

Sebastian Groß

Untersuchung der Speicherfähigkeit von Fernwärmenetzen und
deren Auswirkungen auf die Einsatzplanung von Wärmeerzeugern

Beiträge aus den Ingenieurwissenschaften

Sebastian Groß

**Untersuchung der Speicherfähigkeit von
Fernwärmenetzen und deren Auswirkungen auf
die Einsatzplanung von Wärmeerzeugern**

 **VOGT**

Dresden 2013

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen
Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über
<http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Bibliographic Information published by the Deutsche Bibliothek
The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie;
detailed bibliographic data is available in the internet at <http://dnb.ddb.de>.

Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2012

Die vorliegende Arbeit stimmt mit dem Original der Dissertation
„Untersuchung der Speicherfähigkeit von Fernwärmenetzen und deren
Auswirkungen auf die Einsatzplanung von Wärmeezeugern“ von Sebastian Groß
überein.

© Jörg Vogt Verlag 2013
Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.

Gesetzt vom Autor

ISBN 978-3-938860-60-1

Jörg Vogt Verlag
Niederwaldstr. 36
01277 Dresden
Germany

Phone: +49-(0)351-31403921
Telefax: +49-(0)351-31403918
e-mail: info@vogtverlag.de
Internet : www.vogtverlag.de



UNTERSUCHUNG DER SPEICHERFÄHIG- KEIT VON FERNWÄRMENETZEN UND DEREN AUSWIRKUNGEN AUF DIE EINSATZPLANUNG VON WÄRME- ERZEUGERN

Der Fakultät Maschinenwesen
der
Technischen Universität Dresden
zur
Erlangung des akademischen Grades
Doktoringenieur (Dr.-Ing.)
angenommene Dissertation

von
Dipl.-Math. Sebastian Groß
geb. am 11.06.1981 in Dresden

Tag der Einreichung: 01.08.2012

Tag der Verteidigung: 26.11.2012

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Clemens Felsmann

Prof. Dr.-Ing. habil. Achim Dittmann

Vorsitzender der Promotionskommission:

Prof. Dr. rer. nat. habil. Cornelia Breitkopf

VORWORT

Die vorliegende Dissertation entstand in den Jahren 2007 bis 2012 während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Energietechnik der Technischen Universität Dresden.

Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Achim Dittmann recht herzlich für die fachliche Unterstützung zur Erstellung meiner Arbeit und für seine stete Einsatzbereitschaft. Er stand mir mit Rat und Tat hilfreich zur Seite, was insbesondere in Zeiten, in denen weniger Fortschritte zu verzeichnen waren, eine wichtige Stütze darstellte. Mein großer Dank geht ebenso an Herrn Prof. Dr.-Ing. Clemens Felsmann, der durch zahlreiche Anregungen zum guten Gelingen meiner Arbeit maßgeblich beitrug. Auch danke ich allen Mitgliedern der Prüfungskommission, die völlig unkompliziert ein sehr schnelles Zustandekommen der Verteidigung ermöglichten.

Ein herzlicher Dank geht an alle Kollegen meines Lehrstuhls. Sie haben sich für mich stets die Zeit für fachliche Diskussionen, aber auch für persönliche Anliegen genommen. Die sehr angenehme, schon fast familiäre Atmosphäre im Lehrstuhl und die ausgeprägte Hilfsbereitschaft meiner Kollegen haben wesentlich zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen.

Besonders herzlich bedanke ich mich bei meinen Eltern, meiner Familie und meinen Freunden, die mich stets und in allen Lebenslagen unterstützten und hinter mir standen und somit vor allem moralisch eine große Hilfe waren. Sie haben mir so den notwendigen Ausgleich zur Arbeit gegeben.

