

Ermittlung von Energieeinsparpotenzialen durch überbetriebliche Wärmeintegration in Deutschland



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

**Dem Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
der Technischen Universität Darmstadt**

**zur Erlangung des Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)**

**vorgelegte Dissertation von
Ali Aydemir (M.Sc.)
aus Duisburg**

Karlsruhe 2018

**Erstreferentin: Prof. Dr. rer. nat. Liselotte Schebek
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Hans Joachim Linke
Korreferent: Dr.-Ing. Clemens Rohde**

Aydemir, Ali: Ermittlung von Energieeinsparpotenzialen durch überbetriebliche
Wärmeintegration in Deutschland

Darmstadt, Technische Universität Darmstadt,

Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUprints: 2018

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-76843

Tag der mündlichen Prüfung: 16.03.2018

Veröffentlicht unter CC BY-SA 4.0 International

<https://creativecommons.org/licenses/>

Abstract

This dissertation deals with the question of how energy saving potentials through inter-company heat integration can be systematically determined for Germany. After a summary of the state of knowledge on this topic, the research gap is worked out in a structured manner (Chapter 3). It is found that to date there are no systematic models for determining energy saving potentials through inter-company heat integration for Germany. Previous work on this topic focuses on the analysis of individual processes. The overall economic potential of the energy efficiency measure "inter-company heat integration" is not considered. Consequently, the rest of the work is concerned with developing systematic models to close this research gap.

Chapter 4 first develops a model with which the theoretical energy saving potential through inter-company heat integration in Germany can be determined (quantified). The model is based on a top-down approach. A central limitation of the model is that the distribution of heat demand over the temperature ranges is assumed as in the underlying energy statistics. This is a simplistic abstraction, since a large number of companies are aggregated in the statistics. In addition, no distances and other technical aspects are taken into account in the approach and therefore only the theoretical energy saving potential for Germany can be determined with the approach. In principle, the approach can be applied to all regions for which energy statistics are available that show the heat demand by temperature and industry. Finally, Chapter 4 concludes with a corresponding theoretical estimate of potential for Germany, thus demonstrating the relevance of the topic for the energy system. Overall, it is estimated that the theoretical energy saving potential through inter-company heat integration in Germany is up to about 6 % in relation to the industry's final energy consumption.

The following parts of the work deal with the development of models with which the technical and economic energy saving potential through inter-company heat integration can be determined for Germany. In principle, this requires a bottom-up approach in which all eligible neighborhoods between production sites in Germany are identified and their technical and economic potential is evaluated. Therefore, in Chapter 5 a techno-economic model for the evaluation of the inter-company heat integration is first developed and validated and tested for an exemplary neighbourhood. In addition, Chapter 6 develops a spatial analysis model for locating promising neighborhoods of production sites for inter-company heat integration. The interaction of the models from Chapter 5 and Chapter 6 enables to determine the technical and economic potential for inter-company heat integration in Germany successively (bottom-up approach).

In the case study from Chapter 5, however, the techno-economic model developed shows that a large amount of data is required for a detailed evaluation of the technical and economic potential, which would have to be collected on site in the specific case or defined in technical detail in feasibility studies. The necessity of collecting this data is shown in sensitivity calculations. For this purpose, central input parameters (e.g. heat transfer coefficients) are varied and their effect on the economic potential depending on the distance is shown. In extreme cases, the maximum economic distances vary by up to ten kilometers.

Finally, Chapter 6 uses spatial analysis to estimate the number of neighbourhoods between production sites for which a more detailed technical and economic study appears promising. For a distance of a maximum of ten kilometres, the number of these neighborhoods is around 3,000; even at a rather short distance of one kilometre, the number of promising neighborhoods is still 375.

From the combination of the findings from Chapter 5 and Chapter 6, the following findings are derived in the context of the research question. The technical and economic energy saving potential for inter-company heat integration strongly depends on parameters that have to be defined for individual cases on a site-related basis (Chapter 5). The effort of this can only be estimated inaccurately. Furthermore, the spatial analysis in Chapter 6 has shown that the number of promising neighbourhoods for inter-company heat integration is particularly high. As a result, the effort required to determine the overall technical and economic energy saving potential for Germany through inter-company heat integration can only be estimated inaccurately as well. Thus, analyses to determine the technical and economic potential could therefore probably only be carried out step by step for smaller regional restrictions. This is the central limitation of the bottom-up approach in the context of the question.

On the basis of the above, it is also argued in Chapter 6 that the energy efficiency option "inter-company heat integration" could be incorporated into spatial decision support systems that support municipal spatial planners and energy managers in the planning of energy infrastructures.

Inhaltsverzeichnis

1.....Einleitung und Motivation	1
2.....Grundlagen	4
2.1. Industrielle Abwärme	4
2.2. Wärmeintegration	5
2.3. Potenzialbegriffe	7
3.....Stand des Wissens	9
3.1. Erstsichtung Literatur	9
3.2. Strukturierte Literaturrecherche	10
3.2.1. Untersuchungsraum	11
3.2.2. Untersuchungsmerkmale	14
3.2.3. Merkmalsverteilung	16
3.2.4. Inhaltliche Ergebnisse der Literaturrecherche	18
3.2.5. Ergebnis: Forschungslücke	24
3.3. Weitere Vorgehensweise	25
4.....Modell zur Ermittlung des theoretischen Potenzials (Top-Down)	27
4.1. Datenbasis	27
4.2. Methode	29
4.2.1. Potenziell wärmeabgebende Wirtschaftszweige	29
4.2.2. Theoretisches Abwärmepotenzial	30
4.2.3. Kaskadenartige Verrechnung	35
4.3. Ergebnisse: theoretisches Potenzial	40
5.....Modell zur Berechnung des technischen und wirtschaftlichen Potenzials (Bottom-Up I/II)	45
5.1. Methodeneingrenzung	45
5.1.1. Pinch-Analyse	46
5.1.2. Mathematisch programmierte Methoden	49
5.1.3. Methodenwahl	49
5.2. Modellentwicklung	51
5.2.1. Grundlegendes Modellkonzept	51
5.2.2. Abbildung von Wärmebedarfen im Modell	52
5.2.3. Ermittlung des technischen Potenzials im Modell	55
5.2.4. Ermittlung des wirtschaftlichen Potenzials im Modell	59
5.2.5. Berücksichtigung dynamischer Aspekte im Modell	79
5.2.6. Steuerungsmöglichkeiten intern vs. extern	82
5.2.7. Zusammenfassung der Modellentwicklung	83
5.3. Anwendung des Modells für eine exemplarische Nachbarschaft	84
5.3.1. Datengrundlage (betrachtete Fabriken)	85

5.3.2.	Validierung des Modells	88
5.3.3.	Vergleich des Modells	88
5.3.4.	Technisches und wirtschaftliches Potenzial	91
5.3.5.	Sensitivitätsrechnungen	93
5.3.6.	Ergebnisse: Sensitivität und Modellbewertung	103
5.4.	Mögliche Modellweiterentwicklungen	105
6.....	Modell zur Lokalisierung von Nachbarschaften (Bottom-Up II/II)	107
6.1.	Methodenwahl: Raumanalyse	108
6.2.	Nachbarschaftssuche mit dem Kollokationsmusterminer	111
6.3.	Extraktion der Nachbarschaften für Deutschland	113
6.3.1.	Verwendete Geodaten	113
6.3.2.	Ermittelte Nachbarschaften	114
6.4.	Ergänzung um energiebezogene Aspekte	115
6.4.1.	Prozesswärmestruktur	116
6.4.2.	Kriteriendefinition	119
6.5.	Ergebnisse: aussichtsreiche Nachbarschaften	121
6.6.	Mögliche Integration in räumliche Entscheidungsunterstützungssysteme	125
7.....	Zusammenfassung, Diskussion und Ausblick	127
8.....	Anhang	130
8.1.	Zu Kapitel 3: Stand des Wissens	130
8.2.	Zu Kapitel 5: Methodik Wärmeintegration	131
8.3.	Zu Kapitel 5:	134
8.3.1.	Zur Beschichtungsfabrik	134
8.3.2.	Zu Eisengießereien	139
9.....	Verzeichnisse	140
9.1.	Tabellenverzeichnis	140
9.2.	Abbildungsverzeichnis	141
9.3.	Abkürzungsverzeichnis	142
9.4.	Symbole	143
9.5.	Literaturverzeichnis	144
9.6.	Danksagung	154

1. Einleitung und Motivation

Die Steigerung der Energieeffizienz in allen Verbrauchssektoren ist einer der Grundpfeiler Deutschlands, um dem Klimawandel durch eine Reduzierung von Treibhausgasen entgegenzutreten und gleichzeitig die Versorgungssicherheit zu erhöhen (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 2016).

Ein erheblicher Anteil des Energiebedarfs ist auf den industriellen Sektor zurückzuführen. In Europa wird etwa ein Drittel der Endenergie im industriellen Sektor verbraucht. Etwa 73 % der verbrauchten Endenergie wird zur Bereitstellung von Wärme und Kälte verwendet. Davon entfallen wiederum 80 % auf die Bereitstellung von Prozesswärme (European Commission (EC) 2016). In Deutschland sind die Zahlen vergleichbar. Hier werden rund 30 % der Endenergie im industriellen Sektor verbraucht, wobei zwischen 70 % und 80 % der Energie zur Erzeugung von Wärme und Kälte verwendet werden (Rohde et al. 2017).

In Verbindung mit der Erzeugung von Prozesswärme fallen häufig große Mengen Abwärme an (Pehnt 2010). Eine intensivere Nutzung dieser Abwärme bietet daher eine aussichtsreiche Möglichkeit, um die einzel- und gesamtwirtschaftliche Energieeffizienz zu verbessern. Unternehmen mit großen Abwärmemengen, insbesondere energieintensive Industrien, können die Abwärme allerdings häufig nicht oder nur teilweise direkt verwerten. Ist die Möglichkeit einer internen Verwertung nicht gegeben, so stellt die überbetriebliche Wärmeintegration eine Maßnahme zur Verbesserung der Energieeffizienz dar.

Bei der überbetrieblichen Wärmeintegration werden Wärmeübertragernetzwerke über die Grenzen einer Industrieanlage hinweg aufgebaut. Dabei handelt es sich um Industrieanlagen, die zu unterschiedlichen Firmen, respektive Organisationseinheiten gehören. Mit Hilfe überbetrieblicher Wärmeintegration können Unternehmen Energie einsparen, indem Wärmequellen und Wärmesenken der teilnehmenden Industrieanlagen im Vergleich zu einer nicht integrierten Planung energetisch besser aufeinander abgestimmt werden. Dieser Ansatz wird bei der Planung von Industrieparks gelegentlich schon berücksichtigt. Energieeinsparpotenziale für solche Wärmeübertragernetzwerke werden bis dato nur für spezifizierte Fallstudien ermittelt. Dabei werden Energieeinsparpotenziale für real existierende als auch für fiktiv zusammengestellte Standorte untersucht. Die angewendeten Methoden zielen im Kern auf die detaillierte technische Bewertung von Einzelfällen ab (vgl. Hackl et al. 2011, Hackl und Harvey 2013, Hackl 2014, Morandin et al. 2014).

Gesamtwirtschaftliche Studien, die Potenziale zur Nutzung von Abwärme quantifizieren, berücksichtigen bis dato das Konzept der überbetrieblichen Wärmeintegration nur selten. Zudem quantifiziert keine der vorhandenen Arbeiten das Energieeinsparpotenzial durch überbetriebliche Wärmeintegration in Deutschland. Um diese Lücke möglichst bald zu schließen, befasst sich diese Arbeit mit folgender Forschungsfrage:

Wie lassen sich Energieeinsparpotenziale durch überbetriebliche Wärmeintegration in Deutschland systematisch ermitteln?

Ansätze zur Schätzung von Potenzialen für Energieeffizienzmaßnahmen können zwischen Bottom-Up und Top-Down basierten Methoden unterschieden werden. Diese Unterscheidung ist der Klassifizierung von Modellen zur Prognose der Energienachfrage oder methodischen Ansätzen zum Messen von Energieeffizienz entlehnt, wo unter anderem ebenfalls zwischen Top-Down- und Bottom-Up-Ansätzen unterschieden wird (Herbst et al. 2012, Schlomann et al. 2015). Bei Top-Down-Ansätzen werden Energiesysteme auf Basis von aggregierten ökonomischen Kenngrößen analysiert, beispielsweise auf Basis von aggregierten Energieverbräuchen aus Energiestatistiken. Bei Bottom-Up-Ansätzen werden bei der Analyse technologische Zusammenhänge und Optionen im Energiesystem mit einbezogen, indem beispielsweise Energieverbräuche zur Herstellung bestimmter Produkte durch technologische Betrachtung der Herstellprozesse abgeschätzt werden. Diese Arbeit greift beide Ansätze zur Ermittlung von Potenzialen auf und hat dabei folgende Struktur.

In Kapitel 2 werden zentrale Grundlagen der Arbeit beschrieben, die in den folgenden Kapiteln der Arbeit wieder aufgegriffen werden (bspw. Potenzialbegriffe). Danach wird in Kapitel 3 der Stand des Wissens beschrieben und die Forschungslücke auf Basis einer strukturierten Literaturanalyse erarbeitet. Der vorangegangene Teil ergibt für die Forschungslücke, dass zum einen bisher keine Ermittlung des Energieeinsparpotenzials durch überbetriebliche Wärmeintegration für Deutschland insgesamt erfolgt ist. Zum anderen wurden diesbezüglich bisher keine systematischen Modelle entwickelt. Die folgenden Kapitel widmen sich daher konsequenterweise dem Entwickeln von Modellen zum Schließen der Forschungslücke.

Zunächst wird in Kapitel 4 ein Modell entwickelt, mit dem sich das theoretische Energieeinsparpotenzial durch überbetriebliche Wärmeintegration für Deutschland ermitteln lässt. Damit neben dem theoretischen auch das technische und wirtschaftliche Potenzial ermittelt werden kann, werden in den danach folgenden Teilen der Arbeit weitere Modelle entwickelt. In Kapitel 5 wird hierfür zunächst ein techno-ökonomisches Modell entwickelt, mit dem das technische und wirtschaftliche Potenzial für die überbetriebliche Wärmeintegration für beliebige Nachbarschaften von Produktionsstandorten berechnet werden kann. In Kapitel 6 wird ein raumanalytisches Modell entwickelt, mit dem sich Nachbarschaften zwischen Produktionsstandorten lokalisieren lassen, die für die überbetriebliche Wärmeintegration aussichtsreich sind. Durch Kombination der Modelle aus Kapitel 5 und 6 lässt sich sukzessive auch das technische und wirtschaftliche Potenzial für überbetriebliche Wärmeintegration für Deutschland bestimmen. Dabei handelt es sich dann um einen Bottom-Up-Ansatz.

Abschließend werden zentrale Erkenntnisse der Arbeit zusammengefasst und es werden Ansatzpunkte für weitere Arbeiten aufgezeigt. Die Kapitelstruktur der Arbeit ist in Abbildung 1 dargestellt.

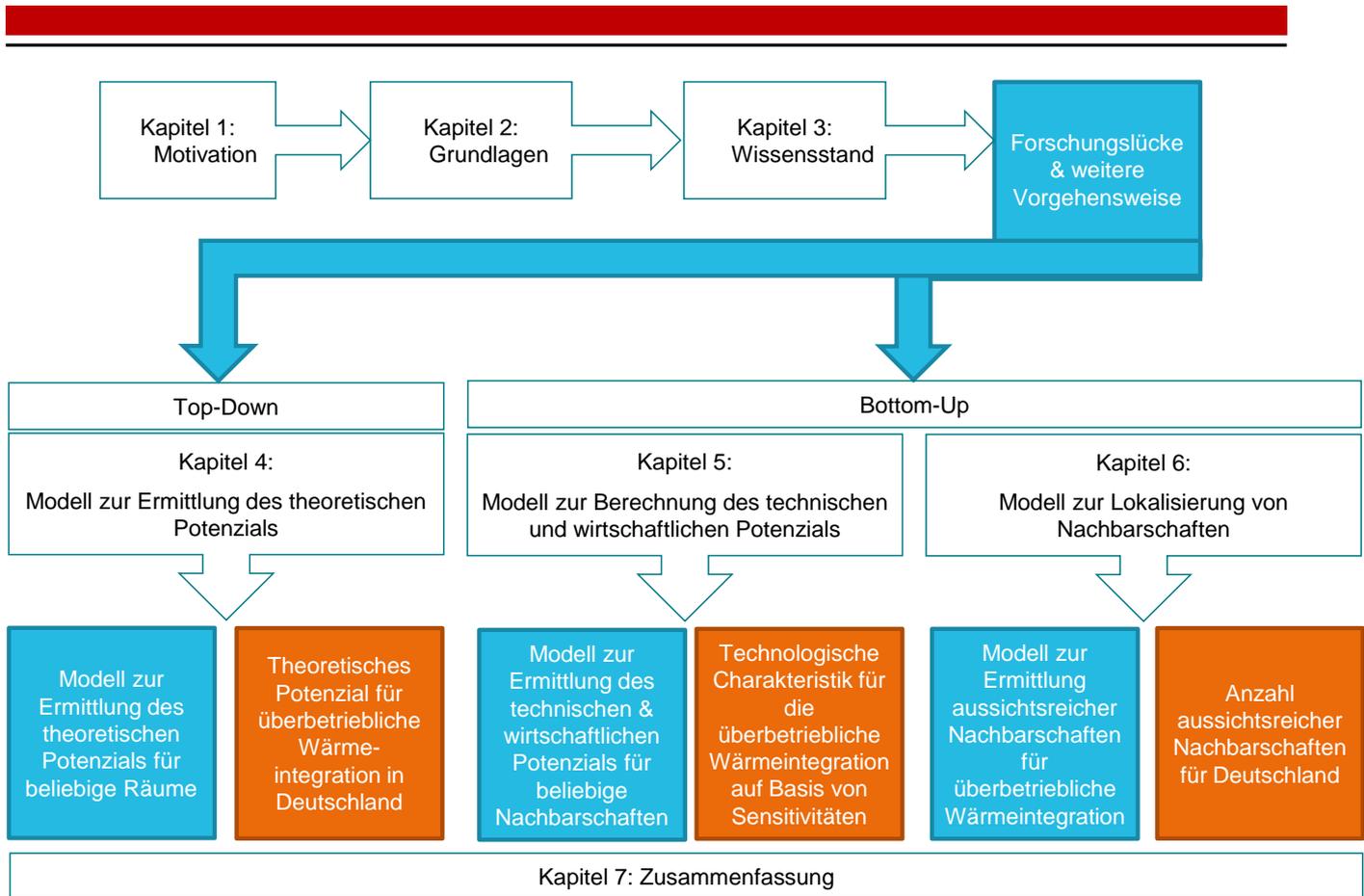


Abbildung 1: Kapitelstruktur

2. Grundlagen

2.1. Industrielle Abwärme

Im industriellen Sektor wird Abwärme hauptsächlich bei der Anwendung von Prozesswärme im Rahmen von Produktionsprozessen erzeugt. Aus technischer Sicht kann industrielle Abwärme als Wärme bezeichnet werden, die unerwünscht durch Industrieprozesse erzeugt wird (Pehnt 2010). Aus gesellschaftlicher Sicht kann Abwärme als Wärme bezeichnet werden, die ein Nebenprodukt industrieller Prozesse ist. Sie wird gegenwärtig nicht genutzt, jedoch könnte eine zukünftige Nutzung einen Mehrwert für Industrie und Gesellschaft zur Folge haben (Broberg Viklund und Johansson 2014a). In dieser Arbeit wird der Begriff Abwärme im Folgenden synonym für industrielle Abwärme verwendet.

Tabelle 1: Warum Abwärme in der Industrie entsteht.

<p>Industrielle Abwärme entsteht durch Ineffizienzen von Anlagen und Prozessen sowie durch thermodynamische Beschränkungen (vgl. Hirzel 2013, USDOE 2008). Ein Beispiel für Ineffizienzen von Anlagen sind fehlende Isolierungen zur Verminderung von Wärmeverlusten. Thermodynamische Beschränkungen ergeben sich hingegen aus Prozesscharakteristiken. Ein Beispiel ist das Schmelzen von Aluminium in Flammöfen. Abgase, die den Flammofen verlassen, können Temperaturen von bis zu 1.300 °C aufweisen. Infolgedessen enthalten die Abgase einen hohen Wärmeinhalt, der bis zu 60 % des Energieeinsatzes des Ofens ausmacht. Eine Energieeffizienzmaßnahme für Flammöfen wäre es demnach niedrigere Abgastemperaturen anzustreben, bspw. durch bessere Wärmeübertragung im Ofen. Aber auch in diesem Fall liegt eine untere Grenze für die Abgastemperatur vor. Beim Wärmeaustausch im Ofen findet Energieübertragung von einer Hochtemperaturquelle auf eine Niedrigtemperatursenke statt. Um das Schmelzen des Aluminiums zu erreichen, muss die Verbrennungsgastemperatur immer über dem Schmelzpunkt für Aluminium liegen, da sonst keine Schmelze erzeugt wird. Der Schmelzpunkt von Aluminium liegt zwischen 650 und 750 °C, infolgedessen liegt die untere Grenze für die Abgastemperatur ebenfalls in diesem Bereich. Bezogen auf den Energieeinsatz im Ofen würde bei einer Abgastemperatur in diesem Bereich immer noch mindestens 40 % der in den Ofen eingespeisten Energie als Abwärme verloren gehen. Die Art des Ofens und die Funktion gibt somit eine minimale Abwärmemenge im Abgas aufgrund thermodynamischer Beschränkungen vor. Diese Abwärme könnte jedoch anderen Prozessen zur Verfügung gestellt werden und die nicht genutzte industrielle Abwärme würde somit insgesamt vermindert werden.</p>

Zur Steigerung der Energieeffizienz wird im Hinblick auf nicht genutzte Abwärme in der Regel auf einen gestuften Ansatz zurückgegriffen, der die verschiedenen Möglichkeiten priorisiert:

1. Vermeidung des Anfalls der Abwärme
2. Prozessinterne Nutzung der Abwärme
3. Innerbetriebliche Nutzung der Abwärme
4. Außerbetriebliche Nutzung der Abwärme
5. Umwandlung der Abwärme in andere Medien (bspw. elektrischen Strom oder Kälte, vgl. Sächsische Energieagentur GmbH (SAENA) 2012).

Bei den Maßnahmen 2. bis 4. wird Wärme zurückgewonnen und an anderer Stelle zur Wärmeversorgung verwendet. In der Literatur werden dabei die Begriffe „Wärmerückgewinnung“ und „Abwärmenutzung“ häufig unterschieden. Der Hintergrund ist im Folgenden erläutert.

Wird die Abwärme dem Prozess ihres Entstehungsortes zurückgeführt und dort verwendet, so wird dies häufig als „Wärmerückgewinnung“ bezeichnet. Wird die Abwärme an einem anderen Ort verwendet, so wird dies häufig als „Abwärmenutzung“ bezeichnet (Hirzel et al. 2013). Ein Beispiel für die „Wärmerückgewinnung“ ist die Verwendung von Wärme im Abgasstrang eines Dampferzeugers zur Vorerwärmung des Speisewassers (Anwendung eines Economisers). Ein Beispiel für die „Abwärmenutzung“ wäre die Verwendung von Abwärme aus dem Abgasstrang eines Industrieofens zur Beheizung einer Fabrikhalle. Diese sprachliche Vorgehensweise wird jedoch nicht immer einheitlich verwendet. Zudem besteht bei einer solchen Kategorisierung das Problem darin, den Begriff „Prozess“ in der Art zu definieren, dass unterschiedlichste Fachdisziplinen das gleiche Verständnis im Hinblick auf die Aggregationsebene haben. Im Rahmen dieser Arbeit wird daher auf eine Unterscheidung der Begriffe „Abwärmenutzung“ und „Wärmerückgewinnung“ verzichtet. Die Begriffe werden demnach synonym verstanden.

Des Weiteren kann unterschieden werden, ob die Nutzung wiedergewonnener Abwärme innerhalb des Unternehmens, in dem die Abwärme entsteht, stattfindet, oder außerhalb. Die Nutzung von Abwärme innerhalb eines Unternehmens, in dem die Abwärme entsteht, wird im Rahmen dieser Arbeit als innerbetriebliche Abwärmenutzung bezeichnet. Findet die Nutzung außerhalb des Unternehmens statt, so wird die Maßnahme als überbetriebliche Abwärmenutzung bezeichnet.

Die Nutzbarkeit industrieller Abwärme hängt von diversen Faktoren ab, wie bspw. der Abwärmemenge, der Temperatur und der Art der Bündelung. Bei der Art der Bündelung wird unterschieden, ob industrielle Abwärme diffus (bspw. in Form von Strahlung), oder geführt (bspw. in einem Abgasstrang) auftritt. Weitere wichtige Faktoren zur Charakterisierung von Abwärme werden in Hirzel et al. 2013 zusammengefasst.

2.2. Wärmeintegration

Wärmeintegration ist ein Überbegriff für Konzepte zur thermischen Kombination von stationären oder diskontinuierlichen Prozessen zur Wärmerückgewinnung durch Wärmeübertragung (Klemeš und Kravanja 2013). Die Wärmeintegration (im Englischen: heat integration) kann daher als ein technisches Konzept zur Reduktion des Energiebedarfs von Industrieanlagen und somit als Energieeffizienzmaßnahme aufgefasst werden.

Bei der Wärmeintegration handelt es sich um einen Teilbereich der Prozessintegration. Die Prozessintegration bezeichnet einen ganzheitlichen Ansatz zur Prozessgestaltung, zum Nachrüsten von Prozessen und zum Betrieb von Prozessen. Dabei wird die Einheit des Prozesses in den Vordergrund gestellt, im Gegensatz zu Ansätzen, bei denen die Optimierung von Grundoperationen des überliegenden Prozesses im Fokus steht (Dunn und Bush 2001, El-Halwagi 1997).

Die Wärmeintegration hat ihren Ursprung in den 1970er-Jahren. Aufgrund der Ölkrisen 1973 und 1979 suchten die besonders energieintensiven Unternehmen der chemischen und petrochemischen Industrie nach Möglichkeiten zur Reduktion ihres Energieverbrauchs (Klemeš und Kravanja 2013). Die Wärmeintegration stellte dabei eine aussichtsreiche Möglichkeit dar.

Innerhalb einer Industrieanlage werden häufig eine Vielzahl aufzuheizender und abzukühlender Prozesse parallel und in örtlicher Nähe zueinander betrieben. Inwieweit dies der Fall ist, hängt von den jeweils herzustellenden Gütern und den verfügbaren Technologien ab. In der chemischen und petrochemischen Industrie kommt dies besonders häufig vor (Smith 2005). Ein Beispiel für einen aufzuheizenden und somit wärmenachfragenden Prozess ist die zum Trennen von Stoffgemischen eingesetzte Destillation. Bei der Destillation wird Wärme einem flüssigen Stoffgemisch zugeführt. Unterschiedlich hohe Siedepunkte der Stoffe im Stoffgemisch führen schließlich dazu, dass einige Bestandteile des Stoffgemisches früher verdampfen als andere. Infolgedessen bildet sich eine Dampf- und Flüssigphase heraus. Grundlegend wird dieser Umstand in entsprechenden Anlagen genutzt, um Bestandteile des Stoffgemischs durch Trennen der Dampf- und Flüssigphase voneinander zu trennen. Dabei wird die dampfförmige Phase abgeführt und in der Regel an anderer Stelle durch externe Zufuhr von Kälte zum Kondensieren gebracht. Dies stellt somit ein Beispiel für einen abzukühlenden Prozess dar.

Der Grundgedanke der Wärmeintegration besteht darin, Wärme aus abzukühlenden Prozessen zur Versorgung von aufzuheizenden Prozessen zu verwenden. Dies geschieht häufig, indem Prozesse durch Einsatz von Wärmeübertragern vernetzt werden. Ein aus mehreren Wärmeübertragern bestehendes System, welches aufzuheizende Prozesse und abzukühlende Prozesse miteinander vernetzt, wird Wärmeübertragernetzwerk (Im Englischen: heat exchanger network) genannt. Je mehr Prozesse in einem Wärmeübertragernetzwerk miteinander verschaltet werden können, desto höhere Energieeinsparungen können grundsätzlich erzielt werden. Deswegen wird das Konzept der Wärmeintegration auch über Grenzen von Produktionshallen hinweg betrieben, um ganze Fertigungsstandorte miteinander zu verbinden. Dies ist beispielsweise in Chemieparks der Fall. Im Rahmen dieser Arbeit wird jeglicher Wärmeaustausch zwischen Industrieanlagen, die zu unterschiedlichen Firmen, respektive Organisationseinheiten gehören als überbetriebliche Wärmeintegration bezeichnet. Die überbetriebliche Wärmeintegration stellt somit einen Spezialfall der Abwärmenutzung und der Wärmeintegration dar.

2.3. Potenzialbegriffe

Abwärmepotenziale können in drei Kategorien differenziert werden. Dabei handelt es sich um das theoretische, technische und wirtschaftliche Potenzial (Blesl et al. 2009). Im Folgenden werden diese Kategorien auf den Kontext der Wärmeintegration übertragen. Hierfür wird zunächst das theoretische Abwärmepotenzial eingeführt. Darauf aufbauend werden das theoretische, technische und wirtschaftliche Potenzial für Wärmeintegration definiert.

- **Theoretisches/Physisches Abwärmepotenzial:** Beim theoretischen Abwärmepotenzial handelt es sich um die Gesamtheit des zur Verfügung stehenden Potenzials im Untersuchungsraum. Bezogen auf Abwärme kann hierunter die maximal nutzbare Energiemenge, die in der Abwärme enthalten ist, verstanden werden. Diese Energiemenge entspricht dem Exergieanteil der Abwärme. Der Anteil wird mit Hilfe des Carnot-Faktors errechnet.

Die Wärmeintegration stellt eine Energieeffizienzmaßnahme zur Nutzung des Abwärmepotenzials dar (neben anderen). Daher lassen sich die Potenzialbegriffe wie folgt auf die Wärmeintegration übertragen.

- **Theoretisches/Physisches Potenzial für Wärmeintegration:** Beim theoretischen Potenzial für Wärmeintegration handelt es sich um die komplette Ausschöpfung des theoretischen Abwärmepotenzials mit der Energieeffizienzmaßnahme Wärmeintegration. Das theoretische Potenzial für Wärmeintegration kann somit gleich dem Abwärmepotenzial sein. Dies ist dann der Fall, wenn jeder einzelnen Abwärmequelle, die Bestandteil des theoretischen Abwärmepotenzials ist, ein Wärmebedarf in gleicher Höhe entgegengestellt werden kann, dessen Temperatur niedriger ist als die der Quelle.
- **Technisches Potenzial für Wärmeintegration:** Bei dem technischen Potenzial handelt es sich um den Anteil des theoretischen Potenzials, der unter technischen und ökologischen Restriktionen genutzt werden kann. Im Rahmen der Wärmeintegration müssen somit Verluste für Wärmeübertragung und Wärmetransport vom theoretischen Potenzial abgezogen werden.
- **Wirtschaftliches Potenzial für Wärmeintegration:** Das wirtschaftliche Potenzial bezeichnet den Teil des technischen Potenzials, der unter ökonomischen Kriterien wirtschaftlich genutzt werden kann. Ökonomische Kriterien können dabei anhand unterschiedlicher Berechnungs- und Bewertungsmethoden ermittelt und bewertet werden. Beispielsweise könnte hier zunächst zwischen betriebswirtschaftlicher und volkswirtschaftlicher Perspektive differenziert werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird bei wirtschaftlichen Kriterien immer die betriebswirtschaftliche Sichtweise eingenommen.

Das theoretische Potenzial für Wärmeintegration lässt sich wiederum in das theoretische Potenzial für innerbetriebliche und das theoretischen Potenzial für überbetriebliche Wärmeintegration aufteilen. Ein Überblick zu den Potenzialdimensionen gibt Abbildung 2. Dies lässt sich konsequenterweise auf das technische und wirtschaftliche Potenzial für die Wärmeintegration ausweiten. Auch diese Potenziale können grundsätzlich nach innerbetrieblichen und überbetrieblichen Potenzialen differenziert werden.

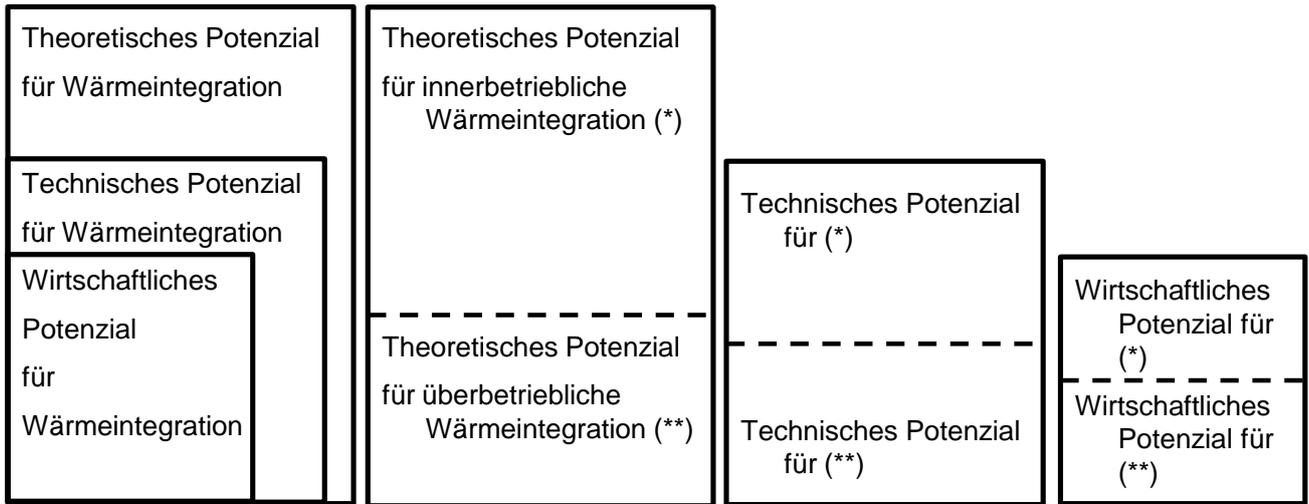


Abbildung 2: Potenziale für die Wärmeintegration

3. Stand des Wissens

In den folgenden Unterkapiteln wird der Stand des Wissens im Hinblick auf die Forschungsfrage aufgearbeitet. Im ersten Schritt wird auf Basis aktueller wissenschaftlicher Artikel geprüft, welche Aspekte der überbetrieblichen Wärmeintegration bereits behandelt worden sind (vgl. Erstsichtung Literatur). Darauf aufbauend wird eine Hypothese formuliert, die mit einer strukturierten Literaturrecherche überprüft wird (vgl. Strukturierte Literaturrecherche).

3.1. Erstsichtung Literatur

Da es sich bei der überbetrieblichen Wärmeintegration um eine Energieeffizienzmaßnahme zur Nutzung industrieller Abwärme handelt, wurden zunächst aktuelle Beiträge aus dem Bereich der Schätzung von Abwärme gesichtet. Relevante Beiträge sind im Folgenden chronologisch sortiert zusammengefasst und es wird kurz dargestellt, inwieweit die Thematik der überbetrieblichen Wärmeintegration aufgegriffen wird.

2010

Für Großbritannien ermitteln McKenna und Norman (2010) Wärmebedarf und Abwärme der energieintensiven Industrie. Zudem wird die Qualität der anfallenden Abwärme anhand der Temperatur und des entsprechenden Carnot-Faktors charakterisiert. Es werden also Aussagen darüber getroffen, wie viel mechanische Arbeit theoretisch durch die anfallende Abwärme generiert werden kann. Des Weiteren verorten McKenna und Norman (2010) die geschätzten anfallenden Abwärmemengen. **In der Studie werden mögliche Nutzungsoptionen für die Abwärme jedoch nicht behandelt und somit auch nicht die überbetriebliche Wärmeintegration.**

2014

Element Energy et al. (2014) bauen auf die Vorarbeiten von McKenna und Norman (2010) auf. In dem Beitrag werden Potenziale zur Rückgewinnung und Nutzung industrieller Abwärme geschätzt. Im Vergleich zu McKenna und Norman (2010) werden neben der Schätzung und Verortung von Abwärme auch Technologien zur Rückgewinnung und Nutzung von Abwärme behandelt. Diese werden anhand von techno-ökonomischen Kriterien bewertet. Dabei wird die technologische Option der Nutzung von Abwärme durch Wärmetransport an benachbarte Unternehmen explizit mitberücksichtigt. Für die Bewertung dieser Option wird die maximal austauschbare Wärmemenge zwischen benachbarten Unternehmen zur Bewertung herangezogen. Dabei werden jedoch keine Wärmenetze modelliert. **Die Thematik der überbetrieblichen Wärmeintegration wird bei Element Energy et al. (2014) somit adressiert.** Die strukturierte Suche nach dem Potenzial wird jedoch nicht im Kern thematisiert, da die regional aufgelösten Daten aus Vorarbeiten entnommen sind und die Auswahl zwischen verschiedenen technologischen Optionen zur Nutzung von Abwärme im Fokus steht.

2015

Für Europa wird die Menge industrieller Abwärme im Rahmen des Stratego-Projekts geschätzt (STRATEGO project 2015). Als Grundlage wird das europäische Emissionshandelsregister verwendet und es werden ausschließlich Standorte mit einer thermischen Leistung über 20 MW betrachtet. Basierend auf den gelisteten CO₂-Emissionen werden entsprechend Branchenaufteilung im Register

Primärenergieverbräuche errechnet. Zudem werden für die Sektoren diverse Wirkungsgrade bei der Energieumwandlung angenommen, um daraus die anfallende Abwärme zu berechnen. **Die Thematik der überbetrieblichen Wärmeintegration wird im Stratego-Projekt nicht aufgegriffen.**

2017

Für Deutschland findet sich die aktuellste Abschätzung zu Abwärmepotenzialen der deutschen Industrie in einem Beitrag von Brueckner et al. (2017). Die Datengrundlage der Schätzung bilden Emissionsberichte, die von den Umweltämtern der jeweiligen Bundesländer zusammengestellt worden sind. Für die Schätzung der Abwärme wurde eine Methode zur anonymen Auswertung von Daten zu Abgasströmen, die in den Emissionsberichten vorhanden sind, entwickelt. Diese Methode wurde zur Auswertung von etwa 81.000 Abgasströmen der deutschen Industrie angewendet. Die dabei ausgewerteten Unternehmen verursachen etwa 58 % des industriellen Brennstoffverbrauchs in Deutschland. Für die ausgewerteten Unternehmen ergibt sich ein Abwärmepotenzial von 127 PJ pro Jahr, was etwa 13 % des Brennstoffverbrauchs der Unternehmen entspricht. Zudem werden darauf aufbauend nach Wirtschaftszweigen differenzierte Kennwerte ermittelt, mit denen das gesamte Abwärmepotenzial der deutschen Industrie geschätzt wird. Dieses Potenzial beträgt nach Brueckner et al. (2017) etwa 223 PJ/a. **In der Studie werden mögliche Nutzungsoptionen für die Abwärme nicht quantifiziert. Die Thematik der überbetrieblichen Wärmeintegration wird somit nicht behandelt.**

Des Weiteren wird die überbetriebliche Wärmeintegration in zahlreichen Beiträgen aufgegriffen, die sich mit Energieeinsparpotenzialen, die durch Wärmeintegration an großen Produktionsstandorten oder in Industriegebieten erzielt werden können, befassen. Dabei werden hauptsächlich Methoden zum Entwurf von Wärmeübertragernetzwerken in den Fokus gesetzt. Je nach Beitrag gehören nicht alle evaluierten Produktionsstandorte zum gleichen Unternehmen und demnach wird in einigen Beiträgen das Konzept der überbetrieblichen Wärmeintegration adressiert (vgl. Roman Hackl et al. 2011, Hackl 2014).

