7	Zielfunktion des Modells	36
3.8	Validierung des modellierten Wärmenetzes	37
3.8.1	Modell Anpassungen für die Validierung	37
3.8.2	Ergebnisse der Validierung	40
<b>4</b>	<b>Anwendung des Modells zur Analyse der Versorgungskonfigurationen</b>	<b>47</b>
4.1	Betrachtete Siedlungstypen	47
4.1.1	Stadtteil Karlsruhe Rüppurr	49
4.1.2	Stadtteil Karlsruhe City Park	50
4.2	Verwendete Lastprofile	51
4.3	Betrachtete Szenarien	55
4.4	Umsetzung der Modellierung	57
<b>5</b>	<b>Auswertung der Ergebnisse der Modellanwendung</b>	<b>59</b>
5.1	Netzdimensionierung	59

---

5.2 Kapazitäten und Betriebsweisen	65
5.3 Unterschiede der zentralen und dezentralen Quartierslösungen	72
5.3.1 Ökologische Aspekte	72
5.3.2 Autarkiegrade	74
5.3.3 Ökonomische Aspekte	76
<b>6 Schlussbetrachtung</b>	<b>79</b>
6.1 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	79
6.2 Kritische Betrachtung	82
6.3 Ausblick	83
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>85</b>
<b>Anhang</b>	<b>91</b>

## Abkürzungen

Abkürzungen	Größe	Einheit
$A$	Wärmeerzeugungsanlage	[-]
$a$	Abstand zwischen verlegten Vor- und Rücklaufrohren	[m]
$demand_{N,t}$	Wärmebedarf von Knoten N im Zeitschritt t	[W]
$DSS$	Grad der Selbstversorgung (degree of self-sufficiency)	[-]
$\Delta T_L$	Temperaturunterschied zwischen den verlegten Leitungen	[K]
$fh_{N,N+1,t}$	Wärmefluss zwischen Knoten N und N+1 im Zeitschritt t	[W]
$fr_{ave,R}$	Mittlere Strömungsgeschwindigkeit in Rohr R	[m/s]
$g$	Erdbeschleunigung	[m/s <sup>2</sup> ]
$h_{\ddot{u}}$	Überdeckungshöhe	[m]
$\lambda_{Bo}$	Wärmeübertragungskoeffizient des Bodens	[W/(m K)]
$\lambda_D$	Wärmeübertragungskoeffizient der Rohrdämmung	[W/(m K)]
$\lambda_R$	Rohrwidestandsbeiwert	[-]
$l_{N-1,N}$	Leitungslänge zwischen Knoten N-1 und N	[m]
$l_R$	Leitungslänge von Rohr R	[m]
$loss_{max,R}^{heat,l}$	Max. Wärmeverluste von Rohr R pro Trassenmeter	[W/m]
$loss_{max,R}^{press}$	Max. Druckverluste von Rohr R	[Pa]
$loss_{max,R}^{press,l}$	Max. Druckverluste von Rohr R pro Trassenmeter	[Pa/m]
$N$	Knoten im Wärmenetzgraph	[-]