

Felten, Björn; Baginski, Jan Paul; Weber, Christoph

Working Paper

KWK-Mindest- und Maximaleinspeisung - die Erzeugung von Zeitreihen für die Energiesystemmodellierung

HEMF Working Paper, No. 10/2017

Provided in Cooperation with:

University of Duisburg-Essen, Chair for Management Science and Energy Economics

Suggested Citation: Felten, Björn; Baginski, Jan Paul; Weber, Christoph (2017) : KWK-Mindest- und Maximaleinspeisung - die Erzeugung von Zeitreihen für die Energiesystemmodellierung, HEMF Working Paper, No. 10/2017, University of Duisburg-Essen, House of Energy Markets & Finance, Essen

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/172444>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.



House of
Energy Markets
& Finance



KWK-Mindest- und Maximaleinspeisung - Die Erzeugung von Zeitreihen für die Energiesystemmodellierung

(Restrictions of the Electricity Generation from CHP Plants - Producing Time Series for Energy System Modeling)

HEMF Working Paper No. 10/2017

von

Björn Felten,

Jan Paul Baginski

und

Christoph Weber

6. Dezember 2017

UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

Open-Minded

Abstract

Die gekoppelte Erzeugung von Strom und Wärme in KWK-Anlagen ist eine der brennstoffeffizientesten Erzeugungsformen im Strommarkt. Aus diesem Grund wird sie in vielen europäischen Ländern gefördert und ihr Ausbau ist erklärtes Ziel von Regierungen und Nichtregierungsorganisationen. Durch die gekoppelte Erzeugung richtet sich der Betrieb nicht allein nach dem Strompreis und der Elektrizitätsnachfrage, sondern auch nach der lokalen Wärmenachfrage und den verfügbaren Erzeugungseinheiten im Wärmenetz. Für den KWK-Anlagenbetreiber ergeben sich dadurch Restriktionen für die Vermarktung des Stroms im Elektrizitätsmarkt. Aus dem gleichen Grund ergeben sich Herausforderungen aus Systemsicht: Die Flexibilität des Betriebs von KWK-Anlagen, die beispielsweise zum Ausgleich von Prognosefehlern Erneuerbarer Erzeugung genutzt werden kann, ist begrenzt. Das vorliegende Paper gibt einen Kurzüberblick über die Modellierung dieser Restriktionen im Kontext der europäischen Energiesystemmodellierung und trägt somit zum Verständnis der Wirkzusammenhänge und wesentlichen Treiber bei.

(The combined generation of electricity and heat in CHP plants is one of the most resource-efficient types of power generation in the electricity market. Therefore many European countries have implemented support schemes and the further deployment is the declared goal of governments and non-governmental organizations. Through the combined generation of electricity and heat, the operation of CHP plants is not only governed by electricity prices and electricity demand, but also depends on the local heat demand and the available heat generators in the heating grid. For CHP plant operators, this fact entails restrictions for trading the electricity on the electricity market. For the same reason, challenges exist from a system perspective: The operational flexibility of CHP plants, which may be used for e.g. balancing forecast errors of renewable-based generation, is limited. This paper provides a summary of how to model these restrictions in the context of modeling the European energy system. Thus it contributes to understanding the interdependencies of electricity and heating markets and their substantial drivers.)

Keywords : Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), Must-Run, Strommarktmodellierung, Fernwärme, Combined Heat and Power (CHP), Cogeneration, Electricity Market Modeling, District Heating.

JEL-Classification : Q40, Q41, Q43, Q47.

Björn Felten
(Corresponding Author)
House of Energy Markets and Finance
University of Duisburg-Essen, Germany
Berliner Platz 6-8, 45127 Essen
+49-(0)201 / 183-3389
bjoern.felten@uni-due.de
www.hemf.net

Jan Paul Baginski
House of Energy Markets and Finance
University of Duisburg-Essen, Germany
paul.baginski@uni-due.de

Christoph Weber
House of Energy Markets and Finance
University of Duisburg-Essen, Germany
christoph.weber@uni-due.de

Der Inhalt dieses Dokuments wurde eigenverantwortlich durch die Autoren erstellt und muss nicht notwendigerweise die Meinung des House of Energy Markets and Finance darstellen.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
1 Einleitung	1
2 Methodik	2
2.1 Wärmenachfrage	5
2.2 Wärmeauskopplung	6
2.2.1 Plausibilisierung der KWK-Parameter	7
2.2.2 Berechnung der variablen Nettowärmeerzeugungskosten	7
2.2.3 Detailliert betrachtete Fernwärmenetze	8
2.2.4 Aggregierte Fernwärmenetze	9
2.3 Wärmeauskopplung unter Berücksichtigung von Speichern	10
2.4 Minimale Stromerzeugung	11
2.5 Maximale Stromerzeugung	12
3 Daten	12
3.1 Fernwärme in Deutschland	12
3.2 Fernwärme in Nachbarländern	14
3.3 KWK-Parameter (wärmeseitig)	14
4 Exemplarische Ergebnisse	14
4.1 Wärmenachfrage	15
4.2 Wärmeauskopplung	15
4.3 Wärmeauskopplung unter Berücksichtigung von Speichern	16
4.4 Minimale Stromerzeugung	17
4.5 Maximale Stromerzeugung	18
4.6 Jährliche KWK-Stromerzeugung	19
5 Zusammenfassung und Ausblick	20
Literatur	VI

Abbildungsverzeichnis

1	Schematische Darstellung der Berechnungsschritte des KWK-Modells.	4
2	Darstellung der linear angenommenen Temperaturabhängigkeit der Wärmenachfrage. . . .	5
3	Modellierte Wärmenachfrage in einem beispielhaften heizwärmedominierten Fernwärmenetz	15
4	Modellierte Wärmenachfrage in einem beispielhaften prozesswärmedominierten Fernwärmenetz	15
5	Modellierte Wärmeerzeugung nach Wärmeerzeugern in einem beispielhaften heizwärmedominierten Fernwärmenetz	16
6	Modellierte Wärmeerzeugung nach Wärmeerzeugern in einem beispielhaften prozesswärmedominierten Fernwärmenetz	16
7	Verschiebung der Wärmeerzeugung durch einen Wärmespeicher auf Basis der marginalen Wärmeerzeugungskosten in einem beispielhaften Fernwärmenetz	17
8	Relative Mindeststromerzeugung nach Wärmeerzeugern in einem beispielhaften Fernwärmenetz	18
9	Relative Maximalstromerzeugung nach Wärmeerzeugern in einem beispielhaften Fernwärmenetz	19

Abkürzungsverzeichnis

AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.
AGFW	Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V.
BHKW	Blockheizkraftwerk
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
FWN-a	aggregiert abgebildete Fernwärmenetze
FWN-d	detailliert abgebildete Fernwärmenetze
IEA	International Energy Agency
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
StBA	Statistisches Bundesamt

Symbole und Formelzeichen

c_{BS}	Brennstoffkosten
\bar{c}_{CO_2}	Äquivalente CO_2 -Kosten
c_{reg}	Netzentgelte und sonstige regulatorische Kostenbestandteile
$c_{var,t,u}$	Variable Nettowärmeerzeugungskosten von Anlage u in Stunde t
$c_{var,max}$	Max. variable Wärmebereitstellungskosten aller Wärmeerzeuger eines Wärmenetzes innerhalb eines Tages
$c_{var,min}$	Min. variable Wärmebereitstellungskosten aller Wärmeerzeuger eines Wärmenetzes innerhalb eines Tages
$c_{var,O+M}$	Variable Betriebs- und Instandhaltungskosten
δ	Stromverlustkennziffer
d_Q	Wärmenachfrage
$d_{Q,max}$	Maximale Wärmenachfrage im Betrachtungszeitraum
H_1	Negative Steigung der Wärmenachfrage
H_0	Grundlast der Wärmenachfrage
$\eta_{in/out}$	Speicherwirkungsgrad von Einspeicherung bis Ausspeicherung
$\bar{\eta}_{Kond}$	Äquivalenter Kondensationswirkungsgrad bei ungekoppelter Stromerzeugung
$\eta_{th,max}$	Maximaler thermischer Wirkungsgrad
$\eta_{tot,KWK}$	Gesamtwirkungsgrad bei gekoppelter Strom- und Wärmeerzeugung
P	elektrische Leistung
$p_{el,t}$	Strompreis in Stunde t
$P_{el,max}$	Obere elektrische Leistungsbegrenzung aufgrund von Wärmeauskopplung
$P_{el,min}$	Untere elektrische Leistungsbegrenzung aufgrund von Wärmeauskopplung
$P_{tech,min}$	Technische Mindestleistung
\dot{Q}	Wärmeauskopplung
σ	Stromkennzahl (bei Entnahme-Kondensations-Anlagen Stromkennzahl im Gegendruckbetrieb)
t	Zeitschritt der Simulation (simulierte Stunde)
T	Geometrischer Reihenwert der Temperatur
T_g	Heizgrenztemperatur

T_{min}	Minimale Temperatur im Betrachtungszeitraum
u	Index zur Referenzierung der Wärmeerzeuger eines Fernwärmenetzes
z_{KWK}	KWK-Zuschlag

1 Einleitung

Die gekoppelte Erzeugung von Strom und Wärme in **KWK**-Anlagen ist eine der brennstoffeffizientesten Erzeugungsformen im Strommarkt. Dieses Potential wurde von der Politik wahrgenommen und die Erhöhung der gekopplten Erzeugung gilt als ein erklärtes Ziel der Energiepolitik (vgl. z.B. **KWKG 2015** und **EP 2010**). Durch die gekoppelte Erzeugung richtet sich der Betrieb nicht allein nach dem Strompreis und der Elektrizitätsnachfrage, sondern auch nach der lokalen Wärmenachfrage und den verfügbaren Erzeugungseinheiten im Wärmenetz. Für den **KWK**-Anlagenbetreiber ergeben sich dadurch Restriktionen für die Vermarktung des Stroms im Elektrizitätsmarkt. Aus dem gleichen Grund ergeben sich Herausforderungen aus Systemsicht: Die Flexibilität des Betriebs von **KWK**-Anlagen, die beispielsweise zum Ausgleich von Prognosefehlern Erneuerbarer Erzeugung genutzt werden kann, ist begrenzt. Diese Fragestellungen sind z.B. für Netzbetreiber wesentlich, da sie u.a. Einfluss auf die Versorgungssicherheit und die strategische Kraftwerksreserve haben können. Zu den weiteren Interessengruppen gehören Stromhändler, da Erzeugungsrestriktionen auch Rückwirkungen auf die Marktpreise haben können.