Sebastian Groß

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	1
1.1	Allgemeines	1
1.2	Untersuchungsgegenstand	2
1.3	Bilanzraum	3
1.4	Literaturrecherche	5
2	Grundlagen der Netzspeicherung	9
2.1	Definitionen	9
2.2	Netzspeicherungsarten	11
2.3	Theoretische Voruntersuchungen	15
2.4	Erweiterung auf Strahlennetze	20
2.5	Bezeichnungen und Charakterisierungen	23
3	Simulationsbasierte Analyse der Netzspeicherung	27
3.1	Simulationswerkzeug TRNSYS-TUD und Beispielnetz	27
3.2	Einfluss der Umgebungstemperaturen auf die Netzspeicherleistung	30
3.3	Einfluss der Abnehmerstrukturen auf die Netzspeicherleistung	31
3.4	Untersuchungen von Ladekurven nach Vorlauftemperatursprüngen	32
3.5	Untersuchungen von Entladekurven nach Vorlauftemperatursprüngen	37
3.6	Einfluss der Höhe von Vorlauftemperatursprüngen auf die Netzspeicherleistung	38
3.7	Untersuchungen von Lade- und Entladekurven bei Laständerungen	39
3.8	Untersuchung der Netzspeicherleistung bei variablem Verlauf von Vorlauftemperatur und Gesamtlast	41
4	Einbindung der Netzspeicherung in das Optimierungsmodell	49
4.1	Einführung anhand einer einfachen Ansatzfunktion	49
4.2	Bewertung der Regression	52
4.3	Einfluss der Eingangsgrößen auf die Regressionsergebnisse	58
4.4	Untersuchung weiterer Ansatzfunktionen	63
4.5	Auswertung der multiplen linearen Regression	66
4.6	Bestimmung der optimalen Vorlauftemperatur	67
5	Mathematische Grundlagen der Optimierung	71
5.1	Wahl der Problemklasse der Optimierung	72
5.2	Lösung des Optimierungsproblems	75
5.3	Übersicht Modellierungssprachen	76
5.4	Übersicht Solver	77
5.5	Grundaufbau des mathematischen Modells	78
5.6	Wahl der Zielfunktion	79
5.7	Linearisierung realer Kurvenverläufe	84
6	Randbedingungen für das Optimierungsmodell	89
6.1	Einleitung	89

6.2	Heizkraftwerke	89
6.3	Heizwerke und Heizkessel	91
6.4	Blockheizkraftwerke	92
6.5	Solarthermische Anlagen	93
6.6	Wärmepumpen	96
6.7	Thermische Wärmespeicher	97
6.8	Wirtschaftliche Rahmenbedingungen	99
7	Anwendungsbeispiel	105
7.1	Einleitung	105
7.2	Technische Randbedingungen	105
7.3	Wirtschaftliche Randbedingungen	108
7.4	Optimierung	109
7.5	Ergebnisse Variante I: Vergleich optimierter Einsatzplan Winter- und Sommertag	110
7.6	Ergebnisse Variante I: Jahresoptimierungen	116
7.7	Ergebnisse Variante I: Vergleich Netzspeicher und thermischer Verdrängungs- speicher	124
7.8	Ergebnisse Variante I: Minimierung CO_2 -Emission und Primärenergie	126
7.9	Ergebnisse Variante II	128
7.10	Vergleich Variante I mit Variante II	129
8	Fazit	135
	Literaturverzeichnis	139
A	Publikationen	145
B	Abbildungen und Tabellen	147
B.1	Regression: Ansatzfunktion I	147
B.2	Regression: Ansatzfunktion II - V	150
B.3	Ergebnisse Variante I: Minimierung CO_2 -Emission und Primärenergie	154
B.4	Ergebnisse Variante II	157
C	Marktübersicht Software Einsatzoptimierung	163
	Symbolverzeichnis	167
	Abkürzungsverzeichnis	169