Auf Basis der Erstsichtung werden folgende Hypothesen aufgestellt, die im Rahmen der strukturierten Literaturrecherche überprüft werden:

- In der Literatur wurden bisher nur wenige Ansätze zur systematischen Ermittlung von Energieeinsparpotenzialen durch überbetriebliche Wärmeintegration vorgestellt.
- Zudem wurde das Energieeinsparpotenzial durch überbetriebliche Wärmeintegration in Deutschland noch nicht ermittelt.

3.2. Strukturierte Literaturrecherche

Zweck der strukturierten Literaturrecherche ist die zuvor aufgestellten Hypothesen zu überprüfen und somit die in Kapitel 1 formulierte Forschungsfrage zu bestätigen. Dies ist notwendig, da die Thematik in vielen Literatursträngen aufgegriffen wird (Wärmeintegration, Schätzung von Abwärme, Industrielle Symbiose) und so sichergestellt werden kann, dass besonders relevante Artikel möglichst nicht übersehen worden sind. Dabei wird wie folgt vorgegangen:

1. Wahl relevanter Fachzeitschriften und Definition relevanter Suchterme (Untersuchungsraum),
2. Definition der Untersuchungsmerkmale,
3. Auswertung der Merkmalsverteilung,
4. Zusammenfassung zentraler Ergebnisse.

Die Wahl der Untersuchungsmerkmale wird dabei so gewählt, dass die eingangs gestellten Hypothesen überprüft werden können. Zudem werden weitere Merkmale aufgegriffen, so dass die strukturierte Literaturrecherche auch für weitere Analysen im Kontext der Abwärmenutzung nutzbar ist.

3.2.1. Untersuchungsraum

Für die strukturierte Literaturanalyse wurden zunächst relevante wissenschaftliche Fachzeitschriften identifiziert. Dafür wurden in einem ersten Schritt alle Fachzeitschriften, die bei der ersten Sichtung der relevanten Literatur enthalten waren, mit einbezogen. In einem zweiten Schritt wurden Referenzen und Quellen der bereits vorhandenen Artikel auf interessante zusätzliche Fachzeitschriften hin überprüft. Insgesamt wurde eine Obergrenze von 20 Fachzeitschriften festgesetzt. Die Eingrenzung hat somit subjektiven Charakter, da die zu durchsuchenden Fachzeitschriften nicht nach Kennziffern wie beispielsweise Zitationsindizes eingegrenzt wurden. Im Ergebnis wurden die in Tabelle 2 aufgelisteten Fachzeitschriften ausgewählt. Darunter finden sich englischsprachige Fachzeitschriften aus den Kategorien Energie-, Material- und Umweltwissenschaften. In Tabelle 2 ist zudem der SCImago Journal Rank Index für das Jahr 2014 der jeweiligen Fachzeitschrift innerhalb der jeweils relevanten Kategorie angegeben. Bei dem Index handelt es sich um einen nach Fachdisziplinen differenzierten Index zur Messung des wissenschaftlichen Einflusses von wissenschaftlichen Zeitschriften.

Tabelle 2: Fachzeitschriften der Literaturanalyse.

Titel der Fachzeitschrift / SCImago Journal Rank Index (2014)	Energie	Umwelt	Material
Applied Energy	8	-	-
Applied Thermal Engineering	41	-	-
Energy	13	-	-
Energy Conversion and Management	27	-	-
Energy Efficiency	72	-	-
Energy Policy	20	-	-
Energy Procedia	145	-	-
Heat Recovery Systems and CHP	*	-	-
International Journal of Ambient Energy	194	-	-
International Journal of Energy Research	67	-	-
International Journal of Energy Technology and Policy	270	-	-
International Journal of Low-Carbon Technologies	-	326	-
JOM	-	-	207
Journal of Cleaner Production	36	-	-
Journal of Heat Recovery Systems	**	-	-
Renewable and Sustainable Energy Reviews	10	-	-
Sustainable Energy Technologies and Assessments	91	-	-
	368	1174	207
* : Vorgängertitel von Applied Thermal Engineering.			
** : Vorgängertitel von Heat Recovery Systems and CHP.			

Im Anschluss wurden zunächst relevante Suchbegriffe auf Basis der in den vorhandenen Artikeln angegebenen Schlüsselwörter identifiziert. Die Suchbegriffe wurden daraufhin verwendet, um Suchterme zu erstellen. Das Startjahr für relevante Artikel wurde dabei auf 1979 gesetzt. Zeitpunkt der Suche war der 13. Juli 2015. Artikel, die danach publiziert wurden tauchen demnach nicht in den Suchergebnissen auf. Mit Hilfe der Suchterme wurde schließlich die Zitationsdatenbank Scopus verwendet, um relevante Artikel zu filtern. Für die Suche wurden Titel, Kurzfassung und Schlüsselwörter der Artikel in der Datenbank durchsucht. Die Suchterme (S2 - S9) sind in englischer Sprache in Tabelle 3 angegeben. Dabei stecken folgende Grundgedanken hinter den definierten Suchtermen:

- S2 und S6 beziehen sich im Allgemeinen auf Artikel, die sich mit dem Thema der industriellen Abwärme beschäftigen. Dabei handelt es sich um äquivalente Suchterme, bei denen lediglich der zu erfassende Zeitraum verändert wurde.
- S3 - S5 und S7 - S9 greifen Schlüsselwörter auf, die auf die Identifikation von Artikeln, welche sich auch mit dem Thema der überbetrieblichen Wärmeintegration befassen, zielen. S3 - S5 beziehen sich auf den Zeitraum von 2000 bis 2015 und S7 - S9 auf den Zeitraum von 1979 bis 1999. In S3 und S7 wird der Suchbegriff Total Site Analysis verwendet. Hier sind also Artikel zu erwarten, die sich zumindest indirekt mit dem Thema der überbetrieblichen Wärmeintegration befassen.
- Bei S4 und S8 wird der Suchbegriff „Intercompany“ (im Englischen für betriebsübergreifend) in Zusammenhang mit Energie, „Utility“ oder Wärme gesetzt. Hier sind also Artikel zu erwarten, die sich direkt mit überbetrieblichen Energieversorgungskonzepten befassen.
- Schließlich wird das Thema der überbetrieblichen Wärmeintegration auch im Kontext industrieller Symbiose diskutiert. Industrielle Symbiose (im Englischen: industrial symbiosis) ist ein spezielles Konzept aus dem Bereich der industriellen Ökologie. Dies wird konsequenterweise in den Suchbegriffen S5 und S9 in Zusammenhang mit Suchbegriffen zum Thema Abwärme aufgegriffen.

Tabelle 3: Verwendete Suchterme in Scopus.

Kürzel	Suchterme
S2	(("Waste heat" OR "Excess heat" OR "Heat recovery") AND "Industry") AND PUBYEAR > 1999
S3	("Total Site Analysis") AND PUBYEAR > 1999
S4	("Intercompany" AND ("Energy" OR "Utility" OR "Heat")) AND PUBYEAR > 1999
S5	"(Industrial ecology" AND ("Waste heat" OR "Excess heat" OR "Heat recovery")) AND PUBYEAR > 1999
S6	("Industry" AND ("Waste heat" OR "Excess heat" OR "Heat recovery")) AND PUBYEAR > 1978
S7	(("Total Site Analysis")) AND PUBYEAR > 1978 AND PUBYEAR < 2000
S8	(("Intercompany" AND ("Energy" OR "Utility" OR "Heat")) AND PUBYEAR > 1978 AND PUBYEAR < 2000
S9	(("Industrial ecology" AND ("Waste heat" OR "Excess heat" OR "Heat recovery")) AND PUBYEAR > 1978 AND PUBYEAR < 2000

Eine Auflistung der Treffer nach Fachzeitschrift und Suchterm ist in Tabelle 53 im Anhang gegeben. Bestimmte Artikel wurden bei Anwendung der Suchterme mehrmals gefunden. Für die Anzahl der insgesamt gefundenen Artikel wurde daher der Digitale Objektbezeichner (DOI, im Englischen: Digital Object Identifier) verwendet, um mehrfaches Zählen identischer Artikel zu vermeiden. Des Weiteren gab es 23 Artikel aus den 1980er- und 1990er-Jahren, für die keine DOI verfügbar war, die aber in den gewählten Fachzeitschriften veröffentlicht wurden. Diese Artikel wurden ebenfalls mit einbezogen.

Insgesamt wurden 316 Artikel gefunden. Dies entspricht 37 % der Anzahl an Artikeln, die mit den definierten Suchtermen gefunden werden, wenn die Fachzeitschriften nicht entsprechend Tabelle 2 eingegrenzt werden. Auf die Fachzeitschriften mit den vier häufigsten Treffern (Applied Energy, Applied Thermal Engineering, Energy, Energy Conversion and Management) entfallen ca. 60 % der gefundenen Artikel. Zudem lassen sich weitere Trends erkennen. S6 deckt den Suchzeitraum von 1979 bis 2015 und S2 lediglich den Zeitraum von 2000 bis 2015 ab. Man erkennt, dass lediglich 26 % der Treffer von S6 auf den Suchzeitraum von 1979 bis 1999 entfallen, wohingegen die restlichen 74 % der Treffer auf die folgenden 15 Jahre entfallen. Demnach wurden von 1979 bis 1999 jährlich also ca. 3 Artikel in den Fachzeitschriften in dem Themenfeld entsprechend S1 veröffentlicht und von 2000 bis 2015 etwa 17 Artikel pro Jahr. Dies entspricht also nahezu einer sechsfachen Zunahme. Um dies in Relation zu setzen, wurde die Anzahl der jährlichen Veröffentlichungen der entsprechenden Fachzeitschriften aus Scopus ausgeleitet. Scopus liefert nach eigenen Angaben jedoch erst komplette Datensätze seit 1996. Zudem ist die Fachzeitschrift „Journal of Heat Recovery Systems“ schon vor 1996 zunächst in „Heat Recovery Systems and CHP“ und im Anschluss wiederum in „Applied Thermal Engineering“ umbenannt worden. Demnach wurde die Anzahl der Treffer von S6 im Zeitraum von 1996 bis 1999 zur Referenz herangezogen. Ein Vergleich findet sich in Tabelle 4.

Tabelle 4: Referenzvergleich zur Zunahme der Artikel für den Suchterm S6.

Mittelwerte pro Jahr für die Fachzeitschriften aus Tabelle 2 (gerundete Werte)*	1996 - 1999	2000 - 2015	Relative Zunahme
Veröffentlichte Dokumente insgesamt	878,3	3728,2	4,2
Anzahl der Artikel entsprechend S6	4,5	15,7	3,5
* „Journal of Heat Recovery Systems“ und „Heat Recovery Systems and CHP“ wurden nicht mit einbezogen.			

Man erkennt, dass die relative Zunahme im Vergleich leicht unterproportional ist. Die Zunahme der Artikel in dem Themenbereich S6 ist also eher auf eine steigende Anzahl von Veröffentlichungen insgesamt zurückzuführen und der Themenkomplex wird vergleichsweise nicht überproportional stark adressiert. Des Weiteren erkennt man für die äquivalenten Suchterme S3 - S5 und S7 - S9, dass vor 2000 keine Suchtreffer enthalten sind und nach 2000 die Anzahl der Treffer verglichen zu S2 sehr gering ist (4 % bezogen auf S2).

In einem weiteren Schritt wurde die Anzahl der Artikel nochmals reduziert. Viele Artikel greifen das Thema Abwärme auf einer Betrachtungsebene auf, die für die übergeordnete Fragestellung nicht direkt von Relevanz ist. Dabei wurde eine Vielzahl experimenteller Arbeiten aussortiert. Ein typisches Beispiel hierfür ist der Artikel von Rane und Tandale (2005). In dem Artikel werden Experimente durchgeführt, um den Wärmetransport in Rohrbündelwärmeübertragern physikalisch besser beschreiben zu können.

Des Weiteren wurden einige Artikel aussortiert, die sich mit dem Thema der Erzeugung von Kälte mit Hilfe der Ad- oder Absorption beschäftigen. Zwar kann industrielle Abwärme für die Ad- oder Absorption prinzipiell genutzt werden, doch die entsprechend aussortierten Artikel untersuchen die Prozesse nicht im Kontext der Nutzung industrieller Abwärme, sondern anderweitig. Ein typisches Beispiel ist der Artikel von Somers et al. (2011), in dem die Modellierung von Absorptionskälteanlagen im Fokus steht. Zudem wurde eine Vielzahl von Artikeln aussortiert, die sich im Schwerpunkt mit der Nutzung von Abwärme im Kraftwerksbereich beschäftigen. Hierunter fallen insbesondere auch Artikel im Themenbereich der Kraft-Wärme-Kopplung. Nach Aussortierung verblieben 174 Artikel. Schließlich wurden diese Artikel anhand von Untersuchungsmerkmalen charakterisiert (im Folgenden erläutert).

3.2.2. Untersuchungsmerkmale

Die Wahl der Merkmale zielt dabei auf die Untersuchung der im Folgenden aufgelisteten Fragestellungen ab:

- Wie viele Artikel befassen sich im Allgemeinen mit der Nutzung industrieller Abwärme? Gibt es sektorale Schwerpunkte diesbezüglich?
- Wie viele Artikel befassen sich mit energietechnischen Geräten oder Maschinen, die insbesondere auch für die Nutzung von Abwärme entwickelt oder weiterentwickelt werden (bspw. ORC-Turbinen)?
- Wie viele Artikel befassen sich mit Analyse- und Entwurfsmethoden zur Verbesserung der Energieeffizienz industrieller Standorte im Hinblick auf die Wärmeversorgung (bspw. Pinch-Analyse)?

Zudem sollte evaluiert werden, auf welcher technischen Ebene sich die Artikel mit der Nutzung von Abwärme befassen, wenn es um die Steigerung der Energieeffizienz durch Nutzung von Abwärme geht (Vermeidung, Nutzung innerhalb des Prozesses etc.). Hierfür wurden Merkmale definiert. Die Merkmale können grundsätzlich in die Blöcke Fokus und technische Ebene eingeteilt werden. Die Merkmale für die technische Ebene sind in Tabelle 5 beschrieben.

Tabelle 5: Merkmale – technische Ebene.

Vermeidung von Abwärme	Im Zusammenhang von Optionen zur Steigerung der Energieeffizienz wird der Aspekt "Vermeidung von Abwärme" mit aufgegriffen.
Innerbetriebliche Nutzung von Abwärme	Im Zusammenhang von Optionen zur Steigerung der Energieeffizienz werden die Aspekte "Abwärme prozessintern" oder "Abwärme innerbetrieblich" zu nutzen aufgegriffen. Bei Fallstudien qualifiziert die Untersuchung von prozessinternen oder innerbetrieblichen Maßnahmen zur Nutzung von Abwärme für das Merkmal.
Außerbetriebliche Nutzung von Abwärme	Im Zusammenhang von Optionen zur Steigerung der Energieeffizienz wird der Aspekt Abwärme außerbetrieblich zu nutzen auch aufgegriffen. Bei Fallstudien qualifiziert die Untersuchung dieser Maßnahme für das Merkmal.
Umwandlung von Abwärme	Im Zusammenhang von Optionen zur Steigerung der Energieeffizienz wird der Aspekt Abwärme in andere Medien (bspw. Strom oder Kälte) umzuwandeln mit aufgegriffen. Bei Fallstudien qualifiziert die Untersuchung dieser Maßnahme für das Merkmal.

Merkmale für den Fokus sind in Tabelle 6 beschrieben. Bei der Zuordnung von Merkmalen je Artikel wurde die Anzahl der Merkmale pro Artikel nicht beschränkt. Ein Artikel konnte somit also mit mehr als einem Merkmal belegt werden. Ein Beispiel wäre eine sektorübergreifende Potenzialstudie zur Nutzung von Abwärme, die alle technischen Ebenen der Nutzung von Abwärme untersucht oder diskutiert. Ein Artikel solcher Art wird mit den Merkmalen „Möglichkeiten und Potenziale“ und allen technischen Ebenen gekennzeichnet. Jeder Artikel wurde in einer Excel-Tabelle mit den jeweiligen zutreffenden Merkmalen versehen. Qualifiziert sich ein Artikel für eine Merkmalsausprägung, so wurde das entsprechende Merkmal mit einer Eins markiert. Werden zusammenhängende Merkmale vergleichend dargestellt, so kann demnach die Summe der Merkmalsausprägungen über alle Artikel höher sein als die Anzahl der Artikel.

Tabelle 6: Merkmal – Fokus.

Möglichkeiten und Potenziale	Der Artikel befasst sich im Allgemeinen mit der Nutzung industrieller Abwärme. Hierfür werden technische Möglichkeiten zur Nutzung industrieller Abwärme diskutiert und/oder evaluiert. Alternativ werden sektorübergreifende Abwärmepotenziale quantifiziert. Die Potenziale können sich auch auf den Einsatz einer bestimmten Technologie beziehen.
Sektor- und/oder prozess-spezifisch	Der Artikel befasst sich mit der Nutzung industrieller Abwärme bezogen auf eine Branche bzw. einen industriellen Sektor*. Folgende Inhalte qualifizieren für das Merkmal: <ul style="list-style-type: none"> - Abwärmepotenziale für einen Sektor werden quantifiziert. - Die Nutzung einer einem Sektor zugeordneten Abwärmequelle wird im Speziellen untersucht. - Energieeffizienzpotenziale in einem Sektor werden untersucht und die Nutzung anfallender Abwärmequellen innerhalb des Sektors ist enthalten. - Die Nutzung von industrieller Abwärme wird in einer Fallstudie, die einem Sektor zugeordnet werden kann, untersucht.
Komponenten-spezifisch	Der Artikel befasst sich explizit mit einer zur Nutzung von Abwärme geeigneten Technologie, die auch in diesem Kontext untersucht wird. Beispielsweise qualifiziert die Untersuchung folgender Komponenten für das Merkmal: <ul style="list-style-type: none"> - Komponente zum Speichern von Wärme, - Komponente zum Umwandeln von Abwärme in Strom, - spezielle Wärmeübertrager für die Abwärmenutzung.
Methodische Perspektive	Der Artikel befasst sich im Schwerpunkt mit der Entwicklung oder Weiterentwicklung eines systematischen Ansatzes zur Erhöhung der Energieeffizienz auf betrieblicher oder überbetrieblicher Ebene und dabei wird die Optimierung der Wärmeversorgung mit berücksichtigt (bspw. Total Site Analysis).
* Industrieller Sektor und Branche werden synonym verwendet (bspw. die Stahlproduktion).	

3.2.3. Merkmalsverteilung

In Tabelle 7 ist die relative Verteilung über die Summe der Merkmalsausprägungen für das Thema Fokus angegeben. Man erkennt, dass sich eine Vielzahl von Artikeln mit der Nutzung von Abwärme bezogen auf einen industriellen Sektor beschäftigt. Sektorübergreifende Artikel sind dagegen seltener. Insgesamt wurden 191 Merkmale im Bereich Fokus gekennzeichnet. Das heißt zudem, dass eine Vielzahl von Artikeln mehreren Fokusrichtungen zugeordnet wurden. Hier sind zunächst einmal Potenzialstudien für neue Technologien besonders hervorzuheben. Beispielsweise untersuchen und quantifizieren Bauer et al. (2004) und Utlu und Parali (2013) Potenziale für die Thermofotovoltaik in der britischen und türkischen Industrie. Ein weiteres Beispiel sind Campana et al. (2013), die Energieeinsparpotenziale durch Anwendung der ORC-Technologie zur Verstromung von Abwärme in der energieintensiven Industrie für Europa quantifizieren. Des Weiteren finden sich mehrere Artikel, die bestimmte Technologien zur Nutzung von Abwärme im Kontext eines Industriesektors oder damit zusammenhängenden Prozessen untersuchen. Ein Beispiel ist der Artikel von Costa et al. (2009). Dort wird die Möglichkeit zur Steigerung der Energieeffizienz des Kraft-Aufschluss-Verfahrens zur Herstellung von Zellstoff für die Papierproduktion durch Integration von Absorptions-Wärmepumpen untersucht.

Tabelle 7: Merkmalsverteilung für die Kategorie Fokus in %.

Möglichkeiten und Potenziale	11
Sektor-und / oder prozessspezifisch	49
Komponenten-spezifisch	24
Methodische Perspektive	16

Bei der Zuordnung der Merkmale für den Bereich Fokus wurde beobachtet, dass bestimmte Vorgehensweisen gehäuft vorkommen. Für das Merkmal „Möglichkeiten und Potenziale“ lässt sich feststellen, dass Energieeinsparpotenziale durch Nutzung von Abwärme abgeschätzt werden, indem die anfallende Abwärme mehrerer Industriezweige abgeschätzt wird. Entsprechende Beiträge inklusive der untersuchten Region sind in Tabelle 8 aufgeführt.

Tabelle 8: Artikel mit Abwärmepotenzialen für abgegrenzte Regionen.

Beitrag	Region
(Bonilla et al. 1997)	Baskenland (Spanien)
(Johnson et al. 2008b)	USA
(McKenna und Norman 2010)	Großbritannien
(Rattner et al. 2011)	USA
(Ammar et al. 2012)	Großbritannien
(Broberg et al. 2012)	Schweden
(Hammond und Norman 2014)	Großbritannien
(Persson et al. 2014)	Europäische Union (EU)
(Miró et al. 2015)*	EU, USA, Japan, Kanada
* War nicht in den Suchergebnissen enthalten, da der Artikel nach dem Suchzeitpunkt veröffentlicht wurde.	

Den Artikeln wurde zudem der Industriesektor beziehungsweise die Branche zugeordnet. Im Ergebnis sind ca. 80 % der Artikel auf die Sektoren Eisen- und Stahlproduktion, Lebensmittelindustrie, Herstellung von Papier und Pappe, Petrochemie oder die Zementproduktion zurückzuführen.

Bei sektoral abgegrenzten Untersuchungen wird die Nutzung von Abwärme in vielen Artikeln entweder als Haupt- oder Teilaspekt aufgegriffen. Unter anderem werden CO₂ bzw. Energieeinsparpotenziale für die Industriesektoren durch Nutzung von Abwärme in jeweils abgegrenzten Räumen (bspw. Ländern) quantifiziert. Die entsprechenden Artikel sind in Tabelle 10 aufgelistet. Bezüglich der technischen Ebene wurde beobachtet, dass sich keine Artikel nennenswert mit der Option der Abwärmevermeidung beschäftigen. Ein Großteil der Artikel beschäftigt sich hingegen mit der prozessinternen oder innerbetrieblichen Abwärmenutzung (vgl. Tabelle 9).

Tabelle 9: Merkmalsverteilung für die Kategorie technische Ebene in %.

Innerbetriebliche Nutzung von Abwärme	53
Außerbetriebliche Nutzung von Abwärme	22
Umwandlung von Abwärme	25

Tabelle 10: Sektoral abgegrenzte Artikel mit Nutzung von Abwärme.

Sektor	Beispiele	Quantifizierung
Keramik	(Ibáñez-Forés et al. 2013)	n
Eisen und Stahl	(Lyakishev und Perlov 1987)	n
Eisen und Stahl	(Mohsen und Akash 1998)	j *
Eisen und Stahl	(Ma et al. 2012)	j *
Eisen und Stahl	(Wang 2014)	j *
Eisen und Stahl	(Chen et al. 2014)	?
Eisen und Stahl	(Yu et al. 2015)	n
Lebensmittel (Getränke)	(Fawkes und Jacques 1986)	?
Lebensmittel	(Wang et al. 2007)	j *
Lebensmittel	(Seck et al. 2013)	j
Metall allgemein	(Zhang 2012)	n
Papier und Pappe	(Fleiter et al. 2012b)	j
Grundstoffchemie	(NEELIS et al. 2007)	j *
Grundstoffchemie	(Liu et al. 2013)	j
Zement	(Rasul et al. 2005)	j *
Zement	(Ansari und Seifi 2013)	j
Zement	(Ammenberg et al. 2015)	n
Zement	(Shen et al. 2015)	j *
** Die Quantifizierung zur Nutzung von Abwärme ist in der Methodik zur Ermittlung von Effizienzpotenzialen enthalten. Entsprechende Einsparpotenziale werden im Artikel jedoch nicht explizit aufgeführt.		

Zudem wurden 27 Artikel gefunden, die das Thema der außerbetrieblichen Abwärmenutzung in irgendeiner Form mit aufgreifen. Die inhaltlichen Ergebnisse für alle Artikel, die den Aspekt überbetriebliche Abwärmenutzung aufgreifen, werden im folgenden Unterkapitel beschrieben.

3.2.4. Inhaltliche Ergebnisse der Literaturrecherche

Im Folgenden werden die inhaltlichen Ergebnisse der Literaturrecherche schrittweise aufgeführt. Zunächst werden die inhaltlichen Ergebnisse für Artikel, die mit dem Merkmal „Möglichkeiten und Potenziale“ versehen worden sind, aufgeführt. Danach folgen die inhaltlichen Ergebnisse für alle weiteren Artikel, die sich mit überbetrieblicher Nutzung von Abwärme beschäftigen. Abschließend werden die inhaltlichen Ergebnisse im Kontext der Fragestellung zusammengefasst.

Inhaltliche Ergebnisse: Möglichkeiten und Potenziale

(Holmgren 2006): Role of a district-heating network as a user of waste-heat supply from various sources - the case of Göteborg

In einer Fallstudie wird die Nutzung industrieller Abwärme für das Fernwärmenetz in Göteborg (Schweden) analysiert.

(Broberg et al. 2012): Industrial excess heat deliveries to Swedish district heating networks: Drop it like it's hot

Broberg et al. (2012) quantifizieren ungenutzte industrielle Abwärmepotenziale zur Einspeisung in das Fernwärmenetz in Schweden. Hierfür wird eine Umfrage für eine Fallregion durchgeführt, die dann auf das ganze Land hochskaliert wird.

(Ammar et al. 2012): Low grade thermal energy sources and uses from the process industry in the UK

In dem Artikel von Ammar et al. (2012) handelt es sich im Schwerpunkt um Evaluierungen von Technologien zur Nutzung von Abwärme für verschiedene Industrien. Dabei werden keine gesamtwirtschaftlichen Einsparpotenziale quantifiziert. Indikative Angaben zu Abwärmemengen je Industrie in Großbritannien werden dabei Sekundärquellen entnommen.

(Broberg Viklund und Johansson 2014b): Technologies for utilization of industrial excess heat: Potentials for energy recovery and CO2 emission reduction

Broberg Viklund und Johansson (2014b) führen zunächst eine Fallstudie zur Nutzung industrieller Abwärme für das Fernwärmenetz in Göteborg (Schweden) durch. Hierfür wird die Möglichkeit Abwärme in das Fernwärmenetz einzuspeisen, mit der Möglichkeit Abwärme zu verstromen verglichen. Insgesamt wird in der Fallstudie mehr als doppelt so viel Energie zurückgewonnen, wenn die Abwärme für das Fernwärmenetz statt zur Verstromung genutzt wird. Beim Vergleich wird jedoch nicht zwischen Wärme- und elektrischer Energie unterschieden.

(Hammond und Norman 2014): Heat recovery opportunities in UK industry

Hammond und Norman (2014) quantifizieren Abwärmepotenzialen der energieintensiven Industrie in Großbritannien. Sie weisen den Potenzialen anschließend Technologien zur Nutzung auf Basis eines techno-ökonomischen Modells zu.

In dem Rahmen wird eine Quantifizierung von Einsparpotenzialen durch überbetriebliche Nutzung von Abwärme ebenfalls durchgeführt, da dies als Option zur Nutzung mitberücksichtigt wird. Hier werden der Prozesswärmebedarf und das Angebot an Abwärme von Industriestandorten in fünf

Temperaturbänder aufgeteilt (<100, 100 - 500, 500 - 1000, 1000 - 1500, >1500, in °C). Für die jeweiligen Standorte werden der Prozesswärmebedarf und das Angebot an Abwärme innerhalb dieser Temperaturbereiche abgeschätzt. Im Anschluss wird für jede Abwärmequelle anhand techno-ökonomischer Kriterien entschieden, welche Option zur Nutzung vorgeschlagen wird. Grundsätzlich werden die betriebsinterne Verwendung, die Verstromung und die Verwertung für benachbarte Industriestandorte abgewogen. Als maximale Entfernung zwischen Industriestandorten werden dabei zehn Kilometer angenommen. Die Datengrundlage für die Arbeit ist dem Artikeln von McKenna und Norman (2010) entnommen. Hammond und Norman (2014) schätzen für Großbritannien, dass insbesondere die Chemie-, Glas-, Papier- und Lebensmittelindustrie durch Abwärme benachbarter Standorte zumindest teilweise versorgt werden könnten.

Inhaltliche Ergebnisse: sonstige Artikel mit überbetrieblicher Abwärmenutzung

(Gebremedhin et al. 2002): Optimisation of merged district - heating systems - Benefits of co-operation in the light of externality costs

In dem Artikel wird ein Energiesystem optimiert. Neuartig für den damaligen Zeitpunkt ist die interkommunale Betrachtung der Systemgrenzen. In dem Artikel werden vier Kommunen in Dänemark und eine Kommune in Schweden mit räumlicher Nähe zueinander gemeinsam modelliert. Im Rahmen der Modellierung des Energiesystems wird die potenzielle Einspeisung von industrieller Abwärme in die jeweils vorhandenen Fernwärmenetze mitberücksichtigt. Im Rahmen der Systemoptimierung werden Externalitäten ebenfalls mit einbezogen.

(Gebremedhin 2003): The role of a paper mill in a merged district heating system

In dem Artikel wird im Rahmen einer Fallstudie die mögliche Bedeutung einer Papierfabrik als Wärmelieferant für ein nah gelegenes Fernwärmenetz analysiert. Hierfür werden unterschiedliche Szenarien ausgewertet und gegeneinander abgewogen. Für diesen Zweck wird das Energiesystem des Fernwärmenetzbetreibers und der Papierfabrik innerhalb einer gemeinsamen Systemgrenze betrachtet. Unterschiedliche Szenarien werden anhand von Systemkosten zur Bereitstellung der jeweiligen Wärmenachfrage betrachtet. Bei den Szenarien wird zunächst grundsätzlich zwischen der isolierten Papierfabrik und einer Anbindung der Fabrik an das Fernwärmenetz unterschieden. In einem weiteren Szenario wird ein damals noch nicht vorhandener deregulierter Strommarkt unterstellt.

(Grönkvist und Sandberg 2006): Driving forces and obstacles with regard to co-operation between municipal energy companies and process industries in Sweden

In dem Beitrag wird die Kooperation von kommunalen Energieversorgern und Unternehmen aus der Prozessindustrie in Schweden im Bereich der Wärmeversorgung untersucht. Auf Basis von Dokumenten und Interviews für acht Kooperationen werden Erfolgsfaktoren ausgearbeitet und diskutiert. Ein besonders interessanter Aspekt des Beitrags ist, dass neben der Nutzung industrieller Abwärme als Lieferant für Fernwärmenetze auch die Option, Wärmeerzeuger gemeinsam zu nutzen, aufgegriffen wird. Ein zentrales Ergebnis der Studie ist, dass für alle untersuchten Fälle und Varianten "Personen mit Ambitionen" für das Zustandekommen solcher Projekte entscheidend sind. Zudem können Gründe für das Scheitern möglicher Kooperationen nur schwer erforscht werden, da nicht durchgeführte Projekte in der Regel kaum dokumentiert werden.

(AJAH et al. 2008): On the robustness, effectiveness and reliability of chemical and mechanical heat pumps for low-temperature heat source district heating: A comparative simulation-based analysis and evaluation

Bei dem Artikel handelt es sich um eine Studie zum Einsatz von Wärmepumpen in Fernwärmenetzen. Dabei wird Abwärme als mögliche Energiequelle evaluiert. Im Schwerpunkt werden vergleichende Analysen auf Basis von Simulationen für die betrachteten Energiesysteme durchgeführt.

(Svensson et al. 2008): Excess heat from kraft pulp mills: Trade-offs between internal and external use in the case of Sweden- Part 1: Methodology

In dem Artikel wird für eine Papierfabrik in Schweden eine Fallstudie zu Nutzungsmöglichkeiten anfallender Abwärme durchgeführt. Hierfür werden die Papierfabrik und der Fernwärmenetzbetreiber als ein gemeinsames System betrachtet und unterschiedliche Systeme werden anhand von Kriterien verglichen. Diese Kriterien sind die Wirtschaftlichkeit und vermiedene Treibhausgasemissionen. Die Wirtschaftlichkeit wird wie bei Gebremedhin (2003) anhand der Systemkosten bewertet, die es zu minimieren gilt. Dabei wird die anfallende Abwärme zum einen als potenzieller Wärmelieferant für das Fernwärmenetz betrachtet. In diesem Fall werden Wärmeerzeugungskosten bei dem Betreiber des Fernwärmenetzes reduziert. Referenzsysteme, die zum Vergleich herangezogen werden, sind ein Biomasse- und ein Erdgas-KWK. Zum anderen kann die Abwärme zur Erzeugung von Strom und somit zur Deckung des Eigenbedarfs der Papierfabrik genutzt werden.

(Klugman et al. 2009): A Swedish integrated pulp and paper mill-Energy optimisation and local heat cooperation

In der Studie von (Klugman et al. 2009) werden Möglichkeiten die Energieeffizienz einer Papierfabrik zu steigern evaluiert. Neben innerbetrieblichen Maßnahmen wie der Wärmeintegration wird auch die Verknüpfung der Fabrik mit einem lokalen Wärmemarkt (Fernwärme) diskutiert, um überschüssige Abwärme zu verkaufen. Diese Möglichkeit wird in der Studie als wirtschaftlich bewertet.

(Atkins et al. 2010): The challenge of integrating non-continuous processes - milk powder plant case study

Der Artikel ist im Prinzip ein Vorgänger von Atkins et al. (2012). Bei der Untersuchung handelt es sich um eine Fallstudie für den gleichen Standort. Lediglich das untersuchte Teilsystem ist kleiner. Zudem sind die angewendeten Methoden noch nicht endgültig formalisiert. Daher wird auf Atkins et al. (2012) verwiesen.

(Chae et al. 2010): Optimization of a waste heat utilization network in an eco-industrial park

Chae et al. (2010) entwickeln in dem Beitrag eine Methode zum Optimieren des Einsatzes von Abwärmeströmen in sogenannten Eco-Industrial-Parks (EIP). Dabei handelt es sich um ein Modell zur Optimierung von Energiesystemen. In dem Modell werden neben rein technischen Restriktionen auch Aspekte zur Wirtschaftlichkeit aufgegriffen. Die Methode wird in einer Fallstudie für einen petrochemischen Komplex in Süd-Korea angewendet. Zur Bewertung von Nutzungsmöglichkeiten anfallender Abwärmeströme des Komplexes werden Unternehmen im oder in der Nähe des EIP als potenzielle Wärmeabnehmer betrachtet. Zudem werden auch benachbarte Kommunen als potenzielle Abnehmer betrachtet.

(Andrews und Pearce 2011): Environmental and economic assessment of a greenhouse waste heat exchange

In dem Beitrag von Andrews und Pearce (2011) wird eine Methode entwickelt, um die Nutzung von Abwärme in Gewächshäusern in nördlichen Regionen wirtschaftlich und technisch zu bewerten.

(Hackl et al. 2009): Targeting for energy efficiency and improved energy collaboration between different companies using total site analysis (TSA)

In dem Beitrag von Hackl et al. (2009) wird die TSA-Methode für einen Industriepark im Rahmen einer Fallstudie demonstriert und angewendet. Der Industriepark besteht aus mehreren Fabriken aus der chemischen Industrie (Chemiecluster). Die Fallstudie behandelt ein potenzielles betriebsübergreifendes Wärmenetz. Im Ergebnis wird gezeigt, dass durch Errichtung eines Wärmenetzes der thermische Leistungsbedarf der Standorte maßgeblich reduziert werden könnte.

(Stijepovic 2011 et al. 2011): Optimal waste heat recovery and reuse in industrial zones

Stijepovic et al. (2011) entwickeln eine Methode zum Entwerfen von Wärmeübertragernetzwerken in Industriegebieten (insbesondere für energieintensive Anlagen). Wie üblich in dem Forschungsstrang der Wärmeintegration enthält die Methode einen optimierenden Ansatz zum Errechnen der maximalen Wärmerückgewinnung (im Englischen: target optimization) und einen Ansatz zum Entwerfen von möglichst optimalen Wärmenetzwerken (im Englischen: design optimization). Grundsätzlich kann nach energetischen, technischen und wirtschaftlichen Zielkriterien optimiert werden. Neu bei Stijepovic et al. (2011) ist, dass neben Temperaturen auch Drücke berücksichtigt werden. Eine Optimierung zeitlich dynamischer Wärmequellen und Senken ist jedoch nicht vorgesehen. Der Ansatz ist insgesamt dem Ansatz von Cerda et al. (1983) sehr ähnlich.