Es bestehen verschiedene Ansätze, um die Mindesterzeugung (und Maximalerzeugung) aus **KWK**-Anlagen zu modellieren. Hierzu zählen empirische Betrachtungen des Strommarktes (vgl. z.B. **Hirth 2015**) oder integrale fundamentaltheoretische Betrachtungen des Elektrizitäts- und Wärmemarktes (vgl. z.B. **Ravn 2001**, **Balmorel 2001** oder **WILMAR 2006**). Im Folgenden wird ein Kurzüberblick über einen weiteren Modellierungsansatz dieser Stromerzeugungsrestriktionen im Kontext der europäischen Energiesystemmodellierung gegeben, der auf **Felten 2016** beruht. Der Ansatz basiert auf einer fundamentaltheoretischen Betrachtung lokaler Wärmemärkte bzw. Wärmenetze. Die technischen¹ sowie wirtschaftlichen² Parameter werden für die einzelnen Fernwärmenetze bereitgestellt bzw. eigens im Modell berechnet. Hierdurch stehen die substantiellen Entscheidungsgrößen für die Bestimmung des wärmeseitigen **KWK**-Anlagenbetriebs zur Verfügung. Die Wärmeauskopplung wird anlagenscharf und in stündlicher Auflösung berechnet und ist die wesentliche Ausgangsgröße des Modells. Diese kann dann für die Strommarktmodellierung und weitere Anwendungen als Eingangsgröße dienen. Die detaillierte Betrachtung des Betriebs von **KWK**-Anlagen bietet somit die Möglichkeit, die Güte der beschriebenen Anwendungen zu erhöhen. Durch die quasi-isolierte Betrachtung der einzelnen Wärmemärkte ergibt sich die Möglichkeit, die Charakteristika der einzelnen Wärmenetze und der jeweils angeschlossenen Erzeugungseinheiten in einem Detaillierungsgrad zu betrachten, der in den o.g. Alternativansätzen keine Anwendung findet bzw. schwer darstellbar ist. Des Weiteren ist die vorgestellte Modellierung einfach parallelisierbar und flexibel mit Hinblick auf ihre Folgeanwendungen, was zu einer Verkürzung der Rechenzeiten und einer gesteigerten Nutzbarkeit führt.

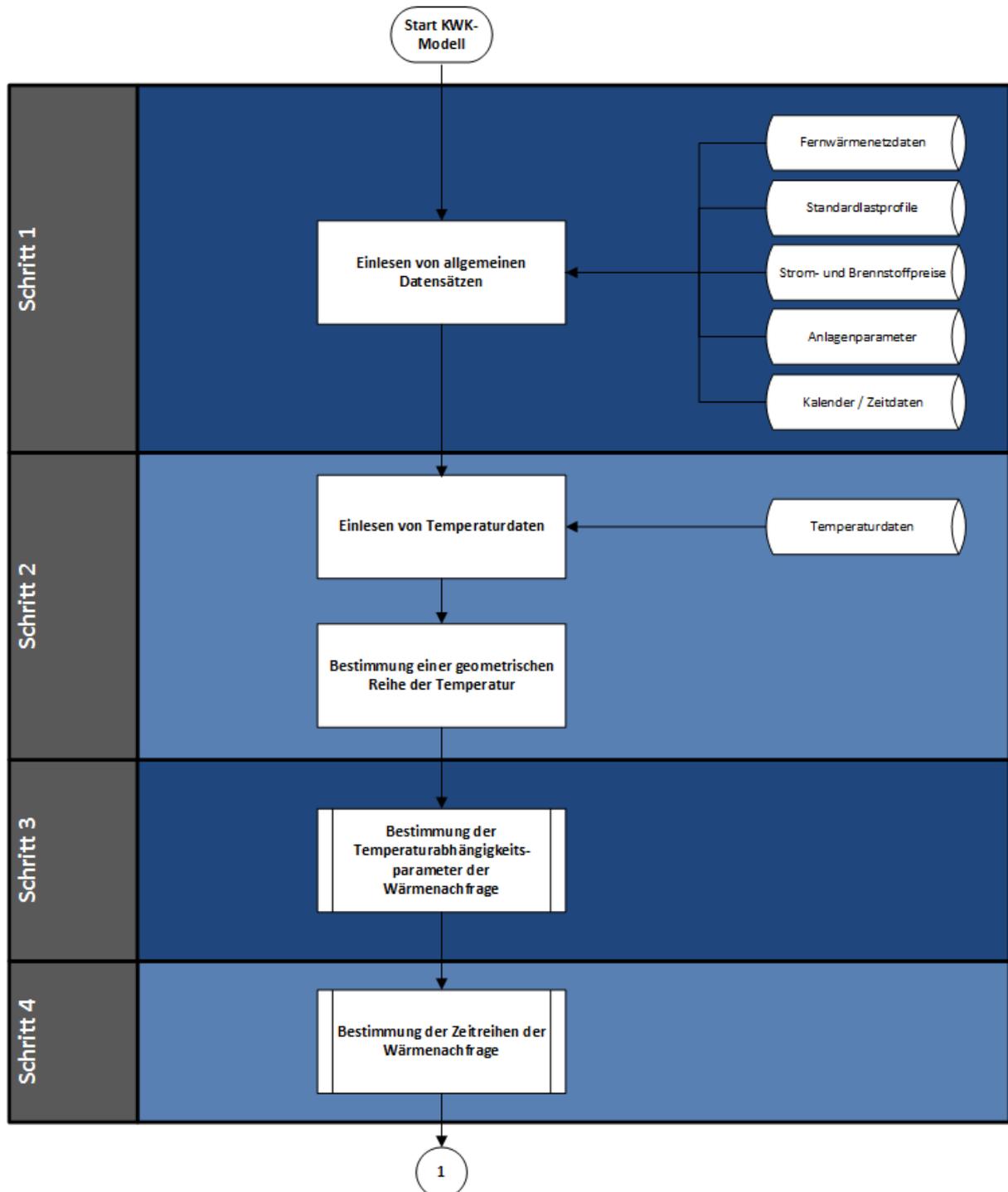
Das vorliegende Paper stellt die Methodik von **ebd.** inkl. einiger Erweiterungen dar. Es erläutert zudem die Datenstruktur und deren wesentliche Quellen. Das Paper ist wie folgt gegliedert. In Kapitel 2 wird die Methodik des Modells vorgestellt. Der Aufbau des Kapitels folgt dabei dem Modellaufbau und beginnt mit der Bestimmung der Wärmenachfrage. Daraufhin wird die Berechnung der Wärmeauskopplung dargestellt und zusätzlich der Einsatz von Wärmespeichern berücksichtigt. Es folgt die Umrechnung der Wärmeauskopplung in die minimale und maximale Stromerzeugung aus **KWK**-Anlagen. Kapitel 3 dient der Zusammenstellung der notwendigen Eingangsdaten und dem Verweis auf entsprechende Quellen. Dabei wird zwischen Deutschland und den benachbarten Ländern unterschieden. Zu jedem Berechnungsschritt des **KWK**-Modells werden in Kapitel 4 exemplarische Ergebnisse präsentiert. Abschließend wird in Kapitel 5 eine kurze Zusammenfassung sowie ein Ausblick gegeben.

¹Z.B. die stündliche Fernwärmenachfrage, vorhandene Erzeugungseinheiten und deren Kenngrößen und Betriebsparameter.

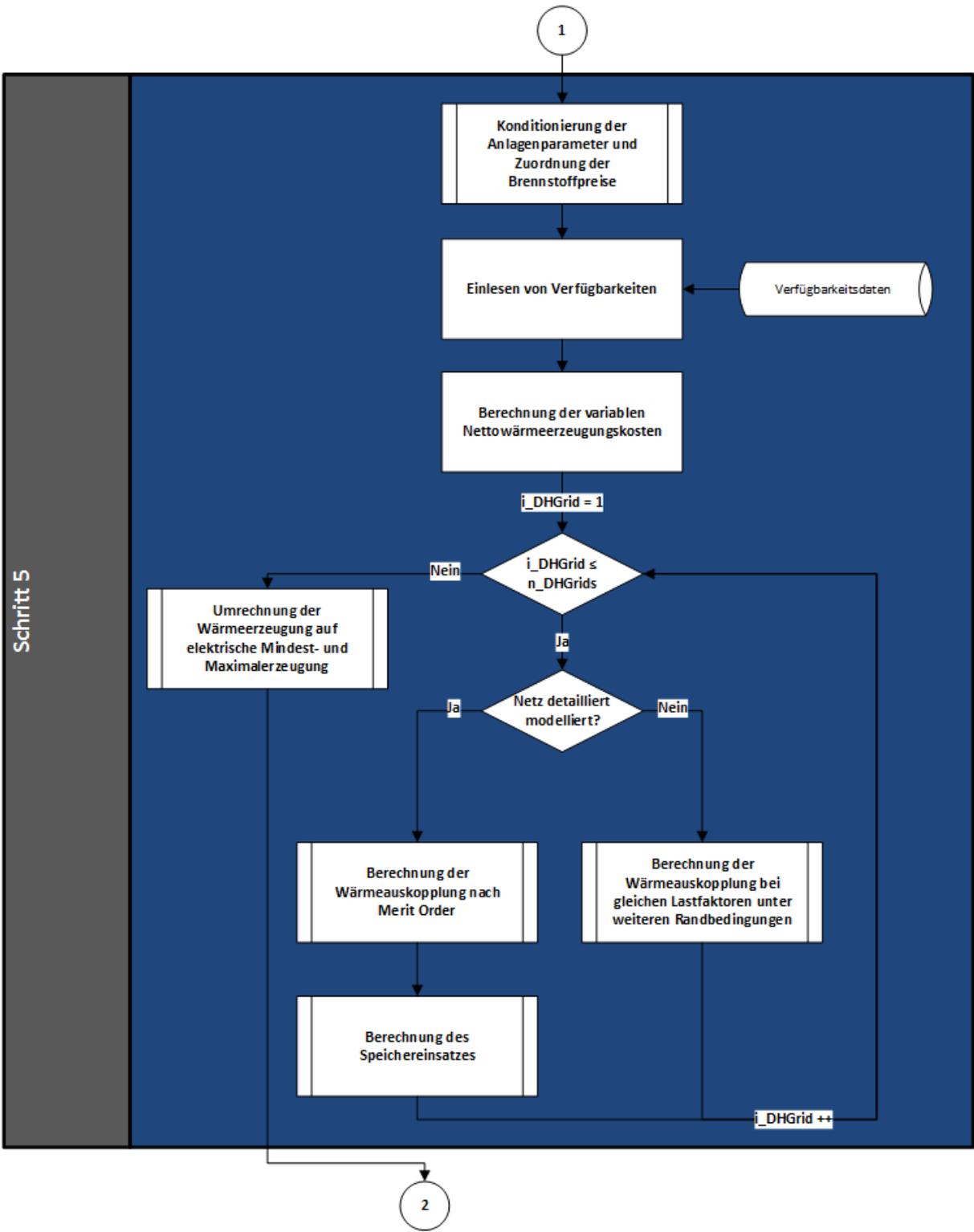
²Z.B. Brennstoffpreise, CO_2 -Preise und erwartete Strompreise

2 Methodik

Das KWK-Modell führt verschiedene Berechnungsschritte aus. Der grundsätzliche Programmablauf ist in Abbildung 1 skizziert.