1 EINLEITUNG

1.1 Allgemeines

Die in den letzten Jahren immer stärker einsetzende Verknappung fossiler Brennstoffe bei gleichzeitigem Ansteigen des Energiebedarfs führte zu einem deutlichen Anstieg der Brennstoffpreise. Dieser Trend wird sich auch in den kommenden Jahren weiter fortsetzen [26], [84]. Um der stärker werdenden Verknappung der fossilen Rohstoffe entgegenzuwirken – aber auch aus ökologischen Gesichtspunkten – werden in Deutschland verstärkt regenerative Energiequellen nutzende Erzeugeranlagen in Form von Wärmepumpen, Solarthermie-, Photovoltaik- und Windkraftanlagen eingesetzt. Aufgrund der Zwangsabnahme von regenerativ erzeugtem Strom ins übergeordnete Netz kommt es zunehmend zu starken Fluktuationen der Stromeinspeisung. Der Ausgleich der Fluktuationen durch vorwiegend zur Grundlastversorgung eingesetzte Gas-, Kohle- oder Kernkraftwerke ist hingegen zu teuer oder technisch nur begrenzt realisierbar. Möglichkeiten, Strom in den erforderlichen Mengen sinnvoll zwischenspeichern sind nur wenig und vorwiegend in Form von Pumpspeicherkraftwerken gegeben. Resultat sind starke Schwankungen des Strompreises beim börsennotierten Handel. Angebot und Nachfrage bestimmen auch hier den Preis, sodass in der Vergangenheit sich für vereinzelte Stundenkontrakte negative Preise am Spotmarkt ergaben.

Eine alternative Möglichkeit des Ausgleichs der Fluktuationen der Stromeinspeisung ergibt sich durch die Verlagerung der Einsatzzeiten von KWK-Anlagen, die aufgrund der Lastanforderungen des zu versorgenden Fernwärmenetzes nur zum Teil flexibel betrieben werden können. Um die von KWK-Anlagen abgegebene Wärme zu speichern und somit eine größere Bandbreite der Fahrweisen der Anlagen zu erreichen, werden gegenwärtig vor allem Heißwasserspeicher genutzt, aber auch das Verteilnetz selbst bietet eine Möglichkeit Wärme zu speichern, was keine zusätzlichen Investitionen erfordert und somit aus ökonomischer Sicht äußerst attraktiv erscheint. So führen Änderungen der Vorlauftemperatur am Erzeuger oder der Rücklauftemperaturen der Abnehmer zu instationären Betriebszuständen in Bezug auf die Energiebilanz – es tritt eine zeitliche Entkopplung des Einspeise- von dem Entnahmevorgang auf, was in allen realen Fernwärmenetzen als unerwünschter Nebeneffekt beobachtbar ist, da die resultierende Netzspeicherleistung aufgrund verschiedener Einflussfaktoren stark schwankt. So ist zwar bekannt, dass die Vorlauftemperatur am Einspeisepunkt die Netzspeicherleistung maßgeblich beeinflusst – wie diese konkret gewählt werden muss, um eine gewünschte Netzspeicherleistung zu erhalten, ist bisher nur unzureichend bestimmbar.

Zielstellung der vorliegenden Arbeit ist daher die Untersuchung der Netzspeichervorgänge und die Integration der Netzspeicherung in die Einsatzplanung von Wärmeerzeugern, um die optimale Fahrweise ermitteln zu können. So können für beliebige Fernwärmenetze und beliebige Erzeugersysteme die monetären Gewinnpotentiale der Netzspeicherung abgeschätzt werden.

Die vorliegende Arbeit ist in acht Kapitel unterteilt. Beginnend mit dieser Einleitung werden im Kapitel 2 die Grundlagen der Netzspeichervorgänge gelegt – eine Vertiefung mit Hilfe thermo-

hydraulischer Simulationen erfolgt im Kapitel 3, wo sich die Notwendigkeit einer Approximation der Netzspeicherleistung durch eine Ansatzfunktion zeigt. Die Approximation erfolgt dabei mit Hilfe einer multiplen linearen Regression, das entsprechende Vorgehen ist im Kapitel 4 dargestellt. Im Kapitel 5 werden die mathematischen Grundlagen für das Optimierungsmodell und dessen Lösung beleuchtet sowie die für die Optimierung wählbaren Zielfunktionen und deren Zusammensetzung beschrieben. Im Kapitel 6 erfolgt eine technische Beschreibung aller Erzeuger und der thermischen Speicher sowie der sich daraus ergebenden, das Optimierungsmodell beschreibenden Nebenbedingungen. Außerdem werden die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen in Form von Energie- und Brennstoffverträgen sowie Förderungsgesetzen vorgestellt und weiterhin erläutert, in welcher Form sie im Optimierungsmodell berücksichtigt werden. Als Anwendungsbeispiel erfolgt im Kapitel 7 die monetäre Bewertung der Netzspeicherung anhand eines realen Fernwärmenetzes. Abschließend findet sich im Kapitel 8 ein kurzes Fazit.