(Atkins et al. 2012): Process integration between individual plants at a large dairy factory by the application of heat recovery loops and transient stream analysis

Viele Betriebe im Bereich der Lebensmittelindustrie arbeiten mit Wärmeverteilsystemen auf Basis von Dampf. Bei Betrieben mit besonders niedrigen Pinch-Temperaturen gestaltet sich daher die Wärmeintegration schwierig. Dies liegt daran, dass ein Einspeisen vieler Abwärmeströme in das Dampfverteilsystem aufgrund zu niedriger Temperaturen nicht möglich ist. Eine Alternative zur Nutzung dieser Abwärmeströme besteht darin, direkte Verbindungen zwischen Wärmequellen und Wärmesenken aufzubauen (in den entsprechend zulässigen Temperaturbereichen). Dies ist häufig jedoch nicht wirtschaftlich darstellbar. Eine weitere Alternative besteht darin, ein Wärmerückgewinnungs- und -verteilsystem aufzubauen, welches auf niedrigeren Temperaturniveaus betrieben wird (im Englischen: heat recovery loops). Als Wärmeträger können bspw. Thermoflüssigkeiten verwendet werden und das System wird dann parallel zum bestehenden Dampfsystem betrieben. Zudem können solche Systeme mit Wärmespeichern kombiniert werden, was in der Lebensmittelindustrie aufgrund vieler Batch-Prozesse sinnvoll erscheint. Atkins et al. (2012) entwerfen ein solches System für einen Molkereistandort mit sechs separaten Fabriken und bewerten dieses in einer Fallstudie. Bei dem Standort handelt es sich um ein dynamisches System, denn die Temperaturen möglicher Abwärmeströme entwickeln sich zeitlich variabel und es liegen Batch-Prozesse vor. In der Fallstudie werden die Temperaturen der „heat recovery loop“ und die Kapazität eines möglichen thermischen Speichers variiert. Im Ergebnis wird herausgestellt, dass zur Maximierung der Wärmerückgewinnung in der „heat recovery loop“ die geeignete Temperatur

gewählt werden muss. Zudem gibt es eine nach wirtschaftlichen Kriterien optimale Speichergröße. Beides ist in der Dynamik des Systems begründet.

(Nowicki und Gosselin 2012): An overview of opportunities for waste heat recovery and thermal integration in the primary aluminum industry

Nowicki und Gosselin (2012) führen eine Fallstudie zur Nutzung von Abwärme aus einer primären Aluminiumhütte durch. Dabei wird die problematische Nutzung diffuser Abwärme angesprochen. Außerbetriebliche Anwendungen werden ebenfalls als potenzielle Nutzer angesprochen (bspw. als mögliche Wärmelieferanten für Fernwärmenetze oder zur Meerwasserentsalzung).

(Ammar et al. 2013): Desalination using low grade heat in the process industry: Challenges and perspectives

Ammar et al. (2013) führen eine Fallstudie zur Meerwasserentsalzung unter Nutzung von Abwärme durch. Hierfür wird eine Papierfabrik an der britischen Küste untersucht, die Abwärme mit Temperaturen unter 100 °C erzeugt durchgeföhrt. Im Rahmen der Fallstudie werden zwei thermische Prozesse zur Meerwasserentsalzung miteinander verglichen, die die Abwärme prinzipiell verwerten könnten. Beim ersten Prozess handelt es sich um ein mehrstufiges Entfeuchtungsverfahren, bei dem Wärme mit Temperaturen unter 100 °C als Energiequelle eingesetzt werden kann. Beim zweiten Prozess handelt es sich um ein mehrstufiges Destillationsverfahren. Hierfür ist es notwendig die Abwärme unter 100 °C mit Hilfe einer Wärmepumpe auf höhere Temperaturen anzuheben. Für den Vergleich der Prozessvarianten werden eine Lebenszyklusanalyse (LCA) und eine Kostenrechnung durchgeföhrt. Für beide Prozesse ergaben sich Herstellkosten, die laut Autoren etwa dem häuslichen Bezugspreis für Wasser in Großbritannien entsprechen (2 Pfund pro Tonne). Im Rahmen der LCA mindern beide Prozesse das Treibhausgaspotenzial etwa gleich hoch. Dabei werden die Prozesse mit einem konventionellen mit Erdgas betriebenen Destillationsprozess verglichen. Unterschiede zwischen beiden Prozessvarianten, die sich bei der LCA ergeben und die von den Autoren besonders hervorgehoben werden, beziehen sich auf die toxische Wirkungskategorie. Der mit der Wärmepumpe betriebene Prozess hat höhere toxische Wirkungen als der mit Erdgas betriebene Vergleichsprozess. Die Ursache liegt in dem eingesetzten Strom und dem entsprechend hohen Anteil an mit Kohlekraftwerken erzeugtem Strom in Großbritannien.

(Ammar et al. 2013): Evaluation of low grade heat transport in the process industry using absorption processes

Ammar et al. (2013) evaluieren ein technisches System zum Transport von Abwärme mit niedrigen Temperaturen aus Prozessindustrien über längere Distanzen zu häuslichen Verbrauchern. Das System basiert auf Absorptionsprozessen. In der Studie wird angegeben, dass Abwärme mit einer Temperatur ab etwa 80 °C über Distanzen von 30 bis 40 km mit dem System ökonomisch transportiert werden kann.

(Fang et al. 2013): Industrial waste heat utilization for low temperature district heating

Fang et al. (2013) schlagen einen ganzheitlichen Ansatz zur Planung der Verwertung von Abwärme industrieller Standorte vor. Der Ansatz wird für Abwärmeströme einer Fabrik zur Kupferherstellung vorgestellt. Hierfür wird die Nutzung industrieller Abwärme in einem neu zu planenden Fernwärmenetz evaluiert. Die Abwärme soll dabei mit einem kaskadenartigen System gesammelt werden. Wasser wird zunächst aufgeheizt, um Abwärme niedriger Temperaturen aufzunehmen (also niedrigere Temperaturen

zu kühlen) und je Kaskade (3) zu höheren Temperaturen geführt. Dies führt zu einer hohen Effizienz. Zudem können beim Anzapfen der Kaskade auf unterschiedlichen Ebenen unterschiedliche Verbraucher versorgt werden (Niedertemperatur-Heizsysteme usw.).

(Hackl und Harvey 2013): Framework methodology for increased energy efficiency and renewable feedstock integration in industrial clusters

In dem Artikel wird wie beim Artikel von Hackl et al. (2009) die TSA-Methode anhand einer Fallstudie für ein Chemiecluster demonstriert. Aufbauend auf Hackl et al. (2009) wird die Methode ausführlicher formalisiert und es werden zuvor nicht berücksichtigte Kälteverbraucher nun einbezogen.

(Ljungstedt et al. 2013): Evaluation of opportunities for heat integration of biomass-based Fischer-Tropsch crude production at Scandinavian kraft pulp and paper mill sites

Ljungstedt et al. (2013) evaluieren in einer Fallstudie die Nutzung von Abwärme aus einer Fabrik zur Herstellung von Biokraftstoff (Fischer-Tropsch-Verfahren mit Holz als Rohstoff). Hierfür wird die mögliche Bereitstellung der Wärme für eine integrierte Papierfabrik analysiert. Zur Analyse werden Methoden der Wärmeintegration angewendet.

(Morandin et al. 2014): Economic feasibility of district heating delivery from industrial excess heat: A case study of a Swedish petrochemical cluster

Morandin et al. (2014) führen eine Fallstudie zur überbetrieblichen Wärmeintegration für ein Chemiecluster durch. Hierfür wird die TSA-Methode angewendet. Bei dem Chemiecluster handelt es sich um den gleichen Standort wie im Beitrag von Hackl et al. (2009). Neu an der Analyse ist, dass eine potenzielle Konkurrenz zwischen überbetrieblicher Wärmeintegration und dem Einspeisen von Abwärme in ein Fernwärmenetz mit aufgenommen und miteinander anhand unterschiedlicher Indikatoren verglichen wird.

(Oh et al. 2014): Improving energy efficiency for local energy systems

Oh et al. (2014) präsentieren eine systematische Methode auf Basis der Pinch-Analyse, die es erlaubt Energiesysteme zu optimieren. Dabei können mehrere Perioden (also eine zeitliche Dynamik) im Wärmelastgang berücksichtigt werden (inklusive thermischer Energiespeicher). Die Methode wird für eine Fallstudie angewendet, bei der saisonal fluktuierende Abwärme aus einem Industriekomplex zur Verfügung steht. Hierfür wird die Nutzung dieser Wärme für ein Fernwärmenetz inklusive thermischen Speichern analysiert.

(Broberg Viklund und Lindkvist 2015): Biogas production supported by excess heat - A systems analysis within the food industry

In der Lebensmittelindustrie fällt biogener Abfall an, der zu Biogas verarbeitet werden kann. Zudem fällt in der Lebensmittelindustrie häufig Abwärme unter 100 °C an, die bei der Produktion von Biogas unterstützen könnte (bspw. zur Bereitstellung von Wärme in Faulbehältern). Broberg, Viklund und Lindkvist (2015) bewerten und vergleichen das Treibhausgaspotenzial für zwei Konzepte zur Nutzung des biogenen Abfalls und der anfallenden Abwärme für einen Produktionsstandort aus der Lebensmittelindustrie (Hersteller von Majonäse-Salaten).

Beim ersten Konzept wird unterstellt, dass der aus der Lebensmittelfabrik stammende biogene Abfall für zwei externe Fabriken separat bereitgestellt wird. In der ersten der beiden Fabriken wird aus dem

biogenen Abfall Biogas für den Kraftfahrzeugverkehr hergestellt, in der zweiten Fabrik wird Biogas als Brennstoff für Fernwärmenetze produziert. Das aus dem biogenen Abfall hergestellte Biogas wird somit nicht innerhalb der Fabrik verwertet.

Beim zweiten Konzept wird unterstellt, dass der biogene Abfall innerhalb der Lebensmittelfabrik zu Biogas verarbeitet wird. Dabei wird Abwärme, die in der Majonäse-Fabrik anfällt, zur Beheizung des Faulbehälters verwendet. Zudem wird Dünger einer benachbarten Schweinezucht im Faulbehälter zugemischt. Das in der Lebensmittelfabrik hergestellte Biogas wird wiederum zur Wärmeerzeugung innerhalb der Fabrik verwendet. Die Energiemenge, die zuvor in Form von Biogas für den KFZ-Verkehr und für Fernwärmenetze bereitgestellt worden ist, wird nun durch Benzin und Holz bereitgestellt.

Ergebnis der Analyse ist, dass das zweite Konzept das Treibhausgaspotenzial stärker reduziert als das erste Konzept. Dies ist hauptsächlich in der zusätzlichen Nutzung sonst ungenutzter Abwärme begründet. Durch die Beimischung von Dünger wird zudem die Biogasproduktion insgesamt erhöht.

(Oluleye et al. 2015): A hierarchical approach for evaluating and selecting waste heat utilization opportunities

In dem Beitrag von Oluleye et al. (2015) werden Hierarchie-Kriterien entwickelt, die zur Bewertung von Möglichkeiten zur Nutzung von Abwärme herangezogen werden sollen. Die überbetriebliche Nutzung von Abwärme wird dabei auch berücksichtigt. Im Grunde genommen werden hierfür Kosten und Nutzen eingesparter Treibhausgasemissionen gegenübergestellt.

Zusammenfassung inhaltlicher Ergebnisse im Kontext der Forschungsfrage

Im Hinblick auf die übergeordnete Fragestellung – Potenziale für die überbetriebliche Wärmeintegration zu quantifizieren – lässt sich feststellen, dass in einem der Artikel entsprechende Potenziale quantifiziert werden, die über den Rahmen einzelner Fallstudien hinausgehen. In dem Beitrag von Hammond und Norman (2014) werden Potenziale zur Nutzung von Abwärme für Großbritannien quantifiziert.

Von den anderen vier Artikeln mit dem Merkmal „Möglichkeiten und Potenziale“ befassen sich drei Artikel speziell mit der Nutzung industrieller Abwärme in Fernwärmenetzen und ein Artikel evaluiert Technologien zur Nutzung von Abwärme im Allgemeinen. Weitere Artikel, welche die Thematik der außerbetrieblichen Nutzung von Abwärme aufgreifen, tun dies in Form von Fallstudien für bestehende Fabrikstandorte. Gegebenenfalls wird eine Methode entwickelt oder weiterentwickelt, die es ermöglicht, eine außerbetriebliche Nutzung von Abwärme über bestehende Methoden hinaus zu bewerten.

3.2.5. Ergebnis: Forschungslücke

Die eingangs in Kapitel 1 gestellte Forschungsfrage lautete:

Wie lassen sich Energieeinsparpotenziale durch überbetriebliche Wärmeintegration in Deutschland systematisch ermitteln?

In diesem Zusammenhang wurden folgende Hypothesen mit der strukturierten Literaturrecherche überprüft. Ergebnisse für die Hypothesenprüfung sind unten aufgeführt.

-
- **Hypothese 1:** In der Literatur wurden bisher nur wenige Ansätze zur systematischen Ermittlung von Energieeinsparpotenzialen durch überbetriebliche Wärmeintegration vorgestellt.
 - **Ergebnis der Recherche:** Im Beitrag von McKenna und Norman (2010) werden Abwärmepotenziale für die UK quantifiziert. Im Beitrag von Hammond und Norman (2014) werden diese Potenziale dazu verwendet, Potenziale für Nutzungsoptionen zu quantifizieren. Unter den Nutzungsoptionen befinden sich die innerbetriebliche Wärmeintegration (dort im Englischen: On-Site recovery) sowie die überbetriebliche Wärmeintegration (dort im Englischen: Heat transport). Somit werden lediglich in einem der gefundenen Artikel großflächig Potenziale für die überbetriebliche Wärmeintegration als Teilaspekt quantifiziert (vgl. Hammond und Norman 2014). Dies stützt die Hypothese.
 - **Hypothese 2:** Das Energieeinsparpotenzial durch überbetriebliche Wärmeintegration wurde für Deutschland noch nicht ermittelt.
 - **Ergebnis der Recherche:** Für Deutschland wurde ein Artikel von Brückner et al. (2017) gefunden, in dem Abwärmepotenziale quantifiziert werden. In dem Beitrag werden Potenziale für mögliche Nutzungsoptionen für die Abwärme jedoch nicht quantifiziert. Die Thematik der überbetrieblichen Wärmeintegration wird somit nicht behandelt. Dies stützt die Hypothese.

Die Ergebnisse der Literaturanalyse stützen somit die Hypothesen und somit die eingangs gestellte Forschungsfrage. Die weitere Vorgehensweise wird somit so gewählt, dass die Forschungslücke perspektivisch geschlossen wird.

3.3. Weitere Vorgehensweise

Im weiteren Verlauf der Arbeit werden **drei Modelle** entwickelt, die der systematischen Ermittlung von Energieeinsparpotenzialen durch überbetriebliche Wärmeintegration dienen. Zunächst wird in Kapitel 4 ein Modell entwickelt, mit dem sich das theoretische Potenzial für überbetriebliche Wärmeintegration in Deutschland ermitteln lässt. Im Hinblick auf das Ergebnis der Forschungslücke dient es somit dazu, erstmals das Potenzial für überbetriebliche Wärmeintegration in Deutschland systematisch zu quantifizieren. Zur Ermittlung des Potenzials wird in dem Modell eine in dieser Arbeit entwickelte Top-Down-Methode verwendet. Abschließend wird mit dem Modell eine Ermittlung des theoretischen Potenzials für Deutschland durchgeführt und so die Relevanz des Themas für das Energiesystem aufgezeigt (Kapitel 4). Da sich mit dem Modell in Kapitel 4 jedoch nur das theoretische Potenzial ermitteln lässt, werden in den folgenden Kapiteln zwei weitere Modelle entwickelt, mit denen auch das technische und wirtschaftliche Potenzial sukzessive ermittelt werden kann. Zur Ermittlung des technischen und wirtschaftlichen Potenzials sind grundsätzlich die folgenden zwei Schritte erforderlich.

- Erstens, müssen die für die Energieeffizienzmaßnahme überbetriebliche Wärmeintegration in Frage kommende Nachbarschaften von Produktionsstandorten räumlich abgegrenzt identifiziert werden.
- Zweitens, müssen diese Nachbarschaften im Hinblick auf ihr Potenzial für die überbetriebliche Wärmeintegration technisch und wirtschaftlich bewertet werden.

In Kapitel 5 wird daher zunächst ein techno-ökonomisches Modell entwickelt, mit dem das technische und wirtschaftliche Potenzial für die überbetriebliche Wärmeintegration für beliebige Nachbarschaften von Produktionsstandorten berechnet werden kann. Das Modell wird in Kapitel 5 für eine exemplarische Nachbarschaft angewendet, um es zunächst zu validieren und zudem Sensitivitäten, die sich aus der Modellarchitektur, aber auch aus der Charakteristik der untersuchten Maßnahme (überbetriebliche Wärmeintegration) ergeben, herauszuarbeiten. In einem weiteren Schritt wird in Kapitel 6 ein raumanalytisches Modell entwickelt, mit dem sich Nachbarschaften zwischen Produktionsstandorten lokalisieren lassen, die für die Maßnahme überbetriebliche Wärmeintegration aussichtsreich sind. Das Modell wird für Deutschland angewendet und so die Anzahl aussichtsreicher Nachbarschaften für Deutschland bestimmt. Abschließend wird die Arbeit zusammengefasst und diskutiert.

4. Modell zur Ermittlung des theoretischen Potenzials (Top-Down)

Im folgenden Kapitel wird ein Modell zur Schätzung des theoretischen Energieeinsparpotenzials durch überbetriebliche Wärmeintegration für Deutschland entwickelt. Hierfür wird eine Top-Down-Methode entwickelt, die auf eine Datenbasis mit einer bestimmten Struktur angewendet werden kann. Schließlich wird das theoretische Einsparpotenzial durch Anwendung des Modells geschätzt. Dies erlaubt es, die Relevanz dieser Energieeffizienzmaßnahme in den Kontext des Energieverbrauchs des verarbeitenden Gewerbes zu stellen. Im Folgenden wird zunächst die Datenbasis vorgestellt (vgl. 4.1). Darauf aufbauend wird die Methode erläutert (vgl. 4.2) und abschließend werden Ergebnisse präsentiert (vgl. 4.3).

4.1. Datenbasis

Ausgangslage der Methode ist die „Datenbasis zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen in der Zeitreihe 2005 - 2014“ (Rohde et al. 2017). In der Studie wird unter anderem der Prozesswärmebedarf der deutschen Industrie für definierte Temperaturbereiche differenziert nach Wirtschaftszweigen abgeschätzt. Zur Kategorisierung des verarbeitenden Gewerbes werden 14 Wirtschaftszweige verwendet, die grundsätzlich der Systematik der Wirtschaftszweige in der Europäischen Gemeinschaft (NACE) zuordenbar sind. Prinzipiell stellt die Studie eine konsistente und detaillierte Datenbasis für den Endenergieverbrauch in Deutschland nach Anwendungsgebieten und Sektoren (Industrie, Verkehr, GHD, Haushalte) zur Verfügung.

In der Studie von Rohde et al. (2017) wird der Endenergiebedarf der deutschen Industrie für Prozesswärme auf Basis der Energiebilanzen der AG Energiebilanz abgeleitet (AG Energiebilanzen e.V.). In der Studie wird der Endenergiebedarf der deutschen Industrie differenziert nach Energieträgern und Wirtschaftszweigklassen ausgewiesen. Darauf aufbauend wird der Prozesswärmebedarf je Wirtschaftszweig auf Basis der folgenden Schritte ermittelt (vereinfacht).

- Im ersten Schritt wird der Endenergiebedarf für Brennstoffe berechnet, indem der Endenergiebedarf für Strom vom gesamten Endenergiebedarf abgezogen wird. Diese Berechnung basiert komplett auf den Energiebilanzen der AG Energiebilanz.
- Im zweiten Schritt wird der Endenergiebedarf für Brennstoffe, der zur Bereitstellung mechanischer Energie aufgewendet wird, geschätzt. Dies wird durch Anwendung relativer Kennwerte aus der Literatur durchgeführt. Der Anteil ist relativ klein, da sich dies hauptsächlich auf Anwendungen, die durch Verbrennungskraftmaschinen angetrieben werden, beschränkt. Beispiele sind besonders große Pumpen oder Verdichter, die durch Dampfturbinen betrieben werden. Dieser Wert wird vom Endenergiebedarf für Brennstoffe abgezogen.
- Im dritten Schritt wird der endenergetische Anteil für die Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser vom Ergebnis aus dem zweiten Schritt abgezogen. Dieser Anteil wird durch Kombination von Kennwerten aus der Literatur mit Arbeitsmarktdaten ermittelt. Hierfür werden im ersten Schritt Flächen für Büro- und Produktionshallen geschätzt. Dies wird durchgeführt, indem die Anzahl der Beschäftigten im jeweiligen Wirtschaftszweig mit spezifischen Kennwerten zum Flächenbedarf je Beschäftigten multipliziert wird. Die hierfür verwendeten Kennwerte stammen aus der Literatur, wobei es sich diesbezüglich um eine Erhebung für den GHD-Bereich handelt (Schlomann et al. 2014). Die nun verfügbaren Flächen werden abschließend mit flächenspezifischen Durchschnittswerten für den Endenergiebedarf zur Bereitstellung von

Raumwärme und Warmwasser in Deutschland multipliziert. Dies wird wiederum mit dem relativen Anteil der Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser durch Brennstoffe multipliziert, wobei es sich dabei um einen Kennwert auf Basis von Mittelwerten für Deutschland handelt. Dies resultiert somit im Endenergiebedarf für Brennstoffe zur Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser. Dieser Wert wird schließlich vom Ergebnis aus dem zweiten Schritt abgezogen. Das Resultat ist der geschätzte Endenergiebedarf für Brennstoffe zur Bereitstellung von Prozesswärme.

- Im vierten Schritt wird der Endenergiebedarf für Prozesswärme insgesamt gebildet. Hierfür wird zunächst der Endenergiebedarf für Strom zur Bereitstellung von Prozesswärme geschätzt. Ein Beispiel hierfür ist die Aluminiumelektrolyse. Die Schätzung wird durchgeführt, indem der spezifische Stromverbrauch zur Herstellung der relevanten Produkte (bspw. Aluminium, Primärkupfer usw.) mit der jeweils im Jahr hergestellten Menge multipliziert wird. Der Endenergiebedarf für Prozesswärme insgesamt ergibt sich dann durch Addition des Wertes aus Schritt drei mit dem Endenergiebedarf für Strom zur Bereitstellung von Prozesswärme.
- Im fünften Schritt wird der Endenergiebedarf für Prozesswärme auf unterschiedliche Temperaturbereiche aufgeteilt. Die zentrale Quelle hierfür sind relative Kennwerte aus dem Beitrag von Hofer (1994). In dem Beitrag werden Prozesstemperaturen der deutschen Industrie ausgewertet, um Potenziale für die industrielle Kraft-Wärme-Kopplung zu ermitteln.

Eine Übersicht der zuvor erläuterten Vorgehensweise ist in Abbildung 3 dargestellt.

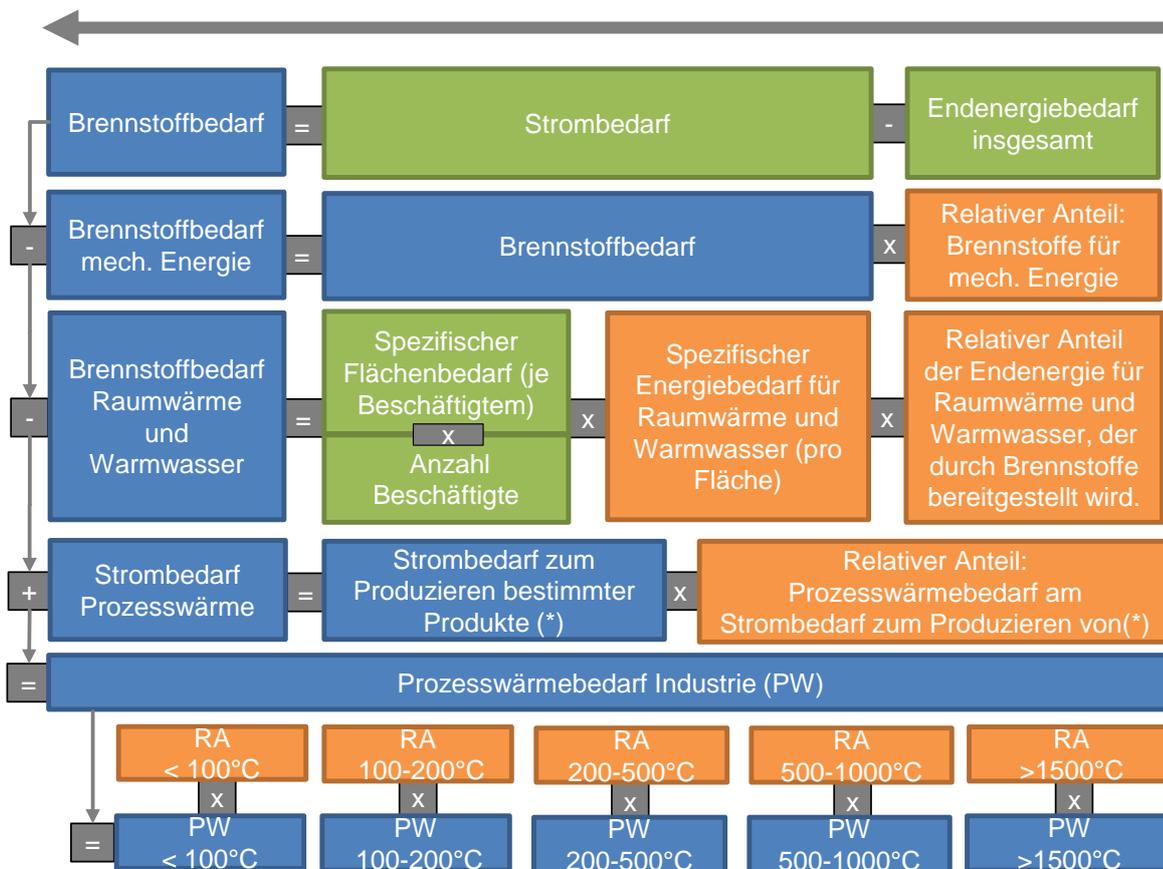


Abbildung 3: Konzept der Schätzung von Prozesswärmebedarfen in Rohde et al. (2017)

Blau: berechnete Werte; Grün: Werte aus Statistiken; Orange: Kennwerte aus der Literatur; „-“ kennzeichnet eine Subtraktion, „x“ eine Multiplikation.

4.2. Methode

Die Methode zur Top-Down-Schätzung des Energieeinsparpotenzials durch überbetriebliche Wärmeintegration besteht grundlegend aus drei Schritten.

- Im ersten Schritt werden auf Basis der Datenbasis potenziell wärmeabgebende Wirtschaftszweige definiert (vgl. Kapitel 4.2.1).
- Im zweiten Schritt wird das theoretische Abwärmepotenzial differenziert nach Wirtschaftszweigen und Temperaturbereichen geschätzt (vgl. 4.2.2).
- Im dritten Schritt wird das zuvor geschätzte theoretische Abwärmepotenzial kaskadenartig verrechnet, um das theoretische Potenzial für die überbetriebliche Wärmeintegration in Deutschland zu bestimmen. Die Art der Verrechnung wird in Kapitel 4.2.3 erläutert.

Sämtliche Schritte werden somit auf der Ebene von Wirtschaftszweigen durchgeführt und nicht auf der Ebene von Einzelunternehmen. Es wird für die theoretische Betrachtung somit angenommen, dass die Verteilung des Wärmebedarfs über die Temperaturbereiche wie in der zugrunde liegenden Datenbasis ist. Dies stellt eine vereinfachende Abstraktion dar. In Abbildung 4 ist die Vorgehensweise schematisch dargestellt.

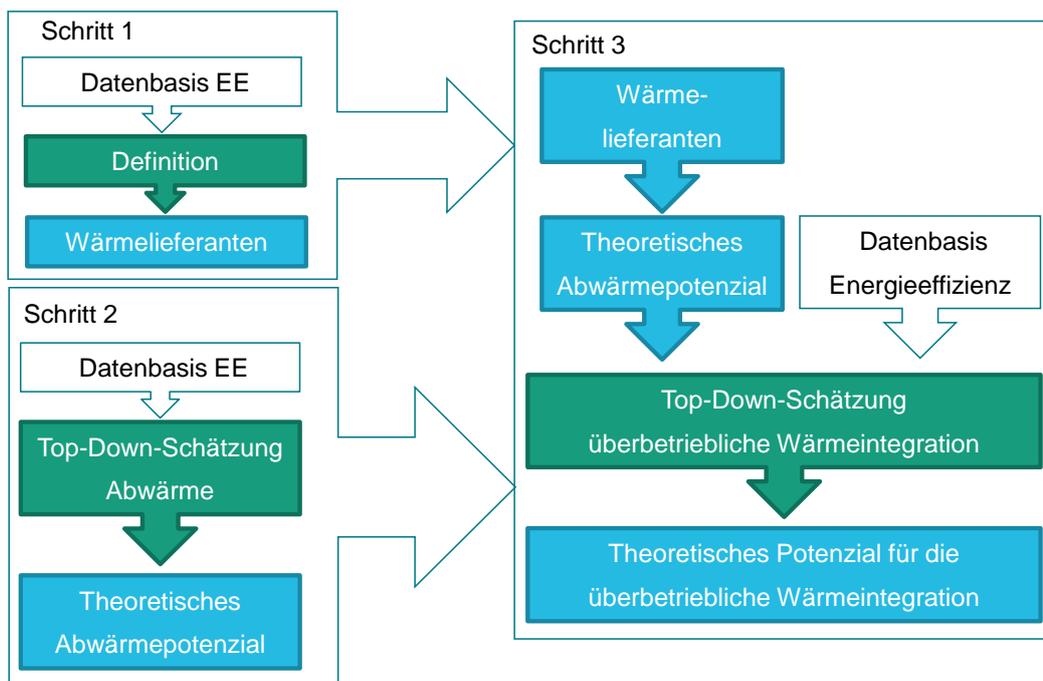


Abbildung 4: Struktur der theoretischen Potenzialschätzung

4.2.1. Potenziell wärmeabgebende Wirtschaftszweige

Zur Definition potenziell wärmeabgebender Wirtschaftszweige wird der Endenergiebedarf für Prozesswärme je Temperaturbereich auf den gesamten Endenergiebedarf für Prozesswärme des jeweiligen Wirtschaftszweigs für das Jahr 2014 bezogen. Daraus ergeben sich relative Anteile für den Prozesswärmebedarf je Temperaturbereich, was im Folgenden auch mit Wärmebedarfsprofil bezeichnet wird. Darauf aufbauend werden potenzielle wärmeabgebende Wirtschaftszweige definiert. Für die überbetriebliche Wärmeintegration werden diesbezüglich Wirtschaftszweige mit hohen Anteilen im

Temperaturbereich über 500 °C als plausibel angesehen, da in diesen Wirtschaftszweigen von Ofenprozessen ausgegangen werden kann. Die anfallenden Abwärmeströme sind somit geführt und mit dem Stand der Technik auch überbetrieblich mit verhältnismäßig niedrigem Aufwand nutzbar (vgl. Praxisbeispiel Umweltbundesamt 2011). Nicht geführte Abwärmeströme sind prinzipiell ebenfalls überbetrieblich nutzbar, jedoch werden diese Ströme aufgrund des hohen technischen Aufwands zur Bündelung der Wärme zumindest für die überbetriebliche Wärmeintegration als nicht plausibel angesehen. Als Kriterium für einen potenziell wärmeabgebenden Wirtschaftszweig wird zunächst festgelegt, dass mindestens 30 % des Wärmebedarfs auf Temperaturniveaus größer oder gleich 500 °C zurückzuführen sind. Die entsprechend potenziell wärmeabgebenden Wirtschaftszweige sind demnach in Tabelle 11 aufgelistet.

Tabelle 11: Aufteilung der Wirtschaftszweige für die Schätzung.

Wirtschaftszweig	Nr. NACE-2008	Wärmebedarf [%]		Quelle [J/N]
		< 500 °C	> 500 °C	
Gew. v. Steinen u. Erden	8	100,0	0,0	N.b.
Ernährung und Tabak	10, 11, 12	96,5	3,5	N
Papiergewerbe	17	98,5	1,5	N
Grundstoffchemie	20.1	29,2	70,8	J
Sonst. chemische Industrie	20 ohne 20.1	100,0	0,0	N
Gummi- u. Kunststoffwaren	22	100,0	0,0	N
Glas u. Keramik	23.1, 23.2, 23.4, 23.31	28,1	71,9	J
Verarb. v. Steine u. Erden	23 ohne 23.1, 23.2, 23.4, 23.31	13,7	86,3	J
Metallerzeugung	24.1	3,1	96,9	J
NE-Metalle und Gießereien	24.4, 24.5	19,4	80,6	J
Metallbearbeitung	24 ohne 24.1, 24.4, 24.5; 25	71,1	28,9	N
Maschinenbau	28 ohne 28.23	89,8	10,2	N
Fahrzeugbau	29, 30	74,2	25,8	N
Sonst. Verarbeitendes Gewerbe	13, 14, 15, 15, 18, 28.23, 26,27, 31, 32, 33	82,5	17,5	N
J: Ja, N: Nein, N.b.: nicht betrachtet.				

4.2.2. Theoretisches Abwärmepotenzial

Das theoretische Abwärmepotenzial wird auf Grundlage des Wärmebedarfs aus der Datenbasis für die folgenden zwei Temperaturbereiche geschätzt; >500 °C und 100 – 500 °C. Diese Unterteilung wurde gewählt, da der Wärmebedarf zwischen 100 °C und 500 °C zu großen Teilen auf Dampfsysteme zurückzuführen ist, die wiederum in den meisten Wirtschaftszweigen gängig sind. Die Abschätzung der Abwärme für den Temperaturbereich zwischen 100 °C und 500 °C erfolgt somit nicht differenziert nach Wirtschaftszweigen, sondern einheitlich unter der Annahme, dass Dampfsysteme diesen Temperaturbereich dominieren (vgl. **Abschnitt Abwärmeanteile unter 500 °C**). Die Abschätzung der Abwärme aus dem Temperaturbereich >500 °C wird jedoch differenziert nach Wirtschaftszweigen durchgeführt, da diese stärker von Prozesscharakteristiken abhängt, und wird somit gesondert betrachtet. Zur Schätzung der Abwärmemenge werden relative Abwärmefaktoren (RA) angenommen,

die den Anteil der Abwärmemenge bezogen auf den Wärmebedarf im jeweiligen Temperaturbereich darstellen (vgl. Gleichung 4.1).

$$RA_{\text{Industrie } i, \text{Temperaturbereich } A} = \frac{\text{Abwärme}_{\text{aus Temperaturbereich } A, \text{Industrie } i}}{\text{Endenergiebedarf}_{\text{Temperaturbereich } A, \text{Industrie } i}} \quad (4.1)$$

In der obigen Gleichung ist somit $\text{Endenergiebedarf}_{\text{Temperaturbereich } A, \text{Industrie } i}$ gegeben, der Faktor $RA_{\text{Industrie } i, \text{Temperaturbereich } A}$ wird angenommen und darauf aufbauend wird $\text{Abwärme}_{\text{aus Temperaturbereich } A, \text{Industrie } i}$ ermittelt bzw. geschätzt. Der Gedanke hinter dieser Vorgehensweise besteht darin, dass der Endenergiebedarf in energieintensiven Wirtschaftszweigen für bestimmte Temperaturbereiche auf bestimmte Prozesse zurückgeführt werden kann. So ist bspw. der Endenergiebedarf über 500 °C im Industriesektor „Glasherstellung“ auf den eigentlichen Schmelzprozess in der Glasschmelzwanne zurückzuführen. Für Glasschmelzwannen liegen wiederum Technologieberichte vor, die den Anteil an Abwärme bezogen auf den Energieeinsatz der Wanne darstellen.

Die getroffenen Annahmen für die relativen Abwärmeanteile je Wirtschaftszweig und Temperaturbereich werden im Folgenden zunächst für den Temperaturbereich über 500 °C begründet. Danach folgt eine Begründung für den Temperaturbereich unter 500 °C.

Abwärmeanteile über 500 °C

Die Annahmen für die Abwärmeanteile über 500 °C werden im Folgenden differenziert nach Wirtschaftszweig begründet.

Glas und Keramik: Der Wirtschaftszweig Glas und Keramik umfasst die Herstellung von Glas und Keramik. Bei der Glasherstellung trägt der Anteil geführter Abwärme im Abgaskanal von Glasschmelzwannen bezogen auf den Brennstoffverbrauch etwa 30 % (Johnson et al. 2008a). Ein Teil dieser Wärme wird entsprechend des aktuellen Anlagenbestands in Deutschland jedoch genutzt (insbesondere für die regenerative Luftvorerwärmung, vgl. Gitzhofer 2007). In Deutschland ist der Energieverbrauch in der Glasherstellung zu etwa 80 % auf die Herstellung von Behälter- und Flachglas zurückzuführen. Dabei sind in der Behälterglasherstellung U-Flammenwannen mit regenerativer Luftvorwärmung gängig (über 70 % bezogen auf die Produktionskapazität) und bei der Flachglasherstellung Querbrennerwannen mit regenerativer Luftvorwärmung (über 90 % bezogen auf die Produktionskapazität). Für diese Schmelzwannen ist eher von einem Abwärmeanteil von etwa 10 % bis 20 % auszugehen. Das Brennen von Keramik findet bei höheren Temperaturen statt und daher wird von ähnlichen Werten ausgegangen. Brueckner et al. (2017) geben insgesamt für den NACE-Sektor „Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden“ nach NACE-Klassifikation (Nr. NACE-2008: 23) einen relativen Abwärmeanteil von 15 % an. Daher wird für den gesamten Wirtschaftszweig der relative Abwärmefaktor für Prozesswärme über 500 °C auf 15 % festgelegt.

Metallerzeugung: Die Branche Metallerzeugung bezieht sich durch die Zuordnung des NACE-Sektors 24.1 (Erzeugung von Roheisen, Stahl und Ferrolegierungen) in erster Linie auf die Stahlherstellung. In Deutschland wird Stahl über zwei Routen hergestellt. Bei der ersten Route handelt es sich um die

primäre Stahlerzeugung via Hochofenroute. Bei dieser Route wird zuerst Roheisen aus Eisenerz und Koks in einem Hochofen hergestellt. Im weiteren Prozessverlauf wird aus diesem Roheisen Stahl hergestellt. Hierfür ist in Deutschland das Sauerstoffblasverfahren (Linz-Donawitz-Verfahren) am weitesten verbreitet (Ghenda 2010). Bei diesem Verfahren ist der Konverter ein zentrales Element, indem aus Roheisen durch Zugabe von Sauerstoff und weiteren Stoffen Stahl hergestellt wird. Bei der zweiten Route handelt es sich um die sekundäre Stahlerzeugung. Dabei wird Stahl mehrheitlich durch Einschmelzen von Stahlschrotten in einem elektrisch betriebenen Lichtbogenofen hergestellt.