Schritt 5



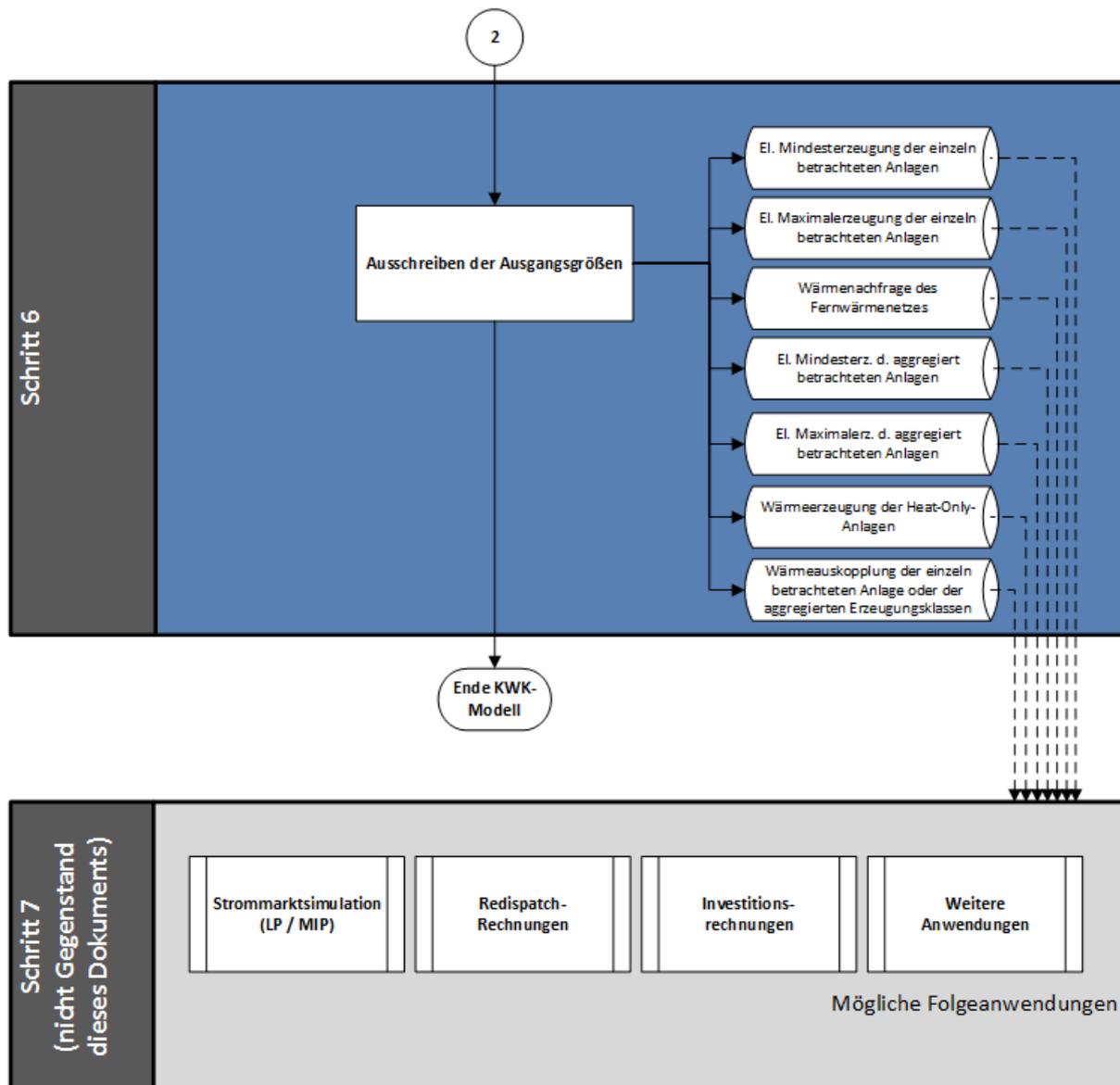


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Berechnungsschritte des KWK-Modells.

Die Teilprozesse in Abb. 1 werden im Folgenden erläutert. Ausgenommen davon sind die möglichen Folgeanwendungen in Schritt 7. Diese sind nicht Gegenstand dieses Dokuments. Das Modell wurde bereits erfolgreich mit der Strommarktsimulation im WILMAR Joint Market Model (s. WILMAR 2006 bzw. Felten 2016) und weiteren Marktmodellen gekoppelt. Hierzu und zu den weiteren unter Schritt 7 aufgezeigten Folgeanwendungen befinden sich derzeit Studien und Veröffentlichungen in der Erstellung. Es ist abhängig von der Folgeanwendung, welche Ausgangsgrößen des KWK-Modells benötigt werden. So kann für einige Anwendungen bereits die stündliche Wärmeauskopplung je Anlage als Eingangsgröße oder sogar nur die Fernwärmenachfrage genügen. Für andere Anwendungen sind weitere Berechnungen notwendig. Solche sind z.B. die Aggregation der Wärmeauskopplung je Kraftwerksklasse oder die direkte Vorgabe elektrischer Erzeugungsgrenzen. Letztere Berechnungen werden in Kapiteln 2.4 und 2.5 dargestellt.

2.1 Wärmenachfrage

Das KWK-Modell errechnet den Wärmebedarf ab KWK-Anlage. Vereinfachend wird im Folgenden der Begriff „Wärmenachfrage“ verwendet. Zur Berechnung der Wärmenachfrage d_Q werden folgende Eingangsdaten benötigt:

- geometrische Reihe der Temperaturverläufe des jeweiligen Fernwärmenetzstandortes
- jährliche Wärmeerzeugung
- Spitzenlaststunden
- Tagesprofile je Saison

Zunächst wird aus den Temperaturdaten des jeweiligen Fernwärmenetzes bestimmt, wie hoch der Anteil der temperaturabhängigen Nachfrage ist. Es wird eine lineare Temperaturabhängigkeit gemäß Abb. 2 angenommen.

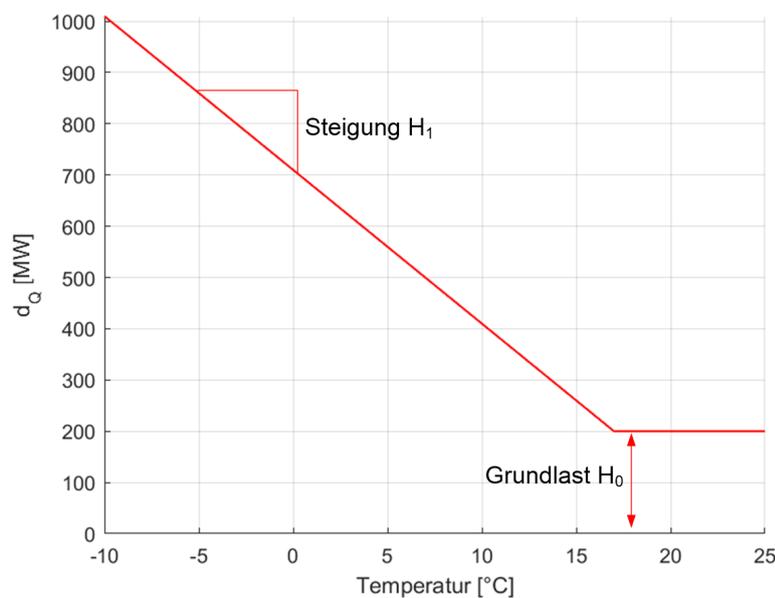


Abbildung 2: Darstellung der linear angenommenen Temperaturabhängigkeit der Wärmenachfrage.

Der formelmäßige Zusammenhang kann wie folgt ausgedrückt werden:

$$d_Q = H_0 + \underbrace{\frac{d_{Q,max} - H_0}{T_g - T_{min}}}_{H_1} \max(T_g - T, 0). \quad (1)$$

Hier ist H_0 die Grundlast, die auch oberhalb der Heizgrenztemperatur T_g im Fernwärmenetz anliegt. Die (negative) Steigung H_1 der Wärmenachfrage kann durch die maximale Wärmenachfrage innerhalb des Jahres $d_{Q,max}$, die Grundlast H_0 , die minimale Temperatur im Betrachtungszeitraum T_{min} und die Heizgrenztemperatur T_g ausgedrückt werden. T bezeichnet hier den geometrischen Reihenwert der Temperatur des betrachteten Zeitschritts. Die Parameter des Temperaturdiagramms (H_0 und H_1) werden durch die

integralen Zusammenhänge für jedes Fernwärmenetz einzeln bestimmt. Hierbei wird eine anteilige Mindestgrundlast angenommen. Mit den so ermittelten Parametern des Temperaturdiagramms (H_0 und H_1) lässt sich durch Multiplikation des Temperaturwertes und der Tagesprofile der stündliche Wärmenachfrageverlauf erzeugen.

Die Modellierung der Wärmenachfrage in heizwärmedominierten³ und industriell geprägten Wärmenetzen geschieht prinzipiell auf die gleiche Weise. Industriell geprägte Wärmenetze weisen allerdings in der Regel einen höheren Grundlastanteil auf. Zudem sind die Charakteristika der täglichen Lastprofile der beiden Wärmenetztypen unterschiedlich. Diese Tatsachen erfasst die Methodik über die Eingangsdaten (siehe Kapitel 3).

2.2 Wärmeauskopplung

Bei der Berechnung der Wärmeauskopplung aus den jeweiligen KWK-Anlagen und weiteren Wärmeerzeugern wird zwischen zwei Berechnungsweisen unterschieden.

1. Netze, die aufgrund der Anzahl an angeschlossenen Wärmeerzeugern über die Möglichkeit zum kostenminimalen Wärmeerzeugereinsatz verfügen und die aufgrund ihrer Größe zugleich die relevantesten Fernwärmenetze darstellen:

In diesen Netzen wird der Wärmeerzeugereinsatz unter Verwendung eines erweiterten Merit-Order-Ansatzes bestimmt. Die Berechnungsschritte werden in Abschnitt 2.2.3 dargestellt. Im Folgenden werden diese Netze als detailliert abgebildete Fernwärmenetze (FWN-d) bezeichnet.

2. Kleinere Fernwärmenetze und solche Netze, die nicht innerhalb der Fokusgebiete der Strommarktsimulation liegen:

Da es zu einem unverhältnismäßig hohen Rechercheaufwand führen würde, auch relativ kleine Fernwärmenetze zu erfassen, und zugleich in diesen Netzen nur eine begrenzte Flexibilität bzgl. des Einsatzes von Wärmeerzeugern (aufgrund derer geringen Anzahl im jeweiligen Netz) besteht, werden die übrigen Fernwärmenetze zusammengefasst. Im Folgenden werden diese Netze als aggregiert abgebildete Fernwärmenetze (FWN-a) bezeichnet.

Die Berechnungsweise der Wärmeauskopplung in FWN-ds und FWN-as wird in Abschnitten 2.2.3 bzw. 2.2.4 dargestellt.

Vorgelagert zu den oben genannten Berechnungen werden die technischen Parameter der Wärmeerzeuger plausibilisiert und ggf. korrigiert. Die Begründung für diese Plausibilisierung wird in Abschnitt 2.2.1 gegeben. Danach werden für alle Wärmeerzeuger die variablen Kosten je Zeitschritt berechnet (siehe Abschnitt 2.2.2).

Eine Vereinfachung, die üblicherweise in der Marktmodellierung Anwendung findet (vgl. WILMAR 2006), ist die Beschränkung auf zwei KWK-Anlagentypen: Gegendruck- und Entnahme-Kondensations-Anlagen. Die entsprechende Zuordnung zu einem der beiden Typen ist Bestandteil des Eingangsdatensatzes. Für die möglichen Betriebszustände dieser Gruppen werden deren vereinfachten Betriebskennfelder ($P-\dot{Q}$ -Diagramme) zugrunde gelegt (vgl. ebd.). Hierbei wird ebenso die analoge Brennstoffverbrauchsfunktion wie in ebd. unterstellt.

