

Jonas Hinker

Konzepte und Methoden zur Flexibilisierung zukünftiger städtischer Energieversorgungssysteme

Band 8



Konzepte und Methoden zur Flexibilisierung zukünftiger städtischer Energieversorgungssysteme

Von der
Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
der
Technischen Universität Dortmund
genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von

Jonas Hinker, M.Sc.
aus Ochtrup

Referentin:	Prof. Dr.-Ing. Johanna Myrzik
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Rehtanz
Korreferentin:	Prof. Dr. rer. nat. Angelika Heinzel
Tag der mündlichen Prüfung:	Dienstag, 18.12.2018

Dortmunder Beiträge zu Energiesystemen,
Energieeffizienz und Energiewirtschaft

herausgegeben von:
Prof. Dr.-Ing. Christian Rehtanz und
Prof. Dr.-Ing. Johanna Myrzik

Band 8

Jonas Hinker

**Konzepte und Methoden zur Flexibilisierung
zukünftiger städtischer Energieversorgungssysteme**

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Aachen 2019

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Dortmund, Technische Univ., Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2019

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6507-7

ISSN 2567-2908

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Kurzfassung

Für die städtische Energieversorgung hat sich seit Jahrzehnten die zeitgleiche Erzeugung elektrischer und thermischer Energie in der sogenannten Kraft-Wärme-Kopplung etabliert. Im Vergleich zur separaten Erzeugung erlaubt diese Kopplung eine verhältnismäßig effiziente Energieumwandlung. Andererseits stellt diese Eigenschaft häufig auch eine Begrenzung für das System dar, weil thermische und elektrische Leistungsabgabe nicht vollständig getrennt voneinander eingestellt werden können. Es besteht also eine unerwünschte technische Abhängigkeit der Leistungslieferungen. Diese fehlende Flexibilität wird heute angesichts einer kontinuierlichen Veränderung der Versorgungsaufgabe und der Energiemärkte zu einer zunehmenden Herausforderung: So nehmen etwa städtische Wärmebedarfe wegen Dämmung und Neubau konstant ab, während der Zubau Erneuerbarer Energien die erzielbaren Energiepreise beeinflusst. Aus diesem Grund stehen städtische Energieversorger vor der Frage, wie zukünftig die Energieversorgung auf solche neuen Situationen angepasst werden kann. In dieser Arbeit wird hierzu ein innovatives technologieneutrales Managementkonzept erarbeitet und modelliert, das die sukzessive Anpassung von Erzeugungskapazitäten erlaubt. Hierauf aufbauend werden Methoden entwickelt, um die Flexibilität von auf diese Weise neu entwickelten Energiesystemen präzise bestimmen zu können. Hierdurch werden technische Möglichkeiten und Grenzen des flexiblen Anlageneinsatzes ermittelt und diskutiert. Um zukünftig möglicherweise notwendige Anpassungen gezielt vornehmen zu können, wird der Flexibilitätsbeitrag einzelner Systembestandteile inklusive Fernwärmesystemen vergleichend eingeordnet. Die Auswertungen der Gesamtflexibilität bestätigen die Möglichkeit der vollständigen Entkopplung von Strom- und Wärmelieferung trotz eingeschränkter Flexibilität der Einzelsysteme.

Abstract

For decades, the concept of combined-heat-and-power generation has been a well-established means for the urban energy supply. Compared to separate generation, the coincident coupled generation enables a relatively efficient energy conversion. However, this feature often poses restrictions on the system's capabilities as thermal and electric power output cannot be controlled fully independent of one another. So, an undesirable technical dependency between different power outputs is given. Nowadays, this lack of flexibility becomes more challenging as the supply task and energy markets are continuously changing: For instance, the urban heat demand constantly decreases due to refurbishment and new building constructions, while the continuous integration of renewable energies affects the achievable prices. For these reasons, urban energy suppliers face the question how to adapt the given energy supply systems to such new conditions in future. To this end, an innovative technology-agnostic management concept is worked out and modelled in this work which allows to successively tailor the generation capacities. Building on this, methods are derived to precisely assess the flexibility of newly developed systems implementing the concept. Hereby, technical possibilities and restrictions of a flexible system dispatch are analyzed and discussed. To enable a systematic retrofit of future energy systems, the contribution of flexibility of different system components including district heating systems is constrained. The analyses of the aggregated flexibility prove that a complete decoupling of thermal and electric power output is possible despite the limited flexibility of individual systems.

Danksagung

Diese Arbeit ist in den vergangenen vier Jahren als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Energiesysteme, Energieeffizienz und Energiewirtschaft – ie³ in der Abteilung Verteilnetzplanung und -betrieb entstanden. Diese Arbeit ist auch Teil des interdisziplinären Projekts „Energieeffizienz im Quartier“ und wurde durch das Ministerium für Kultur und Wissenschaft des Landes Nordrhein-Westfalen gefördert (Förderkennzeichen 322-8.03-110-116441).