1.2 Untersuchungsgegenstand

Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit ist die Analyse der Netzspeichervorgänge in Fernwärmenetzen sowie deren Auswirkungen auf die Einsatzoptimierung von Wärmeerzeugern. Zur Bestimmung der optimierten Einsatzplanung kommt eine erweiterte Version der Software *FreeOpt* zum Einsatz. Bei der Software handelt es sich um ein im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderten¹ Forschungsprojekts *MULTILEVEL DISTRICT HEATING* entstandenes, frei verfügbares Optimierungstool für die Einsatzplanung von Wärmeerzeugern im Verbund mit Wärmespeichern in einem Fernwärmenetz und dient als Entscheidungs- und Planungshilfe für bestehende oder neue Fernwärmesysteme. Bei letzteren können mit Hilfe einer zusätzlichen Investitionskostenabschätzung² der Anlage die Gesamtkosten genauer bestimmt werden. Außerdem fungieren die durch *FreeOpt* ermittelten Betriebskosten als Bewertungsgröße für die Fahrweise des Erzeugerparks. In [31] findet sich eine detaillierte Beschreibung des Aufbaus und der Bedienung von *FreeOpt* sowie ein Anwendungsbeispiel, das die Einsatzweise verdeutlicht.

Für die Integration der Möglichkeit der Netzspeicherung in *FreeOpt* mussten eine Reihe von Anpassungen bzw. Erweiterungen im Optimierungsmodell durchgeführt werden. Zur deutlichen Abgrenzung der neuen Version vom Original-*FreeOpt* wurde ein neuer Name gewählt: *FWOpt*. Auch wenn die grundlegenden Elemente von *FWOpt* aus *FreeOpt* stammen, wird in der vorliegenden Arbeit nur *FWOpt* erwähnt – eine explizite Trennung der beiden „Versionen“ ist nicht gegeben. Die wesentlichen Erweiterungen von *FWOpt* im Vergleich zu *FreeOpt* sind in Tab. 1.1 dargestellt.

¹FKZ: 0327400B

²muss vom Benutzer selbst durchgeführt werden

Tabelle 1.1: Wesentliche Erweiterungen von FWOpt im Vergleich zu FreeOpt

	FreeOpt	FWOpt
Zeitschrittweite	fest: 1 Stunde	frei wählbar: 1,2,3,6,10,12,15,60 Minuten
tageweise Optimierung	sequentiell	rollierend
Brennstoffpreis	konstant	variabel in allen Zeitschritten
Mindestlaufzeiten Erzeuger	-	+
Mindeststillstandzeiten Erzeuger	-	+
Netzspeicherleistung	-	+
thermische Verluste Netz	-	+
Energie Umwälzpumpen	-	+
Zielgrößen Optimierung	Betriebskosten	Deckungsbeitrag, Primärenergie, CO ₂ -Emission

In FWOpt implementiert sind diese Erzeuger: Blockheizkraftwerke (BHKW), Dampfturbinen-Heizkraftwerke (HKW) mit Entnahme-Gegendruckturbinen (EGD) oder Entnahme-Kondensationsturbinen (EKT), Heizwerke (HW) bzw. Kessel, solarthermische Anlagen (ST) und Wärmepumpen (WP). Darüber hinaus können auch Stromverträge³ sowie die bereits angesprochenen Möglichkeiten der Wärmespeicherung in Form von thermischen Verdrängungsspeichern und der Netzspeicherung im Optimierungsmodell berücksichtigt werden.