³Hierzu gehören Netze, deren Wärmeabnehmerstruktur überwiegend durch Haushalte, Gewerbe, Handel und Dienstleistungen geprägt ist.

2.2.1 Plausibilisierung der KWK-Parameter

Durch folgende Punkte kann es zu inkonsistenten Werten innerhalb der KWK-Daten kommen, die einer Kontrolle und gegebenenfalls einer Korrektur bedürfen:

- Uneindeutige Angaben der max. Wärmeauskopplung in öffentlich verfügbaren Quellen (Internetseiten der Kraftwerksbetreiber, Datenzusammenstellungen von weiteren Autoren etc.), bei denen es gelegentlich zur Einrechnung der installierten Spitzenlastkesselleistung kommt.
- Technischen Charakteristika von KWK-Anlagen, die nicht durch die im KWK-Modell betrachteten Typen abgebildet werden.
- Inkonsistente Parameter und Parameterannahmen (Wirkungsgrade, Stromkennzahlen und maximale Wärmeauskopplung).

Der Eingangsdatensatz wird zu Beginn eines Modelllaufs auf die o.g. Inkonsistenzen geprüft. Falls inkonsistente Wertkombinationen festgestellt werden, werden für die verschiedenen KWK-Technologien Grenzwerte definiert, auf die die Stromkennzahl und / oder die max. Wärmeauskopplung korrigiert werden.

2.2.2 Berechnung der variablen Nettowärmeerzeugungskosten

Die variablen Nettowärmeerzeugungskosten $c_{var,t,u}$ bezeichnen die variablen Kosten, die je erzeugter Wärmemenge abzgl. der Erlöse des Stromverkaufs entstehen. Im Folgenden werden diese Kosten vereinfacht als variable Kosten bezeichnet. Die Berechnung der variablen Kosten für die verschiedenen Wärmeerzeuger wird wie folgt durchgeführt:

Für Entnahme-Kondensations-Anlagen:

$$c_{var,t,u} = \begin{cases} \frac{c_{BS} + \bar{c}_{CO_2}}{\eta_{th,max}} - \sigma p_{el,t} - \sigma z_{KWK} + c_{var,O+M} (\sigma + \delta) & \text{bei max. Stromerzeugung} \\ \delta p_{el,t} - \sigma z_{KWK} + c_{var,O+M} (\sigma + \delta) & \text{im Gegendruckbetrieb} \end{cases} \quad (2)$$

Für Gegendruck-Anlagen:

$$c_{var,t,u} = \frac{c_{BS} + \bar{c}_{CO_2}}{\eta_{th,max}} - \sigma p_{el,t} - \sigma z_{KWK} + c_{var,O+M} \sigma \quad (3)$$

Für Heizwerke und Spitzenlastkessel:

$$c_{var,t,u} = \frac{c_{BS} + \bar{c}_{CO_2}}{\eta_{th,max}} + c_{var,O+M} \quad (4)$$

Für Heizelemente:

$$c_{var,t,u} = \frac{p_{el,t} + c_{reg}}{\eta_{th,mittel}} + c_{var,O+M} \quad (5)$$

Hier sind c_{BS} die Brennstoffkosten [$\text{€}/MWh_{BS}$], \bar{c}_{CO_2} die äquivalenten CO_2 -Kosten [$\text{€}/MWh_{BS}$] (CO_2 -Preis multipliziert mit dem jeweiligen CO_2 -Faktor), $\eta_{th,max}$ der maximale thermische Wirkungsgrad [-], σ

die Stromkennzahl (im Gegendruckbetrieb) [-], $p_{el,t}$ der Strompreis [$\text{€}/MWh_{el}$] zur Stunde t , δ die Stromverlustkennziffer [-], z_{KWK} der KWK-Zuschlag [$\text{€}/MWh_{el}$], $c_{var,O+M}$ die variablen Betriebs- und Instandhaltungskosten [$\text{€}/MWh_{th}$] und c_{reg} steht für die zu zahlenden Netzentgelte und sonstige regulatorische Kostenbestandteile [$\text{€}/MWh_{el}$].

2.2.3 Detailliert betrachtete Fernwärmenetze

Im Folgenden sind die Berechnungsschritte zur Modellierung der Wärmeauskopplung in FWN-d für einen Zeitschritt t dargestellt:

1. Ordnen der Wärmeerzeuger in aufsteigender Reihenfolge ihrer variablen Kosten.
2. Subtraktion der Wärmeauskopplung aus verfügbaren Gegendruckanlagen im Netz, die im Zwangseinsatz betrieben werden, von der Wärmenachfrage: Es wird zunächst nur die technische Mindestwärmeerzeugung der o.g. Anlagen von der Wärmenachfrage subtrahiert. In einem späteren Schritt wird bestimmt, ob es kostenminimal ist, die im Zwangseinsatz betriebenen Gegendruckanlagen auch über ihre technische Mindestleistung hinaus zu betreiben.
3. Berechnung der Wärmeauskopplung aus dem Wärmeerzeuger mit den niedrigsten variablen Kosten und freier (noch nicht zur Nachfragedeckung berücksichtigter) verfügbarer Wärmeleistung. Es werden zwei Fälle unterschieden:
 - a) Falls die verbleibende Nachfrage durch den Wärmeerzeuger nicht vollständig gedeckt werden kann, ist dessen Wärmeauskopplung maximal. Falls es sich um eine Gegendruckanlage im Zwangseinsatz handelt, wird in diesem Schritt nur die zusätzliche Wärmeerzeugung (max. Wärmeerzeugung abzgl. Mindestwärmeerzeugung) berücksichtigt. Die verbleibende Nachfrage wird um die zusätzliche Wärmeerzeugung reduziert. Da noch ein Teil der Gesamtnachfrage zu decken ist, wird danach Schritt 3 abermals für den nächstteureren Wärmeerzeuger durchgeführt.
 - b) Falls die verbleibende Nachfrage durch den Wärmeerzeuger vollständig gedeckt werden kann, kann es zu zwei Fällen kommen:
 - i. Die verbleibende Wärmenachfrage ist größer als die technische Mindestwärmeerzeugung des Wärmeerzeugers: Dessen Wärmeerzeugung entspricht dann der verbleibenden Wärmenachfrage. Die Berechnung für diesen Zeitschritt ist abgeschlossen.
 - ii. Die verbleibende Wärmenachfrage ist kleiner als die technische Mindestwärmeerzeugung des Wärmeerzeugers. Falls es sich um eine Gegendruckanlage handelt, wird diese nicht berücksichtigt. Schritt 3 wird für den nächstteureren Wärmeerzeuger durchgeführt. Falls es sich um eine Entnahme-Kondensations-Anlage handelt, wird geprüft, ob es kostenminimal ist, die Entnahme-Kondensations-Anlage in Teillast zu betreiben. In diesem Fall entspricht die Wärmeerzeugung der Entnahme-Kondensations-Anlage der verbleibenden Nachfrage. Anderenfalls wird diese Anlage als Einheit mit freier verfügbarer Wärmeauskopplungskapazität vermerkt und bei Bedarf (falls die im Volllastbetrieb günstigeren Wärmeerzeuger nicht ausreichend Wärme zur Verfügung stellen können) später berücksichtigt.

Falls alle Wärmeerzeuger ihre maximale verfügbare Wärmeleistung unter den genannten Randbedingungen auskoppeln und die Nachfrage noch nicht vollständig gedeckt ist, wird die verbleibende Wärme durch einen nicht explizit modellierten (sehr teuren) Spitzenlastkessel bereitgestellt.

2.2.4 Aggregierte Fernwärmenetze

Im Folgenden sind die Berechnungsschritte zur Modellierung der Wärmeauskopplung in aggregiert betrachteten Fernwärmenetzen für einen Zeitschritt t^4 dargestellt. Schritte 6 bis 8 werden nur ausgeführt, falls die Wärmenachfrage durch den Betrieb der Wärmeerzeuger gemäß Berechnung in den vorangegangenen Schritten nicht bereits vollständig gedeckt ist:

1. Berechnung der durchschnittlichen variablen Kosten der Heizwerke und Spitzenlastkessel im aggregierten Netz.
2. Subtraktion der Wärmeauskopplung aus verfügbaren Gegendruckanlagen im aggregierten Netz, die im Zwangseinsatz betrieben werden, von der Wärmenachfrage. Hierbei wird zunächst nur die technische Mindestwärmeerzeugung berücksichtigt, in einem späteren Schritt wird bestimmt, ob es kostenminimal ist, die im Zwangseinsatz betriebenen Gegendruckanlagen auch über ihre technische Mindestleistung hinaus zu betreiben.
3. Identifikation der **KWK**-Anlagen, die kostengünstiger sind als die berücksichtigten Heizwerke / Spitzenlastkessel im aggregierten Netz.
4. Berechnung des durchschnittlichen thermischen Lastfaktors dieser **KWK**-Anlagen. Dieser ergibt sich aus dem Quotienten der verbleibenden Wärmenachfrage und der Summe der freien verfügbaren Wärmeauskopplungskapazitäten dieser **KWK**-Anlagen.
5. Identifikation der **KWK**-Anlagen, deren thermischer Mindestlastfaktor den o.g. durchschnittlichen Lastfaktor überschreitet⁵. Diese **KWK**-Anlagen werden beim errechneten durchschnittlichen (thermischen) Lastfaktor betrieben.
6. Identifikation der Entnahme-Kondensations-Anlagen, die auch im Niedriglastbereich (bei Kesselmindestlast) kostengünstiger sind als die Heizwerke / Spitzenlastkessel. Diese Anlagen werden dann mit dem sich ergebenden durchschnittlichen (thermischen) Lastfaktor betrieben.
7. Berücksichtigung der Heizwerke / Spitzenlastkessel zur Wärmeerzeugung.
8. Berücksichtigung der Entnahme-Kondensations-Anlagen zur Wärmeerzeugung, die zuvor aufgrund von zu hohen variablen Kosten nicht berücksichtigt wurden.

Falls alle Wärmeerzeuger ihre maximale verfügbare Wärmeleistung unter den genannten Randbedingungen auskoppeln und die Nachfrage noch nicht vollständig gedeckt ist, wird die verbleibende Wärme durch einen nicht explizit modellierten (sehr teuren) Spitzenlastkessel erzeugt.

⁴Die Berechnungen werden für individuelle Zeitschritte ausgeführt. Durch die Berücksichtigung eines gleitenden Mittelwerts der Strompreise können auch Werte der umliegenden Zeitschritte Einfluss auf das Minimierungskalkül nehmen.

⁵Der thermische Mindestlastfaktor einer **KWK**-Anlage ergibt sich aus dem Quotienten der Wärmeauskopplung bei technischer thermischer Mindestleistung und der maximalen Wärmeauskopplungskapazität.