Bei der primären Route entsteht Abwärme bei diversen Prozessschritten. Beim Erzeugen von Roheisen im Hochofen entsteht sogenanntes Gichtgas. Dieses Gas ist etwa 200 °C heiß, brennbar und wird am oberen Schachtende des Hochofens abgezogen. Des Weiteren tritt geführte Abwärme im Abgas der Winderhitzer des Hochofens aus. Zudem tritt Abwärme in Form von Abgas in der Sinteranlage aus. Bei der Herstellung von Koks in Kokereien entsteht in Koksöfen sogenanntes Kokereigas. Dieses Gas wird aus dem Ofen abgesaugt, ist zwischen 650 °C und 1000 °C heiß und ist ebenfalls brennbar. Zudem entsteht bei der Stahlherstellung (Sauerstoffblasverfahren) im Konverter sogenanntes Konvertergas (auch brennbar). Die bei der primären Stahlherstellung entstehenden Gase werden Kuppelgase genannt und werden in der Regel schon innerbetrieblich verwendet. Beispielsweise werden sie zur Heißwinderzeugung und somit zur Reduktion des Brennstoffverbrauchs verwendet. Zudem werden die Gase zur Medienerzeugung in der Weiterverarbeitung verwendet, bspw. zur Produktion von Prozessdampf und zur Erzeugung von Elektrizität. Bei der sekundären Route tritt Abwärme in erster Linie in Form von Abgas aus dem Elektrolichtbogenofen aus, welches wiederum ggf. zur Schrottvorwärmung verwendet wird.

Im Wirtschaftszweig Metallerzeugung entstehen bei der Produktion des Gutes somit Energieträger (Kuppelgase), die zu großen Teilen intern verwertet werden. Das Ermitteln eines relativen Abwärmefaktors auf Basis der eingesetzten Energieträger erfordert somit eine detaillierte Aufstellung von Energiebilanzen für die Stahlwerke in Deutschland. Für eine Top-Down Abschätzung erscheint dieser Aufwand nicht gerechtfertigt, da die Wirtschaftszweige ohnehin vereinfacht abstrahiert werden. Daher wird im weiteren Verlauf ein relativer Faktor auf Basis von Literaturwerten verwertet. In Brueckner et al. (2017) wird für den NACE-Sektor „Metallerzeugung und Bearbeitung“ (NACE-Sektor 24) insgesamt ein relativer Abwärmefaktor von etwa 20 % angegeben. Für den Wirtschaftszweig Metallerzeugung wird der relative Abwärmefaktor für Prozesswärme über 500 °C daher auf 20 % festgelegt.

Grundstoffchemie: Im Wirtschaftszweig Grundstoffchemie werden Grundchemikalien hergestellt. Ein kennzeichnendes Merkmal von Grundchemikalien ist, dass diese vergleichsweise zu anderen Chemikalien besonders vielseitig einsetzbar sind und in großen Mengen produziert werden (EnArgus). Der Wärmebedarf in der Grundstoffchemie ist häufig auf thermische Stofftrennverfahren zurückzuführen. Beispiele hierfür sind die Destillation, die Rektifikation, die Ab- oder Adsorption und die Extraktion. In der Grundstoffchemie wird der Wärmebedarf schon seit den 1980er Jahren intensiv durch Wärmeintegration reduziert. Auch bei der Grundstoffchemie ist bedingt durch die hohe Komplexität und Größe der Standorte eine detaillierte Aufstellung von Energiebilanzen zur Abschätzung der anfallenden Abwärme notwendig. Daher wird wie schon beim Wirtschaftszweig Metallerzeugung auf Literaturwerte zurückgegriffen.

NEELIS et al. (2007) erstellten Energie- und CO₂-Bilanzen für 68 petrochemische Prozesse für die Niederlande, Westeuropa und weltweit. Hierfür erstellen sie ein Energie- und Stoffstrommodell, das wiederum anhand öffentlicher Statistiken validiert wird. In dem Beitrag werden unter anderem auch Energieumwandlungsverluste angegeben. Dabei betragen die Endenergieverluste für Wärme bezogen auf den gesamten Endenergieeinsatz für Westeuropa etwa 9 %. In Pehnt et al. (2010) wird der Anteil an Abwärme über 140 °C bezogen am Gesamtenergiebedarf der befragten Unternehmen für den Sektor Chemie mit 8 % beziffert. In Brueckner et al. (2017) wird für den NACE-Sektor „Herstellung von chemischen Erzeugnissen“ (NACE-Sektor 20) ein relativer Abwärmefaktor von etwa 9 % angegeben. Für den Wirtschaftszweig Grundstoffchemie wird der relative Abwärmefaktor für Prozesswärme über 500 °C daher auf rund 10 % festgelegt.

Verarbeitung von Steinen und Erden: Im Wirtschaftszweig Verarbeitung von Steinen und Erden ist die Herstellung diverser Produkte erfasst (Zement, Gips usw.). Mengenmäßig ist dabei die Zementherstellung dominierend. Bei der Zementherstellung ist die anfallende Abwärme in erster Linie auf die Klinkerherstellung im Drehrohrofen zurückzuführen. Die aus dem Drehrohrofen austretenden heißen Abgase werden in der Regel bereits für Vorwärmestufen eingesetzt. Der Anteil der Abwärme hängt schließlich im Einzelfall von der Verfahrensart (Trockenverfahren, Nassverfahren) und der Anzahl der Vorwärmestufen ab. Die Größenordnung für die unterschiedlichen Verfahren liegt zwischen 20 % und 25 % bezogen auf den Energieeinsatz (vgl. Johnson et al. 2008a). Brueckner et al. (2017) geben insgesamt für den NACE-Sektor „Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden“ nach NACE-Klassifikation (Nr. NACE-2008: 23) einen relativen Abwärmeanteil von 15 % an. Da dies für den niedrigeren Wert spricht, wird für den Wirtschaftszweig Verarbeitung von Steinen und Erden der relative Abwärmefaktor für Prozesswärme über 500 °C daher auf 20 % festgelegt.

Übrige Wirtschaftszweige:

- Ernährung und Tabak: Der relative Anteil am Endenergiebedarf für Wärme über 500 °C beträgt lediglich 4 %. Für den relativen Abwärmefaktor für Wärme im Temperaturbereich über 500 °C wird der sektoral äquivalente Wert aus Brueckner et al.(2017) angenommen. Im Hinblick auf die geringe Menge am Gesamtverbrauch wird die Nichtübereinstimmung der Temperaturbereiche toleriert.
- Papiergewerbe: Der relative Anteil am Endenergiebedarf für Wärme über 500 °C beträgt lediglich 2 %. Für den relativen Abwärmefaktor für Wärme im Temperaturbereich über 500 °C wird der Wert für die Papierindustrie insgesamt aus Brueckner et al.(2017) verwendet.
- Metallbearbeitung, Maschinenbau und Fahrzeugbau: Der anteilige Wärmebedarf in diesen drei Wirtschaftszweigen für den Temperaturbereich über 500 °C liegt zwischen 10 % und 30 %. In diesen drei Sektoren erscheint es plausibel anzunehmen, dass Wärmebedarfe über 500 °C in erster Linie auf metallschmelzende Prozesse zurückzuführen sind. Daher wird für den relativen Abwärmefaktor für diese drei Wirtschaftszweige die gleiche Annahme wie beim Wirtschaftszweig NE-Metalle und Gießereien verwendet.
- Sonstiges Verarbeitendes Gewerbe: Für diesen Wirtschaftszweig liegt der relative Anteil am Endenergiebedarf für Wärme über 500 °C bei 17 %. Für den relativen Abwärmefaktor für Wärme über 500 °C wird angenommen, dass sich das sonstige verarbeitende Gewerbe im Mittel so verhält, wie die anderen Wirtschaftszweige. Für den relativen Abwärmefaktor für Prozesswärme über 500 °C wird somit der Mittelwert der Werte aus den anderen Wirtschaftszweigen angenommen (rund 20 %).

Die Annahmen für den Anteil der Abwärme am Endenergieverbrauch für Prozesswärme über 500 °C differenziert nach Wirtschaftszweig sind in Tabelle 12 zusammengefasst aufgelistet.

Tabelle 12: Abwärmeanteile der Wirtschaftszweige für die Schätzung.

Wirtschaftszweig	Anteil Abwärme am Wärmebedarf >500 °C [%]	Kommentar
Gew. v. Steinen u. Erden	Bedarf > 500 °C nicht vorhanden (laut Datenbasis).	
Verarb. v. Steine u. Erden	20	Abgeleitet aus Brueckner et al. (2017).
Ernährung und Tabak	10	Abgeleitet aus Brueckner et al. (2017).
Papiergewerbe		
Grundstoffchemie	10	Abgeleitet aus NEELIS et al. (2007).
Sonst. chemische Industrie	Bedarf > 500 °C nicht vorhanden (laut Datenbasis).	
Gummi- u. Kunststoffwaren	Bedarf > 500 °C nicht vorhanden (laut Datenbasis).	
Glas u. Keramik	15	Eigene Annahme.
Metallerzeugung	20	Abgeleitet aus Brueckner et al. (2017).
NE-Metalle und Gießereien	30	Eigene Annahme.
Metallbearbeitung		
Maschinenbau		
Fahrzeugbau		
Sonst. Verarbeitendes Gew.	20	Eigene Annahme.

Abwärmeanteile unter 500 °C

In der Studie von Rohde et al. (2017) wird der Wärmebedarf für Temperaturen kleiner als 500 °C in drei Temperaturbereiche eingeteilt (<100 °C, 100 - 200 °C, 200 - 500 °C). Im weiteren Verlauf wird für die Schätzung angenommen, dass die theoretisch nutzbare Abwärme mehrheitlich aus dem Temperaturbereich zwischen 100 °C und 500 °C anfällt. Dahingegen wird die potenziell aus dem Prozesstemperaturbereich unter 100° anfallende Abwärme für die Schätzung vernachlässigt. Des Weiteren wird für den Wärmebedarf im Temperaturbereich zwischen 100 °C und 500 °C angenommen, dass der Bedarf für alle Wirtschaftszweige hauptsächlich auf Dampfsysteme zurückzuführen ist. In Fleiter et al. (2016) werden Kennwerte des Bestands für Technologien zur Wärme- und Kälteversorgung in Europa nach Ländern differenziert angegeben. Für industrielle Dampferzeuger in Deutschland wird basierend auf einer Ecodesign-Vorbereitungsstudie für die Europäische Kommission von einem Wirkungsgrad von etwa 90 % ausgegangen (vgl. Paolo Gentili et al. 2014, Aydemir et al. 2015). Für die Effizienz im Dampfverteilsystem wird etwa 86 % angegeben, so dass insgesamt eine Systemeffizienz von etwa 78 % resultiert. Beim Dampfverteilsystem kann jedoch nicht davon ausgegangen werden, dass die Abwärme geführt ist und zudem würde hier in jedem Fall die Vermeidung anfallender Abwärme durch verstärkte Isolierung vorgezogen werden. Beim Dampferzeuger ist die Abwärme jedoch im Abgaskanal geführt. Deshalb wird der relative Abwärmefaktor für den Temperaturbereich zwischen 100 °C und 500 °C mit 10 % angenommen.

Zur Wahl der Annahmen für die Abwärmepotenzialschätzung

Für die Vorgehensweise bezüglich der Schätzung des Abwärmepotenzials ist Folgendes hervorzuheben: Für die Schätzung werden Annahmen verwendet, die entweder auf Basis technologischer Sachverhalte abgeleitet oder Literaturquellen entnommen sind. Diese Annahmen berücksichtigen jedoch keine Aspekte der technischen Nutzbarkeit und es werden somit theoretische und keine technischen Abwärmepotenziale ermittelt. Dabei ist zu betonen, dass die Wahl der Annahmen zur Schätzung des theoretischen Abwärmepotenzials bei allen Wirtschaftszweigen auf der Betrachtung heißer Abgas- und / oder Rauchgasströme fußt. Infolgedessen werden Abwärmeströme anderer Quellen (diffuse Abwärme, Abwasser usw.) nicht berücksichtigt. Zur Berücksichtigung dieser Ströme sind weitere Arbeiten notwendig.

4.2.3. Kaskadenartige Verrechnung

Die im Folgenden vorgestellte kaskadenartige Verrechnung dient zur Berechnung des theoretischen Potenzials für die überbetriebliche Wärmeintegration in Deutschland und liefert somit eine theoretische Größenordnung des Energieeinsparpotenzials durch diese Energieeffizienzmaßnahme für die deutsche Industrie. Für die kaskadenartige Verrechnung wird zunächst davon ausgegangen, dass in der Praxis die innerbetriebliche Wärmeintegration der überbetrieblichen Wärmeintegration vorgezogen wird. Dies ist durch folgende Argumente gestützt:

- Die überbetriebliche Wärmeintegration schafft Abhängigkeiten zwischen Unternehmen, was wiederum ein grundsätzliches Hemmnis für diese Energieeffizienzmaßnahme darstellt, verglichen zur innerbetrieblichen Wärmeintegration (Hiete et al. 2012).
- Aufgrund der zu überbrückenden Entfernungen zwischen Betriebsstandorten kann davon ausgegangen werden, dass Aufwände der überbetrieblichen Wärmeintegration in der Regel höher sind als bei der innerbetrieblichen Wärmeintegration. Somit wäre die innerbetriebliche Wärmeintegration tendenziell wirtschaftlicher.
- Es kann nicht davon ausgegangen werden, dass Unternehmen bis dato ihre innerbetrieblichen Abwärmepotenziale voll ausschöpfen. Eine Befragung, die vom Autor dieser Arbeit im Jahr 2017 im Rahmen eines Forschungsprojekts durchgeführt worden ist, bekräftigt diese These. Die Befragung ist in Tabelle 14 kurz zusammengefasst.

Zur Ermittlung des Potenzials für überbetriebliche Wärmeintegration sollte also auch das Potenzial für innerbetriebliche Wärmeintegration bestimmt werden, denn schließlich reduziert diese vorzuziehende Energieeffizienzmaßnahme das für die Wärmeintegration notwendige Abwärmereservoir. In der Schätzung wird dem Rechnung getragen, indem Abwärmemengen prioritär innerhalb eines Wirtschaftszweigs verschoben werden. Dies wird umgesetzt, indem die geschätzten Abwärmemengen mit Wärmebedarfen aus niedrigeren Temperaturbereichen verrechnet werden, so dass der Bedarf der niedrigeren Temperaturbereiche entsprechend sinkt. Dies soll eine kaskadenartig und somit optimierte Prozessführung innerhalb der Branchen reflektieren.

Konkret werden die Abwärmemenge aus dem Wärmebedarf des Temperaturbereichs über 500 °C mit dem Bedarf aus dem Temperaturbereich 100 - 500 °C verrechnet und die Abwärmemenge aus dem Wärmebedarf des Temperaturbereichs 100 - 500 °C mit dem Wärmebedarf unter 100 °C. Die Systematik der Berechnung ist in Tabelle 13 dargestellt.

In die Berechnungssystematik fließen keinerlei technische oder wirtschaftliche Kriterien für die Nutzung ein und somit handelt es sich bei sämtlichen Energieeinsparpotenzialen, die auf Basis der Systematik abgeleitet werden, um theoretische Potenziale.

Zudem wird für die potenzielle Wärmelieferung an andere Wirtschaftszweige prinzipiell nur die residuale Abwärme aus dem Temperaturbereich über 500 °C berücksichtigt. In der Berechnungssystematik wird dies durch die entsprechende Definition von res_AW_{500} deutlich. Dieser Wert ist nur dann größer als null, wenn Abwärme aus dem Temperaturbereich über 500 °C vorhanden ist, nachdem sämtliche Mengen innerhalb eines Wirtschaftszweigs verrechnet worden sind. Bleibt Abwärme aus dem Temperaturbereich 100 - 500 °C nach der Verrechnung übrig, so wird diese nicht für die Lieferung von Wärme an andere Wirtschaftszweige berücksichtigt. Eine visuelle Darstellung der Vorgehensweise ist in Abbildung 6 für den Wirtschaftszweig Grundstoffchemie und in Abbildung 7 für den Wirtschaftszweig Metallerzeugung gegeben.

Tabelle 13: Berechnungssystematik residuale Abwärme (je Wirtschaftszweig)

1	$AS_{500} = RA_{500} \cdot WB_{500}$			
2	$red_WB_{100-500} = WB_{100-500} - AS_{500}$			
3	Wenn			
4	$red_WB_{100-500} > 0:$		$red_WB_{100-500} \leq 0:$	
5	$AS_{100-500} = RA_{100-500} \cdot red_WB_{100-500}$	$red_WB_{<100} = WB_{<100} + red_WB_{100-500}$		
6	$red_WB_{<100} = WB_{<100} - AS_{100-500}$	$red_WB_{100-500} = 0^*$		
7	Wenn		Wenn	
8	$red_WB_{<100} > 0:$	$red_WB_{<100} \leq 0:$	$red_WB_{<100} > 0:$	$red_WB_{<100} \leq 0:$
9	$red_WB_{<100}$ bleibt	$red_WB_{<100} = 0^*$	$red_WB_{<100}$ bleibt	$res_AW_{500} = red_WB_{<100} $
10	$res_AW_{500} = 0$	$res_AW_{500} = 0$	$res_AW_{500} = 0$	$red_WB_{<100} = 0^*$
11	<u>Abkürzungen:</u>			Einheit
	Relativer Abwärmeanteil aus dem Temperaturbereich > 500 °C			%
	Relativer Abwärmeanteil aus dem Temperaturbereich 100 - 500 °C			$RA_{100-500}$
	Abwärme aus dem Temperaturbereich > 500 °C			AS_{500}
	Abwärme aus dem Temperaturbereich 100 - 500 °C			$AS_{100-500}$
	Wärmebedarf Temperaturbereich >500 °C			TWh
	Wärmebedarf Temperaturbereich 100 - 500 °C			$WB_{100-500}$
	Wärmebedarf Temperaturbereich <100 °C			$WB_{<100}$
	reduzierte Bedarfe, bspw. für 100 - 500 °C usw.			$red_{WB_{100-500}}$
*: Wert wird gesetzt.				

Tabelle 14: Durchgeführte Befragung zur Thematik industrielle Abwärme.

Im Rahmen der Befragung wurden im Jahr 2017 20 Fachgespräche in Form von telefonischen Interviews zur Thematik der industriellen Abwärmenutzung durchgeführt. Der Interviewleitfaden wurde den Teilnehmern vorab zugesandt. Bei den Befragten handelte es sich ausschließlich um Energiemanager und / oder technische Betriebsleiter. Die Verteilung der Befragten auf die im Projekt verwendete Wirtschaftszweigklassifikation gibt Tabelle 15.

Tabelle 15: Verteilung der Befragten auf die Wirtschaftszweige

Wirtschaftszweig (im Projekt der Befragung)	Anzahl Befragte
Chemische Industrie	5
Maschinenbau und andere metallverarbeitende Industrien	1
Nahrungsmittelindustrie	1
Nicht-Eisen-Metallindustrie	6
Nichtmetallische Mineralstoffe	5
Papier- und Druckindustrie	0
Sonstiges verarbeitendes Gewerbe	1
Stahlindustrie	1

Aussagen, die sich bei den Befragungen wiederholt haben, wurden in Gruppen zusammengefasst. Tabelle 6 zeigt die Anzahl der Aussagen der Befragten zur Einschätzung, wie viel des innerbetrieblichen Abwärmepotenzials gegenwärtig ausgeschöpft ist. Fast die Hälfte der Befragten (8 x) nutzen Abwärme bereits teilweise aus. Weitere Befragte (2 x) geben an, dass vorhandene Abwärme nahezu vollständig genutzt wird. Ein Viertel der Befragten (5 x) gibt jedoch an, dass Abwärme nicht nennenswert genutzt wird, jedoch Potenzial zur Nutzung vorhanden wäre oder gesehen wird.

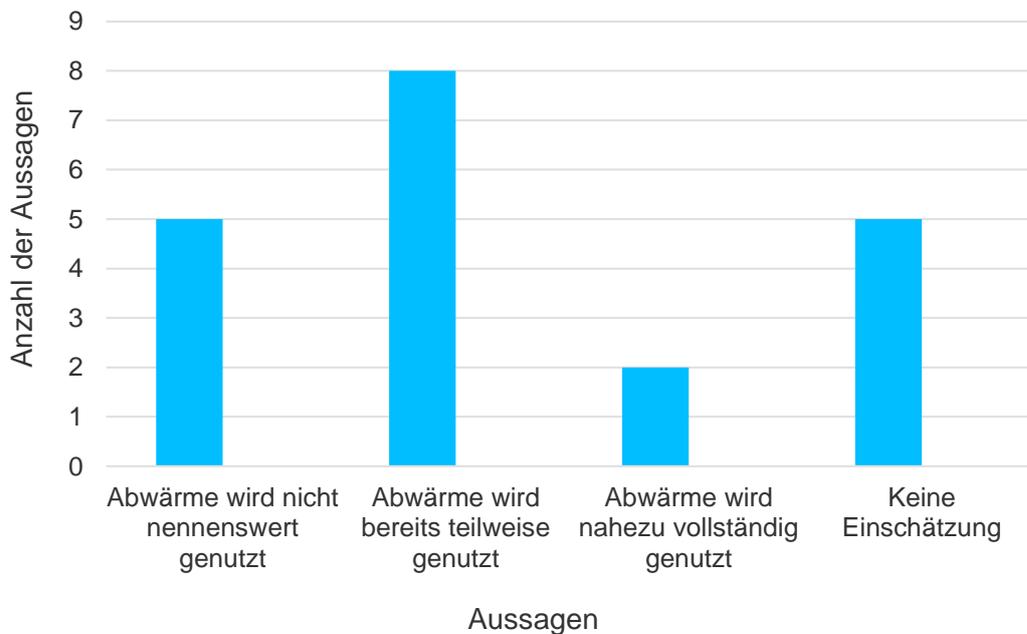


Abbildung 5: Aussagen der Befragten zur Abwärmenutzung in Ihrem Betrieb

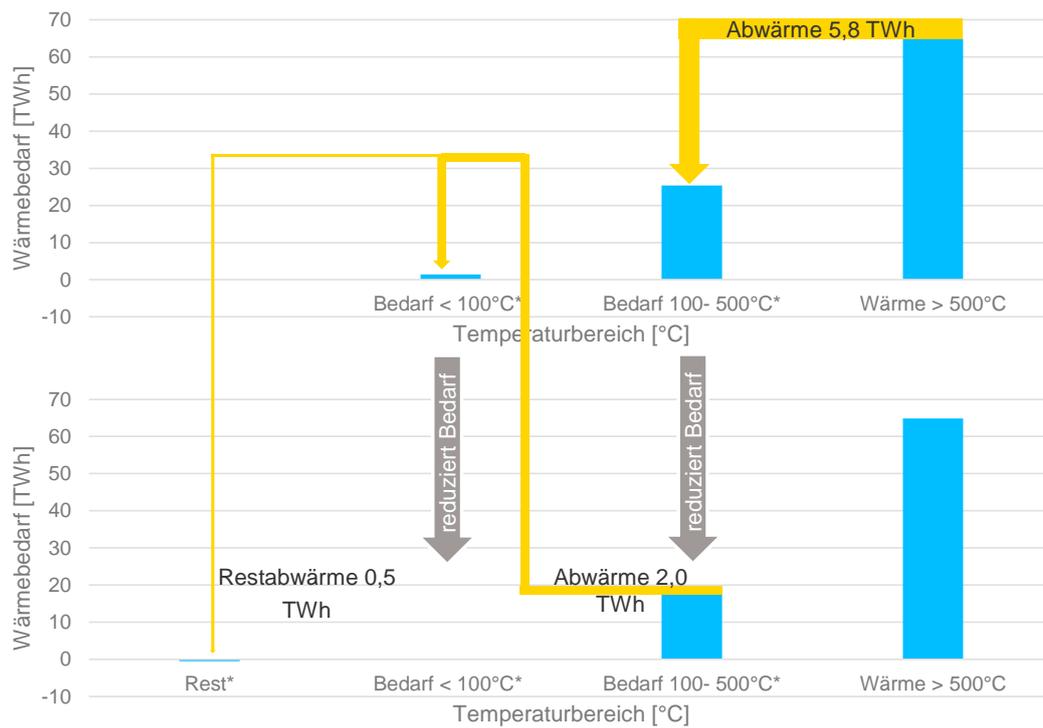


Abbildung 6: Kaskadenartige Rechnung Grundstoffchemie (oben vor, unten nach der Verrechnung)

Anmerkung: Die Restabwärme aus dem Temperaturbereich 100 - 500 °C wird entsprechend der Methodik nicht für die überbetriebliche Wärmeintegration berücksichtigt.

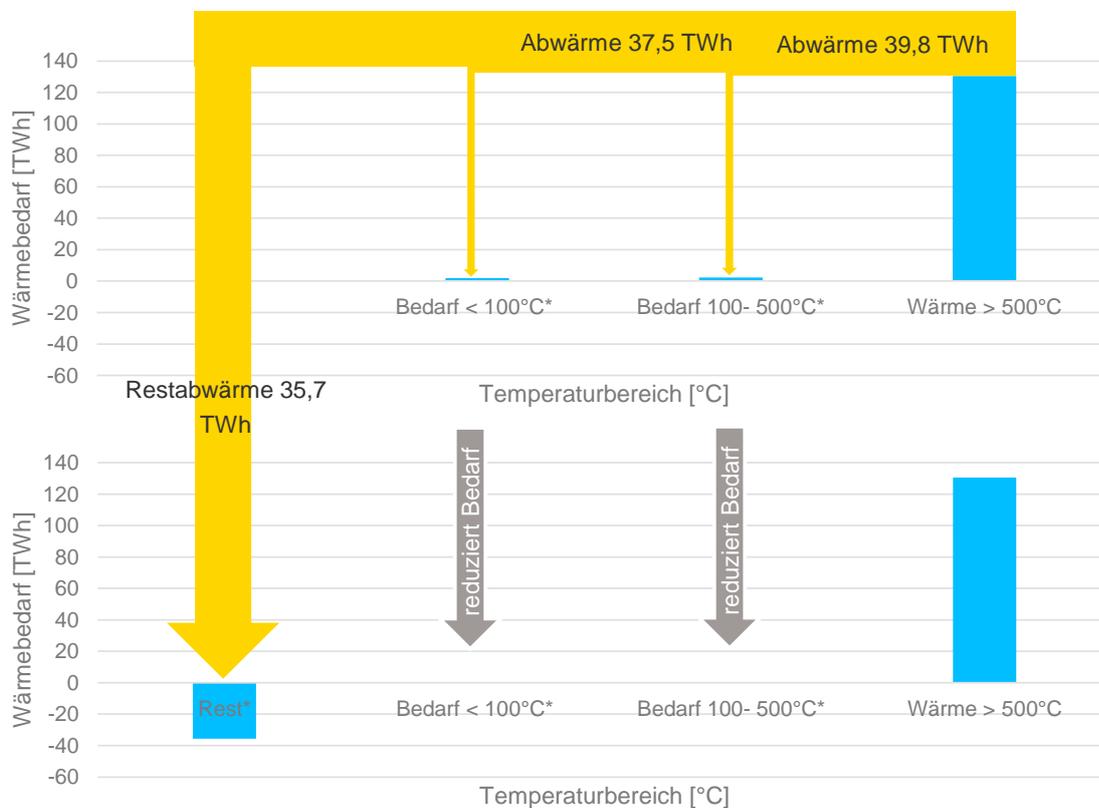


Abbildung 7: Kaskadenartige Rechnung Metallerzeugung (oben vor, unten nach der Verrechnung)

Zusammenfassend stellt die Berechnungssystematik theoretische Energieeinsparpotenziale durch Wärmeintegration somit wie folgt dar.

- Die innerhalb von Wirtschaftszweigen kaskadenartig verrechnete Abwärmemenge stellt das theoretische Energieeinsparpotenzial durch innerbetriebliche Wärmeintegration dar.
- Das theoretische Energieeinsparpotenzial durch überbetriebliche Wärmeintegration wird durch die Summe der resultierenden Abwärmemengen, die über Wirtschaftszweige hinweg verschoben werden kann, bestimmt. In dem Fall, dass der Wärmebedarf der potenziell zu beliefernden Wirtschaftszweige unter 500 °C höher ist als die Summe der resultierenden Abwärmemengen ($\sum res_{AW_{500}}$), entspricht die Summe der resultierenden Abwärmemengen eben dem theoretischen Energieeinsparpotenzial durch überbetriebliche Wärmeintegration.

Entsprechend der Berechnungssystematik aus Tabelle 13 kann davon ausgegangen werden, dass für das Energieeinsparpotenzial durch innerbetriebliche Wärmeintegration eher ein Maximalwert geschätzt wird. Dies ist darin begründet, dass durch die Art der Berechnung angenommen wird, dass sich die Verteilung der Wärmenachfrage in den Unternehmen so verhält wie das zugrundeliegende Wärmebedarfsprofil des dem Unternehmen zugeteilten Wirtschaftszweigs. Infolgedessen liegen für Abwärmequellen aus dem Temperaturbereich über 500 °C in allen Wirtschaftszweigen immer auch Abwärmesenken vor. Im konkreten Fall kann dies in der Praxis jedoch durchaus abweichen, insbesondere bei Wirtschaftszweigen, die als potenzielle Wärmelieferanten festgelegt worden sind. Beispiele wären hier schmelzende Betriebe, bspw. Gießereien, die zwar Rohmaterialien herstellen, diese jedoch nicht im eigenen Betrieb weiterverarbeiten. Hier könnte es durchaus zu der Situation kommen, dass nicht ausreichend Wärmesenken zur Nutzung anfallender Abwärmeströme vorhanden sind, wie das Beispiel vom Umweltbundesamt (2011) zeigt. Ein überschätztes Einsparpotenzial für die innerbetriebliche Wärmeintegration führt in der Berechnungssystematik zudem zu einer Unterschätzung des Einsparpotenzials für die überbetriebliche Wärmeintegration, da letztlich die residualen Abwärmemengen ($\sum res_{AW_{500}}$) der potenziell wärmeabgebenden Wirtschaftszweige sinken. Daher wurde die Berechnung ebenfalls mit einer eingeschränkten kaskadenartigen Verrechnung durchgeführt, um einen Korridor für das Potenzial der Einsparpotenziale durch überbetriebliche Wärmeintegration zu darzustellen.

Bei der eingeschränkten kaskadenartigen Verrechnung wird nicht in jedem Wirtschaftszweig Abwärme aus dem Temperaturbereich >500 °C mit dem Bedarf im Bereich 100 - 500 °C verrechnet. Abwärme aus dem Temperaturbereich zwischen 100 - 500 °C wird jedoch weiterhin mit dem Bedarf aus dem Bereich <100 °C verrechnet. Diese Vorgehensweise soll dem Umstand Rechnung tragen, dass die Zuordnung einer Wirtschaftszweigklasse zu einem Unternehmen am Schwerpunkt der unternehmerischen Tätigkeit ausgerichtet wird. Es kann also in einigen Wirtschaftszweigklassen durchaus dazu kommen, dass Hersteller von Rohmaterialien gemeinsam mit weiterverarbeitenden Unternehmen erfasst sind. Die Einschränkungen oder Nichteinschränkung je Wirtschaftszweig für die wiederholte Berechnung sind in Tabelle 16 aufgelistet und begründet.

Tabelle 16: Annahmen der eingeschränkten kaskadenartigen Verrechnung.

Wirtschaftszweig	Art der kaskadenartigen Verrechnung
Gew. v. Steinen u. Erden	Nicht betrachtet, da Bedarf lediglich $<100\text{ }^{\circ}\text{C}$.
Verarb. v. Steine u. Erden	Es wird angenommen, dass die Abwärme dieses Sektors in der Regel aufgrund fehlender Wärmesenken nicht innerbetrieblich verwertet werden kann. Daher wird die Abwärme aus $T>500\text{ }^{\circ}\text{C}$ nur für die überbetriebliche und nicht für die innerbetriebliche Verrechnung vorgesehen.
Grundstoffchemie	Es wird von eher tiefen Weiterverarbeitungsstufen ausgegangen, so dass die kaskadenartige Verrechnung über alle Temperaturbereiche hinweg gerechtfertigt erscheint. Zudem ist die innerbetriebliche Wärmeintegration in diesem Zweig sehr weit verbreitet.
Glas u. Keramik	Es wird angenommen, dass in diesen Sektoren Hersteller von Rohmaterialien und teilweise auch weiterverarbeitende Unternehmen erfasst sind. Demnach würden Wärmequellen ggf. keine Wärmesenken gegenüberstehen. Daher wird die Abwärme aus $T>500\text{ }^{\circ}\text{C}$ nur für die überbetriebliche und nicht für die innerbetriebliche Verrechnung vorgesehen.
Metallerzeugung	
NE-Metalle und Gießereien	
Ernährung und Tabak	Es wird von eher tiefen Weiterverarbeitungsstufen ausgegangen, so dass die kaskadenartige Verrechnung über alle Temperaturbereiche hinweg gerechtfertigt erscheint.
Papiergewerbe	
Sonst. chemische Industrie	
Gummi- u. Kunststoffwaren	
Metallbearbeitung	
Maschinenbau	
Fahrzeugbau	
Sonst. Verarbeitendes Gewerbe	
Anmerkung: Abwärme aus dem Temperaturbereich $100 - 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ wird weiterhin für alle Wirtschaftszweige mit dem Bedarf $<100\text{ }^{\circ}\text{C}$ verrechnet.	

4.3. Ergebnisse: theoretisches Potenzial

Das gesamte geschätzte theoretische Abwärmepotenzial für die deutsche Industrie ist ein Zwischenergebnis der kaskadenartigen Berechnung und wird daher als erstes präsentiert und im Anschluss mit dem aktuellsten Wert aus der Literatur für Deutschland verglichen. Darauf aufbauend werden Ergebnisse für die geschätzten Energieeinsparpotenziale durch inner- und überbetriebliche Wärmeintegration vorgestellt. Abschließend werden die Schätzwerte qualitativ bewertet.

Abwärmepotenzialschätzung

Mit dem Top-Down Ansatz wird bei der nicht eingeschränkten kaskadenartigen Verrechnung insgesamt ein Abwärmepotenzial von etwa $62,0\text{ TWh}$ geschätzt, wobei $52,2\text{ TWh}$ auf den Wärmebedarf über $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ zurückzuführen sind.

Bei der eingeschränkten kaskadenartigen Verrechnung wird ein etwas höheres Abwärmepotenzial geschätzt, was auf die im Folgenden erläuterte Ursache zurückzuführen ist. Bei der nicht eingeschränkten kaskadenartigen Berechnung wird die Abwärme aus dem Temperaturbereich $>500\text{ °C}$ mit dem Bedarf aus dem Temperaturbereich $100 - 500\text{ °C}$ für alle Wirtschaftszweige verrechnet. Dies führt dazu, dass der Wärmebedarf im Temperaturbereich $100 - 500\text{ °C}$ für einige Wirtschaftszweige verschwindet (Glas u. Keramik, Verarb. v. Steine u. Erden, Metallerzeugung, NE-Metalle, -gießereien). Bei der eingeschränkten kaskadenartigen Verrechnung findet die vorab erwähnte Verrechnung für eben diese Wirtschaftszweige jedoch nicht statt (vgl. Tabelle 16). In diesen Wirtschaftszweigen besteht daher weiterhin ein Bedarf für den Temperaturbereich $100 - 500\text{ °C}$, für den wiederum anfallende Abwärme geschätzt wird. Im Ergebnis führt dies insgesamt zu einem geschätzten Abwärmepotenzial von $63,2\text{ TWh}$.

Für Deutschland schätzen Brueckner et al. (2017) das Abwärmepotenzial der Industrie ebenfalls. Zur Schätzung wird ein Bottom-Up-Ansatz angewendet. Die Datengrundlage der Schätzung bilden Emissionsberichte, die von den Umweltämtern der jeweiligen Bundesländer zusammengestellt worden sind. Für die Schätzung der Abwärme wurde eine Methode zur anonymen Auswertung von Daten zu Abgasströmen, die in den Emissionsberichten vorhanden sind, entwickelt. Diese Methode wurde zur Auswertung von etwa 81.000 Abgasströmen der deutschen Industrie angewendet. Die dabei ausgewerteten Unternehmen verursachen etwa 58% des industriellen Brennstoffverbrauchs in Deutschland. Für die ausgewerteten Unternehmen ergibt sich ein Abwärmepotenzial von 35 TWh pro Jahr, was etwa 13% des Brennstoffverbrauchs der Unternehmen entspricht. Dabei ist jedoch hervorzuheben, dass sich diese Abwärmepotenzialschätzung ausschließlich auf (geführte) Abgasströme bezieht und zudem auf die Bilanzgrenze "Betrieb". Infolgedessen werden Abwärmeströme anderer Quellen (diffuse Abwärme, Abwärme im Abwasser usw.) sowie die Energiemenge, die die Abgasströme innerhalb der Betriebsgrenzen ungenutzt verlieren, nicht berücksichtigt. In der Tendenz unterschätzen Brückner et al. (2017) somit die Abwärmepotenzial für die betrachteten Betriebe. Das in Brückner et al. (2017) geschätzte theoretische Abwärmepotenzial könnte expliziter auch als „theoretisches Abwärmepotenzial aus Abgasströmen an der Betriebsgrenze“ bezeichnet werden. Zudem wird darauf aufbauend eine Schätzung für Deutschland durchgeführt. Im Ergebnis schätzten Brueckner et al. (2017) so ein Potenzial für Deutschland von etwa 62 TWh pro Jahr. Der Wert liegt also in der gleichen Größenordnung, wie die Werte, die mit dem Top-Down-Ansatz ermittelt worden sind.

Einsparpotenzial durch überbetriebliche Wärmeintegration

Ohne Einschränkung der kaskadenartigen Verrechnung werden innerhalb der Wirtschaftszweige insgesamt etwa 37 TWh verrechnet und mit Einschränkung reduziert sich dieser Wert auf 22 TWh . Entsprechend der Methodik stellen diese Werte somit das theoretische Energieeinsparpotenzial durch innerbetriebliche Wärmeintegration dar. Die verrechneten Abwärmemengen und der reduzierte Eigenbedarf je Variante sind in Tabelle 17 dargestellt.

Tabelle 17: Wärmebedarf nach kaskadenartiger Verrechnung (in TWh).