Mit Hilfe mathematischer Optimierungsverfahren erfolgt durch die Maximierung des Deckungsbeitrags, Minimierung der CO₂-Emission oder Minimierung der Primärenergie die Ermittlung des optimalen Fahrplans: Wann wird welcher Erzeuger in welcher Form eingesetzt, wie werden die Speicher gefahren und welches Volumen der Stromverträge wird genutzt? Bereits bei kleineren Erzeugerparks ist die Zahl der möglichen Betriebsweisen sehr groß, sodass die rechnergestützte Entscheidung wirtschaftliche Potentiale aufzeigen kann. Insbesondere soll dabei das ökonomische und auch das ökologische Einsparpotential der Netzspeicherung untersucht werden.

Die Integration der Netzspeichervorgänge in die Einsatzoptimierung von FWOpt ist aufgrund der hohen Komplexität der thermohydraulischen Vorgänge in Fernwärmenetzen nicht ohne weiteres möglich, sodass umfangreiche Voruntersuchungen notwendig sind. Diese werden anhand eines fiktiven, vereinfachten Beispielnetzes und später mit Hilfe thermohydraulischer Simulationssoftware anhand eines realen Fernwärmenetzes durchgeführt. So kann die Netzspeicherleistung bestimmt werden – die direkte Kopplung der Simulation an das Optimierungsmodell von FWOpt ist jedoch nicht realisierbar. Aus diesem Grund wird mit Hilfe einer multiplen linearen Regression die Netzspeicherleistung approximiert. Die zu bestimmende Ansatzfunktion der Regression kann dann leicht in das Optimierungsmodell eingebunden werden.

1.3 Bilanzraum

In Abb. 1.1 ist der Bilanzraum der Untersuchungen dargestellt, die Beschreibung der dort verwendeten Größen ist in Tab. 1.2 aufgelistet. Alle gewählten Erzeuger sind über das Fernwärmenetz miteinander verknüpft. Bei Vorhandensein von dezentral einspeisenden Erzeugern werden alle Erzeuger zu einem Standort zusammengefasst. Eine weitere Kopplung besteht

³Stromlieferung an den bzw. Strombezug von dem übergeordneten Netzbetreiber

über das Stromnetz. Der Optimierungszeitraum kann beliebig gewählt werden, bei der zeitlichen Diskretisierung stehen folgende Zeitschrittweiten zur Auswahl: 1,2,3,6,10,12,15 oder 60 Minuten. Die Lastgänge für die thermische bzw. elektrische Leistung \dot{Q}_{ab} bzw. P_{ab} sind in der gewählten zeitlichen Auflösung vorzugeben.