2.3 Wärmeauskopplung unter Berücksichtigung von Speichern

Wärmespeicher ermöglichen einen flexibleren Einsatz von KWK-Anlagen, indem sie die Strom- und Wärmeerzeugung partiell entkoppeln (Fraunhofer 2014). Wichtige Modellparameter für den Einsatz von Wärmespeichern sind die Speicherkapazität, die Ein- und Ausspeicherleistung, sowie der Wirkungsgrad der Ein- und Ausspeicherung. In dem hier vorgestellten Ansatz wird der Speichereinsatz nur für detailliert modellierte Netze abgebildet, da eine Ein- und Ausspeicherung für die aggregierten Netze aufgrund unterschiedlicher geografischer Lagen der Einheiten nicht plausibel ist.

Die Abbildung von Wärmespeichern ist unter Beibehaltung des Simulationsansatzes unter Verwendung einer Heuristik möglich und wird in einer dem Merit-Order-Modell nachgelagerten Berechnung durchgeführt. Es sind die stündliche Wärmebereitstellung, die freie Wärmekapazität sowie die variablen Kosten der Wärmebereitstellung sämtlicher Anlagen bekannt und dienen als Input-Größen. Da Wärmespeicher in Fernwärmenetzen in der Regel als Tagesspeicher ausgelegt sind, wird ein Speicherzyklus pro Tag abgebildet⁶. D.h., dass der Speicher pro Tag maximal einmal vollständig be- und entladen wird. Wärmeübertragungsverluste werden durch den Gesamtwirkungsgrad $\eta_{in/out}$ des gesamten Speichervorgangs berücksichtigt, d.h. von der Einspeicherung bis zur Ausspeicherung der Wärme. Der Füllstand des Speichers zu Beginn eines Tages ist im Modell optimal gewählt, d.h. in der ersten Stunde, in welcher der Speicher genutzt wird, steht dieser in der erforderlichen Richtung (Ladung oder Entladung) zur Verfügung.

In den Stunden mit hohen variablen Nettowärmeerzeugungskosten wird der Speicher zum „Peak-Shaving“ eingesetzt. Hohe variable Wärmekosten können z.B. durch niedrige Strompreise oder eine hohe Wärmenachfrage bedingt sein. Die Wärmeproduktion der KWK-Anlagen oder Heizwerke mit hohen variablen Wärmekosten wird reduziert und durch eine Entladung des Speichers ersetzt. Umgekehrt wird der Speicher in Stunden mit niedrigen Wärmebereitstellungskosten gefüllt.

Innerhalb eines Tages werden im Modell folgende Schritte durchgeführt:

1. Die Wärmeerzeugungen, die abgeschaltet werden können, werden nach variablen Kosten absteigend sortiert. Die Wärmeerzeugungen, die zugeschaltet werden können, werden aufsteigend sortiert. Falls an einem Tag keine freie Wärmebereitstellungskapazität vorliegt, kann der Speicher nicht eingesetzt werden, da keine Anlagen zum Laden des Speichers zur Verfügung stehen.
2. Der thermische Speicher wird eingesetzt, indem er pro Simulationsschritt die Wärmeerzeugung mit den niedrigsten variablen Kosten erhöht (Ladung) und die Wärmeerzeugung mit den höchsten variablen Kosten reduziert (Entladung). Der Speichereinsatz wird folgendermaßen bestimmt:
 - a) Für den Speichereinsatz müssen zwei Bedingungen erfüllt sein, die in jedem Simulationsschritt geprüft werden:
 - i. Es ist freies Speichervolumen für Ein- und Ausspeicherung verfügbar.
 - ii. Die Spreizung zwischen den variablen Wärmeerzeugungskosten $c_{var,t,u}$ der Anlagen $u = 1$ bis $u = n$ ist so groß, dass durch den Speicher positive Deckungsbeiträge erzielt werden. Formal kann dieser Zusammenhang wie folgt ausgedrückt werden:

⁶Dies entspricht der Standardkonfiguration des Modells. Das Modell bietet die Möglichkeit, mit weiteren typisierten Zyklusdauern zu rechnen.

$$c_{var,min} = \min_{t \in [1,24], u \in [1,n]} c_{var,t,u} \quad (6)$$

$$c_{var,max} = \max_{t \in [1,24], u \in [1,n]} c_{var,t,u} \quad (7)$$

$$\frac{c_{var,min}}{\eta_{in,out}} \leq c_{var,max} \quad (8)$$

Dabei sind $\eta_{in/out}$ der Gesamtwirkungsgrad der Ein- und Ausspeicherung der Wärme, $c_{var,min}$ die variablen Kosten der zuzuschaltenden Anlage und $c_{var,max}$ die Kosten der abzuschaltenden Anlage. Laufen Entnahme-Kondensations-Einheiten unter ihrer Mindestlast, werden dabei die variablen Kosten für kleine Lastfaktoren verwendet.

b) Pro Simulationsschritt wird die verschobene Wärmeerzeugung begrenzt durch:

- die verfügbare stündliche Speicherleistung für eine Ladung bzw. Entladung,
- die in den günstigen Stunden freie Wärmebereitstellungskapazität (Differenz aus Wärmeerzeugung ohne Speichereinsatz und maximaler Wärmeerzeugung),
- die in teuren Stunden abschaltbare Wärmeerzeugung⁷ und
- das verfügbare Speichervolumen für Ein- und Ausspeicherung, welches in jedem Simulationsschritt um die verschobene Wärmemenge reduziert wird.

In der Regel sollte durch das Merit-Order-Modell in derselben Stunde keine Anlage eingesetzt werden, deren variable Kosten größer sind als die variablen Kosten anderer Anlagen. Dieser Zustand tritt allerdings auf, wenn der Mindestlastfaktor einer Anlage nicht erreicht wird und folglich eine teurere Anlage eingesetzt wird. Daher wird innerhalb der Speicherfunktion geprüft, ob die variablen Kosten einer nicht produzierenden Einheit kleiner sind, als die einer produzierenden Einheit. In diesem Fall findet kein Speichereinsatz statt.

2.4 Minimale Stromerzeugung

Nachdem die Wärmeauskopplung berechnet ist, wird diese in Restriktionen der elektrischen Erzeugung umgerechnet. Dies erfolgt auf Grundlage der vereinfachten P - \dot{Q} -Diagramme für die minimale Stromerzeugung $P_{el,min}$ wie folgt:

Für Entnahme-Kondensations-Anlagen:

$$P_{el,min} = \begin{cases} \max(\sigma\dot{Q}, P_{tech,min}) & \text{falls } \dot{Q} > 0 \text{ oder im Zwangseinsatz} \\ 0 & \text{falls } \dot{Q} = 0 \text{ und nicht im Zwangseinsatz} \end{cases} \quad (9)$$

Für Gegendruck-Anlagen:

$$P_{el,min} = \sigma\dot{Q} \quad (10)$$

⁷Für Gegendruckanlagen wird berücksichtigt, dass die Wärmeerzeugung nur bis zur thermischen Mindestleistung reduziert werden kann.

Für Entnahme-Kondensations-Anlagen besteht die Möglichkeit, zeitvariable (Winter / Sommer) technische Mindestleistungen $P_{tech,min}$ im Zwangseinsatz zu modellieren. Dies ist nicht explizit in Gl. 9 dargestellt.

2.5 Maximale Stromerzeugung

Die Berechnung der maximalen Stromerzeugung $P_{el,max}$ erfolgt analog (auf Basis des P - \dot{Q} -Diagramms):

Für Entnahme-Kondensations-Anlagen:

$$P_{el,max} = \max\left(P_{el,nom} - \delta\dot{Q}, P_{el,min}\right) \quad (11)$$

Für Gegendruck-Anlagen:

$$P_{el,max} = \sigma\dot{Q} \quad (12)$$

3 Daten

In diesem Kapitel werden die Datenstruktur des **KWK**-Modells und die wesentlichen Quellen erläutert. Hierbei wird unterschieden zwischen dem Wärmemarkt in Deutschland und weiteren europäischen Ländern. Damit ist zum einen die Datengrundlage für die Modellierung gelegt. Zum anderen sind wesentliche energiewirtschaftliche Kennzahlen des Wärmemarktes verfügbar, um die Plausibilität der Modellierung zu prüfen. Folgende Angaben werden benötigt:

- Wärmebedarf differenziert nach Sektoren (impliziert Heizwärme und Prozesswärme)
- Wärmeerzeugung differenziert nach Brennstoff bzw. Technologie sowie differenziert nach öffentlicher und nicht-öffentlicher Versorgung
- Wärme- und Stromerzeugung in **KWK**-Anlagen differenziert nach Brennstoff sowie differenziert nach öffentlicher und nicht-öffentlicher Versorgung
- Ungekoppelte Wärmeerzeugung differenziert nach Brennstoff sowie differenziert nach öffentlicher und nicht-öffentlicher Versorgung

3.1 Fernwärme in Deutschland

Als Datengrundlage für Deutschland wird neben den Statistiken der International Energy Agency (**IEA**) (**IEA 2013**, **IEA 2015**) eine Vielzahl unterschiedlicher Quellen herangezogen. Den Wärmebedarf nach Sektoren kann man den Daten der **IEA** entnehmen. Dieser entspricht dem Fernwärmebedarf der Energiebilanzen des **AGEB** und weist nur die Fernwärme von **KWK**-Anlagen und Heizwerken der allgemeinen Versorgung größer 1 MW aus. Im Sinne der Energiebilanz Deutschlands ist die Wärmeerzeugung in Industriekraftwerken und in **KWK**-Kleinanlagen keine Fernwärme. Der Brennstoffeinsatz dieser Anlagen ist im jeweiligen Endenergieverbrauch enthalten. Die erzeugte Wärme dieser Anlagen wird in der Energiebilanz nicht aufgeführt

(AGEB 2015). Um den daraus resultierenden großen Unterschied zwischen Wärmeerzeugung und Fernwärmebedarf zu erklären, werden in dieser Studie zusätzlich Wärmebedarfe aufgeführt, die durch weitere **KWK**-Anlagen und Industrieanlagen gedeckt werden.

Eine einheitliche statistische Erfassung der Wärmeerzeugung in **KWK**-Anlagen und Heizwerken liegt für Deutschland nicht vor (vgl. Ökolnst 2015, UBA 2014). Die Aufbereitung der Daten in dieser Studie beruht auf folgendem Gerüst. Die Wärme, die in Fern- oder Nahwärmenetzen bereitgestellt wird oder in industriellen Prozessen zumindest teilweise in **KWK**-Anlagen erzeugt wird, ist in fünf Bereiche aufgeteilt, welche sich aus der Verfügbarkeit der Daten in verschiedenen Quellen ergeben:

- Wärmeerzeugung in **KWK**-Anlagen der öffentlichen Versorgung (AGEB 2015, IEA 2013, IEA 2015)
- Wärmeerzeugung in Heizkesseln der öffentlichen Versorgung (AGEB 2016, IEA 2013, IEA 2015, StBA 2016c)
- Wärmeerzeugung in **KWK**-Anlagen der nicht-öffentlichen Versorgung (StBA 2016b, AGEB 2015)
- Wärmeerzeugung in Heizkesseln der nicht-öffentlichen Versorgung (StBA 2016b)
- Wärmeerzeugung in weiteren **KWK**-Anlagen (biogene **KWK**-Anlagen und fossile **KWK**-Anlagen unter 1 MW) (AGEB 2015, Ökolnst 2015)

Zur Validierung werden unter anderem eine Zusammenstellung der **KWK**-Erzeugung des Instituts für angewandte Ökologie (Öko-Institut) (ebd.), der Hauptbericht des Energieeffizienzverbands für Wärme, Kälte und **KWK** e. V. (AGFW) 2012 (AGFW 2013), Fernwärmedaten von Euroheat (EuroHeat 2013) sowie die Energiedaten des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) (BMWi 2016) herangezogen. Die Stromerzeugung aus **KWK**-Anlagen ist den Auswertungstabellen der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB) (AGEB 2015), sowie der Datenzusammenstellung des Öko-Instituts (Ökolnst 2015) entnommen.