An erster Stelle gilt mein ganz besonderer Dank Frau Professor Dr.-Ing. Johanna Myrzik, die mir in den vergangenen vier Jahren die Möglichkeit zur Promotion am ie³ gegeben hat. Durch ihre Authentizität und Aufrichtigkeit konnten wir schnell einen angenehmen gemeinsamen Arbeitsstil entwickeln. Ich muss hier aber vor allem festhalten, dass sie als Doktormutter ständig für mich erreichbar war und sich in außergewöhnlicher Weise in der fachlichen und inhaltlichen Betreuung von Projekt und Promotion engagiert hat. Es war ihr auch immer ein persönliches Anliegen, mich als persönliche Mentorin zu unterstützen und weiterzuentwickeln. Auch nach ihrem Wechsel an die Universität Bremen im März 2018 war es für sie daher eine Selbstverständlichkeit, mich in Fragen der beruflichen Weiterentwicklung zu unterstützen. Für das persönliche Engagement, das Vertrauen und die damit verbundenen Freiheiten bin ich ihr wirklich dankbar.

Ebenso gilt mein Dank Herrn Professor Dr.-Ing. habil. Christian Rehtanz. Er hat mich am ie³ herzlich aufgenommen und war immer für einen fachlichen und persönlichen Austausch verfügbar. Besonders zu schätzen weiß ich seine Denkanstöße und sein Feedback auf Konferenzen sowie die vertrauensvolle Zusammenarbeit bei Abschlussarbeiten. Über sein Korreferat freue ich mich daher ganz besonders.

Herzlich danken möchte ich auch den weiteren Mitgliedern der Prüfungskommission für ihren Einsatz und für ihre konstruktiven Rückmeldungen zu dieser Arbeit. Insbesondere bedanke ich mich bei Frau Professor Dr. rer. nat. Angelika Heinzl vom Lehrstuhl für Energietechnik der Universität Duisburg-Essen für die Übernahme des Korreferats. Unter allen Projektpartnern bedanke ich mich in ganz besonderem Maße für den intensiven Fachaustausch mit den Kollegen aus ihrem Team, nämlich bei Nicolas Witte, M.Sc., Dipl.-Phys. Ing. Othmar Verheyen und Dr.-Ing. Jürgen Roes.

Ich möchte auch die Chance nutzen, allen Kolleginnen und Kollegen am ie³ zu danken. Die Arbeitsatmosphäre, die ich am Institut erleben durfte, geht über das rein Kollegiale weit hinaus. Vielmehr habe ich einen gemeinsamen Teamgeist erfahren, der die Arbeit persönlich angenehm und gleichzeitig produktiv gemacht hat. In den unzähligen Diskussionen sind viele Ideen, wichtige Fragen und hilfreiche Eingebungen entstanden – und das nicht selten spontan in der Kaffeeküche. Diese Gespräche waren extrem wichtig für das Gelingen dieser Arbeit! Aber auch im privaten Kontext verbinden uns viele gemeinsame Erlebnisse, die ich an dieser Stelle leider nicht alle aufzählen kann. Ganz besonders möchte ich aber Herrn Daniel Mayorga González, M.Sc. hervorheben, der zeitgleich mit mir am ie³ gestartet ist. Wir haben zusammen nächtelang an Papern geschrieben, gemeinsam Konferenzen besucht und über Fachthemen diskutiert. Über die Zeit sind wir tiefe Vertraute und echte Freunde geworden.