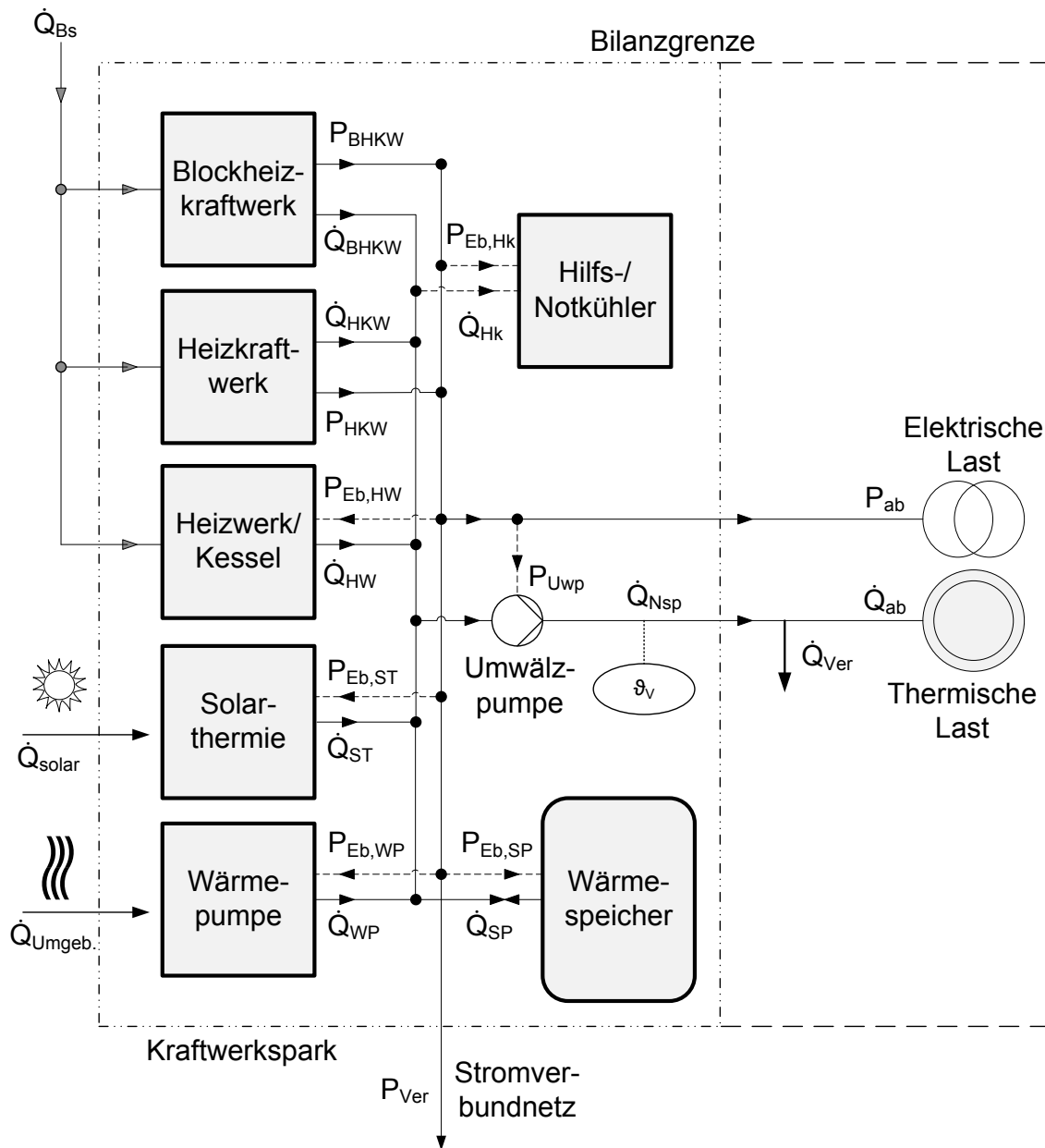


Abbildung 1.1: Bilanzraum der Untersuchungen (ohne Darstellung des Rücklaufs des Fernwärmenetzes)

Tabelle 1.2: Beschreibung der in Abb. 1.1 verwendeten Größen

Größe	Beschreibung	Größe	Beschreibung
\dot{Q}_{ab}	thermischer Lastgang	P_{ab}	elektrischer Lastgang
\dot{Q}_{BHKW}	thermische Leistung BHKW	P_{BHKW}	elektrische Leistung BHKW
\dot{Q}_{HKW}	thermische Leistung HKW	P_{HKW}	elektrische Leistung HKW
\dot{Q}_{HW}	thermische Leistung HW	$P_{Eb,HW}$	elektrischer Eigenbedarf HW
\dot{Q}_{ST}	thermische Leistung ST	$P_{Eb,ST}$	elektrischer Eigenbedarf ST
\dot{Q}_{WP}	thermische Leistung WP	$P_{Eb,WP}$	elektrischer Eigenbedarf WP
\dot{Q}_{SP}	Lade- bzw. Entladeleistung Speicher	$P_{Eb,SP}$	elektrischer Eigenbedarf SP
\dot{Q}_{Hk}	Hilfskühlerleistung	$P_{Eb,Hk}$	elektrischer Eigenbedarf Hilfskühler
\dot{Q}_{Nsp}	Netzspeicherleistung	P_{Uwp}	elektrischer Eigenbedarf Umwälzpumpen
\dot{Q}_{Ver}	thermische Verluste Fernwärmenetz	P_{Ver}	Stromverträge
\dot{Q}_{Bs}	Brennstoffleistung		
\dot{Q}_{solar}	Einstrahlungsleistung	ϑ_V	Vorlauftemperatur
$\dot{Q}_{Umgeb.}$	Umweltwärme		