Die Angaben des AGEB beruhen auf Erhebungen des statistischen Bundesamtes StBA: für **KWK**-Anlagen der öffentlichen Versorgung auf der Erhebung „43311 Monatsbericht über die Elektrizitätsversorgung (066)“ (StBA 2016a), für **KWK**-Anlagen der nicht-öffentlichen Versorgung auf der Erhebung „43351 Erhebung über Stromerzeugungsanlagen im Bergbau und Verarbeitenden Gewerbe (067)“ (StBA 2016b), für Heizwerke der öffentlichen Versorgung auf der Erhebung „43411 Jahreserhebung über Erzeugung, Verwendung, Bezug und Abgabe von Wärme (064)“ (StBA 2016c). Die Erhebungen 066 und 067 berücksichtigen **KWK**-Anlagen größer 1 MW elektrisch. Strom- und Wärmeerzeugung aus weiteren **KWK**-Anlagen werden vom Öko-Institut im Auftrag des BMWi zusammengetragen und jährlich veröffentlicht (nähere Informationen zum Vorgehen in Ökolnst 2015). Darunter befinden sich fossile Blockheizkraftwerke (BHKW) mit einer elektrischen Leistung kleiner 1 MW. Zudem werden Daten zu biogenen **KWK**-Anlagen, die nicht in den Erhebungen 066 und 067 des StBA enthalten sind, ausgewiesen. Diese werden von der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik geliefert (ebd.).

Die ungekoppelte Wärmeerzeugung wird in keiner Statistik umfänglich erfasst. Ein Teil der ungekoppelten Wärmeerzeugung der öffentlichen Versorgung lässt sich aus der Erhebung 066 ableiten. Es wird eine gesamte Nettowärmeerzeugung, sowie die sich darunter befindende Nettowärmeerzeugung aus **KWK**-Anlagen angegeben. Die Differenz dieser beiden Größen stellt die ungekoppelte Nettowärmeerzeugung z.B. aus Spitzen- oder Reservekesseln dar. Diese Anlagen befinden sich in unmittelbarer Nähe zur **KWK**-Anlage und unterstützen bzw. ersetzen die Wärmeauskopplung der **KWK**-Anlagen. Gleichmaßen lässt sich die

ungekoppelte Wärmeerzeugung aus Anlagen der nicht-öffentlichen Versorgung aus der Erhebung 067 herleiten. Des Weiteren wird die Nettowärmeerzeugung in reinen Heizwerken der öffentlichen Versorgung in der Erhebung 064 über Erzeugung und Verwendung von Wärme veröffentlicht (StBA 2016c). Diese beinhaltet Anlagen mit einer thermischen Leistung größer 2 MW. Die Wärmeerzeugung aus reinen Heizwerken der nicht-öffentlichen Versorgung wird vernachlässigt, da hierzu keine Daten publiziert werden.

3.2 Fernwärme in Nachbarländern

Für die Nachbarländer Deutschlands sowie für weitere europäische Länder kann auf die Statistiken der IEA zurückgegriffen werden (bspw. IEA 2015, IEA 2013)⁸.

3.3 KWK-Parameter (wärmeseitig)

In diesem Abschnitt wird auf wärmeseitige KWK-Parameter eingegangen und auf entsprechende Literatur verwiesen. In Kapitel 2.2.1 werden bereits einige Zusammenhänge erklärt und Richtwerte angegeben. In Panos 2013 werden grundlegende Zusammenhänge der KWK-Parameter für verschiedene Anlagen erläutert. Es lassen sich beispielhafte Stromverlustkennziffern und Stromkennzahlen für Entnahme-Kondensations-Anlagen entnehmen. Grundsätzlich gelten die folgenden formalen Zusammenhänge:

$$\text{Stromkennzahl } \sigma = \frac{P}{\dot{Q}}, \quad (13)$$

$$\text{Stromverlustkennziffer } \delta = \frac{\Delta P}{\dot{Q}}, \quad (14)$$

$$\frac{\sigma + \delta}{\bar{\eta}_{Kond}} = \frac{1 + \sigma}{\eta_{tot,KWK}}. \quad (15)$$

ΔP kennzeichnet die durch die Wärmeauskopplung \dot{Q} verursachten Stromeinbußen gegenüber dem Kondensationsbetrieb. Für Gasturbinen-Heizkraftwerke und Verbrennungsmotoren ist die Stromverlustziffer δ praktisch gleich null (ebd.). Der Zusammenhang in Formel 15 ergibt sich aus dem gleichen Brennstoffverbrauch der beiden Betriebsmodi. $\bar{\eta}_{Kond}$ steht für den „äquivalenten“ Kondensationswirkungsgrad bei ungekoppelter Stromerzeugung, $\eta_{tot,KWK}$ für den Gesamtwirkungsgrad bei gekoppelter Strom- und Wärmeerzeugung. Ein ähnlicher Zusammenhang wird im Modell durch die Annahme einer entsprechenden Brennstoffverbrauchsfunktion (gemäß WILMAR 2006) berücksichtigt. Auf Basis weiterer ähnlicher Quellen werden die wärmeseitigen KWK-Parameter für die Modellierung recherchiert bzw. generiert (vgl. UBA 2014, VDI 2005, IER 2009, IER 2014). Diese werden ferner durch thermodynamische Betrachtungen plausibilisiert und durch Einzelfallrecherchen ergänzt.

4 Exemplarische Ergebnisse

Analog zu den methodikorientierten Abschnitten (Abschnitt 2ff.) werden im Folgenden die Modellergebnisse exemplarisch aufgezeigt und diskutiert.

⁸(In dieser Studie werden die Länder AT, BE, CH, CZ, DK, FR, LU, NL, NO, PL und SE berücksichtigt.)

4.1 Wärmenachfrage

Im ersten Schritt des KWK-Modells wird für jedes Netz ein stündliche Wärmenachfrage bestimmt. In den Abbildungen 3 und 4 sind diese für ein heizwärmedominiertes und ein prozesswärmedominiertes Netz dargestellt.

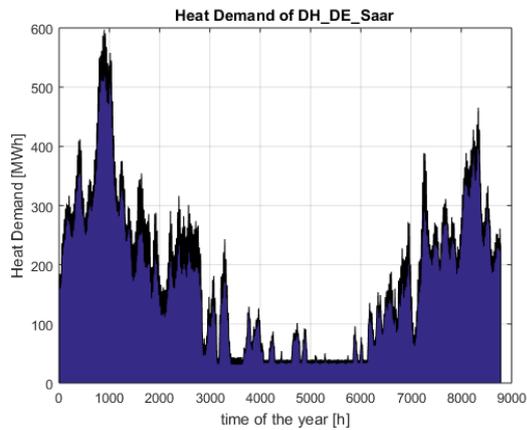


Abbildung 3: Modellierter Wärmenachfrage in einem beispielhaften heizwärmedominierten Fernwärmenetz (hier: Fernwärmenetz Saar).

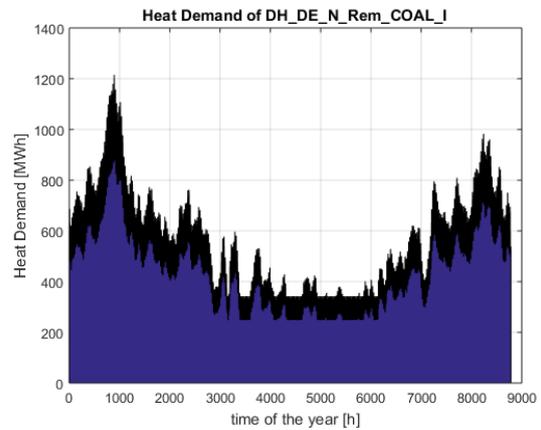


Abbildung 4: Modellierter Wärmenachfrage in einem beispielhaften prozesswärmedominierten Fernwärmenetz (hier: aggregierte norddeutsche industrielle Fernwärmenachfrage, die aus kohlegefeuerten KWK-Anlagen gedeckt wird).

Der saisonale Verlauf der Wärmenachfrage ist in beiden Abbildung zu erkennen. Es wird jedoch deutlich, dass in prozesswärmedominierten Netzen (Abbildung 4) der Anteil des temperaturunabhängigen Wärmebedarfs höher ist. Der Unterschied zwischen Sommer- und Wintermonaten ist aufgrund der höheren Grundlast weniger stark ausgeprägt als in Heizwärmenetzen (Abbildung 3).

4.2 Wärmeauskopplung

Die modellierte Wärmeerzeugung der jeweiligen Anlagen zur Deckung der Wärmenachfrage eines Netzes ist in den Abbildungen 5 und 6 veranschaulicht.

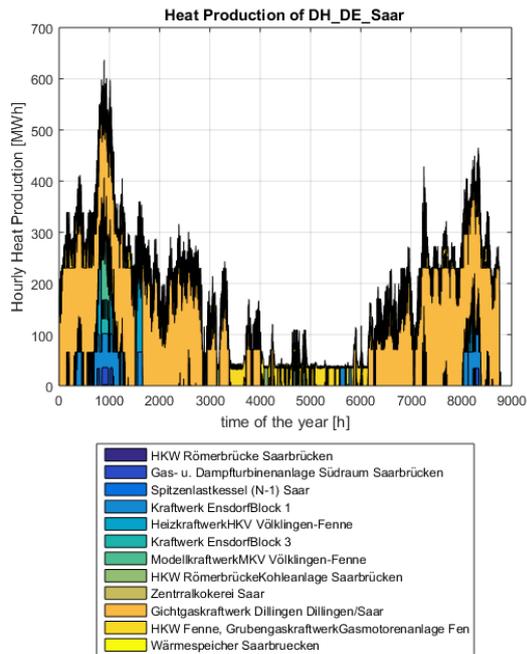


Abbildung 5: Modellierter Wärmeezeugung nach Wärmeerzeugern in einem beispielhaften heizwärmedominierten Fernwärmenetz (hier: Fernwärmenetz Saar) - zugleich Beispiel für ein detailliert modelliertes Fernwärmenetz.