Wirtschaftszweig	Ohne Einschränkung der Kaskade			Mit Einschränkung der Kaskade		
	Wärmebedarf		Versch. Menge	Wärmebedarf		Versch. Menge
	<500 °C	>500 °C		<500 °C	>500 °C	
Gew. v. Steinen u. Erden	2,6	0,0	0,0	2,6	0,0	0,0
Ernährung und Tabak	35,9	1,4	1,7	35,9	1,4	1,7
Papiergewerbe	37,4	0,6	3,3	37,4	0,6	3,3
Grundstoffchemie	18,9	64,9	7,9	18,9	64,9	7,9
Sonst. chemische Industrie	19,2	0,0	0,8	19,2	0,0	0,8
Gummi- u. Kunststoffwaren	8,6	0,0	0,4	8,6	0,0	0,4
Glas u. Keramik	2,9	12,6	2,0	4,6	12,6	0,3
Verarb. v. Steine u. Erden	0,0	36,2	5,7	5,3	36,2	0,5
Metallerzeugung	0,0	130,5	4,1	3,9	130,5	0,2
NE-Metalle und Gießereien	0,0	18,6	4,5	4,2	18,6	0,3
Metallbearbeitung	11,1	5,2	1,7	11,1	5,2	1,7
Maschinenbau	9,6	1,1	0,4	9,6	1,1	0,4
Fahrzeugbau	12,9	5,1	1,6	12,9	5,1	1,6
Sonst. Verarbeitendes Gewerbe	28,4	6,5	2,3	28,4	6,5	2,3
Intern insgesamt verrechnet			36,5			21,5

Für den Fall ohne Einschränkung der kaskadenartigen Verrechnung verbleiben nach Verrechnung der Abwärmemengen drei von 14 Wirtschaftszweigen, die als potenzielle Wärmelieferanten für die anderen Wirtschaftszweige in Frage kommen (vgl. Tabelle 17, Wirtschaftszweige mit Wärmebedarf <500 °C=0). Für den Fall mit eingeschränkter kaskadenartiger Verrechnung werden definatorisch fünf von 14 Wirtschaftszweigen als mögliche Wärmelieferanten angesehen (vgl. potenzielle Quellen aus Tabelle 11). Tabelle 18 listet die je Wirtschaftszweig resultierenden Abwärmemengen, die zur überbetrieblichen Verschiebung verfügbar sind, auf. In beiden Fällen ist der Bedarf der anderen Wirtschaftszweige so hoch, dass die Summe der resultierenden Abwärmemengen komplett verwertet werden könnte. Das theoretische Energieeinsparpotenzial durch überbetriebliche Wärmeintegration entspricht somit dieser Summe.

Tabelle 18: Potenzielle Wärme zur externen Verschiebung (in TWh).

Wirtschaftszweig	Ohne Einschränkung der Kaskade*	Mit Einschränkung der Kaskade
Grundstoffchemie	0,0	0,0
Glas u. Keramik	0,0	1,9
Verarb. v. Steine u. Erden	1,5	7,2
Metallerzeugung	22,0	26,1
NE-Metalle und Gießereien	1,1	5,6
Anmerkung: nur <i>res_AW</i> ₅₀₀ einbezogen vgl. Tabelle 13.		

Tabelle 19 und Tabelle 20 stellen abschließend das theoretische Energieeinsparpotenzial durch innerbetriebliche und überbetriebliche Wärmeintegration bezogen auf unterschiedliche Referenzwerte dar.

Tabelle 19: Theoretisches Energieeinsparpotenzial durch innerbetriebliche Wärmeintegration.

Ohne Einschränkung der kaskadenartigen Verrechnung (interne Menge: 36,5 TWh):	
... bezogen auf den Wärmebedarf der Industrie insgesamt	7,2 %
... bezogen auf den Energiebedarf der Industrie insgesamt	5,2 %
Mit Einschränkung der kaskadenartigen Verrechnung (interne Menge: 21,5 TWh):	
... bezogen auf den Wärmebedarf der Industrie insgesamt	4,2 %
... bezogen auf den Energiebedarf der Industrie insgesamt	3,1 %

Tabelle 20: Theoretisches Energieeinsparpotenzial durch überbetriebliche Wärmeintegration.

Ohne Einschränkung der kaskadenartigen Verrechnung (externe Menge: 24,5 TWh):	Inkl. Metall	Exkl. Metall
... bezogen auf den Wärmebedarf der Industrie insgesamt	4,8 %	0,2 %
... bezogen auf den Energiebedarf der Industrie insgesamt	3,5 %	0,2 %
Mit Einschränkung der kaskadenartigen Verrechnung (externe Menge: 40,8 TWh):		
... bezogen auf den Wärmebedarf der Industrie insgesamt	8,1 %	2,9 %
... bezogen auf den Energiebedarf der Industrie insgesamt	5,9 %	2,1 %

Tabelle 21: Theoretisches Energieeinsparpotenzial durch Wärmeintegration insgesamt.

	Inkl. Metallerzeugung	Exkl. Metallerzeugung
Ohne Einschränkung der Kaskade	8,7 %	5,4 %
Mit Einschränkung der Kaskade	9,0 %	5,2 %
... bezogen auf den Energiebedarf der Industrie insgesamt in %.		

Werden die Einsparpotenziale für die überbetriebliche und innerbetriebliche Wärmeintegration aufaddiert, so ergibt sich für beide Fälle (mit und ohne Einschränkung der kaskadenartigen Verrechnung) ein Korridor für das Einsparpotenzial durch Wärmeintegration insgesamt. Bezogen auf den Endenergiebedarf der Industrie liegt dieser Korridor ohne Einbeziehung des Wirtschaftszweigs Metallerzeugung zwischen 5,2 % und 5,4 %. Mit Einbeziehung des Wirtschaftszweigs Metallerzeugung liegt der Korridor zwischen 8,7 % und 9,0 % (vgl. Tabelle 21). Da sich je nach Annahme innerbetriebliche Einsparpotenziale zu überbetrieblichen Potenzialen verschieben und umgekehrt, erscheint die Wärmeintegration insgesamt als ein aussichtsreiches Feld zur Senkung des Energiebedarfs der deutschen Industrie. Dies ist darin begründet, dass auch wenn keine internen Senken vorhanden sind (Schätzung ohne kaskadenartige Verrechnung), Betriebe der potenziell wärmeabgebenden Wirtschaftszweige häufig Nachbarschaften zu anderen Unternehmen haben könnten, die aussichtsreiche Senken darstellen würden. Die für die überbetriebliche und innerbetriebliche Wärmeintegration jeweils angegebenen Einsparpotenziale über- oder unterschätzen das Potenzial je nach Fall auf Basis der Annahmen. Daher

ist abschließend eine Bewertung zu den angegebenen Potenzialen in Tabelle 22 mit Begründung je Wert aufgeführt.

Tabelle 22: Bewertung der geschätzten Energieeinsparpotenziale für die Wärmeintegration.

Energieeinsparpotenzial durch...	Fall	Schätzung (+/-)	Begründung
Interne Wärmeintegration	Ohne	+	Für jede Abwärmequelle liegen auch innerhalb des Wirtschaftszweigs relativ hohe Wärmesenken vor. Daher eher „Maximalwert“.
Externe Wärmeintegration	Ohne	-	Die Heterogenität der Betriebe innerhalb des Wirtschaftszweigs wird insbesondere bei den potenziell wärmeabgebenden Wirtschaftszweigen nicht berücksichtigt. Daher eher „Minimalwert“.
Externe Wärmeintegration	Mit	+	Die Abwärme der potenziell wärmeabgebenden Wirtschaftszweige aus $T > 500 \text{ °C}$ wird komplett extern zur Verfügung gestellt. Senken innerhalb des Wirtschaftszweigs werden vernachlässigt. Daher eher „Maximalwert“.
Interne Wärmeintegration	Mit	-	Durch das komplette Vernachlässigen der internen Verrechnung von Abwärme aus $T > 500 \text{ °C}$ in einigen Wirtschaftszweigen wird das Potenzial eher unterschätzt.
<p>Fall: Ohne: Ohne Einschränkung der kaskadenartigen Verrechnung Mit: Mit Einschränkung der kaskadenartigen Verrechnung</p> <p>Schätzung: + : Tendenzielle Überschätzung - : Tendenzielle Unterschätzung</p>			

5. Modell zur Berechnung des technischen und wirtschaftlichen Potenzials (Bottom-Up I/II)

Im folgenden Kapitel wird ein techno-ökonomisches Modell für die überbetriebliche Wärmeintegration entwickelt. Zweck des Modells ist es, das technische und wirtschaftliche Potenzial für überbetriebliche Wärmeintegration für beliebige Nachbarschaften von Produktionsstandorten zu berechnen. Bei der Modellentwicklung wird wie folgt vorgegangen:

- Für das Entwerfen von Wärmeübertragernetzwerken und somit zum Bewerten der Wärmeintegration stehen im Allgemeinen unterschiedliche methodische Richtungen zur Verfügung. Im ersten Schritt wird auf Basis der Forschungsfrage die in dieser Arbeit gewählte methodische Richtung begründet.
- Im zweiten Schritt wird das Bewertungsmodell entwickelt. Dabei handelt es sich um ein techno-ökonomisches Optimierungsmodell, das relevante Faktoren zur technischen und wirtschaftlichen Bewertung der überbetrieblichen Wärmeintegration mitberücksichtigt. Mit dem Modell kann somit das technische und wirtschaftliche Potenzial für die überbetriebliche Wärmeintegration für eine Nachbarschaft von Produktionsstandorten berechnet werden.
- Im dritten Schritt wird das Modell im Rahmen einer Fallstudie angewendet und zunächst thermodynamisch validiert. Im Rahmen der Fallstudie werden zudem zahlreiche Sensitivitäten gerechnet, die der Bewertung des Modells dienen.
- Im vierten Schritt werden zentrale Ergebnisse der Sensitivitätsrechnungen zusammengefasst.

5.1. Methodeneingrenzung

Ein Wärmeübertragernetzwerk für eine Industrieanlage zu entwerfen, ist eine komplexe Aufgabe. Dies liegt darin begründet, dass Wärme spontan nur von höheren auf niedrigere Temperaturen übertragen werden kann. Beim Entwerfen des Wärmeübertragernetzwerks müssen die Temperaturbereiche der beteiligten Wärme- und Kälteverbraucher somit berücksichtigt werden.

Für zwei Prozesse, die mit Hilfe eines Wärmeübertragers vernetzt werden sollen, kann der theoretisch mögliche Wärmeübertrag von Wärmequelle auf Wärmesenke durch Beachtung diverser Faktoren errechnet werden. Zum einen müssen die technischen Eigenschaften des Wärmeübertragers wie beispielsweise die verfügbare Wärmeübertragerfläche und die Bauform (Gegenstrom, Gleichstrom, usw.) mit einbezogen werden. Zum anderen müssen Massenströme, Temperaturen, Aggregatzustand und Fähigkeit zur Wärmeübertragung der beteiligten Wärmeträgermedien beachtet werden.

Die Berechnung der möglichen Wärmeübertragung von Wärmequellen auf Wärmesenken in einem Wärmeübertragernetzwerk gestaltet sich deutlich komplexer. Dies ist darin begründet, dass die Anzahl der zu evaluierenden Netzwerke schon bei wenigen Prozessen sehr hoch ist. Schon bei fünf Wärmequellen und Wärmesenken beträgt die Anzahl der zu evaluierenden Wärmeübertragernetzwerke $25! \approx 1.5 \cdot 10^{25}$ (Rašković und Stoiljković 2009). Daher wurden entsprechende Methoden zum Bewerten und Entwerfen von Wärmeübertragernetzwerken entwickelt.

Nach Klemeš und Kravanja (2013) werden in der aktuellen Literatur die folgenden zwei grundlegenden methodischen Richtungen zum Entwerfen von Wärmeübertragernetzwerken unterschieden.

- Pinch-Analyse basierte Methoden: Diese Methoden basieren auf thermodynamischen Grundlagen und daraus abgeleiteten Heuristiken.
- Mathematisch programmierte Methoden: Bei diesen Methoden werden in der Regel Zielfunktionen für die Problemlösung formuliert, die es zu lösen gilt.

Im Folgenden wird zunächst die Pinch-Analyse als Grundlage für Pinch-Analyse basierte Methoden eingeführt. Des Weiteren werden mathematisch programmierte Methoden grundlegend eingeführt. Darauf aufbauend werden beide methodische Richtungen im Hinblick auf den Zweck dieser Arbeit argumentativ gegeneinander abgewogen und es wird eine der beiden Richtungen für die weitere Entwicklung gewählt.

5.1.1. Pinch-Analyse

Pinch-Analyse basierte Methoden sind die in der Praxis am weitesten verbreitete Methode zum Bewerten und Entwerfen von Wärmeübertragernetzwerken (Natural Resources Canada 2003). Wesentliche Impulse für die Entwicklung der Pinch-Analyse und darauf aufbauende Methoden kamen in den 1980er-Jahren aus der chemischen Industrie. Aufgrund der beiden Ölkrisen in den 1970er-Jahren suchte die chemische Industrie nach Möglichkeiten, Energie einzusparen. Die Wärmeintegration wurde dabei als aussichtsreiche Methode erkannt. Das Bewerten und Entwerfen von Wärmeübertragernetzwerken war jedoch problematisch, denn es standen keine simpel durchführbaren Methoden zur Verfügung und es wurden unterschiedliche Methoden im Hinblick auf Einsparpotenziale bewertet (siehe bspw. Zachoval et al. 1985).

Die grundsätzliche Entwicklung der Pinch-Analyse durch Bodo Linnhoff und darauf aufbauende Erweiterungen der Methode stellten schließlich Meilensteine für das Entwerfen und Optimieren von Wärmeübertragernetzwerken und somit der Wärmeintegration dar (Linnhoff und Flower 1978, Linnhoff und Hindmarsh 1983, Linnhoff und Ahmad 1990, Ahmad et al. 1990). Die neue Methode beinhaltete eine strukturierte Vorgehensweise, die es Prozessingenieuren ermöglichte Wärmeübertragernetzwerke für Alt- und Neuanlagen zu entwerfen und zu optimieren. Innerhalb der chemischen Industrie fand die Wärmeintegration daher weite Verbreitung (Natural Resources Canada 2003). Heute stellen Wärmeübertragernetzwerke in der chemischen Industrie eine gängige Energieeffizienzoption dar (Smith 2005).

Zur Optimierung der Wärmeintegration setzte sich die Pinch-Analyse in den 1980er-Jahren durch (Linnhoff und Lenz 1987). Zudem wurde die durch Ahmad et al. (1990) vorgestellte finale Pinch-Analyse kontinuierlich weiterentwickelt. Beispielsweise wurden ursprünglich ausschließlich thermische Energieströme betrachtet. Druckverluste, die durch Verbindung von Wärmeübertragern mit Rohren entstehen, wurden zunächst vernachlässigt. Weiterentwicklungen, die zwischen 2005 und 2009 stattfanden, führten dann dazu, dass Aspekte bezogen auf den Druckverlust nun prinzipiell mitberücksichtigt werden können (Sreepathi und Rangaiah 2014).

Inwieweit es sich bei der Vielzahl der Methoden, die aus Weiterentwicklungen der Pinch-Analyse entstanden sind, noch um die Pinch-Analyse oder um Pinch-Analyse basierte Methoden handelt, wird sprachlich nicht einheitlich gehandhabt.

Ein Überblick gibt der Artikel von Klemeš und Kravanja (2013), indem die Geschichte von Methoden für die Wärmeintegration innerhalb der letzten 40 Jahre aufgearbeitet wird. Die grundlegende Systematik ist jedoch einheitlich und wird im Folgenden auf Basis der Beschreibungen von Radgen (1996) kurz vorgestellt.

Annahmen und Grundlagen der Pinch-Analyse

Die Durchführung der Pinch-Analyse liefert grundsätzlich zwei Ergebnisse.

- Erstens wird der theoretische minimale Energiebedarf des Gesamtsystems ermittelt.
- Zweites wird ein Wärmeübertragernetzwerk entworfen. Dabei wird das Netzwerk in der Art entworfen, dass der theoretisch minimale Energiebedarf komplett oder annähernd erreicht werden kann.

Dabei werden in der ursprünglichen Pinch-Analyse nach Ahmad et al. (1990) die im Folgenden aufgelisteten Grundannahmen getroffen.

- Die betrachteten Prozesse sind kontinuierlich und stationär.
- Die Wärmekapazitäten sind nicht temperaturabhängig.
- Potenzielle und kinetische Energie der Prozesse werden nicht betrachtet.
- Wärmeverluste werden nicht betrachtet.

Aufteilung des Systems in Wärmequellen und Wärmesenken

In der ursprünglichen Pinch-Analyse wird eine Industrieanlage auf Prozesse, die aufgeheizt und abgekühlt werden sollen, reduziert. Es werden somit Wärmequellen und Wärmesenken gebildet. Der Energiebedarf der Prozesse ergibt sich aus der notwendigen Wärmezufuhr oder Wärmeabfuhr, die den Prozessen zugefügt werden muss, um entsprechend gewünschte Temperaturen zu erreichen. Da von kontinuierlichen Prozessen ausgegangen wird, werden die Bedarfe üblicherweise als Leistung angegeben. Unter der Annahme konstanter Wärmekapazitäten und stationärer Prozesse ergibt sich die zu entziehende oder zuzuführende Wärmeleistung näherungsweise entsprechend Gleichung (5.1). Dabei bezeichnen T_{aus} und T_{ein} die Ein- und Austrittstemperatur des abzukühlenden oder aufzuheizenden Mediums, c_p die spezifische Wärmekapazität des Mediums bei konstantem Druck und H_v die Enthalpie für einen möglichen Phasenwechsel. Der Massenstrom des Mediums wird mit \dot{m} gekennzeichnet.

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{aus} - T_{ein}) + \dot{m} \cdot H_v \quad (5.1)$$

Bilden von Summenkurven und Ermittlung des minimalen Leistungsbedarfs

Der Leistungsbedarf für die Wärmequellen und Wärmesenken wird anhand von Temperaturintervallen aufgeteilt. „Die Temperaturintervalle werden dabei so gewählt, dass auf jede gewünschte Eintritts- und Austrittstemperatur einer Wärmequelle und Wärmesenke eine Intervallgrenze fällt“ (aus Radgen(1996)). Im Anschluss wird der Leistungsbedarf in jedem gebildeten Temperaturintervall ermittelt. Hierfür werden die Leistungsbedarfe der jeweiligen Verbraucher innerhalb der jeweiligen Temperaturintervalle aufaddiert. Auf Basis dieser Werte kann eine sogenannte Summenkurve gebildet werden. Dieser Vorgang wird getrennt jeweils für die Wärmequellen und Wärmesenken durchgeführt. Die Summenkurven

werden schließlich in einem Diagramm zusammengeführt. Die Kurven werden im Anschluss in horizontaler Richtung in der Art verschoben, so dass die heiße Summenkurve überall über der kalten Summenkurve liegt. Zudem werden die Kurven in vertikaler Richtung verschoben, bis der Abstand an der Stelle mit der größten Annäherung zwischen heißer und kalter Summenkurve in horizontaler Richtung der gewählten minimalen Temperaturdifferenz entspricht.

Die minimale Temperaturdifferenz stellt dabei das notwendige Temperaturgefälle dar, welches in den Wärmeübertragern vorhanden sein muss, um Wärme zu übertragen. Je kleiner die minimale Temperaturdifferenz gewählt wird, desto größer müssen die entsprechenden Wärmeübertragerflächen ausgeführt werden, was wiederum zu steigenden Investitionen führt. Die Stelle zwischen der heißen und kalten Summenkurve mit dem Abstand der minimalen Temperaturdifferenz wird als Pinch (aus dem Englischen für Engstelle) bezeichnet.

Weitere Darstellung der Summenkurven wie beispielsweise das Wärmestromprofil sind zur Bewertung ebenfalls üblich. Das Zusammenführen der heißen und kalten Summenkurve liefert die folgenden Ergebnisse.

- Der theoretisch minimale extern zuzuführende Leistungsbedarf zur Aufheizung und Abkühlung der Prozesse des gesamten Systems wird ermittelt.
- Der Pinch wird identifiziert. Der Pinch dient im Folgenden schließlich dazu, ein Wärmeübertragernetzwerk zu entwerfen.

Entwerfen des Wärmeübertragernetzwerks

Im letzten Schritt der Pinch-Analyse wird ein Wärmeübertragernetzwerk entworfen, mit dem der theoretisch minimale Energiebedarf vollständig oder annähernd erreicht werden kann. Für das Entwerfen des Wärmeübertragernetzwerks ist die Kenntnis über den Pinch notwendig. Der Pinch dient dazu, das Problem ein Wärmeübertragernetzwerk zu entwerfen in zwei kleinere Teilprobleme aufzuteilen. Hierfür wird das Gesamtsystem in zwei thermodynamisch voneinander getrennte Regionen aufgeteilt. In der Literatur wird die Region oberhalb des Pinch als Wärmesenke und die Region unterhalb des Pinch als Wärmequelle zusammengefasst (Abbildung 8). Das Wärmeübertragernetzwerk wird schließlich durch Anwendung diverser heuristischer Regeln entworfen. Damit ein Netzwerk mit möglichst minimalem Energiebedarf entworfen werden kann, dürfen dabei die drei folgenden Grundregeln nicht verletzt werden:

- Oberhalb des Pinch darf keine externe Wärme abgeführt werden.
- Unterhalb des Pinch darf keine externe Wärme zugeführt werden.
- Ein Wärmetransport über den Pinch vom Bereich der Wärmesenke zur Wärmequelle darf nicht stattfinden.

Zum Entwerfen des Netzwerks werden dann schließlich Gitterdiagramme verwendet, in denen anhand von heuristischen Regeln Wärmeübertragernetzwerke entworfen werden können. Dabei wird zum einen geprüft, welche Verbindungen zwischen Wärmequelle und Senke temperaturbedingt und zum anderen mengenmäßig zulässig sind. Hierfür werden Wärmekapazitätsströme verwendet. Bei Netzwerken, die mit Pinch-Analyse basierten Methoden entworfen werden, kann nicht garantiert werden, dass mit diesen Netzwerken der theoretisch minimale Energiebedarf erreicht werden kann. Die entworfenen Netzwerke

sind somit nicht zwangsläufig optimal. Sie stellen jedoch „gute Annäherungen“ an das theoretische Optimum dar (Martín und Mato 2008, Sieniutycz und Jeżowski 2013).

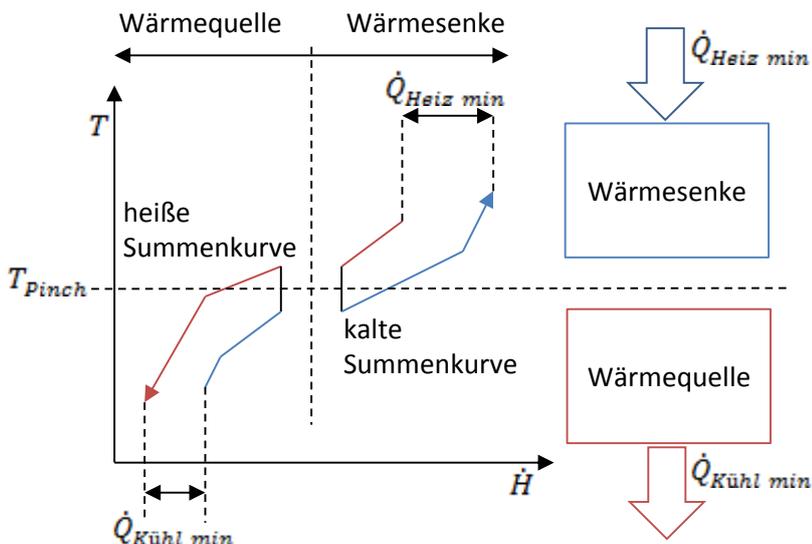


Abbildung 8: Pinch-Temperatur

Eine erweiterte Variante der Pinch-Methode ist die sogenannte Total Site Analysis. Dabei handelt es sich um eine methodische Erweiterung, die dem Zweck dient auch Standorte zu evaluieren, deren Wärme- und Kältenachfragen weiter voneinander entfernt sind als üblicherweise (Hackl et al. 2011).

5.1.2. Mathematisch programmierte Methoden

Mit mathematisch programmierten Methoden können technisch realisierbare Netzwerke automatisch, d. h. ohne manuelle Anwendung von Entwurfsheuristiken entworfen werden. Hierfür werden in der Regel Zielfunktionen formuliert, um Netzwerke mit minimalen Energieanforderungen zu generieren. Cerda et al. (1983) präsentieren die erste mathematisch programmierte Methode zum Entwerfen von Wärmeübertragernetzwerken. Hierfür nutzen sie das Transportproblem, eine Fragestellung aus dem Operations-Research, als Formulierungsgrundlage und kombinieren diese mit Elementen der Pinch-Analyse. Weitere Ansätze nutzen das Umladeproblem, bei dem es sich um ein logistisches Optimierungsproblem handelt, als Grundlage zur Problemformulierung (vgl. Papoulias und Grossmann 1983, Chen et al. 2015).

Gegenüber Pinch-Analyse basierten Methoden sind die Vorteile, dass mathematisch programmierte Methoden durch Adaption der Zielfunktionen und Randbedingungen beliebig erweitert werden können. Beispielsweise berücksichtigen Weiterentwicklungen ebenfalls die Anzahl der Wärmeübertrager und versuchen diese zu reduzieren (Klemeš und Kravanja 2013). Grundsätzlich kann durch die Automatisierung ein Netzwerk schneller entworfen werden verglichen mit Pinch-Analyse basierten Methoden.

5.1.3. Methodenwahl

Die strukturierte Literaturanalyse in Kapitel 3.2 hat aufgezeigt, dass eine Vielzahl von Methoden zum Entwerfen von Wärmeübertragernetzwerken vorhanden sind, die zudem kontinuierlich weiter entwickelt werden. Für die übergeordnete Fragestellung stellt sich somit die Frage, welche dieser Methoden oder methodischen Richtungen besonders gut geeignet ist, um das Einsparpotenzial für die überbetriebliche Wärmeintegration systematisch zu ermitteln. Zunächst sind daher Pinch-basierte und mathematisch basierte Methoden gegeneinander abzuwägen.

Pinch-basierte Methoden sind in der industriellen Praxis weiterhin am weitesten verbreitet, was zunächst ein Argument für diese Methoden ist (Natural Resources Canada 2003, Klemeš et al. 2013). Ursachen hierfür sind die klare Verständlichkeit der Methode und weit verbreitete Kenntnis unter Prozessingenieuren über deren Anwendung (Natural Resources Canada 2003, Martín und Mato 2008, Klemeš et al. 2013). Zudem werden in der Praxis kommerzielle Programme angewendet, die Prozessingenieure bei der Auslegung unterstützen und deren grundlegende Methodik auf der Pinch-Analyse basiert (bspw. Aspen Energy Analyzer, PinCH usw.). Somit sind Wärmeübertragernetzwerke und damit zusammenhängende Einsparpotenziale, die mit Pinch-basierten Methoden ermittelt werden, zumindest in der Initialanalyse nah an Netzwerken, die in der Praxis ermittelt werden.

Die Anwendung mathematisch basierter Methoden erfordert in der Praxis die Anwendung kommerzieller Software. Ein Beispiel ist das Programm Aspen Energy Analyzer, das Pinch-basierte sowie mathematisch basierte Methoden enthält. Ein weiteres Beispiel, das ausschließlich mathematisch basierte Methoden verwendet ist das Programm i-Heat, das in erster linear optimierende Ansätze enthält (Klemeš und Kravanja 2013). Da schon die Pinch-Analyse ohnehin schwerpunktmäßig im chemischen Sektor verbreitet ist, kann davon ausgegangen werden, dass dies umso mehr für Programme gilt, die mathematisch basierte Methoden zum Auslegen umsetzen. Inwieweit also Wärmeübertragernetzwerke, die ausschließlich mit mathematischen Methoden ermittelt werden, praxisnah sind, ist unklar. Dies ist zunächst ein Argument, das gegen mathematisch basierte Methoden spricht.

Unabhängig davon, ob Wärmeübertragernetzwerke mit Pinch-basierten oder mathematisch basierten Methoden entworfen werden, ist jedoch davon auszugehen, dass initial ermittelte Netzwerke in vielen Fällen im Rahmen der praktischen Umsetzung weiter verändert bzw. angepasst werden. Solche Anpassungen werden in erster Linie durch örtliche Gegebenheiten wie bspw. fehlender Bauraum bedingt. Daher sollte die Verbreitung der Methode in der Praxis kein ausschlaggebendes Kriterium zur Abwägung zwischen Pinch-Analyse und mathematisch basierten Methoden für die übergeordnete Fragestellung sein.

Für die übergeordnete Fragestellung ist vielmehr relevant, inwieweit Einsparpotenziale durch Wärmeintegration automatisiert und zügig in vergleichsweise kurzer Zeit ermittelt werden können. Schließlich soll ein Rahmen präsentiert werden, der es erlaubt, diese Potenziale für abgegrenzte regionale Einheiten (bspw. Städte) systematisch zu ermitteln und dies kann mitunter die Analyse vieler Kombinationen bzw. Agglomerationen von Produktionsstandorten erfordern.

Pinch-basierte Programme sind in der Regel für das detaillierte Design der Wärmeübertragernetzwerke konzipiert und daher auch nur halb-automatisiert, d. h. bestimmte Schritte werden zwar übernommen, jedoch ist eine Interaktion seitens des Nutzers erforderlich. Eine Automatisierung der Pinch-basierten

Heuristiken in einer eigenständigen Entwicklung ist prinzipiell denkbar, aufgrund von Ausnahmeregeln zur Anwendung der Heuristiken (Kemp 2007) jedoch aufwendig zu bewerkstelligen und daher fehleranfällig.

Bei kommerziellen Programmen auf Basis von mathematisch basierten Methoden ist die Benutzerführung ggf. ebenfalls nur halb-automatisiert oder es sind Meilensteine für die Interaktion seitens des Nutzers vorgesehen. Jedoch lässt sich eine Automatisierung in einer eigenständigen Entwicklung aufgrund der nicht vorhandenen Ausnahmefälle besser durchführen, da Zielfunktionen formuliert werden. Zudem werden in vielen Pinch-Analyse basierten Methoden ausschließlich Investitionen für Wärmeübertrager mitberücksichtigt. Bei mathematisch basierten Methoden lassen sich weitere relevante Investitionen wie bspw. für Rohrleitungen und Arbeitsmaschinen sowie Kosten für Wärmeverluste in die Methodik prinzipiell mit aufnehmen. Zudem können Wärmeübertragernetzwerke in vergleichsweise kürzeren Zeiten generiert werden (Klemeš und Kravanja 2013). Für die übergeordnete Fragestellung erscheint es daher sinnvoll, eine eigene Entwicklung auf Basis mathematischer Methoden mit Fokus auf die überbetriebliche Wärmeintegration zu erstellen.

In der wissenschaftlichen Literatur wird bei mathematischen Methoden zum Entwerfen von Wärmeübertragernetzwerken zwischen Entwurfs- und Zieloptimierung unterschieden (im Englischen: Design- und Target-Optimization). Bei der Zieloptimierung werden Wärmeübertragungsnetzwerke im Hinblick auf thermodynamische Grenzen oder deren Wirtschaftlichkeit ermittelt. Die Entwurfsoptimierung baut auf der Zieloptimierung auf und es werden dabei in der Regel Netzwerke, die zuvor mit der Zieloptimierung ermittelt worden sind im Hinblick auf weitere Kriterien optimiert. Diese Kriterien stammen in der Regel aus den Anforderungen in der praktischen Umsetzung. Gängige Beispiele sind die Reduzierung der Anzahl von Wärmeübertragern, oder die Reduktion der Verrohrungskomplexität. Für die übergeordnete Fragestellung eignet sich in erster Linie die Zieloptimierung als grundsätzlicher Ansatz. Dies ist darin begründet, dass Zielkriterien für die Entwurfsoptimierung aus örtlichen Gegebenheiten (bspw. Bauraum) resultieren und daher ohne technische Detailplanungen nicht abzuschätzen sind.

Zur Methodenwahl ist abschließend zu erwähnen, dass im Bereich der Wärmeintegration nahezu „wöchentlich substanzielle Publikationen“ veröffentlicht werden (Klemeš und Kravanja 2013). Eine Methodenwahl auf Basis bestehender Literatur kann demnach kaum einen Anspruch auf Vollständigkeit erheben.

5.2. Modellentwicklung

Im folgenden Kapitel wird die Modellentwicklung beschrieben. Zunächst wird das grundlegende Modellkonzept beschrieben. Darauf aufbauend werden elementare Modellbestandteile beschrieben (Problemzerlegung, Energetische Problemformulierung und Wirtschaftliche Problemformulierung).

5.2.1. Grundlegendes Modellkonzept

Das Modellkonzept basiert auf dem Entwurf von Wärmenetzen mit dem Transportalgorithmus. (Cerde et al. (1983) zeigen erstmals einen Weg auf, wie ein nach energetischen Kriterien optimales

Wärmeübertragernetzwerk durch Kombination von Ansätzen aus der Pinch-Analyse und dem Operations-Research erstellt werden kann.

Bei der Pinch-Analyse wird jeder aufzuheizende und abzukühlende Prozess anhand von Temperaturintervallen aufgeteilt, um den jeweiligen Energiebedarf der Prozesse in den jeweiligen Temperaturintervallen zu errechnen. Die Temperaturen der Temperaturintervalle sind dabei so gewählt, dass die Ein- und Ausgangstemperatur jedes betrachteten Prozesses enthalten sind. In der klassischen Pinch-Analyse wird dieser Ansatz verwendet, um zunächst sogenannte heiße und kalte Summenkurven zu bilden und den Pinch zu identifizieren. Darauf aufbauend kann mit Hilfe heuristischer Regeln ein nach energetischen Kriterien möglichst optimales Wärmeübertragernetzwerk entworfen werden (Sieniutycz und Jeżowski 2013).

Die Aufteilung der Prozesse anhand von Temperaturintervallen erlaubt es zudem, jeden aufzuheizenden Prozess durch eine Gruppe von Energiebedarfen und jeden abzukühlenden Prozess durch eine Gruppe von Energieangeboten abzubilden. Nun kann evaluiert werden, inwieweit die Energiebedarfe prinzipiell durch zur Verfügung stehende Energieangebote gedeckt werden können. Dieser Umstand erlaubt es, das Problem, ein Wärmeübertragernetzwerk zu entwerfen, als Transportproblem zu formulieren.

Das Transportproblem hat seinen Ursprung im Operations-Research und beschäftigt sich damit, die Transportkosten zwischen Nachfrage und Angebot zu minimieren. Dabei sind die Kosten für jede mögliche Verbindung zwischen Nachfrage und Angebot gegeben (Fourer et al. 2003). Die Zielfunktion des Minimierungsproblems für das Transportproblem ist grundsätzlich wie folgt formuliert: $\min_{x_{ij}} \sum_i \sum_j c_{ij} \cdot x_{ij}$. Die Kosten für den Transport einer Einheit von Angebot i zu Nachfrage j werden dabei mit c_{ij} bezeichnet und x_{ij} bezeichnet die von Angebot i zu Nachfrage j transportierte Menge.

Diese Grundformulierung kann nun auf das Problem ein Wärmeübertragernetzwerk zu erstellen übertragen werden. Dabei sind jedoch nicht nur die möglichen von Energieangeboten zu Energienachfrage transportierbaren Mengen von Relevanz, sondern auch die Temperaturniveaus für die jeweils entsprechenden Kombinationen zwischen Energienachfrage und Energieangebot. Dies liegt darin begründet, dass Wärme spontan nur von höhere auf niedrigere Temperaturen übertragen werden kann. Energieangebote können also nur dann zur Deckung von Energienachfragen gedeckt werden, wenn ihre Temperaturen über den Temperaturen der Energienachfrage liegen.

5.2.2. Abbildung von Wärmebedarfen im Modell

In dem Modell werden Wärmebedarfe und Wärmeangebote entsprechend Temperaturintervallen in Teilbereiche untergliedert dargestellt. Diese Darstellung dient der Optimierung und wird Problemzerlegung genannt. Die Problemzerlegung erfolgt durch Bildung von Energieangeboten und Energienachfragen, die unter bestimmten Kriterien verbunden werden sollen. Cerda et al. (1983) präsentieren eine angepasste Formulierung des Transportproblems, um Temperaturniveaus mit zu berücksichtigen und somit zulässige Wärmeübertragernetzwerke zu generieren. Wie bereits erwähnt werden die Prozesse analog zur Pinch-Analyse entsprechend von Temperaturintervallen aufgeteilt. Hierfür sind die zwei im Folgenden vorgestellten Schritte notwendig. Im ersten Schritt wird eine kalte

Temperaturliste für die aufzuheizenden Prozesse und eine heiße Temperaturliste für die abzukühlenden Prozesse erstellt.

- Die kalte Temperaturliste wird gebildet, indem alle Ein- und Austrittstemperaturen aller aufzuheizenden Prozesse hinzugefügt werden. Zudem werden alle Ein- und Austrittstemperaturen aller abzukühlenden Prozesse in die kalte Temperaturliste hineinprojiziert, indem sie abzüglich der minimalen Temperaturdifferenz hinzugefügt werden. Falls im Temperaturbereich eines Prozesses eine Verdampfung auftritt, so wird diese Temperatur doppelt hinterlegt. Die kalte Temperaturliste enthält final k nach Größe sortierte Temperaturen.
- Die heiße Temperaturliste wird äquivalent gebildet. Sie enthält alle Ein- und Austrittstemperaturen aller abzukühlenden Prozesse. Zudem werden hier alle Ein- und Austrittstemperaturen aller aufzuheizenden Prozesse in die Liste projiziert, indem die entsprechenden Temperaturen zuzüglich der minimalen Temperaturdifferenz hinzugefügt werden. Falls im Temperaturbereich eines Prozesses eine Kondensation auftritt, so wird diese Temperatur doppelt hinterlegt. Die heiße und kalte Temperaturliste enthalten durch die gegenseitige Projektion immer gleich viele Temperaturen. Die heiße Temperaturliste enthält final l nach Größe sortierte Temperaturen.

Im zweiten Schritt werden die Energiemengen der Prozesse in den jeweiligen Temperaturbereichen berechnet, um schließlich eine Aufteilung vorzunehmen. Zur Darstellung wird die Energiemenge des abzukühlenden Prozesses im Folgenden mit B_j bezeichnet und die Energiemenge des aufzuheizenden Prozesses mit A_i . Die Prozesse sind somit numerisch durch i bzw. j gekennzeichnet. Ziel ist es nun jeden aufzuheizenden Prozess in eine Gruppe von Energienachfragen a_{ik} und jeden abzukühlenden Prozess in eine Gruppe von Energieangeboten b_{jl} aufzuteilen. Dabei bezeichnet a_{ik} die Energienachfrage des Prozesses A_i im Temperaturbereich $k - 1$ bis k . Des Weiteren bezeichnet b_{jl} das Energieangebot des Prozesses B_j im Temperaturbereich $l - 1$ bis l . Der Zusammenhang zwischen Energieangeboten, Energienachfragen und zugrunde liegenden Prozessen ist in Abbildung 9 dargestellt.