1.4 Literaturrecherche

In diesem Kapitel erfolgt eine Abgrenzung der vorliegenden Arbeit zu bereits veröffentlichter Literatur. Eine Übersicht bestehender Softwarelösungen zur Einsatzoptimierung findet sich im Anhang C. Beispiele der praktischen Anwendung der Netzspeicherung in Deutschland, Dänemark und Finnland werden kurz in [85] beschrieben. Ansätze zur vereinfachten Abschätzung des Netzspeicherpotentials finden sich in [21], [30] und [65].

In [53] und [83] wird das Fernwärmenetz als Regelstrecke mit einem differentiellen Verhalten und einer Zeitverzögerung erster Ordnung charakterisiert. Die Lösung der sich ergebenden Differentialgleichung ist eine Exponentialfunktion, mit deren Hilfe der Verlauf der Netzspeicherleistung für bestimmte Typtage approximiert wird. Nachteil dieser Methode ist, dass sie für eine dichte Folge von Vorlauftemperaturänderungen nicht geeignet ist, sondern nur für einzelne Temperatursprünge sinnvoll in die Einsatzoptimierung integriert werden kann.

Ein Modell einer geschlossenen Optimierung findet sich in [77] bzw. [78]. Hier sind vereinfacht die thermohydraulischen Vorgänge in Fernwärmenetzen in das Optimierungsmodell integriert. Vorteil ist das Auffinden einer geschlossenen Lösung, nachteilig die sich bei Verwendung eines nichtlinearen Optimierungsmodells ergebenden, bekannten Schwierigkeiten: die zum Teil langsame Konvergenz sowie der aufwendige Nachweis der Optimalität. Die Fähigkeiten der Methode werden durch zwei einfache, fiktive Beispiele aufgezeigt. Auf die angesprochenen, zu erwartenden Schwierigkeiten in Bezug auf Konvergenz und Optimalität wird dabei nicht eingegangen. Es bleibt darüber hinaus noch offen, inwieweit diese Methode auf größere, reale Netze anwendbar ist. Die Übertragbarkeit wird an dieser Stelle angezweifelt, da das bei großen Netzen entstehende Optimierungsmodell mit mehreren tausend Variablen, das darüber hinaus noch nichtlinear ist, so groß wird, dass es nur in nicht zumutbaren Zeiten gelöst werden kann. Auch verfügt das bei dieser Methode verwendete thermohydraulische Modell nicht über die Qualität des Modells eines reinen Simulationsprogramms, sprich die realen Netzvorgänge werden schlechter abgebildet.

In [23] bzw. [24] wird nach Ausführungen in [77] alternativ zum Optimierungsverfahren ein Suchverfahren auf Grundlage des Pattern-Search verwendet, in dem in jedem Suchschritt eine thermohydraulische Simulation unter geänderten Parametern durchgeführt wird. Verletzungen

von Randbedingungen sind durch Verwendung von Straftermen möglich. Problem bei dieser Methode sind zum einen die hohen Rechenzeiten zum anderen massive Konvergenzprobleme. Der Autor von [23] bzw. [24] selbst stuft nach [77] daher dieses Vorgehen als wenig sinnvoll ein und entwickelte ein Optimierungsverfahren, in dem die Ausbreitung der Temperaturfront über lineare Übertragungsfunktionen aufgestellt wird. Die Daten für die Übertragungsfunktionen stammen aus der dynamischen Simulation des Fernwärmenetzes. Liefert die Lösung des Optimierungsproblems geänderte Vorlauftemperaturen, muss die Simulation erneut durchgeführt werden, bis die Änderungen einen vorher festgelegten Grenzwert unterschreiten. Dieses iterative Vorgehen hat teilweise ebenfalls mit Konvergenzproblemen zu kämpfen. Ein ähnlich vereinfachtes iteratives Vorgehen wird in [68] verwendet.