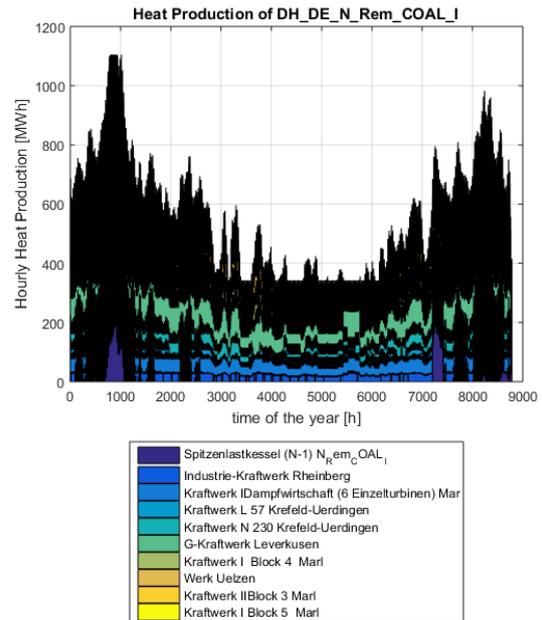


Abbildung 6: Modellierter Wärmeezeugung nach Wärmeerzeugern in einem beispielhaften prozesswärmedominierten Fernwärmenetz (hier: aggregierte norddeutsche industrielle Wärmeezeugung aus kohlegefeuerten KWK-Anlagen) - zugleich Beispiel für ein aggregiert betrachtetes Fernwärmenetz.

Im Vergleich zu den Abbildungen 3 und 4 wird sichtbar, dass die gestapelte Wärmeezeugung der einzelnen Anlagen die Wärmenachfrage bedient. In Abbildung 5 wird ersichtlich, dass die KWK-Anlagen, die mit Gas befeuert werden, nur zu Spitzenlastzeiten zur Fernwärmenachfragedeckung herangezogen werden. Im Sommer wird zuerst das HKW Fenne genutzt, da es das günstigste Kraftwerk zur Nachfragedeckung ist, das zugleich im zulässigen Betriebsbereich betrieben werden kann. In Abbildung 6 wird ein aggregiert betrachtetes Fernwärmenetz dargestellt. Es wird deutlich, dass eine Vielzahl von Erzeugern in ähnlicher Fahrweise die Gesamtnachfrage decken.

4.3 Wärmeauskopplung unter Berücksichtigung von Speichern

Der Einsatz von Speichern beeinflusst die Wärmeproduktion von KWK-Anlagen und Heizwerken in detailliert modellierten Netzen. In Abbildung 7 werden die Ergebnisse des Speichereinsatzes im Wärmenetz Saar über einen Zeitraum von 48 Stunden dargestellt.

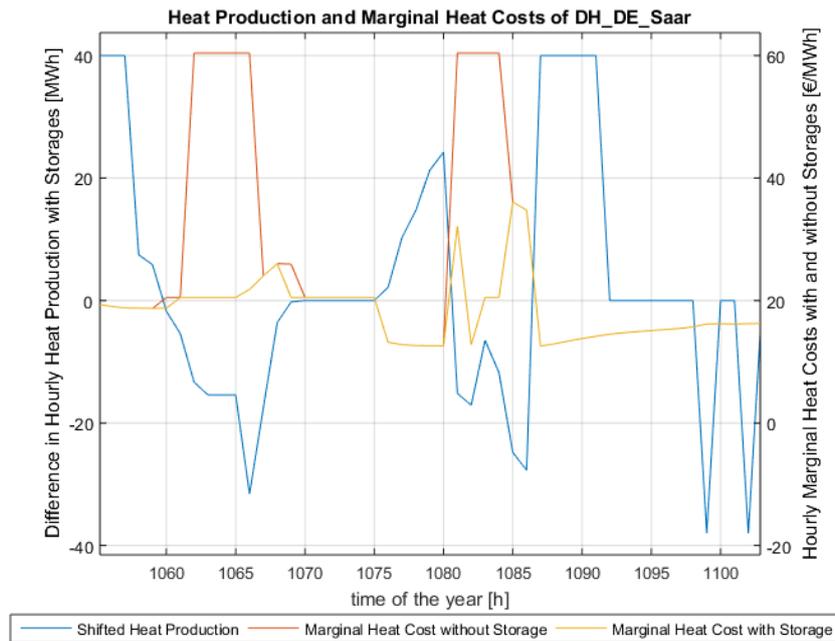


Abbildung 7: Verschiebung der Wärmeerzeugung durch einen Wärmespeicher auf Basis der marginalen Wärmeerzeugungskosten in einem beispielhaften Fernwärmenetz (hier: Fernwärmenetz Saar).

Die Produktion der Einheiten in diesem Netz kann pro Stunde maximal um die Ein- und Ausspeicherleistung des thermischen Speichers (in Abbildung 7: 40 MW) verschoben werden. Eine positive Verschiebung der Wärmeauskopplung der Anlagen des Fernwärmenetzes bedeutet hier eine Ladung des Speichers. Diese wird in Stunden mit geringen marginalen Wärmekosten durchgeführt. Die Wärmeverluste werden bei der Entladung berücksichtigt, sodass sich bei einem Wirkungsgrad $\eta_{in/out}$ von 0.95 (vgl. Prognos 2011) eine negative Verschiebung der Wärmeauskopplung von 38 MW ergibt. Die Entladung des Speichers ersetzt die Wärmeauskopplung der sonstigen Anlagen in Stunden mit hohen marginalen Kosten. Wird in einer Stunde die Wärmeauskopplung der Anlage mit marginalen Wärmekosten durch den Speicher ersetzt, ergeben sich in dieser Stunde geringere marginale Wärmekosten (gelbe Linie) als ohne Wärmespeicher (rote Linie).

4.4 Minimale Stromerzeugung

Die relative Mindeststromerzeugung nach KWK-Anlagen ist in Abbildung 8 dargestellt. Die relativen Werte sind kumuliert dargestellt.

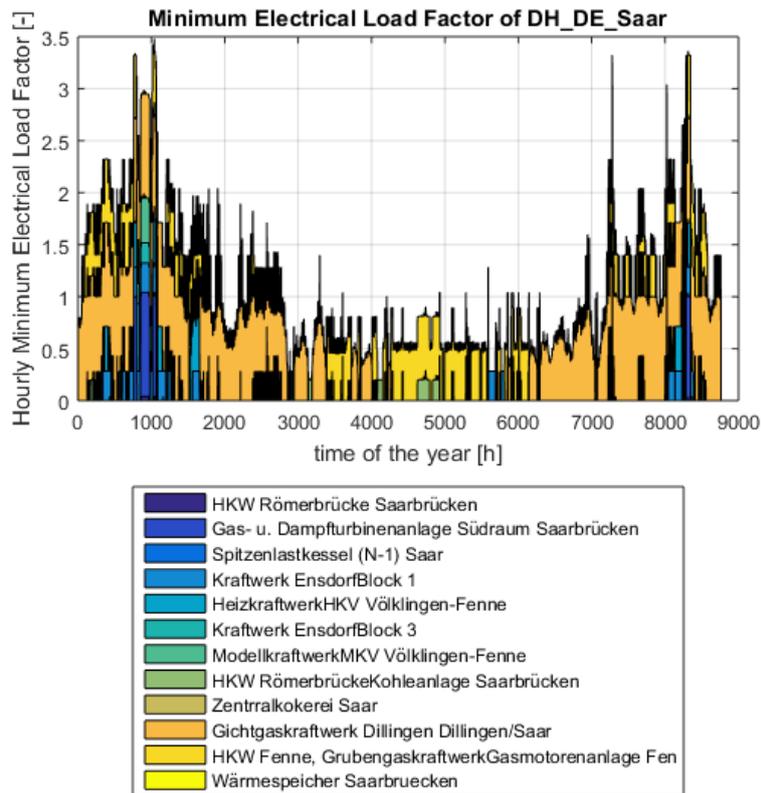


Abbildung 8: Relative Mindeststromerzeugung nach Wärmeerzeugern in einem beispielhaften Fernwärmenetz (hier: Fernwärmenetz Saar).

Prinzipiell sind in Abbildung 8 die gleichen Sachverhalte zu erkennen wie in Abbildung 5. Durch die Normierung auf die installierte Leistung ergibt sich im Vergleich eine andere Skalierung der Einzelwerte.

4.5 Maximale Stromerzeugung

Die relative Maximalstromerzeugung nach KWK-Anlagen ist in Abbildung 9 veranschaulicht. Die relativen Werte sind kumuliert dargestellt.

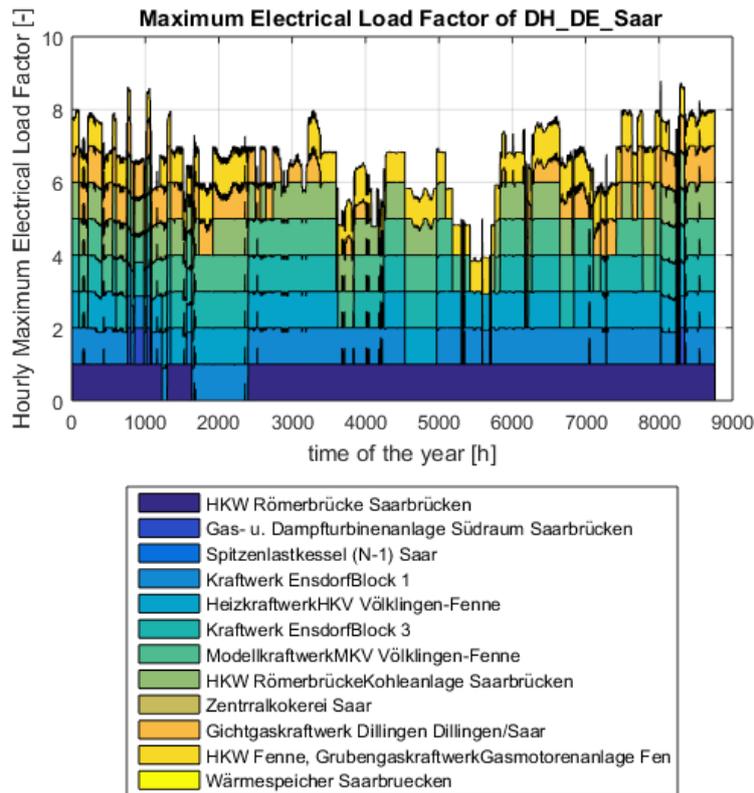


Abbildung 9: Relative Maximalstromerzeugung nach Wärmeerzeugern in einem beispielhaften Fernwärmenetz (hier: Fernwärmenetz Saar).

Hier gelten die gleichen Beobachtungen wie in Abbildungen 5 und 8.

4.6 Jährliche KWK-Stromerzeugung

Zur Validierung des **KWK**-Modells wird ein Vergleich der Modellergebnisse mit den Angaben verschiedener Statistiken für 2012 geführt. Die Verarbeitung bzw. Interpretation der Statistiken weist hierbei verschiedene Herausforderungen auf. Die historischen Vergleichswerte sind häufig selbst nur Näherungen, da sie auf verschiedenen Annahmen beruhen. Zudem sind keine Informationen über die Zuordnung der Wärmeerzeuger zu den berichteten aggregierten Erzeugungsgößen öffentlich verfügbar.