Dortmund, im Januar 2019

Jonas Hinker

Inhaltsverzeichnis

Symbol- und Formelverzeichnis	V
1 Einleitung	1
1.1 Flexibilisierungsbedarf in der städtischen Energieversorgung	2
1.2 Zielsetzung und Forschungsfragen	6
2 Grundlagen integrierter Energiesysteme	11
2.1 Einordnung integrierter Energiesysteme und ihres potentiellen Mehrwerts	11
2.2 Abgrenzung von Flexibilitätsbegriffen	13
2.2.1 Betriebliche, planerische und systemische Freiheitsgrade	13
2.2.2 Potenzial und Flexibilität	18
2.3 Flexibilität konventioneller Kraft-Wärme-Kopplung	19
2.3.1 Grundsätzlicher Aufbau und Betriebsmodi	20
2.3.2 Beeinflussbarkeit der Wärmeentnahme	23
2.3.3 Kenngrößen und Kennzahlen	25
2.3.4 Abhängigkeiten von Effizienz und Flexibilität	27
2.4 Aufbau, Betrieb und Dynamik von Fernwärmesystemen	29
2.4.1 Besondere Bedeutung der Fernwärmeversorgung	29
2.4.2 Struktur von Fernwärmenetzen	31
2.4.3 Betrieb von Fernwärmesystemen	32
2.4.4 Speichervorgänge im Netz	33
3 Konzeption und Modellierung nachhaltig anpassbarer Versorgungssysteme	37
3.1 Systemplattform zur kontinuierlichen Anpassung an veränderte Rahmenbedingungen	38
3.1.1 Kernelemente der Systemarchitektur	39
3.1.2 Gewählte Modulgröße und Anschlüsse	42
3.2 Bedeutung der zusätzlichen planerischen Freiheitsgrade	44
3.2.1 Strategische Diversifizierung	44
3.2.2 Zeitliche Verfügbarkeit und Skalierbarkeit	46
3.2.3 Verbesserung der Finanzierbarkeit	47
3.2.4 Adaptivität gegenüber Veränderungen	48
3.3 Systemflexibilität und Freiheitsgrad eines Portfolios	51
3.3.1 Energy Hub-Modell	51
3.3.2 Modellanpassung und mathematische Zielformulierung	53
4 Flexibilitätsbeiträge von Modulen und Systemen	61
4.1 Beschreibung von Leistungscharakteristika im erweiterten PQ-Raum	62
4.2 Flexibilitätsbeitrag von Einzelanlagen	65
4.2.1 Motorische KWK-Anlagen	66
4.2.2 Brennstoffzellen	71
4.2.3 Heizkessel (Power-to-Heat-Anlagen)	75

4.2.4	Elektrische Kompressions-Wärmepumpen	82
4.2.5	Weitere Technologien	88
4.3	Stationäre thermische Speicher	91
4.3.1	Leistungsgrenzen von sensiblen Speichern	91
4.3.2	Flächeninanspruchnahme und bauliche Integration in Modulen	92
4.4	Zustandsabhängige Flexibilität von Fernwärmesystemen	96
4.4.1	Anforderungen an das Modell und Abgrenzung	96
4.4.2	Zielformulierung	98
4.4.3	Modellbildung durch Betrachtung der Temperaturfronten	99
4.4.4	Vorgehen zur Bestimmung der zustandsabhängigen Flexibilität	105
4.4.5	Übertragung der Flexibilität in den erweiterten PQ-Raum	107
5	Methoden zur Auswertung und Nutzung der aggregierten Systemflexibilität	111
5.1	Überblick über bekannte Verfahren	111
5.2	Minkowski-Addition für nicht-konvexe und degenerierte Mengen	116
5.2.1	Übertragung auf den energietechnischen Fall	118
5.2.2	Feststellung des Systemfreiheitsgrads und der Flexibilität	119
5.2.3	Überblick über relevante Mengenoperationen	121
5.3	Abstimmung auf die erwartete Versorgungsaufgabe	125
5.3.1	Charakterisierung der Versorgungsaufgabe im PQ-Raum	125
5.3.2	Entwickelte Kennzahlen	129
5.4	Einfluss der thermischen Last auf die nutzbaren elektrischen Leistungsbereiche	131
5.4.1	Modulationsvermögen	132
5.4.2	Zugehörige anfahrbare Arbeitsbereiche	134
5.4.3	Zukünftige Koordination der Leistungserbringung	135
6	Fallstudie zu planerischen und systemischen Freiheitsgraden	139
6.1	Überblick über Zielsetzung, System, Anbindung und Versorgungsaufgabe	139
6.2	Variantenvergleich und Einfluss von Systemkomponenten	144
6.2.1	Bestimmung und Deutung der Flexibilitätsfläche	145
6.2.2	Visuelle und Kennzahlen-basierte Bewertung	146
6.2.3	Analyse der maximalen elektrischen Modulation	149
6.2.4	Analyse des Einfluss der Wärmelast auf den Stromhandel	151
6.2.5	Variantenvergleich	153
6.3	Betriebliche Flexibilität des Fernwärmesystems	159
6.3.1	Auslegung des Fernwärmesystems	160
6.3.2	Ausgleich der ermittelten Fehlleistung	161
6.3.3	Gezielte Verschiebung der Symmetrie durch Wahl der Vorlauftemperaturen	164
6.3.4	Beeinflussbarkeit der betrieblichen Flexibilität während der Auslegung	170
6.3.5	Konsequenzen aus zukünftigen Netz- und Lastentwicklungen	174
6.3.6	Lastmodellierung und Messbedarf	174
6.3.7	Bewertung der Flexibilität im Fernwärmesystem	176
6.4	Integrierte Bewertung der Systemflexibilität	178

7 Zusammenfassung und Ausblick	181
7.1 Forschungsbeiträge	181
7.2 Aktuelle Praxisrelevanz und Ausblick	184
Literaturverzeichnis	187
Wissenschaftlicher Tätigkeitsnachweis	199
Lebenslauf	203