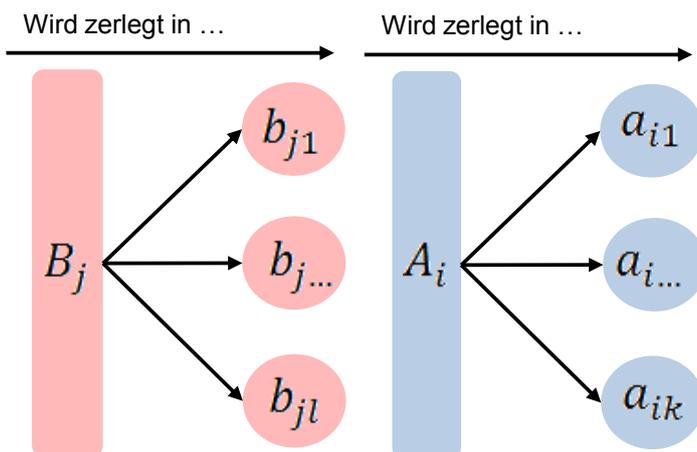


Abbildung 9: Prozesszerlegung in Energienachfragen und Energieangebote

Schließlich werden die Ein- und Ausgangstemperaturen der Prozesse sequentiell mit den Temperaturen in den jeweiligen Temperaturlisten abgeglichen, um die Energiemengen in den jeweiligen Temperaturen zu berechnen.

Für die aufzuheizenden Prozesse wird die kalte Temperaturliste als Grundlage zur Aufteilung genommen. Der Betrag für die jeweiligen Energienachfragen ergibt sich dann durch Erweiterung von Gleichung (5.1) entsprechend Gleichung (5.2). Dabei bezeichnet \dot{m}_i den Massenstrom des Prozesses i und $c_{p,i}$ die spezifische Wärmekapazität des Wärmeträgermediums des Prozesses i . Zudem bezeichnet T_k die Austrittstemperatur der Energienachfrage a_{ik} und T_{k-1} die Eintrittstemperatur. Falls eine Verdampfung im Temperaturbereich auftritt, so wird eine zusätzliche Energienachfrage erstellt, deren Ein- und Ausgangstemperatur der Verdampfungstemperatur entspricht. Deren Energiebedarf ergibt sich dann durch Gleichung (5.3).

$$a_{ik} = \dot{m}_i \cdot c_{p,i} \cdot (T_k - T_{k-1}) \quad (5.2)$$

$$a_{ik} = \dot{m}_i \cdot dhv_{ik \rightarrow ik} \quad (5.3)$$

Äquivalent wird für die Aufteilung der abzukühlenden Prozesse die heiße Temperaturliste als Grundlage genommen. Der Betrag für die jeweiligen Energieangebote ergibt sich dann äquivalent entsprechend Gleichung (5.4). Hier bezeichnet \dot{m}_j den Massenstrom des Prozesses j und $c_{p,j}$ die spezifische Wärmekapazität des Wärmeträgermediums des Prozesses j . Zudem bezeichnet T_l die Austrittstemperatur des Energieangebots b_{jl} und T_{l-1} die Eintrittstemperatur. Äquivalent zur Vorgehensweise zuvor wird ein zusätzliches Energieangebot entsprechend (5.5) erstellt, falls es innerhalb des Temperaturbereichs eines Prozesses zur Kondensation kommt.

$$b_{jl} = \dot{m}_j \cdot c_{p,j} \cdot (T_l - T_{l-1}) \quad (5.4)$$

$$b_{jl} = \dot{m}_j \cdot dhv_{jl \rightarrow jl} \quad (5.5)$$

Zur Veranschaulichung der Bildung von Energienachfragen und Energieangeboten für das Entwerfen des Wärmeübertragernetzwerkes wird im Folgenden ein Beispiel beschrieben. In Abbildung 10 sind exemplarisch zwei Öfen dargestellt, die heißes Abgas produzieren. Das Abgas soll dabei abgekühlt werden und stellt somit abzukühlende respektive heiße Prozesse dar. Zudem ist ein Luftkanal mit einem Luftstrom gegeben, der aufgeheizt werden soll. Dieser Prozess stellt somit einen aufzuheizenden respektive kalten Prozess dar. Für den Wärmeübertrager wird eine minimale Temperaturdifferenz von 10 °C angenommen.

Nun könnte die Abwärme der Abgase genutzt werden, um den Luftstrom aufzuheizen. Da es sich lediglich um nur zwei potenzielle Quellen und eine Senke handelt, ist das Problem auch ohne Anwendung des Transportproblems zu lösen. Zur Darstellung des Algorithmus für die Bildung von Energienachfragen und Energieangeboten eignet sich jedoch ein simples Beispiel und daher wird der Algorithmus im Folgenden exemplarisch angewendet. Im weiteren Verlauf des Kapitels wird das Beispiel wiederholt aufgegriffen, um den Ansatz zur Problemlösung darzustellen.

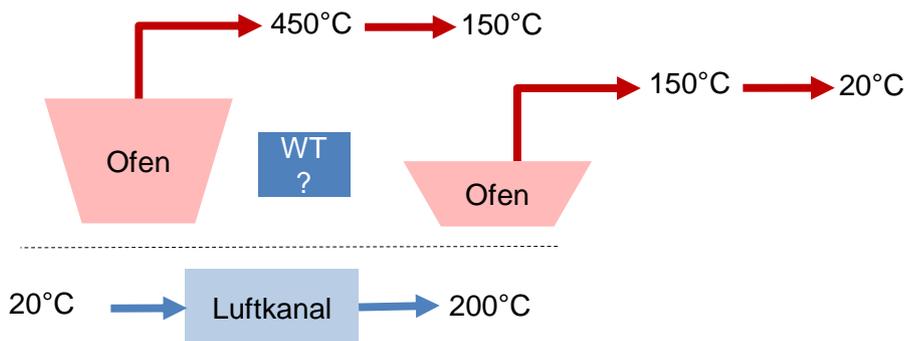


Abbildung 10: Beispiel für Bildung von Energienachfragen und Energieangeboten

Die Temperaturlisten für das Beispiel ergeben sich unter Anwendung der oben beschriebenen Regeln und sind in Tabelle 23 aufgelistet.

Tabelle 23: Heiße und kalte Temperaturliste für das Beispiel – Werte in °C.

Heiße Temperaturliste		20+10=30	150	200+10=210	450
Kalte Temperaturliste	20-10=10	20	150-10=140	200	450- 10=440

Nun werden die Energienachfragen unter Beachtung der kalten Temperaturliste und die Energieangebote unter Beachtung der heißen Temperaturliste gebildet. Dabei werden die Anteile je Prozess systematisch aufgeteilt. Für die zwei Beispielprozesse würden sich Aufteilungen entsprechend Tabelle 24 und Tabelle 25 ergeben.

Tabelle 24: Exemplarische Aufteilung – Energienachfrage.

Intervall	20	150-10=140	200	450-10=440
Wert	N.V.	$a_{Luft.1} = \dot{m}_{Luft} \cdot c_{p,Luft} \cdot (140 - 20)$	$a_{Luft.2} = \dot{m}_{Luft} \cdot c_{p,Luft} \cdot (200 - 140)$	N.V.

Tabelle 25: Exemplarische Aufteilung – Energieangebot.

Intervall	20+10 =30	150	200+10=210	450
Wert	N.V.	$b_{Abgas.1} = \dot{m}_{Abgas} \cdot c_{p,Abgas} \cdot (150 - 30)$	$b_{Abgas.2} = \dot{m}_{Abgas} \cdot c_{p,Abgas} \cdot (210 - 150)$	$b_{Abgas.3} = \dot{m}_{Abgas} \cdot c_{p,Abgas} \cdot (450 - 210)$

5.2.3. Ermittlung des technischen Potenzials im Modell

Das technische Potenzial für die überbetriebliche Wärmeintegration für eine Kombination von Produktionsstandorten wird in dem Modell wie folgt ermittelt. Zunächst wird das energetische Optimum, das durch Vernetzung der Produktionsstandorte mit einem Wärmeübertragernetzwerk erreicht werden kann, bestimmt. Das energetische Optimum für das zu analysierende System (Kombination von Produktionsstandorten) liegt dann vor, wenn der Energieverbrauch dem thermodynamischen Minimum entspricht.

Das technische Energieeinsparpotenzial für überbetriebliche Wärmeintegration ist dann die Differenz aus dem Energieverbrauch des zu analysierenden Systems im gegenwärtigen Zustand verglichen mit dem Energieverbrauch des zu analysierenden Systems, das im Modell im energetischen Optimum vorliegt, abzüglich der Wärmeverluste, die beim Transport der Wärme über Standortgrenzen hinweg anfallen.

Im Folgenden wird die Suche nach dem energetischen Optimum erläutert, die elementar für die Ermittlung des technischen Potenzials ist. Die im vorigen Kapitel gebildeten Energienachfragen und Energieangebote aus der Problemzerlegung werden nun im Rahmen der **Zielfunktion** aufgegriffen, um ein optimales Wärmeübertragernetzwerk zu entwerfen. In der Formulierung nach Cerda et al. (1983) wird nun angenommen, dass ein Kälteversorger a_{C1} existiert, der ausreichend Kapazität besitzt, um alle im System betrachteten Energieangebote abzukühlen. Die entsprechende Randbedingung ist in Gleichung (5.6) angegeben. Zudem wird angenommen, dass ein Wärmeversorger existiert, der in der Lage ist, die komplette Energienachfrage im System zu decken. Die entsprechende Randbedingung ist in Gleichung (5.7) aufgeführt. Die von Energieangebot b_{jl} zu Energienachfrage transportierte Wärmemenge wird mit $q_{ik,jl}$ bezeichnet. Zudem wird vorgeschrieben, dass das zu entwerfende Wärmeübertragernetzwerk so gestaltet wird, dass die komplette Energienachfrage aller Energienachfragen exakt gedeckt wird (vgl. (5.8)). Gleichung (5.9) schreibt dann äquivalent vor, dass alle Energieangebote ihre Wärme übertragen müssen bzw. abgekühlt werden, zudem kann nicht mehr Energie übertragen werden als verfügbar ist. Die Randbedingungen sind in Tabelle 26 zusammengefasst.

Tabelle 26: Randbedingungen nach (Cerda et al. 1983).

$a_{C1} \geq \sum_{j=1}^{H-1} \sum_{l=1}^L b_{jl}$	(5.6)
$b_{HL} \geq \sum_{i=1}^{C-1} \sum_{k=1}^L a_{ik}$	(5.7)
$a_{ik} = \sum_{j=1}^H \sum_{l=1}^L q_{ik,jl} \quad i = 1, 2, \dots, C \quad k = 1, 2, \dots, L$	(5.8)
$b_{jl} = \sum_{i=1}^H \sum_{k=1}^L q_{ik,jl} \quad i = 1, 2, \dots, H \quad k = 1, 2, \dots, L$	(5.9)
$q_{ik,jl} \geq 0 \text{ für alle } i, j, k \text{ und } l$	(5.10)
Mit folgenden Variablen:	
a_{ik}	Energienachfrage: Wärme, die Prozess i im Temperaturintervall k bis $k-1$ benötigt.
b_{jl}	Energieangebot: Wärme, die Prozess j im Temperaturintervall l bis $l-1$ zur Verfügung hat.
L	Länge der Temperaturliste.
$q_{ik,jl}$	Die Wärmemenge, die von Energieangebot b_{jl} zu Energienachfrage a_{ik} transportiert wird. Die Lösungen für $q_{ik,jl}$ besagt somit, welche Prozesse miteinander verbunden werden und wie groß die Wärmeübertrager zwischen den Prozessen sind.

Das Ziel der Optimierung ist nun $q_{ik,jl}$ für $H-1$ Energieangebote und $C-1$ Energienachfragen in der Art zu bestimmen, dass der Leistungsbedarf von a_{C1} und b_{HL} , also der entsprechende Bedarf für die Kälte- und Wärmeversorger, minimiert wird. Die entsprechende Zielfunktion dafür ist in Gleichung (5.11) angegeben.

$$\min_{q_{ik,jl}} \sum_{i=1}^C \sum_{k=1}^L \sum_{j=1}^H \sum_{l=1}^L C_{ik,jl} \cdot q_{ik,jl} \quad (5.11)$$

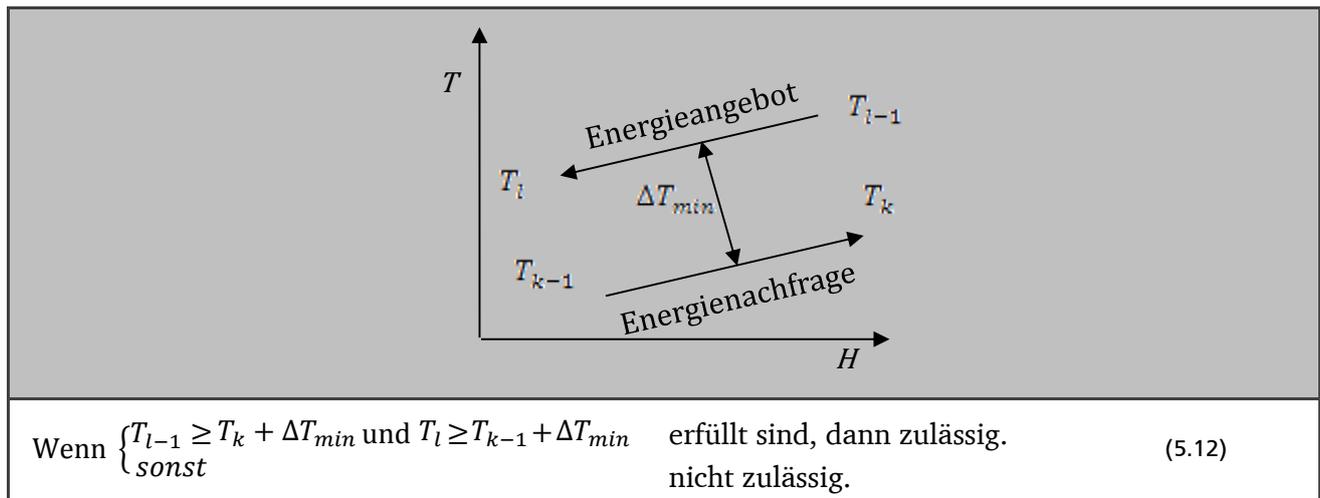
In Gleichung (5.11) wird $q_{ik,jl}$ mit entsprechend assoziierten Kosten $C_{ik,jl}$ multipliziert und für alle Fälle aufsummiert. Die erste Anforderung dabei ist $q_{ik,jl}$ so zu wählen, so dass die Summe der Funktion minimiert wird. Zudem darf kein Wärmetransport zwischen Energienachfrage und Energieangebot stattfinden, wenn die Temperatur der Nachfrage höher ist als die des Angebots. Die zweite Anforderung besteht somit darin, $q_{ik,jl}$ für solche Verbindungen mit null zu belegen. Die Einhaltung beider Anforderungen wird durch entsprechende Parametrisierung der assoziierten Kosten sichergestellt. Um ein Wärmeübertragernetzwerk mit minimalem Leistungsbedarf zu ermitteln, werden demnach assoziierten Kosten $q_{ik,jl}$, die Energieangebot und Energienachfrage verbinden und im Hinblick auf Temperaturniveaus zulässig sind, mit null bewertet. Assoziierte Kosten für $q_{ik,jl}$, die Energieangebot und Energienachfrage verbinden und im Hinblick auf Temperaturniveaus nicht zulässig sind, werden hingegen mit einer sehr großen (in der Theorie unendlichen) Zahl belegt. Assoziierte Kosten für $q_{ik,jl}$, die Energieangebot mit dem Kälteversorger (a_{C1}) verbinden, und assoziierte Kosten für $q_{ik,jl}$, die Energienachfrage mit dem Wärmeversorger (b_{HL}) verbinden, werden mit eins bewertet. Die Kostenfaktoren für die jeweiligen Fälle sind in Tabelle 27 zusammengefasst.

Tabelle 27: Kostenfaktoren – energetische Optimierung.

$C_{ik,jl} =$	0	i ist nicht C und j ist nicht H und die Temperaturen sind zulässig. Verbindungen zwischen E-Angebot und E-Nachfrage.
	0	i ist C und j ist H . Verbindungen zwischen Versorgern (nur zum Modellieren notwendig, nicht technisch).
	1	Entweder i ist C oder j ist H . Verbindungen zwischen einem Versorger (Wärme/Kälte) und E-Nachfrage oder E-Angebot.
	M	Sonst M , eine große Zahl. Für Verbindungen zwischen E-Nachfrage und E-Angebot mit unzulässigen Temperaturen.
Kosten, die für den Transport einer Einheit entlang Verbindung $q_{ik,jl}$ angesetzt werden.		

Dabei müssen für die Zulässigkeit der Temperaturbereiche die Ein- und Austrittstemperaturen des Energieangebots über den Ein- und Austrittstemperaturen der Energienachfrage liegen. Im Rahmen der Arbeit werden ausschließlich Gegenstromwärmeübertrager betrachtet. Für eine Kombination von Energienachfrage a_{ik} und Energieangebot b_{jl} muss somit Gleichung (5.12) erfüllt sein (vgl. Tabelle 28).

Tabelle 28: Gleichung (5.12) mit grafischer Darstellung.



Somit sind alle Randbedingungen und die Zielfunktion linear formuliert. Zudem dürfen alle Variablen beliebige reelle Zahlen annehmen und es handelt sich demnach um ein lineares Optimierungsproblem. Lineare Optimierungsprobleme können in mathematische Modellierungssprachen (bspw. MATLAB, AMPL, Python/PuLP) formuliert und durch Einsatz von sogenannten Solvern gelöst werden. Solver sind spezielle Computerprogramme, die mathematische Probleme numerisch lösen. Im Prinzip wenden Solver heuristische Regeln zur numerischen Lösung der mathematischen Probleme an, die sich für bestimmte Probleme bewährt haben. Lineare Optimierungsprobleme sind in der wissenschaftlichen Literatur für die Problemstellung angemessen erforscht und ein gängiges numerisches Verfahren zum Lösen von linearen Optimierungsproblemen, also zum Ermitteln des globalen Optimums ist das Simplex-Verfahren (Domschke et al. 2015). Somit kann durch Einsatz entsprechend aktueller Lösungsverfahren davon ausgegangen werden, dass das globale Optimum zuverlässig bestimmt wird.

Für das Beispiel aus Abbildung 10 und entsprechenden Energienachfragen und Energieangeboten aus Tabelle 24 und Tabelle 25 würde sich demnach die in Abbildung 11 dargestellte Belegung aufgrund hiterlegter Kosten ergeben. Der Solver würde im Ergebnis die schwarzen (durchgezogenen) Verbindungen im Hinblick auf das verfügbare Energieangebot maximal belegen, um so die Kosten der Zielfunktion zu minimieren. Lila Verbindungen würden so gut es geht vermieden werden und rote Verbindungen würden gar nicht gewählt werden.

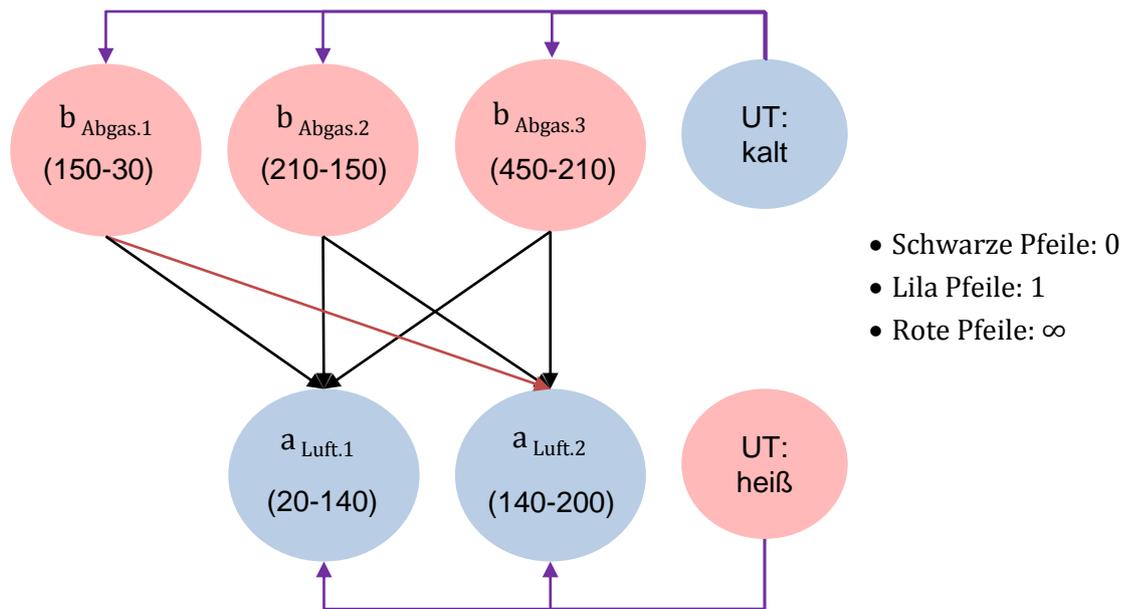


Abbildung 11: Kostenbelegung – energetische Optimierung für das Beispiel

5.2.4. Ermittlung des wirtschaftlichen Potenzials im Modell

Das wirtschaftliche Potenzial der überbetrieblichen Wärmeintegration für eine Kombination von Produktionsstandorten wird in dem Modell methodisch äquivalent zum technischen Potenzial ermittelt. Jedoch wird im Unterschied zum technischen Potenzial nicht das energetische Optimum, sondern das wirtschaftliche Optimum, welches durch Vernetzung der Produktionsstandorte mit einem Wärmeübertragernetzwerk erreicht werden kann, bestimmt. Das wirtschaftliche Optimum für das zu analysierende System (Kombination von Produktionsstandorten) liegt dann im Modell vor, wenn die energieverbrauchsrelevanten Kosten minimal sind. Es stellt somit die Teilmenge des energetischen Optimums dar, die unter Berücksichtigung ökonomischer Kriterien wirtschaftlich ist.

Das wirtschaftliche Energieeinsparpotenzial für überbetriebliche Wärmeintegration ist dann die Differenz aus dem Energieverbrauch des zu analysierenden Systems im gegenwärtigen Zustand verglichen mit dem Energieverbrauch des zu analysierenden Systems, das im Modell beim wirtschaftlichen Optimum vorliegt. Die diesbezügliche Suche nach dem wirtschaftlichen Optimum wird im Folgenden erläutert.

Eine Weiterentwicklung des Ansatzes nach Cerda et al. (1983) besteht darin, notwendige Investitionen für das zu entwerfende Wärmeübertragernetzwerk mit zu berücksichtigen. Hierfür müssen die Kosten spezifisch für die jeweiligen Verbindungen dargestellt werden. Entsprechend der zuvor vorgestellten Formulierung müssen demnach notwendige Investitionen und Betriebskosten in Geldeinheit pro Leistungseinheit dargestellt werden. Prinzipiell kann die Darstellung auch auf Energiemengen bezogen erfolgen. Geldermann et al. (2006) präsentieren einen Ansatz auf Basis von Cerda et al. (1983), um Wärmeübertragernetzwerke mit minimalen Kosten zu entwerfen. Hierfür beziehen Geldermann et al. (2006) notwendige Investitionen für Wärmeübertrager mit ein.

Kostenfaktor Wärmeübertrager

Das Einbeziehen von Investitionen für Wärmeübertrager ist naheliegend, da die notwendige Fläche und somit die Investitionen linear mit der je Verbindung potenziell zu transportierenden Leistung korreliert. Neben notwendigen Investitionen für die Wärmeübertrager können auch entsprechende Betriebs- und Wartungskosten mit einbezogen werden. Zudem können Kapitalkosten mitberücksichtigt werden. Im Rahmen der Arbeit werden nur Gegenstromwärmeübertrager betrachtet. Dabei werden die spezifischen Kosten entsprechend Gleichung (5.13) in Anlehnung an Ludwig abgebildet (Ludwig 2012). In der Gleichung wird eine lineare Abschreibung mit Restwert gleich null angenommen und die Approximation der notwendigen Fläche für einen Gegenstromwärmeübertrager ist dem VDI-Wärmeatlas entnommen (VDI heat atlas 2010).

Tabelle 29: Spezifische Kosten für Wärmeübertrager im Modell.

$c_{WT,ik,jl} \left[\frac{EUR}{W} \right] = \left(\frac{sk_{wt} \left[\frac{EUR}{m^2} \right]}{k \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right] \cdot \Delta T_G [K]} \right) \cdot \left(\frac{1}{A[a]} + \frac{Z \left[\frac{\%}{a} \right]}{2} + W [\%] \right) \quad (5.13)$	
Mit,	
sk_{wt}	Spezifische Investitionen für Wärmeübertragerflächen
k	Wärmedurchgangskoeffizient
ΔT_G	Logarithmische Temperaturdifferenz für Gegenstromwärmeübertrager
A	Abschreibungsdauer für Wärmeübertrager in Jahren
Z	Kalkulatorischer Zins pro Jahr
W	Relativer Faktor für Wartungsaufwand

Der sich aus der Abschreibung ergebende Term inklusive Aufwand für Betrieb und Wartung wird in Gleichung (5.14) zwecks Übersichtlichkeit zu LA zusammengefasst, da er für weitere Kostenfaktoren identisch aufgegriffen wird.

$$LA = \left(\frac{1}{A[a]} + \frac{Z \left[\frac{\%}{a} \right]}{2} + W [\%] \right) \quad (5.14)$$

Zusammenfassend werden nochmal die wichtigsten Vereinfachungen, die bei der Bildung des Kostenfaktors für Wärmeübertrager angenommen werden, im Folgenden aufgelistet.

- sk_{wt} ist nicht abhängig von der zu übertragenden Leistung. In der Praxis sind Skaleneffekte zu erwarten, die zu einer Reduktion der spezifischen Kosten mit steigender Wärmeübertragerfläche führen.
- Der k -Wert ist im Modell ausschließlich abhängig von den Aggregatzuständen der beteiligten Medien. Die angenommenen Kennwerte sind dem VDI-Wärmeatlas (VDI heat atlas 2010) entnommen und stellen Erfahrungswerte aus Ratgebern zur Auslegung von technischen Komponenten dar. Tatsächlich ist der k -Wert jedoch von der Geometrie des Wärmeübertragers und stofflichen Kennwerten der beteiligten Wärmeträgermedien und des Wärmeübertragers abhängig. Mit Methoden der Wärmeübertragung lässt sich k beispielsweise durch Entwerfen eines Wärmewiderstandnetzwerks genauer bestimmen (Wagner 2001).

-
- Der relative Faktor für Wartungs- und Betriebsaufwände variiert grundsätzlich ebenfalls in Abhängigkeit der beteiligten Medien. Medien mit korrosiven Bestandteilen werden beispielsweise höhere Wartungsaufwände an den Wärmeübertragern zur Folge haben als Medien ohne korrosive Bestandteile. Dies wird hier nicht berücksichtigt.

Methodik zum Einbinden weiterer Kostenfaktoren

Die Einbeziehung von Investitionen, Wartungs- und Betriebskosten für andere notwendige Komponenten eines Wärmeübertragernetzwerks wie beispielsweise Pumpen und Verrohrung gestaltet sich deutlich komplexer verglichen zu Wärmeübertragern. Dies ist darin begründet, dass die entsprechenden notwendigen Investitionen für Pumpen und somit auch Betriebs- und Wartungskosten vom finalen Entwurf des jeweiligen Wärmeübertragernetzwerks abhängig sind. Konkret heißt dies, dass erst wenn die zu transportierenden Leistungen zwischen Energieangebot und Energienachfrage festgelegt worden sind, eine Bestimmung der diesbezüglichen Pumpleistung in Abhängigkeit der transportierten Wärmeträgermedien (bspw. Wasser) und der Entfernung erfolgen kann. Es muss also definiert sein, welche Wärmequellen mit welchen Wärmesenken verbunden werden sollen.

Zusammenfassend kann also gesagt werden, dass Investitionen, Wartungs- und Betriebskosten für Pumpen und Verrohrung von der Lösung, also dem zu entwerfenden Wärmeübertragernetzwerk, abhängig sind. Zur Abbildung der Faktoren spielt die Entfernung zwischen den zu verbindenden Energieangeboten und Energienachfragern eine Rolle.

Prinzipiell sind zwei Möglichkeiten denkbar, um die zuvor genannten Faktoren bei der Erstellung eines Wärmeübertragernetzwerks auf Basis des Transportalgorithmus nach Cerda et al. (1983) mit einzubeziehen.

Die erste Möglichkeit besteht darin, entsprechende Gleichungen zur Auslegung von Pumpen und zur Dimensionierung von Rohren inklusive Distanzen in den jeweiligen Kostenfaktoren zu hinterlegen. Die notwendige Pumpleistung muss also mit dem notwendigen Druckaufbau in Abhängigkeit dargestellt werden, der erforderlich ist, um die entsprechende Masse des Wärmeträgermediums entsprechend festgesetzter Wärmeleistung zu transportieren. Die Gleichung zur Darstellung von Druckverlusten in Rohren enthält jedoch nicht lineare Terme. Somit wären nicht alle Gleichungen des Problems linear und es würde sich infolgedessen um ein nicht lineares Optimierungsproblem handeln. Nicht lineare Optimierungsprobleme erfordern besonders leistungsfähige Solver und die Lösung nicht linearer Probleme erfordert verglichen mit linearen Optimierungsproblemen deutlich mehr Zeit (Domschke et al. 2015).

Bei der zweiten Möglichkeit werden Investitionen usw. für Pumpen und Verrohrung vereinfacht mitberücksichtigt und spezifiziert dargestellt. Dabei kann es sich beispielsweise um Schätzansätze handeln. Ziel dabei ist es, weiterhin alle Faktoren und Gleichungen des Problems linear darzustellen. Im Rahmen der Arbeit wurde dieser Weg gewählt. Dies wird im Folgenden begründet. Wärmeübertragernetzwerke, die durch den Einsatz von optimierenden Methoden entworfen werden, stellen in der Praxis eher eine Entwurfsgrundlage für die weitere Gestaltung des Netzwerks dar.

Dies ist darin begründet, dass eventuell weitere Entwurfskriterien beim Netzwerkentwurf mitberücksichtigt werden müssen, die nicht im Modell abgebildet werden. Ein Beispiel wären bauliche Einschränkungen bei der Rohrleitungsplanung, die eine Anpassung des Netzwerkentwurfs zur Folge haben kann.

In der wissenschaftlichen Literatur wird daher zwischen „Target Optimization“ und „Design-Optimization“ unterschieden. In der Regel wird zunächst die Zieloptimierung durchgeführt, d. h. es wird ein Netzwerk mit minimalen Kosten oder minimalem Energieverbrauch entworfen. Darauf aufbauend wird das Netzwerk bei der Entwurfsoptimierung im Hinblick auf weitere Kriterien angepasst. Die dabei aufgegriffenen Aspekte befassen sich beispielsweise mit der Verrohrungskomplexität oder der Anzahl an notwendigen Wärmeübertragern. In der wissenschaftlichen Literatur werden auch Ansätze für die Entwurfsoptimierung vorgestellt. Dabei handelt es sich in der Regel um iterative Modelle, die Aspekte der Ziel- und Entwurfsoptimierung miteinander kombinieren. Es ist jedoch nicht trennscharf definiert, welche zu berücksichtigenden Faktoren zur Zieloptimierung und welche zur Entwurfsoptimierung hinzugezählt werden. Beispielsweise kann die Minimierung der Anzahl an Wärmeübertragern direkt in der Zieloptimierung mitberücksichtigt werden (Klemeš und Kravanja 2013).

Im Rahmen dieser Arbeit wird nicht das Ziel verfolgt ein Modell zur Entwurfsoptimierung zu entwickeln, sondern es werden Methoden der Zieloptimierung in den Kontext der Potenzialermittlung für die überbetriebliche Wärmeintegration gestellt. Infolgedessen sind Schätzansätze im Rahmen dieser Arbeit zielführender, denn sie ermöglichen eine lineare Problemformulierung und somit vergleichsweise schnellere Lösungsfindung. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit ein Schätzansatz zur Berücksichtigung von Kostenfaktoren auf Basis von (Ludwig 2012)) implementiert und weiterentwickelt. In den folgenden Unterkapiteln werden die diesbezüglichen Grundlagen zunächst erläutert, bevor auf die konkrete Ausgestaltung im implementierten Modell eingegangen wird. Dabei wird wie im Folgenden aufgelistet vorgegangen:

- Zunächst wird ein Schätzansatz vorgestellt, der dazu dient die maximal austauschbare Energiemenge zwischen zwei Prozessen zu berechnen. Auf dieser Basis werden Kostenfaktoren für Verrohrung geschätzt, die bei der Lösungsfindung mitberücksichtigt werden.
- In dem originären Schätzansatz nach Ludwig (2012) wird davon ausgegangen, dass Wärme betriebsübergreifend transportiert wird, indem die Massenströme der jeweils zugrundeliegenden Prozesse betriebsübergreifend transportiert werden. In der Praxis ist in vielen Fällen jedoch ein indirekter Wärmetransport realistischer. Daher wird der Schätzansatz in einem nächsten Schritt weiterentwickelt, um ggf. auch die indirekte Wärmeübertragung mit zu berücksichtigen.
- Ludwig (2012) präsentiert eine Vorgehensweise zur Berücksichtigung von Kostenfaktoren für Verrohrung. Die Berücksichtigung von Kosten für Arbeitsmaschinen und auftretende Wärmeverluste wird jedoch nur diskutiert und es wird keine Vorgehensweise ausgearbeitet. Diese Lücke wird ebenfalls durch Weiterentwicklungen gefüllt.

Schätzansatz: maximal austauschbare Energiemengen

Ludwig (2012) entwickelt einen Schätzansatz zur Abschätzung von notwendigen Investitionen für die Verrohrungen bei der überbetrieblichen Wärmeintegration. Prinzipiell wird dabei die maximal zwischen zwei Prozessen austauschbare Wärme als Grundlage zur Ableitung von Rohrdimensionen herangezogen.

Die Kosten für diese Rohrleitungen werden dann durch Aufteilen der maximal verfügbaren Wärmemenge den jeweils entsprechenden Energieangeboten und Energienachfragen spezifisch zugeordnet. Dabei können die spezifischen Kosten prinzipiell gleichmäßig auf die zugehörigen Energieangebote und Energienachfragen aufgeteilt werden oder durch Anwendung von Gewichtungsfaktoren.

Im Rahmen dieser Arbeit wird zur Ermittlung der maximal austauschbaren Wärmemenge zwischen zwei Prozessen ($Q_{ij, \text{Schätz}}$) der im Folgenden vorgestellte Ansatz verwendet.

Der Ansatz zur Ermittlung der Wärmemenge $Q_{ij, \text{Schätz}}$ baut grundsätzlich auf drei Schritten auf, wobei sich die ersten beiden Schritte auf die Ermittlung der Wärmemenge beziehen. Grundsätzlich kann ein direkter und ein indirekter Wärmetransport durch den Ansatz abgebildet werden. Im Folgenden werden die drei Schritte daher zunächst für den direkten und im Anschluss für den indirekten Wärmetransport dargestellt.

Ermittlung der geschätzten Volumenströme bei direkter Wärmeübertragung

Zur Ermittlung der maximal austauschbaren Wärmemenge $Q_{ij, \text{Schätz}}$ zwischen einem abzukühlenden Prozess B_j und einem aufzuheizenden Prozess A_i werden die Temperaturen der jeweiligen Prozesse betrachtet.

Im ersten Schritt werden die Ein- und Austrittstemperaturen für alle Kombinationen der Prozesse B_j und A_i abgeglichen, um jede Kombination anhand unterschiedlicher Fälle zu kategorisieren. Diese Kategorisierung ist notwendig, da die maximal austauschbare Wärmemenge zwischen den Prozessen je Fall unterschiedlich berechnet wird. Auf Basis der Kategorisierung werden Temperaturen definiert, die im Folgenden Schätztemperaturen genannt werden und mit deren Hilfe die maximal austauschbare Wärmemenge zwischen den Prozessen ermittelt wird. Hierfür wird die Ein- und Austrittstemperatur eines abzukühlenden Prozesses mit $T_{j, \text{ein}}$ und $T_{j, \text{aus}}$ bezeichnet. Für die aufzuheizenden Ströme werden die Temperaturen äquivalent mit $T_{i, \text{ein}}$ und $T_{i, \text{aus}}$ bezeichnet. Grundsätzlich kann das Verhältnis der Temperaturen zueinander entsprechend der fünf Fälle in Tabelle 30 zusammengefasst werden. Die Fälle 1 bis 4 erlauben grundsätzlich einen Wärmetransport zwischen B_j und A_i .

Tabelle 30: Fälle für die Temperaturüberlappung.

Fallvisualisierung	Prüfbedingungen	Temperaturen zur Berechnung von $Q_{ij,Schätz}$
	Fall 1 - $T_{j,ein} - \Delta T_{min} \geq T_{i,aus}$ und - $T_{j,aus} - \Delta T_{min} \geq T_{i,ein}$	- N.V.
	Fall 2 - $T_{j,ein} - \Delta T_{min} \geq T_{i,aus}$ und - $T_{i,ein} \geq T_{j,aus} - \Delta T_{min}$ und	- $T_{einSchätz,ij} = T_{i,ein}$ - $T_{ausSchätz,ij} = T_{i,aus}$
	Fall 3 - $T_{j,ein} - \Delta T_{min} < T_{i,aus}$ und - $T_{i,ein} < T_{j,ein} - \Delta T_{min}$ und - $T_{i,ein} \geq T_{j,aus} - \Delta T_{min}$	- $T_{einSchätz,ij} = T_{i,ein}$ - $T_{ausSchätz,ij} = T_{j,ein} - \Delta T_{min}$
	Fall 4 - $T_{i,aus} \geq T_{j,ein} - \Delta T_{min}$ und - $T_{i,ein} \leq T_{j,aus} - \Delta T_{min}$	- $T_{einSchätz,ij} = T_{j,aus}$ - $T_{ausSchätz,ij} = T_{j,ein}$
	Fall 5 sonst, bzw. - $T_{i,ein} \geq T_{j,ein} - \Delta T_{min}$	- N.V.