Ohne die Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien und aus biogenen Brennstoffen lässt sich die deutsche **KWK**-Stromerzeugung im Jahr 2012 auf ca. 78.000 GWh abschätzen⁹. Für dieses Referenzjahr weist das **KWK**-Modell in etwa eine **KWK**-Stromerzeugung von 74.000 GWh aus. Somit liegt der Fehler bei ca. 5,1 %. Neben den o.g. Unsicherheiten bzgl. der in den Statistiken ausgewiesenen Werte gibt es weitere Unschärfen durch die betrachteten **KWK**-Anlagen-Daten (bspw. Leistungsgrenzen der **KWK**-Anlagen, Berücksichtigung von reinen Heizwerken und Spitzenlastkesseln), die betrachteten Brennstoffe (bspw. Nicht-Berücksichtigung biogener Brennstoffe aufgrund des institutionellen Rahmens (Förderregimes)) oder durch

⁹Der Begriff KWK-Stromerzeugung wird hier im Sinne des KWKG 2015 §2 Nr. 16 verwendet, wonach „KWK-Strom‘ das rechnerische Produkt aus Nutzwärme und Stromkennzahl der KWK-Anlage“ ist, was von der Nettostromerzeugung zu unterscheiden ist (vgl. ebd. §2 Nr. 20)

die Klassifizierung von Industrie- und Heizwärme. Insbesondere mit Hinblick auf die Datenlage und den Umfang des Modells lässt sich eine Abweichung von ca. 5,1 % jedoch als sehr gering bewerten.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Das vorliegende Paper gibt einen Überblick über die Modellierung von Zeitreihen der KWK-Mindest- und Maximalerzeugung. Dabei wird auf die Methodik von Felten 2016 zurückgegriffen. Diese basiert auf einer fundamentaltheoretischen Betrachtung der Wärmemärkte bzw. Wärmenetze. Sie beginnt mit der Ableitung von stündlichen Fernwärmefachfragezeitreihen aus jährlichen Werten, die verschiedenen Statistiken entstammen. Danach folgt die Berechnung der stündlichen Wärmeauskopplung entsprechend einem klaren wirtschaftlichen Kalkül. Die anlagenscharfe Wärmeauskopplung kann, entweder direkt oder nach Umrechnung zu elektrischen Erzeugungsgrenzen, in Folgeanwendungen genutzt werden. Dieses Paper stellt zudem die Datenstruktur des KWK-Modells vor. Durch erste exemplarische Ergebnisse wird dargestellt, dass das KWK-Modell adäquate Ergebnisse liefert. Gegenüber bisherigen Ansätzen weist das vorgestellte KWK-Modell vielfache Vorteile auf. ebd. hat bereits einige der Modellgüteverbesserungen in der Strommarktmodellierung aufgezeigt. So trägt die Verwendung des KWK-Modells dazu bei, dass die Strommarktmodellierung den Einsatz verschiedener Brennstoffe deutlich realitätsnäher darstellt. Zudem führt es zu genauer modellierten Base-Preisen im Strommarkt. Vergleiche mit den Angaben verschiedener Statistiken für das Referenzjahr 2012 zeigen, dass die mit dem KWK-Modell erzielten Resultate eine sehr gute Übereinstimmung mit den historischen Erzeugungsgrößen aufweisen.

Weitere Veröffentlichungen befinden sich derzeit in der Erstellung. In diesen werden die Unterschiede in den Ergebnissen dieser Modellierung zu alternativen Ansätzen weitergehend analysiert.

Literatur

- AGEB - AG Energiebilanzen e.V. (2015). *Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland 1990 bis 2014*. URL: <http://www.ag-energiebilanzen.de/10-0-Auswertungstabellen> (besucht am 14.09.2016) (siehe S. 13).
- AGEB - AG Energiebilanzen e.V. (2016). *Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland*. URL: <http://www.ag-energiebilanzen.de/7-0-Bilanzen-1990-2014> (besucht am 11.05.2016) (siehe S. 13).
- AGFW - Der Effizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V. (2013). *Hauptbericht 2012*. Frankfurt am Main. URL: <https://www.agfw.de/zahlen-und-statistiken/agfw-hauptbericht/archiv/> (siehe S. 13).
- Blesl, M. (2014). *Kraft-Wärme-Kopplung im Wärmemarkt Deutschlands und Europas - eine Energiesystem- und Technikanalyse*. Hrsg. von Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung der Uni Stuttgart. Stuttgart. URL: http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2014/9626/pdf/FB_120_Blesl_KWK_Energie_und_Technikanalyse_pdf.pdf (besucht am 09.06.2016) (siehe S. 14).
- BMWi - Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2016). *Energiedaten: Gesamtausgabe*. URL: <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energiedaten-und-analysen/Energiedaten/gesamtausgabe> (siehe S. 13).
- Elkraft System u. a. (2001). *Balmorel: A Model for Analyses of the Electricity and CHP Markets in the Baltic Sea Region*. Balmorel Project. URL: <https://www.balmorel.com/images/downloads/Balmorel-A-Model-for-Analyses-of-the-Electricity-and-CHP-Markets-in-the-Baltic-Sea-Region.pdf> (besucht am 01.12.2017) (siehe S. 1).
- EP (2010). *Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC* (siehe S. 1).
- Euroheat and Power (2013). *Statistics Overview - Country by Country 2013 survey*. URL: <http://www.euroheat.org/wp-content/uploads/2016/03/2013-Country-by-country-Statistics-Overview.pdf> (besucht am 13.05.2016) (siehe S. 13).
- Felten, B. (2016). *CHP Plant Operation and Electricity Market Prices – Analytical Insights and Large-Scale Model Application*. 39th IAEE International Conference. URL: http://iaee.org/iaee2016/program_concurrent.aspx (besucht am 28.11.2017) (siehe S. 1, 4, 20).
- Fraunhofer IWES (2014). *Roadmap Speicher: Speicherbedarf für Erneuerbare Energien - Speicheralternativen - Speichereinsatz - Überwindung rechtlicher Hemmnisse*. URL: http://www.energiesystemtechnik.iwes.fraunhofer.de/de/presse-infothek/Presse-Medien/Pressemitteilungen/2014/Roadmap_Speicher (besucht am 07.06.2016) (siehe S. 10).
- Gores, S., Jörß, Wolfram und Zell-Ziegler, Carina (2015). *Aktueller Stand der KWK-Erzeugung (Dezember 2015): Im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie*. Öko-Institut e.V. Hrsg. von Öko-Institut e.V. Berlin. URL: <http://www.oeko.de/publikationen/p-details/aktueller-stand-der-kwk-erzeugung-dezember-2015/> (besucht am 09.05.2016) (siehe S. 13).
- Gores, S. u. a. (2014). *KWK-Ausbau: Entwicklung, Prognose, Wirksamkeit der Anreize im KWK-Gesetz unter Berücksichtigung von Emissionshandel, Erneuerbare-Energien-Gesetz und anderen Instrumenten*. Umweltbundesamt. Hrsg. von Umweltbundesamt. Berlin. URL: <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/kwk-ausbau-entwicklung-prognose-wirksamkeit-im-kwk> (besucht am 14.09.2016) (siehe S. 13 f.).

- Hirth, L. (2015). „Minimal Thermal Generation in Power Systems - Inferring Private Cost Parameters from Observed Firm Behavior“. In: *USAE Working Paper No. 15-203*. URL: <https://ssrn.com/abstract=2558730> (besucht am 30. 11. 2017) (siehe S. 1).
- IEA - International Energy Agency (2013). *Electricity information 2013*. Paris (siehe S. 12 ff.).
- IEA - International Energy Agency (2015). *Electricity information 2015*. Paris (siehe S. 12 ff.).
- IER - Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung der Uni Stuttgart (2009). *Kraft-Wärme-Kopplung (Hauptfach- und APMB-Versuch)*. Stuttgart. URL: <http://www.ier.uni-stuttgart.de/lehre/skripte/versuche/KWK/KWK.pdf> (besucht am 07. 09. 2016) (siehe S. 14).
- KWKG (2015). *Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz vom 21. Dezember 2015 in der Fassung vom 17. Juli 2017 (BGBl. I S. 2532)* (siehe S. 1, 19).
- Panos, K. (2013). *Praxisbuch Energiewirtschaft: Energieumwandlung, -transport und -beschaffung im liberalisierten Markt*. Berlin, Heidelberg (siehe S. 14).
- Ravn, H. F. (2001). *The Balmorel Model: Theoretical Background*. URL: <https://www.balmorel.com/images/downloads/The-Balmorel-Model-Theoretical-Background.pdf> (besucht am 01. 12. 2017) (siehe S. 1).
- StBA - Statistisches Bundesamt (2016a). *Produzierendes Gewerbe: Bereich Energie- und Wasserversorgung, Fachstatistiken im Bereich Energie- und Wasserversorgung, 43311 Monatsberichte über die Elektrizitätsversorgung der Jahre 2002 - 2015 (Erhebung 066)*. Wiesbaden (siehe S. 13).
- StBA - Statistisches Bundesamt (2016b). *Produzierendes Gewerbe: Bereich Energie- und Wasserversorgung, Fachstatistiken im Bereich Energie- und Wasserversorgung, 43351 Erhebung über Stromerzeugungsanlagen der Betriebe des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden der Jahre 2002-2015 (Erhebung 067)*. Wiesbaden (siehe S. 13).
- StBA - Statistisches Bundesamt (2016c). *Produzierendes Gewerbe: Bereich Energie- und Wasserversorgung, Fachstatistiken im Bereich Energie- und Wasserversorgung: Wärmeversorgung, 43411 Erhebung über Erzeugung und Verwendung von Wärme der Jahre 2003 - 2015: (Erhebung 064)*. Wiesbaden (siehe S. 13 f.).
- VDI - Verein Deutscher Ingenieure (2005). *VDI 4608, Energiesysteme - Kraft-Wärme-Kopplung - Begriffe, Definitionen, Beispiele*. Düsseldorf (siehe S. 14).
- Weber, C. u. a. (2006). *Wilmar Joint Market Model Documentation, Deliverable D6.2 (b)*. Roskilde (siehe S. 1, 4, 6, 14).
- Wünsch, M. u. a. (2011). *Beitrag von Wärmespeichern zur Integration erneuerbarer Energien: Im Auftrag des AGFW*. Berlin. URL: <https://www.prognos.com/publikationen/alle-publikationen/285/show/4bffdca8dbfec079939a62645b45f011/> (besucht am 07. 05. 2016) (siehe S. 17).

Correspondence

Dipl.-Ing. Björn Felten

(Korrespondenzautor)

Wissenschaftlicher Mitarbeiter

House of Energy Markets and Finance

University of Duisburg-Essen

Berliner Platz 6-8, 45127 Essen

Tel. +49 201 183-3389

Fax. +49 201 183-2703

E-Mail bjorn.felten@uni-due.de

M.Sc. Jan Paul Baginski

Wissenschaftlicher Mitarbeiter

House of Energy Markets and Finance

University of Duisburg-Essen

Berliner Platz 6-8, 45127 Essen

Tel. +49 201 183-6504

Fax. +49 201 183-2703

E-Mail paul.baginski@uni-due.de

Prof. Dr. Christoph Weber

*Lehrstuhlinhaber des Lehrstuhls für Energie-
wirtschaft*

House of Energy Markets and Finance

University of Duisburg-Essen

Berliner Platz 6-8, 45127 Essen

Tel. +49 201 183-2966

Fax. +49 201 183-2703

E-Mail christoph.weber@uni-due.de