In der in [57] beschriebenen Methode werden nach Ausführungen in [77] Betriebskosten nicht in der Zielfunktion berücksichtigt. Über eine Voruntersuchung eines konkreten Fernwärmenetzes kommt nach [77] der Autor von [57] zu dem Resultat, die Betriebskostenoptimierung durch die Vorlauftemperaturminimierung zu ersetzen. Methodisch wurde dazu ein Regler entwickelt, mit dem die Vorlauftemperatur bei dem Erzeuger eingestellt werden kann. Dabei müssen vertraglich festgelegte Mindestvorlauftemperaturen bei den Abnehmern und andere hydraulische Restriktionen zu jedem Punkt eingehalten werden. Um dabei die Fließzeiten der Temperaturfronten zu berücksichtigen, werden wie in [23] Übertragungsfunktionen verwendet. Es handelt sich nach [77] insgesamt nur um eine eingeschränkte, auf die Vorlauftemperatur bezogene Optimierung – weitere Freiheitsgrade bestehen nicht.

Die in [27] verwendete Methode dient nach Ausführungen in [77] der kurzfristigen Einsatzoptimierung im Zeithorizont von 15 bis 60 Minuten. Im ersten Schritt erfolgt eine thermohydraulische Simulation des Fernwärmenetzes. Die ermittelten Betriebspunkte dienen als Ausgangspunkte für eine Linearisierung der Modellgleichungen. Daraus entsteht ein lineares Optimierungsmodell, das ohne großen zeitlichen Aufwand gelöst werden kann. Die optimale Lösung muss anschließend über die thermohydraulische Simulation auf Zulässigkeit überprüft werden. Iterativ erfolgt wieder eine Linearisierung der Modellgleichungen für die neu gefundene Lösung. Die Vorlauftemperatur geht in diesem Algorithmus als Parameter ein. Um den Einfluss der Vorlauftemperatur auf die Betriebskosten abzuschätzen, erfolgt eine Parametervariation. Insgesamt bleibt nach [77] der Rechenaufwand vergleichsweise hoch und ist somit nur für kurze Untersuchungszeiträume sinnvoll verwendbar.

In [54] werden die Netzspeichervorgänge in einem realen Fernwärmenetz in Berlin mit Hilfe des thermohydraulischen Simulationstools *SYSHYD* [38] untersucht. Alle Simulationen erfolgen unter der Annahme konstanter Lasten der Abnehmer und konstanter Rücklauftemperaturen über den gesamten Zeitbereich. Außerdem muss sich das gesamte System Fernwärmenetz vor allen Netzspeichervorgängen in einem stationären Zustand befinden.

Insgesamt sind die eben vorgestellten Methoden zur Netzspeicherung – wenn überhaupt – meist nur mit großem Aufwand in eine klassische Einsatzoptimierung integrierbar, haben durch die Verwendung eines Iterationsprozesses teilweise Konvergenzprobleme oder die Ansätze sind für die angestrebte Detailtiefe der Optimierung nicht ausreichend, da konstante thermische Lasten und einzeln auftretende Vorlauftemperatursprünge vorausgesetzt werden. All diese Schwierigkeiten sollen durch die Entwicklung einer neuen Methode behoben werden, in der zunächst auf Grundlage umfangreicher Voruntersuchungen die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Netzspeicherleistung identifiziert werden. Um möglichst realistische Kurvenverläufe der

Netzspeicherung zu erhalten, soll eine thermohydraulische Simulation des Fernwärmenetzes erfolgen. Die dort gewonnenen Daten dienen als Grundlage für eine multiple lineare Regression der Netzspeicherleistung. Die ermittelte Regressionsfunktion kann anschließend leicht in das Optimierungsmodell integriert werden. Vorteil dieser Methode ist, dass keine Iterationen erfolgen müssen. Außerdem kann jedes beliebige thermohydraulische Simulationsprogramm verwendet werden. Nachteilig ist der vergleichsweise hohe Grundaufwand zur Bestimmung der Regressionskoeffizienten und die zusätzlich auftretenden Abweichungen durch die Regression.