- Bei Fall 1 liegt die Eintrittstemperatur des abzukühlenden Prozesses B_j über der Austrittstemperatur des aufzuheizenden Prozesses A_i und die Austrittstemperatur von B_j liegt über der Eintrittstemperatur von A_i . Die maximal übertragbare Wärmemenge zwischen den Prozessen ist somit entweder durch die maximale Wärmemenge, die A_i aufnehmen kann, bestimmt oder durch die maximale Wärmemenge, die B_j abgeben kann. Infolgedessen ergibt sie sich aus der kleineren der beiden Wärmemengen. Für Fall 1 ist die Definition von Schätztemperaturen zur Bestimmung der maximal austauschbaren Energiemenge somit nicht notwendig.
- Bei den Fällen 2 bis 4 kann immer nur ein Teil der Wärmemenge von B_j oder A_i zwischen den Prozessen übertragen werden. Zur Berechnung dieser Wärmemenge ist die Definition von Schätztemperaturen notwendig, die im Folgenden mit $T_{einSchätz,ij}$ und $T_{ausSchätz,ij}$ bezeichnet werden. Die je Fall entsprechende Belegung ist ebenfalls in Tabelle 30 aufgeführt.
- Bei Fall 5 liegt die Eingangstemperatur des abzukühlenden Prozesses unter der Eingangstemperatur des aufzuheizenden Prozesses. Eine Wärmeübertragung zwischen den Prozessen ist somit nicht möglich und daher werden keine Schätztemperaturen definiert.

Im zweiten Schritt wird die maximal austauschbare Energiemenge $Q_{ij,Schätz}$ für alle Kombinationen von B_j und A_i entsprechend vorliegendem Fall bestimmt. Liegt Fall 1 vor, so wird $Q_{ij,Schätz}$ mit dem Betrag der kleineren der beiden Wärmemengen B_j und A_i belegt. Für die Fälle 2, 3 und 4 werden zunächst die Energiemengen des jeweils abzukühlenden und aufzuheizenden Prozesses innerhalb des Temperaturbereichs $T_{einSchätz,ij}$ und $T_{ausSchätz,ij}$ analog der Gleichungen (5.15) und (5.16) berechnet. Die spezifische Wärmekapazität wird dabei im Temperaturbereich als konstant angenommen.

$$A_{ij,Schätz} = \dot{m}_i \cdot c_{p,i} \cdot (T_{ausSchätz,ij} - T_{einSchätz,ij}) \quad (5.15)$$

$$B_{ji,Schätz} = \dot{m}_j \cdot c_{p,j} \cdot (T_{einSchätz,ij} - T_{ausSchätz,ij}) \quad (5.16)$$

Dabei ist zu beachten, dass die Gleichungen für den Fall ohne Phasenübergänge dargestellt sind. Finden Phasenübergänge statt, so werden die Energiemengen zuzüglich Verdampfungs- bzw. Kondensationsenthalpie berechnet. Die spezifischen Wärmekapazitäten werden dann jeweils in der flüssigen bzw. gasförmigen Phase konstant angenommen. Der Fall mit Phasenwechsel für den aufzuheizenden Prozess ist beispielsweise in Gleichung (5.17) dargestellt. Zur Darstellung werden im Folgenden ausschließlich Fälle ohne Phasenwechsel verwendet.

$$A_{ij,Schätz-PW} = \dot{m}_i \cdot [c_{p,fl,i} \cdot (T_{Siede} - T_{einSchätz,ij}) + dhv + c_{p,gas,i} \cdot (T_{ausSchätz,ij} - T_{Siede})] \quad (5.17)$$

In einem weiteren Schritt wird $Q_{ij,Schätz}$ für die Fälle 2, 3 und 4 entsprechend Gleichung (5.18) bestimmt.

$$Q_{ij,Schätz} = \begin{cases} \min\{A_i; B_j\} & \text{Für Fall 1} \\ \min\{A_{ij,Schätz}; B_{ji,Schätz}\} & \text{Für die Fälle 2, 3, und 4} \\ 0 & \text{Für Fall 5} \end{cases} \quad (5.18)$$

Im dritten Schritt wird der zu transportierende Volumen- und Massenstrom auf Basis von $Q_{ij,Schätz}$ bestimmt. Beim direkten Transport wird von keiner Übertragung von Wärme- auf ein Wärmeträgermedium ausgegangen und somit sind die stofflichen Werte der Medien von Prozess A_i und B_j für die Berechnung relevant.

Für die Prozessführung zum Austausch von Wärme zwischen dem abzukühlenden und aufzuheizenden Prozess gibt es nun grundsätzlich zwei Möglichkeiten. Entweder der Massenstrom des aufzuheizenden Prozesses wird zum abzukühlenden Prozess transportiert, oder dies geschieht andersherum. Zum Transport der Massenströme werden Arbeitsmaschinen, respektive Pumpen oder Verdichter eingesetzt. Der apparative Aufwand, der sich in der notwendigen Investition für Pumpen oder Verdichter äußert, hängt vom zu fördernden Volumenstrom ab. Grundsätzlich steigen die notwendigen Investitionen mit steigenden Volumenströmen. Deshalb wird auf Basis von $Q_{ij,Schätz}$ zunächst ermittelt, welcher Volumenstrom jeweils vom abzukühlenden und aufzuheizenden Prozess notwendig wäre, um die

geschätzte Energiemenge $Q_{ij,Schätz}$ bereitzustellen. Dabei wird im Gegensatz zu (Ludwig 2012) jedoch nicht angenommen, dass der zu transportierende Massenstrom lediglich die Hälfte des von ihm abgedeckten Temperaturbereichs durchläuft, sondern den ganzen Bereich. Die zugrundeliegenden Massenströme für beide Varianten der Prozessführung ergeben sich somit durch die Gleichungen (5.19) und (5.20).

$$\dot{m}_{ij,Schätz(kalt \rightarrow heiss)} = \frac{Q_{ij,Schätz}}{c_{p,i} \cdot (T_{ausSchätz,ij} - T_{einSchätz,ij})} \quad (5.19)$$

$$\dot{m}_{ij,Schätz(heiss \rightarrow kalt)} = \frac{Q_{ij,Schätz}}{c_{p,j} \cdot (T_{einSchätz,ij} - T_{ausSchätz,ij})} \quad (5.20)$$

In einem darauf aufbauenden Schritt werden die entsprechend zu transportierbaren Volumenströme für beide Varianten entsprechend Gleichungen (5.21) und (5.22) ermittelt. Dabei stellt $\rho_{i/j}$ jeweils die Dichten des abzukühlenden oder aufzuheizenden Mediums dar.

$$V_{ij,Schätz(heiss \rightarrow kalt)} = \frac{\dot{m}_{ij,Schätz(heiss \rightarrow kalt)}}{\rho_i} \quad (5.21)$$

$$V_{ij,Schätz(kalt \rightarrow heiss)} = \frac{\dot{m}_{ij,Schätz(kalt \rightarrow heiss)}}{\rho_j} \quad (5.22)$$

Zu beachten ist, dass auch hier Fälle mit Phasenwechsel differenzierter berechnet werden, indem zwischen Flüssig- und Gasphase unterschieden wird und die Verdampfungs- bzw. Kondensationsenthalpie mitberücksichtigt wird. Für die Prozessführung wird abschließend angenommen, dass der kleinere der beiden Volumenströme transportiert wird (vgl. (5.23)).

$$V_{ij,Schätz} = \min\{V_{ij,Schätz}(A_i); V_{ij,Schätz}(B_j)\} \quad (5.23)$$

Ermittlung der geschätzten Volumenströme bei indirekter Wärmeübertragung

Bei der Nutzung von Wärme über Standortgrenzen hinweg ist der standortübergreifende Transport von Massenströmen, die direkt den Prozessen entstammen, häufig in der petrochemischen oder der chemischen Industrie anzufinden. Dabei handelt es sich in der Regel um Betriebskomplexe, die mehrere Produktionshallen wärmetechnisch integrieren, jedoch zu demselben Unternehmen gehören.

Im Rahmen dieser Arbeit sollen jedoch insbesondere die noch nicht umgesetzten Möglichkeiten zur überbetrieblichen Wärmeintegration adressiert werden, bspw. die Nutzung von heißen Abgasen aus Gießereien zur Wärmeversorgung benachbarter Produktionsstandorte. In einer solchen Konstellation, bestehend aus Standorten, die zum einen zu anderen Firmen und zum anderen eventuell zu unterschiedlichen Industrien gehören, ist ein indirekter Wärmetransport über Betriebsgrenzen die technisch weniger komplexe Lösung und würde daher voraussichtlich bevorzugt werden.

Zur Abbildung der indirekten Wärmeintegration muss grundsätzlich errechnet werden, wie viel Energie potenziell an ein Wärmeträgermedium übertragen werden kann. Im Rahmen dieser Arbeit wird hierfür angenommen, dass die Wärmeübertragung entweder auf einen Heißwasser- oder einen Dampfstrom bei

5 bar erfolgt. Dabei wird davon ausgegangen, dass der Wasser- oder Dampfstrom am Standort des Energieangebots erwärmt wird und anschließend zum Standort der Energienachfrage transportiert wird.

Hierfür erfolgt im ersten Schritt wieder eine Kategorisierung der Prozesse B_j und A_i anhand unterschiedlicher Fälle. Die Kategorisierung wird dabei äquivalent zur Vorgehensweise bei direkter Wärmeübertragung vorgenommen, mit dem einzigen Unterschied, dass bei den Prüfbedingungen die treibende Temperaturdifferenz doppelt berücksichtigt werden muss. Dies ist darin begründet, dass bei indirekter Wärmeübertragung zwei anstatt einem Wärmeübertrager notwendig sind. Der erste Wärmeübertrager überträgt dabei Wärme vom abzukühlenden Prozess auf das Wärmeträgermedium und der zweite Wärmeübertrager überträgt die Wärme vom Wärmeträgermedium schließlich auf den aufzuheizenden Prozess. Für Fall 1 wären die Prüfbedingung in Tabelle 30 somit beispielsweise:

$$T_{j,ein} - 2 \cdot \Delta T_{min} \geq T_{i,aus} \text{ und } T_{j,aus} - 2 \cdot \Delta T_{min} \geq T_{i,ein}.$$

Im zweiten Schritt erfolgt dann wieder äquivalent zur Vorgehensweise bei direkter Wärmeübertragung die Ermittlung der Wärmemenge $Q_{ij,Schätz}$. Im dritten Schritt wird auf Basis von $Q_{ij,Schätz}$ schließlich der notwendige Massen- und Volumenstrom zum Transport der Wärme errechnet. Dabei werden drei Fälle entsprechend Tabelle 31 unterschieden.

Tabelle 31: Ermittlung des Massenstromes – indirekter Wärmetransport.

Fall 1: Heiß- und Dampfwaterstrom
Prüfbedingung: $T_{j,ein} \geq 150 + \Delta T_{min}$ und $T_{j,aus} < 150 + \Delta T_{min}$, mit $\dot{m}_{ij,Schätz} = \frac{Q_{ij,Schätz}}{[c_{p,H2O\ fl.} \cdot \Delta T_1 + dhv_{H2O(5bar)} + c_{p,H2O\ gas} \cdot \Delta T_2]}$ $\Delta T_1 = 150 - (T_{j,aus} - \Delta T_{min}) \text{ und } \Delta T_2 = (T_{j,ein} - \Delta T_{min}) - 150$
Fall 2: Nur Heißwaterstrom
Prüfbedingung: $T_{j,ein} \leq 150$ und $T_{j,aus} \leq 150$, mit $\dot{m}_{ij,Schätz} = \frac{Q_{ij,Schätz}}{c_{p,H2O\ fl.} [(T_{j,ein} - \Delta T_{min}) - (T_{j,aus} - \Delta T_{min})]}$
Fall 3: Nur Dampfstrom
Prüfbedingung: $T_{j,ein} \geq 150 + \Delta T_{min}$ und $T_{j,aus} \geq 150$, mit $\dot{m}_{ij,Schätz} = \frac{Q_{ij,Schätz}}{c_{p,H2O\ fl.} [(T_{j,ein} - \Delta T_{min}) - (T_{j,aus} - \Delta T_{min})]}$

Zuordnen zu Kostenfaktoren

Die in den vorangegangenen Abschnitten errechneten Massen- und Volumenströme dienen grundsätzlich der wirtschaftlichen Bewertung des Transports von Wärme zwischen einem abzukühlenden Prozess B_j und A_i . Wie bereits zuvor erläutert können Kostenfaktoren in der hier betrachteten Modellstruktur nur dann betrachtet werden, wenn sie spezifisch in Geldeinheit je Leistung den jeweils möglichen Kombinationen von Energieangeboten und Energienachfragen zugeordnet werden. Die gebildeten Energienachfragen und Energieangebote (vgl. Kapitel 5.2.2) müssen somit mit

den geschätzten Massen- und Volumenströmen der Schätzwärme $Q_{ij,Schätz}$ in Relation gebracht werden. Dies geschieht in zwei Schritten.

In einem ersten Schritt wird bestimmt, wie viel Energie maximal von Energieangebot b_{jl} zu Energienachfrage a_{ik} transportiert werden kann. Diese Energiemenge ergibt sich aus dem Minimum der betrachteten Kombination von Energienachfrage und Energieangebot und somit entsprechend Gleichung (5.24).

$$q_{max,ik,jl} = \min\{b_{jl}; a_{ik}\} \quad (5.24)$$

Im zweiten Schritt wird der zuvor bestimmten Energiemenge ein Massenstrom zwecks Abbildung von Kostenfaktoren zugeordnet. Als Grundlage hierfür wird der Massenstrom $\dot{m}_{ij,Schätz}$ der Prozesskombination B_j und A_i herangezogen, die den jeweiligen Energienachfragen und Energieangeboten zugrundeliegt. Die Allokation des Massenstromes $\dot{m}_{ij,Schätz}$ zu der jeweiligen Kombination von Energienachfrage a_{ik} und Energieangebot b_{jl} erfolgt dann proportional entsprechend Gleichung (5.25).

$$\dot{m}_{Schätz,jl,ik} = \frac{q_{max,ik,jl}}{Q_{ij,Schätz}} \cdot \dot{m}_{ij,Schätz} \quad (5.25)$$

Kostenfaktor Verrohrung

In Abhängigkeit des Wärmeträgermediums des heißen (abzukühlenden) Prozesses und der Entfernung zwischen den Prozessen wird nun der notwendige Rohrleitungsdurchmesser bestimmt, um den Massenstrom $\dot{m}_{Schätz,jl,ik}$ zu fördern. Für die Berechnung wird eine Fließgeschwindigkeit von 25 m/s angenommen, die bei Dampfsystemen üblich ist. Die Dichte des Wärmeträgermediums wird mit ρ_j bezeichnet. Dabei wird die Dichte in dem jeweiligen Temperaturbereich konstant angenommen. Kommt es zur Verdampfung in dem Überlappungsbereich, so wird der Mittelwert aus der Dichte der Flüssigphase und der Gasphase zur Berechnung herangezogen. Der notwendige Durchmesser ergibt sich schließlich entsprechend Gleichung (5.26).

$$d_{Schätz,jl,ik} [m] = 2 \cdot \sqrt{\frac{\dot{m}_{Schätz,jl,ik}}{\rho_{j/i} \cdot 25}} \quad (5.26)$$

Der ermittelte Durchmesser wird schließlich auf gängige DN-Größen aufgerundet (vgl. Gleichung (5.27(5.26))), um entsprechende Anschaffungspreise zuordnen zu können. Zudem wird auch eine Dämmung für die fiktive Rohrleitung nach Energieeinsparverordnung (EnEV 2014) angenommen.

$$DN_{jl,ik} \approx d_{Schätz,jl,ik} \quad (5.27)$$

Die geschätzte Annuität der Investitionen zuzüglich Betriebs- und Wartungskosten $I_{R,jl,ik}$ für die fiktive Rohrleitung wird schließlich entsprechend Gleichung (5.28) abgebildet.

Tabelle 32: Annuität der Investition für Verrohrung .

$I_{R,jl,ik} [EUR] = \left(L_{i,j} [m] \cdot \left(sk_{R,jl,ik} + sk_{DN,jl,ik} \left[\frac{EUR}{m} \right] \right) \right) \cdot (1 + s_V[-]) \cdot LA \quad (5.28)$	
Mit,	
$sk_{R,jl,ik}$	Spezifischer Anschaffungspreis Rohrleitung für $DN_{jl,ik}$
$sk_{DN,jl,ik}$	Spezifischer Anschaffungspreis Dämmung für $DN_{jl,ik}$
sk_v	Spezifischer Faktor für Verlegung, Armaturen usw.
RWM	Faktor für Restwertmethode inklusive Wartung (siehe Gl. (5.14))

Die geschätzte Annuität der Investitionen zuzüglich Betriebs- und Wartungskosten $I_{R,jl,ik}$ wird abschließend verwendet, um einen spezifischen Kostenfaktor für Rohrleitungen $c_{R,jl,ik}$ für jede Kombination von Energienachfrage a_{ik} und Energieangebot b_{jl} zu definieren. Dies geschieht, indem $I_{R,jl,ik}$ entsprechend Gleichung (5.29) auf $q_{max,ik,jl}$ bezogen wird.

$$c_{R,jl,ik} \left[\frac{EUR}{W} \right] = \frac{I_{R,jl,ik}}{q_{max,ik,jl}} \quad (5.29)$$

Bei dem Ansatz zur Ermittlung des notwendigen Durchmessers ist zu erwähnen, dass es sich um einen Schätzansatz handelt. Dieser Ansatz hat das Ziel, Kosten für Verrohrungen im Modell mit zu berücksichtigen. Die ermittelten Durchmesser spiegeln keineswegs Größen wider, die im konkreten Auslegungsfall durch eine Rohrleitungsplanung ermittelt werden würden. Dies wird im Folgenden erläutert.

Unter der Annahme, dass mehrere Energieangebote b_{jl} ein und desselben abzukühlenden Prozesses B_j und mehrere Energienachfragen a_{ik} ein und desselben aufzuheizenden Prozesses A_i miteinander verknüpft werden, ergeben sich die Kostenfaktoren wie folgt. In dem Modell werden Kostenfaktoren gebildet, indem für jede Verbindung zwischen Energieangebot und Energienachfrage der entsprechende Durchmesser gebildet wird und die Kosten entsprechend der zuvor erläuterten Methodik abgeschätzt werden. In einer tatsächlichen Rohrleitungsplanung würden die Energieangebote und Energienachfragen viel mehr in einem Rohr zusammengefasst werden, wenn Start und Ziel identisch wären. Dies hätte eine andere Geometrie zur Kostenabschätzung zur Folge. Der geometrische Unterschied ist in Abbildung 12 visuell dargestellt.

Zudem fällt auf, dass immer nur ein Rohr je Verbindung zwischen Energieangebot und Energienachfrage modelliert wird. Das transportierte Wärmeträgermedium müsste jedoch unter Umständen zur Quelle zurück transportiert werden. Dies wird jedoch aufgrund der folgenden zwei Gründe vernachlässigt. Zum einen wird wie schon zuvor erwähnt die Anzahl der Rohre eher überschätzt, da nicht Verbindungen zwischen Prozessen, sondern Energieangeboten und Energienachfragen als Grundlage für die Dimensionierung der Rohrleitungen angenommen werden. Zum anderen ist das Ziel von Wärmeintegration eine kaskadenartige Führung der Wärme- und Kälteversorgung zu erreichen, um möglichst wenig Energie ungenutzt zu lassen. Dies führt im Idealfall dazu, dass nicht zwingend Rohre zur Rückströmung notwendig sind, sondern Wärme auf niedrigeren Temperaturniveaus zu anderen Prozessen weitergeleitet wird.

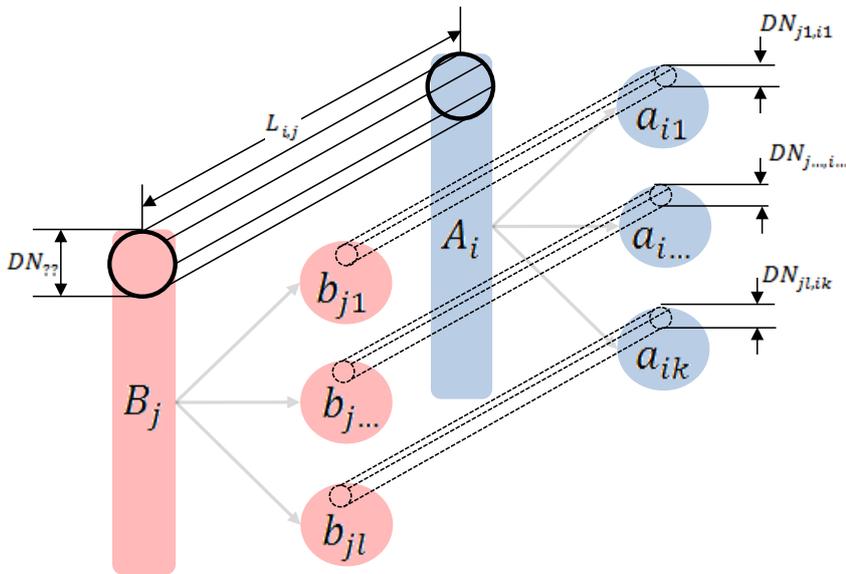


Abbildung 12: Geometrische Grundlage zur Schätzung von Kosten für Verrohrung

Zusammenfassend werden nochmal die wichtigsten Vereinfachungen, die bei der Bildung des Kostenfaktors für Verrohrungen angenommen werden, im Folgenden aufgelistet.

- Die Verrohrungsgeometrie basiert nicht auf Prozessströmen, sondern Energienachfragen und Energieangeboten und ist somit vereinfacht. Tendenziell wird die Anzahl der Rohre überschätzt.
- Skaleneffekte, bspw. geringere Anschaffungspreise, wenn viele Rohre im System vorhanden sind, können nicht abgebildet werden.

Kostenfaktor Arbeitsmaschinen

Im folgenden Abschnitt wird die Festlegung von spezifischen Kosten für Arbeitsmaschinen zur Förderung von Fluiden erörtert. Dabei kann es sich prinzipiell entweder um Pumpen zur Förderung flüssiger Medien handeln oder um Verdichter zur Förderung gasförmiger Fluide.

Investitionen für Arbeitsmaschinen

Investitionen für Pumpen und Verdichter werden in Kostenhandbüchern üblicherweise vom zu fördernden Volumenstrom abhängig gemacht. In einem Kostenhandbuch, das im Energieministerium der Vereinigten Staaten (amtl. United States Department of Energy, DOE) erstellt wurde, werden Beschaffungs- und Installationskosten für Kreiselpumpen und Radialverdichter tabellarisch angegeben (vgl. Loh H.P. et al. 2002). Für beide Komponenten lässt sich durch eine Regressionsanalyse ein linearer Trend der Beschaffungs- und Installationskosten in Abhängigkeit der zu fördernden Volumenströme ableiten.

Infolgedessen wurden Investitionen für Pumpen oder Verdichter im Modell prinzipiell in Abhängigkeit der möglicherweise zu fördernden Volumenströme dargestellt. Dabei wurden jedoch keine fixen Kosten mitberücksichtigt, die sich bspw. ergeben würden, wenn man die linearen Zusammenhänge aus Loh H.P. et al. (2002) komplett übernehmen würde. Dies hat die folgenden zwei Gründe. Werden mögliche Investitionen für Pumpen in dem Modell abgeschätzt, so geschieht dies in Anlehnung an die in Abbildung

12 vorgestellte Geometrie. Es wird also für jedes Rohr eine fiktive Pumpe gesetzt. In der praktischen Umsetzung würde es sich vielmehr um ein Rohrleitungssystem handeln, indem der notwendige Druck über weniger und größere Pumpen bzw. Verdichter bereitgestellt werden würde. Zudem wird wie bereits erwähnt die Anzahl der Rohre eher überschätzt. Investitionen für Pumpen werden daher in Anlehnung an die zuvor erläuterte ‚fiktive‘ Rohrleitungsgeometrie entsprechend Gleichung (5.30) ermittelt. Dabei werden die Investitionen prinzipiell ausschließlich vom potenziell zu fördernden Volumenstrom dargestellt.

Tabelle 33: Annuität der Investition für Arbeitsmaschinen.

$I_{P,jl,ik} [EUR] = sk_{P/V} \left[\frac{EUR}{\frac{m^3}{s}} \right] \cdot \frac{\dot{m}_{Schätz,jl,ik} \left[\frac{kg}{s} \right]}{\rho_j \left[\frac{kg}{m^3} \right]} \cdot LA \quad (5.30)$	
Mit,	
$sk_{P/V}$	Spezifische Anschaffungsinvestition für Pumpen/Verdichter
RWM	Faktor für Restwertmethode inklusive Wartung (siehe Gl. (5.14))

Die geschätzten Investitionen werden schließlich auf die maximale Energieübertragung zwischen dem jeweils zugehörigen Energieangebot und der zugehörigen Energienachfrage bezogen (vgl. Gleichung (5.31)).

$$c_{P/V_Inv,jl,ik} \left[\frac{EUR}{W} \right] = \frac{I_{P,jl,ik}}{q_{max,ik,jl}} \quad (5.31)$$

Betriebskosten für Pumpen

Pumpen wirken dem Druckverlust entgegen, den ein zu förderndes Fluid erfährt, wenn es durch eine Rohrleitung strömt. Der energetische Aufwand zum Betrieb von Pumpen kann somit prinzipiell von der Geometrie und den Materialeigenschaften der Verrohrung, dem zu fördernden Massenstrom und stofflichen Eigenschaften des zu fördernden Fluides abhängig gemacht werden. Auch hier wird wieder die in Abbildung 12 vorgestellte Rohrleitungsgeometrie angenommen. Für ein Fluid mit annähernd konstanter Dichte wird der Druckverlust in einem Rohr üblicherweise entsprechend Gleichung (5.32) dargestellt. Der dargestellte Zusammenhang fußt dabei auf empirischen Beobachtungen (vgl. Wagner 2001).

Tabelle 34: Druckverlustes für Rohre.

$\Delta p_{12} [Pa] = \frac{\rho \cdot u_m^2}{2} \cdot \left(\lambda \cdot \frac{L}{D} + \sum \zeta_i \right) \quad (5.32)$	
Mit,	
ρ	Dichte des Fluides in kg/m ³
u_m	mittlere Geschwindigkeit des Fluides in m/s
λ	Rohrreibungszahl
D	hydraulischer Durchmesser der Rohrleitung in m
ζ_i	Beiwerte für zusätzliche Druckverluste (bspw. durch Ventile)

Der Druckverlust lässt sich ebenfalls in Abhängigkeit des Massenstroms und der Dichte darstellen. Bezogen auf die in Abbildung 12 vorgestellte Rohrleitungsgeometrie ergibt sich für den Druckverlust die Gleichung (5.33).

$$\Delta p_{P,jl,ik} [Pa] = 8 \cdot \frac{\dot{m}_{Schätz,jl,ik}^2}{\rho_j \cdot D_{jl,ik}^4 \cdot \pi^2} \cdot \left(\lambda \cdot \frac{L_{i,j}}{D_{jl,ik}} + \sum \zeta_i \right) \quad (5.33)$$

Zur Berechnung des Leistungsbedarfs einer Pumpe kann die sogenannte Förderhöhe H herangezogen werden (vgl. Spurk und Aksel 2010). Im Rahmen der Arbeit werden geodätische Höhenunterschiede vernachlässigt. Zudem werden die Querschnitte im Rohr nicht verändert und es wird daher vereinfacht von einer konstanten Geschwindigkeit des Fluids im Rohr ausgegangen ($u = const$). Bezogen auf die in Abbildung 12 vorgestellte Rohrleitungsgeometrie ergibt sich somit die notwendige elektrische Leistung an der Pumpe entsprechend Gleichung (5.34).

$$P_{jl,ik} [W] = \frac{H \cdot \rho_j \cdot g \cdot \dot{V}}{\eta_P} = \frac{(\dot{m}_{Schätz,jl,ik}) \left[\frac{kg}{s} \right] \cdot \Delta p_{P,jl,ik} \left[\frac{N}{m^2} \right]}{\eta_P \cdot \rho_j \left[\frac{kg}{m^3} \right]} \quad (5.34)$$

Dabei stellt η_P den Wirkungsgrad der Pumpe inklusive elektrischem Antriebsmotor dar ($\eta_P = \eta_{Pumpe} \cdot \eta_{ElektroMotor}$). Der elektrische Leistungsbedarf wird schließlich zur Definition eines Kostenfaktors zum Betrieb der Pumpe herangezogen. Dabei werden die Kosten ebenfalls wie die Investition auf die maximale Energieübertragung zwischen dem jeweils zugehörigen Energieangebot und der zugehörigen Energienachfrage bezogen (vgl. (5.35)).

Tabelle 35: Kostenfaktor – Betriebskosten Pumpen.

$c_{PuBetr,jl,ik} \left[\frac{EUR}{W} \right] = \frac{P_{jl,ik} [W] \cdot sk_{Strom} \left[\frac{EUR}{Wh} \right] \cdot BeStd [h]}{q_{max,ik,jl} [W]} \quad (5.35)$	
Mit,	
sk_{Strom}	spezifische Stromkosten
$BeStd$	jährliche angenommene Betriebsstunden

Betriebskosten für Verdichter

Der in Gleichung (5.32) vorgestellte Zusammenhang gilt nur für Fluide mit annähernd konstanter Dichte. Verdichter fördern Fluide in der gasförmigen Phase. Durch Abkühlung in den Rohrleitungen kann sich die Dichte demnach maßgeblich ändern und prinzipiell ist die Annahme einer konstanten Dichte für die Berechnung des Druckverlusts ungenau. Es existieren daher alternative Berechnungsmethoden für die Berechnung des Druckverlusts kompressibler Fluide (vgl. Sigloch 2012). Im Rahmen der Arbeit wird dies jedoch vernachlässigt. Druckverluste und entsprechende Betriebskosten werden identisch zu der Berechnung für Pumpen ermittelt. Befindet sich das Fluid in der gasförmigen Phase, so wird die Dichte zur Berechnung als konstant angenommen.

Kostenfaktor Pumpen oder Verdichter insgesamt

Die Kostenfaktoren für Betrieb und Investition für Pumpen werden abschließend in einen gemeinsamen Kostenfaktor für Pumpen für die jeweiligen Energienachfragen und Energieangebote überführt (vgl. (5.36)).

$$c_{P/V,jl,ik} \left[\frac{EUR}{W} \right] = c_{PuBetr,jl,ik} + c_{P/V_Inv,jl,ik} \quad (5.36)$$

Zusammenfassend werden nochmal die wichtigsten Vereinfachungen, die bei der Bildung des Kostenfaktors für Arbeitsmaschinen angenommen werden, im Folgenden aufgelistet.

- Es werden keine fixen Investitionen in den Kostenfunktionen hinterlegt, da dies mit der vorhandenen Modellstruktur nicht zielführend vereinbar wäre.
- Für gasförmige Medien wird von konstanten Dichten beim Transport ausgegangen, bzw. es werden Druckverlustterme für inkompressible Fluide angewendet. Dies ist eine Vereinfachung.

Kostenfaktor Wärmeverluste

Im Folgenden wird dargestellt, wie auftretende Wärmeverluste im Modell berücksichtigt werden. Dabei werden zunächst Grundlagen zu Wärmeverlusten eingeführt, bevor die Implementierung von Wärmeverlusten im Modell dargestellt wird.

Wärmeverlustgleichungen für das Modell

Der Transport von Wärme setzt einen Temperaturgradienten zwischen zwei Stoffen voraus. Wärmetransport kann grundsätzlich über drei Mechanismen erfolgen. Beim ersten Mechanismus, der Wärmeleitung, wird Wärme durch Kontakt zwischen zwei Feststoffen übertragen. Beim zweiten Mechanismus, der Konvektion, wird Wärme von einem strömenden Fluid an die Umgebung übertragen. Beim dritten Mechanismus, der Wärmestrahlung, wird Wärme durch elektromagnetische Strahlung an die Umgebung übertragen.

Zur Ermittlung der Wärmeübertragung eines technischen Systems an die Umgebung kann der sogenannte Wärmeübergangswiderstand herangezogen werden. Dabei ist ein Wärmeübergangswiderstand R_α definiert als Kehrwert der Wärmeübergangszahl α , welche die Intensität des Wärmeübergangs an einer Grenzfläche darstellt (in $\frac{W}{m^2 \cdot K}$). Die Wärmeübergangszahl lässt sich dabei für den jeweiligen Mechanismus differenziert berechnen. Ein Wärmeverlust Q_w , der durch eine treibende Temperaturdifferenz ΔT an einer Übertragungsfläche entsteht, lässt sich dann entsprechend Gleichung (5.37) bestimmen (Herwig und Moschallski 2009).

$$R_\alpha = \frac{\Delta T}{Q_w} = \frac{1}{\alpha \cdot A} \quad (5.37)$$

In technischen Systemen treten die drei Wärmeverlustmechanismen nebeneinander auf. Für das Gesamtsystem kann der Wärmeverlust dann durch Ermittlung des Wärmewiderstands für das gesamte

System ermittelt werden. Hierfür werden sämtliche einzelne Wärmeübergangswiderstände in einem Netzwerk analog zur Elektrotechnik dargestellt und in einen Gesamtwiderstand überführt. Bei der Gestaltung des Netzwerks werden dabei die Widerstände je nach Lage des Auftretens im System entweder seriell oder parallelgeschaltet. Zur Ermittlung des Gesamtwiderstands werden schließlich seriell auftretende Widerstände addiert, bei Auftreten von parallelen Widerständen werden die Kehrwerte der Widerstände addiert (Incropera 2007). Eine Anwendung für die Fragestellung des isolierten Rohres ist im folgenden Abschnitt zwecks Modelleinbindung durchgeführt.

Wird angenommen, dass Innen- und Außentemperatur des durchströmten Rohres konstant sind kann, dann das System grundsätzlich als stationär angenommen werden. Das angenommene frei verlegte, durchströmte isolierte Rohr mit entsprechenden Bezeichnungen der Radien ist in Abbildung 13 dargestellt.

Für ein frei verlegtes Rohr ergibt sich dann das entsprechende Wärmewiderstandsnetzwerk in Tabelle 36.

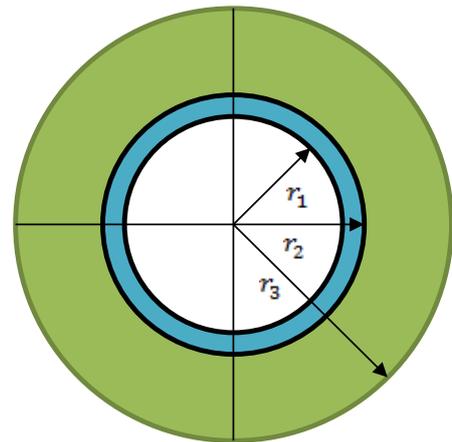


Abbildung 13: Isoliertes Rohr mit Bezeichnung verwendeter Radien

Tabelle 36: Wärmewiderstandsnetzwerk für ein frei verlegtes Rohr.

<p>0 → 1: Konvektion zwischen Wärmeträgerfluid und Innenwand Rohr 1 → 2: Wärmeleitung im Rohr zwischen r_1 und r_2 2 → 3: Wärmeleitung in der Isolierung zwischen r_2 und r_3 3 → 4: Konvektion und Wärmestrahlung zwischen Isolierung und Umgebung</p>

Der Gesamtwiderstand für das Widerstandsnetzwerk ergibt sich schließlich entsprechend Gleichung (5.38).

$$R_{Ges, frei} = R_{KONV,01} + R_{WLEIT,12} + R_{WLEIT,23} + \left(\frac{1}{R_{KONV,34}} + \frac{1}{R_{STRAHL,34}} \right)^{-1} \quad (5.38)$$

Der Wärmeverlust des Systems Q_{WV} kann nun grundsätzlich entsprechend Gleichung (5.39) dargestellt werden, wobei T_0 die Temperatur des Wärmeträgerfluids bezeichnet und T_u die Umgebungstemperatur.

$$Q_{WV, frei} = \frac{T_0 - T_u}{R_{Ges, frei}} \quad (5.39)$$

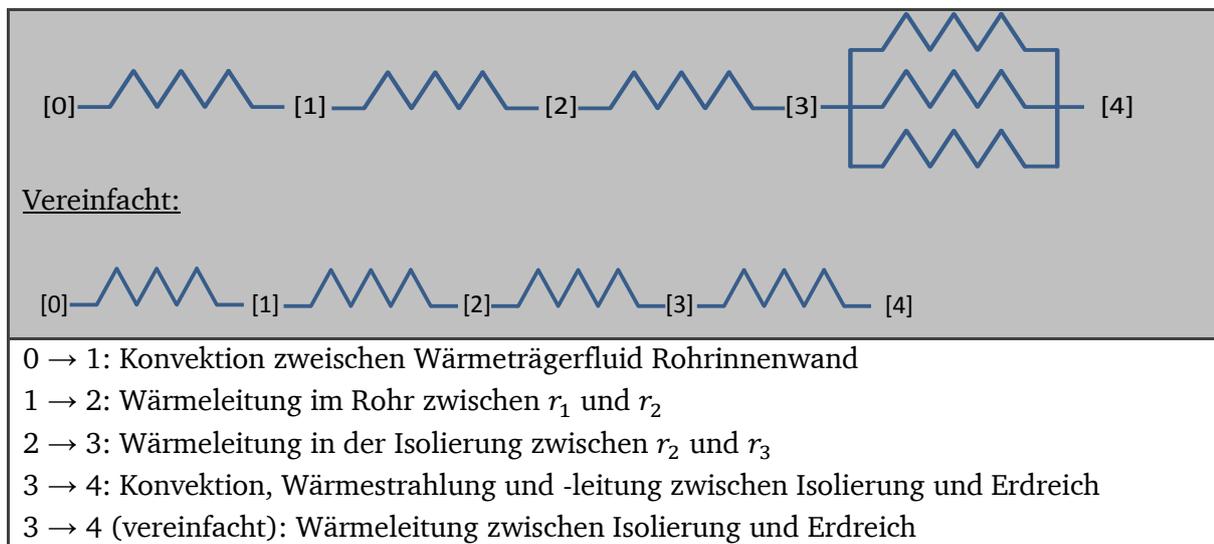
Die Wärmewiderstände können nun ermittelt werden, indem für jeden Mechanismus der Wärmeübertragung die Wärmeübergangszahlen und die Übertragungsflächen ermittelt werden. Für das vorliegende Problem wird die Wärmeleitung durch Strahlung vernachlässigt, da diese erst bei sehr hohen Temperaturen relevant wird. Der Wärmeverlust Q_{WV} für ein isoliertes Rohr entsprechend Abbildung 12 kann dann mit Gleichung (5.40) dargestellt werden.

Tabelle 37: Wärmeverlust für ein erdverlegtes isoliertes Rohr.

$Q_{WV, frei} = \frac{(T_0 - T_u) \cdot 2 \cdot \pi \cdot L}{\left(\frac{1}{\alpha_{innen} \cdot r_1} + \frac{1}{\lambda_{Rohr}} \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{1}{\lambda_{Iso}} \cdot \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right) + \frac{1}{\alpha_{außen} \cdot r_3} \right)} \quad (5.40)$	
Mit,	
$\alpha_{innen}/\alpha_{außen}$	Wärmeübergangskoeffizient innen/außen $\left[\frac{W}{m^2K} \right]$
$\lambda_{Rohr}/\lambda_{Iso}$	Wärmeleitfähigkeit des Rohrwerkstoffes/der Isolierung $\left[\frac{W}{mK} \right]$
r_{1-3}	Radien entsprechend Abbildung 13

Für ein erdverlegtes isoliertes Rohr ergibt sich ein theoretisches Widerstandsnetzwerk entsprechend Tabelle 38. Dabei können die Wärmestrahlung und die konvektive Wärmeübertragung zwischen Isolierung vernachlässigt werden und das Netzwerk kann dann vereinfacht werden (ebenfalls in Tabelle 38 dargestellt, A-to-Z Guide to Thermodynamics, Heat and Mass Transfer, and Fluids Engineering 2006).

Tabelle 38: Wärmewiderstandsnetzwerk für ein erdverlegtes Rohr.



Für das vereinfachte Widerstandsnetzwerk lässt sich nun der Gesamtwiderstand entsprechend Gleichung (5.41) ermitteln.

$$R_{Ges, frei} = R_{KONV,01} + R_{WLEIT,12} + R_{WLEIT,23} + R_{WLEIT,34} \quad (5.41)$$

Der Wärmeverlust des Systems Q_{WV} kann nun grundsätzlich entsprechend Gleichung (5.42) dargestellt werden, wobei T_0 die Temperatur des Wärmeträgerfluids bezeichnet und T_B die Bodenoberflächentemperatur.

$$Q_{WV,erde} = \frac{T_0 - T_B}{R_{Ges,frei}} \quad (5.42)$$

Der VDI-Wärmeatlas präsentiert für den Wärmeverlust einer erdverlegten Leitung an das Erdreich durch Wärmeleitung den Zusammenhang entsprechend Gleichung (5.43).

Tabelle 39: Wärmeverlustgleichung für eine erdverlegte Leitung.

$Q_{WV,Leitung} = \lambda_{Boden} \cdot S_L \cdot (T_W - T_B)$		(5.43)
Mit,		
λ_{Boden}	Wärmeleitfähigkeit Boden $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$	
S_L	Dimensionsloser Formfaktor [-]	
T_W	Temperatur der Rohrwand (hier: Isolierung) [K]	
T_B	Bodenoberflächentemperatur [K]	

Zwecks Konsistenz mit der Darstellung aus Gleichung (5.41) lässt sich $R_{WLEIT,34}$ entsprechend Gleichung (5.44) darstellen. Dabei gilt für $\alpha_{Boden} = \lambda_{Boden} \cdot \frac{S_L}{2 \cdot \pi \cdot r}$.

$$R_{WLEIT,34} = \frac{1}{\alpha_{Boden} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L} = \frac{1}{\lambda_{Boden} \cdot S_L \cdot L} \quad (5.44)$$

Unter der Annahme, dass $T_B \approx T_U$ gilt, lässt sich der Wärmeverlust $Q_{WV,erde}$ einer erdverlegten, isolierten Leitung schließlich entsprechend Gleichung (5.45) darstellen.

$$Q_{WV,erde} = \frac{(T_0 - T_u)}{\left(\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_{innen} \cdot r_1} + \frac{1}{\lambda_{Rohr}} \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{1}{\lambda_{Iso}} \cdot \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right) \right) \right) + \frac{1}{\lambda_{Boden} \cdot S_L \cdot L}} \quad (5.45)$$

Die Einflussgrößen der Gleichungen für den Wärmeverlust einer frei verlegten Leitung ($Q_{WV,frei}$) und für den Wärmeverlust einer erdverlegten Leitung ($Q_{WV,erde}$) lassen sich somit in folgende Gruppen einteilen:

- materialabhängige Kennwerte ($\lambda_{Rohr}, \lambda_{Iso}$) für die Wärmeleitung,
- geometrische Parameter (alle Längen, Radien und Formfaktoren),
- Prozessparameter- bzw. Umgebungsbedingungen (T_0/T_u),
- stoff- und strömungsabhängige Kennwerte ($\alpha_{innen}/\alpha_{außen}$) für die Konvektion.

Die stoff- und strömungsabhängigen Wärmeübertragungskoeffizienten α_{innen} und $\alpha_{außen}$ sind nicht bekannt und müssen zusätzlich bestimmt werden. In der Literatur zur Wärmeübertragung werden Kennzahlen und Zusammenhänge vorgestellt, um Wärmeübertragungskoeffizienten zu schätzen. Im Rahmen des Modells werden die Nusselt- (Nu), Reynold- (Re), Prandtl- (Pr), Grashof- (Gr) und Raleigh- (Ra) Zahl verwendet.

Zur Berechnung von α_{innen} und $\alpha_{außen}$ werden zudem Ähnlichkeitsgesetze entsprechend VDI-Wärmeatlas angewendet. Zentral dabei sind Korrelationsgleichungen für die Nusselt-Zahl einer freien

und erzwungenen Konvektion. Die Gültigkeit dieser Korrelationsgleichungen wird in der Regel durch die Art der Strömung (turbulent/laminar) und somit der Reynolds-Zahl, durch stoffliche Eigenschaften und somit der Prandtl-Zahl und gegebenenfalls durch geometrische Kennwerte, wie bspw. dem Verhältnis von Länge und Durchmesser des Rohrs, bestimmt. Entsprechende Definitionen der Zahlen und die Berechnungsschema für α_{innen} und $\alpha_{außen}$ sind im Anhang aufgeführt.

Abschließend werden die ermittelten Wärmeübertragungskoeffizienten im Modell verwendet, um den Wärmeverlust einer frei- und erdverlegten Rohrleitung entsprechend Gleichungen (5.40) und (5.45) (siehe Anhang) zu berechnen. Dabei wird das Rohr- und Isoliermaterial für alle Fälle jl, ik identisch angenommen und somit sind λ_{Rohr} und λ_{Iso} für alle Fälle identisch. Die Radien hängen im Modell von den geschätzten Durchmessern ab. Sie sind somit abhängig vom Fall und es gilt $r_{1-3} = f(DN_{jl, ik})$. Die Längen der Rohre werden ebenfalls fallspezifisch ermittelt. Die entsprechenden Gleichungen für Wärmeverluste mit Bezug zu den Modellgrößen sind in Tabelle 40 dargestellt.

Tabelle 40: Berechnung der Wärmeverluste im Modell.

<u>Für die frei verlegte Rohrleitung:</u>	
$Q_{WV, frei, jl, ik} = \frac{(T_j - T_u) \cdot 2 \cdot \pi \cdot L_{i, j}}{\left(\frac{1}{\alpha_{innen, jl, ik} \cdot r_1(*)} + \frac{1}{\lambda_{Rohr} \cdot \ln\left(\frac{r_2(*)}{r_1(*)}\right)} + \frac{1}{\lambda_{Iso} \cdot \ln\left(\frac{r_3(*)}{r_2(*)}\right)} + \frac{1}{\alpha_{außen, jl, ik} \cdot r_3(*)} \right)}$	(5.46)
<u>Für die erdverlegte Rohrleitung:</u>	
$Q_{WV, erde, jl, ik} = \frac{(T_j - T_u)}{\left(\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot L_{i, j}} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_{innen, jl, ik} \cdot r_1(*)} + \frac{1}{\lambda_{Rohr} \cdot \ln\left(\frac{r_2(*)}{r_1(*)}\right)} + \frac{1}{\lambda_{Iso} \cdot \ln\left(\frac{r_3(*)}{r_2(*)}\right)} \right) \right) + \frac{1}{\lambda_{Boden} \cdot S_L \cdot L_{i, j}}}$	(5.47)
* = $DN_{jl, ik}$	

Abbildung von Wärmeverlusten in der Modellstruktur

Die zuvor vorgestellten Beziehungen für Wärmeverluste einer frei- und erdverlegten Rohrleitung werden im Modell nun zur Bildung eines spezifischen Kostenfaktors herangezogen. In der folgenden Darstellung zur Abbildung des Kostenfaktors wird in der Bezeichnung der Wärmeverluste nicht mehr zwischen frei- und erdverlegten Leitungen unterschieden, da die Abbildung des Kostenfaktors für beide Verlegungsarten äquivalent erfolgt ($Q_{WV, erde, jl, ik}, Q_{WV, frei, jl, ik} \rightarrow Q_{WV, jl, ik}$).

Die spezifischen Kosten für Wärmeverluste werden wie bereits die Kostenfaktoren für Rohrleitungen und Pumpaufwände auf die geschätzte maximal übertragbare Energiemenge zwischen den entsprechenden aufzuheizenden und abzukühlenden Prozessen bezogen. Der Kostenfaktor wird demnach entsprechend Gleichung (5.48) ermittelt. Dabei stellt η_{WV} einen thermischen Wirkungsgrad dar, der sich an den Opportunitäten orientiert. Wärmeverluste müssten durch zentrale Erzeuger oder Heizaggregate, die direkt an den Prozessen angeordnet sind ausgeglichen werden. Für η_{WV} kann also der Wirkungsgrad der entsprechenden Systeme angenommen werden, für ein Dampfsystem bspw. $\eta_{WV} = \eta_{Erzeuger} \cdot \eta_{Verteilverluste}$. $BeStd$ steht für die jährlich angenommenen Betriebsstunden. Die Brennstoffkosten für das zentrale System, bspw. Erdgas bei einem Dampferzeuger, werden schließlich mit sk_{Brenn} bezeichnet.

$$c_{WV,jl,ik} \left[\frac{EUR}{W} \right] = \left(\frac{Q_{WV,jl,ik}}{q_{max,ik,jl}} \right) [-] \cdot \left(\frac{1}{\eta_{WV}} \right) [-] \cdot sk_{Brenn} \left[\frac{EUR}{Wh} \right] \cdot BeStd[h] \quad (5.48)$$

Zusammenfassend werden nochmal die wichtigsten Vereinfachungen, die bei der Bildung des Kostenfaktors für Wärmeverluste angenommen werden, im Folgenden aufgelistet.

- Es gelten grundsätzlich dieselben Nachteile wie bei der Verrohrungsgeometrie, da Wärmeverluste auf Basis dieser Geometrie ermittelt werden.
- Wärmeverluste werden nicht energetisch, sondern monetär abgebildet.

Kostenfaktor zentrale Wärme- und Kälteerzeuger

Kostenfaktoren für zentrale Erzeuger stellen im Rahmen des Modells Opportunitäten zur Nutzung des Wärmeübertragernetzwerkes dar. Notwendige Investitionen für Wärme- und Kälteerzeuger werden dabei über spezifische, leistungsabhängige Kennziffern abgebildet. Für die Spezifizierung von Betriebskosten werden Produktionszeit und Energieträgerkosten ermittelt. Wartungsaufwände werden äquivalent zu den anderen Komponenten im Restwertterm abgebildet. Insgesamt wird der spezifische Kostenfaktor für zentrale Wärme- und Kälteerzeuger entsprechend Gleichung (5.49) im Modell errechnet.

Tabelle 41: Spezifische Kosten für zentrale Erzeuger im Modell.

$c_{UT,jl,ik} \left[\frac{EUR}{W} \right] = sk_{UT} \left[\frac{EUR}{W} \right] \cdot RWM + \frac{sk_{Energie} \left[\frac{EUR}{Wh} \right] \cdot BeStd[h]}{\eta_{UT}} \quad (5.49)$	
Mit,	
sk_{UT}	Spezifische Anschaffungsinvestition für Erzeuger
$sk_{Energie}$	Spezifische Energieträgerkosten
$BeStd$	Betriebs-/Produktionszeit
RWM	Faktor für Restwertmethode inklusive Wartung (siehe Gl. (5.14))

Bei der Bildung des Kostenfaktors für zentrale Wärmeerzeuger wird mit einem spezifischen, leistungsabhängigen Faktor für Investitionen gerechnet. Leistungsabhängige Skaleneffekte bei Anschaffungsinvestitionen werden somit nicht berücksichtigt, was die wichtigste Vereinfachung im Hinblick auf die Annahmen darstellt.

Zusammenfassung Kostenfaktoren

Sämtliche zuvor vorgestellten Kostenfaktoren werden für jede Kombination von Energienachfrage und Energieangebot ermittelt (vgl. Indexierung ik, jl). Zwecks Lesbarkeit wird im Folgenden jedoch auf die Indexierung der spezifischen Kosten verzichtet. Die Kosten werden je nach Fall entsprechend Tabelle 42 zusammengeführt und bei der Lösung des Optimierungsproblems mit berücksichtigt.

Tabelle 42: Kostenfaktoren – wirtschaftliche Optimierung.

$c_{ik,jl} =$	$c_{WT} + c_R + c_{P/V} + c_{WV}$	i ist nicht C und j ist nicht H und die Temperaturen sind zulässig. Verbindungen zwischen E-Angebot und E-Nachfrage.
	0	i ist C und j ist H. Verbindungen zwischen Versorgern (nur zum Modellieren notwendig, nicht technisch).
	c_{UT}	Entweder i ist C oder j ist H. Verbindungen zwischen einem Versorger (Wärme/Kälte) und E-Nachfrage oder E-Angebot.
	M	Sonst M, eine große Zahl. Für Verbindungen zwischen E-Nachfrage und E-Angebot mit unzulässigen Temperaturen.
Kosten, die für den Transport einer Einheit entlang Verbindung $q_{ik,jl}$ angesetzt werden.		

5.2.5. Berücksichtigung dynamischer Aspekte im Modell

Zur Bewertung der überbetrieblichen Wärmeintegration in einem systemischen Rahmen ist es sinnvoll, dynamische Aspekte bei der wirtschaftlichen Bewertung ebenfalls zu adressieren. Dies ist darin begründet, dass der Wärmebedarf der potenziell teilnehmenden Betriebe zeitlich zueinander variieren kann.

Dies ist beispielsweise relevant, wenn ein Betrieb Abwärme an einen benachbarten Standort liefert, wobei dessen Produktionszeit über das Jahr hinweg kürzer ist als die des Wärmeabnehmers. In diesem Fall kann der wärmeabnehmende Betrieb seinen Bedarf nicht zu jedem Bedarfszeitpunkt durch die Lieferung von Abwärme reduzieren und muss infolgedessen zusätzliche Kapazitäten bei den anderen Wärmeerzeugern vorhalten. Die notwendige Infrastruktur kann dann natürlich auf die Abwärmemenge, die über das Jahr hinweg kontinuierlich geliefert werden kann, ausgelegt werden. Sie würde somit im Hinblick auf zu transportierende Leistungen gegebenenfalls kleiner ausgelegt werden, verglichen zu einem Fall, indem der wärmeabgebende Betrieb eine genauso lange Produktionszeit hätte, wie der wärmeaufnehmende Betrieb. Dies würde sich somit in kleineren Wärmeübertragern, Pumpen usw. äußern.

Möglichkeiten zur Implementierung in der Modellstruktur

In der aktuellen Modellstruktur lassen sich Kosten, die nicht mit Leistungen korrelieren, nur adressieren, indem bei der Spezifizierung von Kosten fixe Anteile mitberücksichtigt werden (vgl. Kapitel 5.2.4). Für Pumpen und Verdichter wird auf die Zuordnung fixer Anteile bewusst verzichtet. Dasgleiche gilt für Wärmeübertrager. Bei den Rohrleitungen wurde jedoch ein Mindestdurchmesser festgelegt. Gemeinsam mit der festgelegten Distanz werden durch diese Vorgehensweise fixe minimale Investitionen mitberücksichtigt und spezifiziert. Bezogen auf die aktuelle Modellstruktur kann die zeitliche Dimension grundsätzlich über zwei im Folgenden vorgestellten Möglichkeiten berücksichtigt werden.

Die erste Möglichkeit besteht darin, ein überbetriebliches Wärmeübertragernetzwerk mit Hilfe des Transportalgorithmus auszulegen und dabei zeitliche Differenzen zwischen den Standorten zunächst nicht zu berücksichtigen. Im Anschluss daran müsste das entworfene Netzwerk im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit bewertet werden. Dies kann durch energetische Simulation des Netzwerks in zeitlicher

Auflösung geschehen, beispielsweise auf stündlicher Basis. Ein nächster Schritt bestünde darin, das Ergebnis der Simulation als Information für den Transportalgorithmus zu nutzen. Dort könnte die Information genutzt werden, um wiederholt ein Netzwerk zu entwerfen, mit dem Ziel, die Wirtschaftlichkeit auch unter Berücksichtigung zeitlicher Aspekte zu erhöhen. Aus dem Ergebnis der Simulation müssten somit Entwurfskriterien (Heuristiken) abgeleitet werden, die dann beim Auslegen mit Hilfe des Transportalgorithmus genutzt werden. Ein qualitatives Beispiel wäre: „Wenn in der Simulation über das Jahr hinweg ‚wenig‘ Wärme überbetrieblich transportiert wird, dann vermeide überbetriebliche Verbindungen zwischen Energieangebot und Energienachfrage“. Dies könnte beliebig häufig mit anschließender Bewertung durch energetische Simulation wiederholt werden, um die Lösung zu verbessern. Hierfür müssten Abbruchkriterien formuliert werden.

Die zweite Möglichkeit besteht darin, zeitliche Aspekte direkt in die Formulierung des Transportalgorithmus zum Entwerfen des Netzwerks mit einzubeziehen. Hierfür muss die Formulierung des Algorithmus so erweitert werden, dass Energieangebote und Energienachfragen für mehrere Zeitpunkte vorliegen und beim Optimieren mitberücksichtigt werden. Dabei muss beachtet werden, dass die transportierten Wärmemengen zwischen Energienachfragen und Energieangebote über die Zeit hinweg technisch realisierbar festgelegt werden. Hier ist zunächst insbesondere hervorzuheben, dass der Algorithmus ohne zusätzliche Randbedingungen die Energienachfragen und Energieangebote in keine Relation zueinander setzt. Dies kann zum einen dazu führen, dass Kombinationen zwischen Energienachfrage und Energieangebot festgelegt werden, die aus unterschiedlichen Zeitpunkten stammen. Dies ist notwendigerweise durch entsprechende zusätzliche Randbedingungen zu verhindern.

Zum anderen können die zu transportierenden Mengen zwischen Energieangebot und Energienachfrage über die Zeit hinweg variabel festgelegt werden. Dies kann dazu führen, dass ein Energieangebot zu einem Zeitpunkt vollständig zur Deckung einer bestimmten Energienachfrage festgelegt wird und zu einem anderen Zeitpunkt wird dieselbe Energienachfrage zur Deckung einer anderen Energienachfrage veranschlagt. Sogar für Systeme mit großen, integrierten Wärmeverteilsystemen, wie bspw. Dampfnetzen dürfte eine solche Festlegung technisch nur schwer umsetzbar sein, da aufwendiger Regelungsaufwand notwendig wäre und viele Komponenten nicht entsprechend ihrem Auslegungspunkt betrieben werden (bspw. Kondensatabscheider). Eine solche Festlegung wird daher als technisch nicht plausibel erachtet und somit sollte eine zusätzliche Randbedingung dieses verhindern. Ziel dieser zusätzlichen Randbedingung ist es, über die Zeit hinweg konsistente Wärmeübertragernetzwerke zu entwerfen.

Im Hinblick auf Vor- und Nachteile hat die erste Möglichkeit im Prinzip die gleichen Nachteile wie bei der Berücksichtigung von Kosten für Rohrleitungen. Bei dem angewendeten Transportalgorithmus handelt es sich um einen Ansatz, der eher dem Ansatz „Target Optimization“ und weniger dem Ansatz „Design-Optimization“ zuzuordnen ist. Der zur Ermittlung spezifischer Kosten angenommene Netzwerkentwurf würde in der praktischen Umsetzung häufig abweichen. Die Ursache dafür ist, dass in der Praxis üblicherweise auch Aspekte der Entwurfsoptimierung, bspw. das Minimieren der Anzahl von Wärmeübertragern und die hydraulische Optimierung der Verrohrung mitberücksichtigt werden. Wird ein entworfenes Netzwerk somit durch Heuristiken verändert, ist nicht auszuschließen, dass es im Hinblick auf Aspekte der Entwurfsoptimierung verschlechtert wird. Ein iteratives Vorgehen würde also voraussetzen, dass zunächst Heuristiken für die Entwurfs-Optimierung angewendet werden, bevor

weitere Heuristiken zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit im Hinblick auf zeitliche Aspekte angewendet werden. Dies spricht im Rahmen der Arbeit prinzipiell gegen einen iterativen Ansatz.

Implementierung in der Modellstruktur

Zwecks Konsistenz wird im Rahmen dieser Arbeit daher die zweite Möglichkeit verfolgt. Die Einbeziehung zeitlicher Aspekte dient wie schon die Einbeziehung spezifischer Kosten für Verrohrung usw. nicht der Berücksichtigung technisch detaillierter Sachverhalte im Rahmen einer Entwurfs-Optimierung, sondern vielmehr der Berücksichtigung von Faktoren, die tendenziell negativ auf die Wirtschaftlichkeit von überbetrieblichen Wärmeübertragernetzwerken wirken. Daher wird der methodische Rahmen des Transportalgorithmus nach Cerda et al. (1983) weiterentwickelt, so dass divergierende Produktionszeiten zwischen Standorten berücksichtigt werden können.

Die Weiterentwicklung geschieht zunächst durch Erweiterung der Zielfunktion entsprechend Gleichung (5.50). Dabei bezeichnet $q_{tik,t,jl}$ die Wärmeleistung, die zum Zeitraum t von Energieangebot b_{jl} zum Energiebedarf a_{ik} transportiert wird. In der Modellimplementierung werden somit Energienachfragen und Energieangebote für die jeweiligen Zeiträume gebildet; $a_{ik} \rightarrow a_{tik}$ und $b_{jl} \rightarrow b_{tjl}$. Dies wird umgesetzt, indem ein relativer Teillastfaktor $PF_{St.,t}$ eingeführt wird, der nach Zeitraum und je Standort differenziert ist. Dabei stellt der erste Zeitraum ($t = 1$) immer den Zeitraum dar, in dem beide Betriebe Volllast aufweisen, somit gilt $PF_{St.,1} = 1$.

$$\min_{q_{tik,t,jl}} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^C \sum_{k=1}^L \sum_{j=1}^H \sum_{l=1}^L C_{tik,jl} \cdot q_{tik,t,jl} \quad (5.50)$$

Für Zeiträume, bei denen $t \neq 1$ gilt, ergibt sich ein Energieangebot entsprechend Gleichung (5.51). Zu beachten ist, dass in der Modellimplementierung für diesen Schritt Energienachfragen und Energieangebote jeweiligen Standorten (bspw. $a_{tik} \rightarrow a_{St.,tik}$) zugeordnet werden. In der folgenden Darstellung wird jedoch zwecks Übersichtlichkeit auf einen Standortindex verzichtet.

$$a_{tik} = PF_{St.,t} \cdot a_{1ik,1jl} \quad (5.51)$$

Grundsätzlich können die Zeiträume dabei variabel lang sein. Für ein Beispiel mit zwei Standorten, bei dem der erste Standort eine Produktionszeit von 8.000 Stunden bei voller Last und der zweite Standort eine Produktionszeit von 4.000 Stunden bei voller Last und 4.000 Stunden bei nur halber Last aufweist, lässt sich dies wie folgt abbilden. Zur Abbildung dieses Falls werden zwei Zeiträume gebildet ($T = \{1,2\}$), die jeweils für einen Zeitraum von 4.000 Stunden stehen. Darauf aufbauend werden je nach Standort Teillastfaktoren gebildet ($PF_{1,1} = PF_{1,2} = 1$, $PF_{2,1} = 1$, $PF_{2,2} = 0,5$), auf dessen Grundlage die Energieangebote und Energienachfragen gebildet werden. Dabei ist darauf hinzuweisen, dass die Zuordnung zwischen Energieangebot und Energienachfrage in der Modellstruktur grundsätzlich auf Basis von thermischen Leistungen erfolgt. Produktions- bzw. Betriebszeiten (hier bspw. jeweils 4.000 Stunden) werden ausschließlich zur Bildung der spezifischen Kostenfaktoren herangezogen, indem Energiekosten über die Betriebszeit bilanziert und anschließend spezifiziert mit einbezogen werden.

Des Weiteren werden zwei zusätzliche Randbedingungen eingeführt. Die erste dieser Randbedingungen ist in Gleichung (5.52) dargestellt. Sie stellt sicher, dass keine Verbindungen zwischen Energieangeboten und Energienachfragen festgelegt werden, die zu unterschiedlichen Zeiträumen gehören. Der zweite Abschnitt der Randbedingung ist zur Darstellung im Rahmen dieser Arbeit prinzipiell nicht notwendig, denn an keiner Stelle wurde in der Indexierung von $q_{tik,tjl}$ das t vor und nach dem Komma unterschiedlich bezeichnet. Infolgedessen handelt es sich immer um denselben Wert. Für die programmtechnische Umsetzung ist jedoch zwingend darauf zu achten, Mechanismen einzubauen, die Verbindungen zwischen unterschiedlichen Zeiträumen für $q_{tik,tjl}$ verhindern. Bei der Umsetzung im Rahmen dieser Arbeit wurde dies wie in Gleichung (5.52) dargestellt gelöst.

$$\begin{aligned} q_{tik,tjl} &\geq 0 && \text{für alle Kombinationen von } i, j, k, l \text{ und } t, \text{ und} \\ q_{tik,tjl} &= 0 && \text{für } q_{tik,tjl} \text{ mit unterschiedlichem } t \text{ im Index} \end{aligned} \quad (5.52)$$

Für die zweite Randbedingung wird für jede mögliche Verbindung ($q_{tik,tjl}$) zunächst ermittelt, welcher Teillastfaktor maßgeblich ist. Dabei wird die möglicherweise austauschbare Wärme zwischen zwei Standorten im Teillastbetrieb durch den kleineren der beiden Teillastfaktoren bestimmt. Wenn somit a_{tik} und b_{tjl} zu unterschiedlichen Standorten gehören, dann wird der kleinere Teillastfall gewählt; dies ist in Gleichung (5.53) angedeutet.

$$PF_{t=2} = \min\{PF_{1,2}, PF_{2,2}\} \quad (5.53)$$

Die Relation für $q_{tik,tjl}$ zwischen Zeiträumen, in denen Teillast vorliegt und dem Fall der Volllast, wird schließlich durch die zweite zusätzliche Randbedingung in Gleichung (5.54) hergestellt. An dieser Stelle ist anzumerken, dass $q_{tik,tjl}$ die Menge des Wärmetransports zwischen Energienachfrage und Energieangebot darstellt. Implizit stellt $q_{tik,tjl}$ also auch die Größe eines Wärmeübertragers für die entsprechende Verbindung dar. Konsequenterweise wird im Modell gefordert, dass wenn eine Verbindung zwischen zwei Prozessen zum Zeitpunkt der Volllast gewählt wird, die zu diesem Zeitpunkt transportierte Menge die Obergrenze für den Wärmetransport über die Zeit hinweg für dieselbe Verbindung darstellt. Dies impliziert die Handlungsprämisse, dass die Größen der Wärmeübertrager für den Volllastfall ausgelegt werden.

$$q_{tik,tjl} = q_{1ik,1jl} \cdot PF_t \quad \text{für alle } i, j, k, l \text{ und } t, \text{ mit } PF_t \leq 1 \quad (5.54)$$

5.2.6. Steuerungsmöglichkeiten intern vs. extern

Bei der Ermittlung der Einsparpotenziale mit Berücksichtigung von wirtschaftlichen Aspekten (wirtschaftliche Einsparpotenziale) werden Kostenfaktoren für notwendige Komponenten und Betriebskosten im Optimieransatz mitberücksichtigt. Diese beziehen sich auf Wärmeübertrager, Arbeitsmaschinen, Verrohrung, zentrale Wärme- und Kälteerzeuger und Mehraufwand bei Wärmeerzeugern durch Wärmeverluste im System. Prinzipiell lassen sich diese Kostenfaktoren sowohl auf die innerbetriebliche als auch auf die überbetriebliche Wärmeintegration anwenden. Werden alle Kostenfaktoren sowohl für die innerbetriebliche und für die überbetriebliche Wärmeintegration

angewendet, so kann dies dazu führen, dass die überbetriebliche Wärmeintegration der innerbetrieblichen Wärmeintegration vorgezogen wird. Ein denkbarer Fall ist, wenn innerbetrieblich nur Abgas/Luft-Verknüpfungen möglich sind, überbetrieblich hingegen Abgas/Wasser-Verknüpfungen. In diesem Fall kann es dazu kommen, dass überbetriebliche Abgas/Wasser-Verknüpfungen bevorzugt werden, da notwendige Wärmeübertrager für den Austausch derselben Energiemenge geringere Flächen benötigen und für den Transport der Medien auch geringere Volumenströme und somit kleinere Rohrdurchmesser notwendig sind. Inwieweit dies eintritt hängt, natürlich auch von den Distanzen ab, die für Rohrleitungen innerhalb des Standorts und für Rohrleitungen zur überbetrieblichen Verbindung angenommen werden. Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Fokus auf der überbetrieblichen Wärmeintegration. Ratgeber zur Nutzung von Abwärme priorisieren in der Regel die innerbetriebliche vor der überbetrieblichen Wärmeintegration. Dafür sprechen vor allem organisatorische, aber auch operative Aspekte bei der Umsetzung der Maßnahme (Sächsische Energieagentur GmbH (SAENA) 2012). Zudem kann die Aufteilung der monetären Einsparung bei der überbetrieblichen Wärmeintegration ein Hemmnis darstellen (Hiete et al. 2012). Daher ist es sinnvoll dies bei der Ermittlung der wirtschaftlichen Einsparpotenziale mitzuberücksichtigen. Dies kann im Rahmen des Modelles prinzipiell durch zwei Vorgehensweisen geschehen.

Bei der ersten Vorgehensweise wird die Distanz für die innerbetriebliche Wärmeintegration auf null gesetzt und infolgedessen werden bei der innerbetrieblichen Wärmeintegration ausschließlich Kosten für Wärmeübertrager berücksichtigt, während bei der überbetrieblichen Wärmeintegration weiterhin alle distanzrelevanten Kosten mit einbezogen werden (Verrohrung usw.). Der Nachteil dieser Vorgehensweise ist, dass nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden kann, dass innerbetriebliche Verbindungen immer vor überbetrieblichen Verbindungen vorgezogen werden. Schließlich wird lediglich die Anzahl der Kostenfaktoren für die innerbetriebliche Wärmeintegration reduziert, was sich zwar bevorzugend für die innerbetriebliche Wärmeintegration auswirkt, jedoch nicht sicherstellen kann, dass in bestimmten Fällen die überbetriebliche Wärmeintegration spezifisch günstiger ist und gewählt wird.

Die zweite Vorgehensweise besteht darin, spezifische Kosten für mögliche Verbindungen bei der innerbetrieblichen Wärmeintegration analog zur Ermittlung energetischer Potenziale auf null zu setzen. Hier wird die innerbetriebliche Wärmeintegration technisch maximal ausgeschöpft.

5.2.7. Zusammenfassung der Modellentwicklung

Mit dem in den vorigen Kapiteln entwickelten Modell lässt sich das Energieeinsparpotenzial durch Wärmeintegration für ein System bestehend aus abzukühlenden und aufzuheizenden Prozessen (alternativ Wärmeangeboten und Wärmebedarfen) ermitteln. Mit dem Modell kann somit das Einsparpotenzial für die innerbetriebliche und überbetriebliche Wärmeintegration ermittelt werden. Darauf aufbauend lässt sich mit dem Modell das technische und wirtschaftliche (Einspar-)Potenzial für überbetriebliche Wärmeintegration bestimmen, indem die Wärmebedarfe des gegenwärtigen Zustands der betrachteten Systeme mit den optimierten Systemen abgeglichen werden.

Die dem Modell zugrundeliegende Methode basiert auf einem Optimierungsansatz. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Programmiersprache Python zusammen mit der Python-Bibliothek PuLP verwendet,

um das entwickelte Modell in einer Fallstudie zu testen. Bei der Python-Bibliothek PuLP handelt es sich um einen Programmcode für Python, der frei verfügbar ist und für Forschungszwecke genutzt werden darf (Mitchell 2009). Die PuLP-Bibliothek bietet eine Programmiersyntax, die dabei unterstützt, lineare Optimierungsprobleme in Python zu formulieren. Zur Lösung der Probleme wird der integrierte Solver CBC (COIN Branch and Cut) verwendet (Forrest und Lougee-Heimer). Der Solver kann zum Lösen gemischt-ganzzahliger Optimierungsprobleme (im Englischen: mixed-integer program, MIP) und linearer Optimierungsprobleme (LP) genutzt werden. Zum Lösen nutzt der Solver das sogenannte Verzweigungs- und Schnittverfahren (Branch-and-Cut).

5.3. Anwendung des Modells für eine exemplarische Nachbarschaft

Das zuvor entwickelte Modell wird im Folgenden in für eine exemplarische Nachbarschaft zwischen zwei Fabriken angewendet. Dabei hat die exemplarische Anwendung die im Folgenden genannten Ziele.

- Validierung: Die energetische Optimierung (als Teil der technischen Potenzialermittlung) soll anhand eines Vergleichs mit theoretischen Werten validiert werden. Dies stellt sicher, dass die Modellimplementierung die Prozesse thermodynamisch korrekt in Energienachfragen und Energieangebote zerlegt und korrekt optimiert.
- Vergleich: Für eines der beiden unterstellten Werke liegt ein technischer Bericht vor. In dem Bericht wird die optimale Temperaturdifferenz für die Wärmeübertrager im System mit einem kommerziellen Programm ermittelt. Dabei werden im kommerziellen Programm ausschließlich Kosten für Wärmeübertrager berücksichtigt. Dies ist mit dem Modell bei der Anwendung der wirtschaftlichen Optimierung auch möglich. Daher wird ein Vergleich mit dem Ziel durchgeführt, die Art der Berücksichtigung von Kosten für Wärmeübertrager in beiden Systemen zu vergleichen. Zudem wird verglichen, wie sich die Struktur der entworfenen Netzwerke zwischen dem Vorschlag im technischen Bericht und dem Ergebnis des optimierenden Modells unterscheidet.
- Exemplarische Potenzialdarstellung: Das Modell liefert das technische und wirtschaftliche Energieeinsparpotenzial für die überbetriebliche Wärmeintegration bezogen auf den gegenwärtigen Zustand. Für die exemplarische Nachbarschaft werden diese Ergebnisse differenziert für unterschiedliche Entfernungen dargestellt.
- Sensitivitäten: Abschließend wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Hier liegt der Fokus insbesondere darauf, den Einfluss der für die überbetriebliche Wärmeintegration eingebrachten Kostenfaktoren im Modell aufzuzeigen. Der Fokus liegt hier also auf dem wirtschaftlichen Potenzial. Dieser Fokus wurde gewählt, da das technische Potenzial eines zu untersuchenden Systems im Modell prinzipiell auf Basis des energetischen Optimums ermittelt wird. Sensitivitäten beim technischen Potenzial ergeben sich also „weniger“ aus der Modellarchitektur heraus oder den im Modell getroffenen Annahmen, sondern aus unterschiedlichen Eingangsdaten (Wärmebedarfe für die Fabriken), die in das Modell gespeist werden. Abschließend werden die Erkenntnisse aus den Sensitivitätsrechnungen im Kontext der Fragestellung zusammengefasst und es werden Ansatzpunkte für Verbesserungsmöglichkeiten diskutiert und in ersten Ansätzen exemplarisch aufgezeigt.

5.3.1. Datengrundlage (betrachtete Fabriken)

Für die Fallstudie werden zwei Fabriken betrachtet. Bei der ersten der beiden Fabriken handelt es sich um eine Beschichtungsanlage der V-Zug AG. Die V-Zug AG stellt unterschiedliche Geräte her, deren Komponenten teilweise beschichtet werden müssen. Ein Beispiel sind Backöfen für Küchen, deren Innenraum mit Email beschichtet wird. Die Anlage wurde gewählt, da ein detaillierter technischer Bericht zu Einsparpotenzialen mit der Pinch-Analyse zum Abgleich vorliegt (Grieder 2011). Bei der zweiten Fabrik handelt es sich um eine fiktiv angenommene Eisengießerei. Die Fabrik wurde gewählt, da Gießereien, insbesondere Eisengießereien einen aussichtsreichen industriellen Sektor für die überbetriebliche Wärmeintegration darstellen. Dies ist darin begründet, dass es bereits einen Praxisfall gibt, in dem Abwärme aus einer Eisengießerei überbetrieblich verwendet wird (Umweltbundesamt 2011). Eine Schätzung von Abwärmepotenzialen für Eisengießereien befindet sich im Anhang (vgl. Tabelle 61). Im Folgenden werden beide Fabriken inklusive zentraler Annahmen beschrieben.

Beschichtungsanlage

In der Beschichtungsanlage werden zwei Beschichtungsverfahren angewendet. Für Komponenten mit ‚hohen‘ Anforderungen an die Beschichtung wird ein elektrostatisches Pulverbeschichtungsverfahren (EPS-Verfahren) angewendet. Für weitere Komponenten wird ein Email-Beschichtungsverfahren (Email-Verfahren) eingesetzt. Beide Verfahren setzen eine Vorbehandlung der Komponenten voraus.

Die Vorbehandlung umfasst die Prozessschritte Entfetten, Waschen und Trocknen. Eine Übersicht der Prozessschritte für die Vorbehandlung inklusive eingesetzter Energieträger und Abluft- und Rauchgasströme ist in Abbildung 14 gegeben. Im ersten Schritt werden die Komponenten in warmen Sprühbädern entfettet. Die Sprühbäder werden mit Wasser betrieben, das auf 55 °C beheizt wird. Die Beheizung erfolgt über einen Heißwasserboiler. Die Abluft der warmen Sprühbäder beträgt etwa 50 °C. Im Anschluss werden die Komponenten in kalten Sprühbädern mit kaltem Wasser gewaschen. Im letzten Schritt werden die Komponenten mit 160 °C heißer Luft im Haftwassertrockner getrocknet, bevor sie in die Lagerhalle transportiert werden. Dort kühlen sie ab, bevor sie entweder mit dem Enamel- oder EPS-Verfahren beschichtet werden.

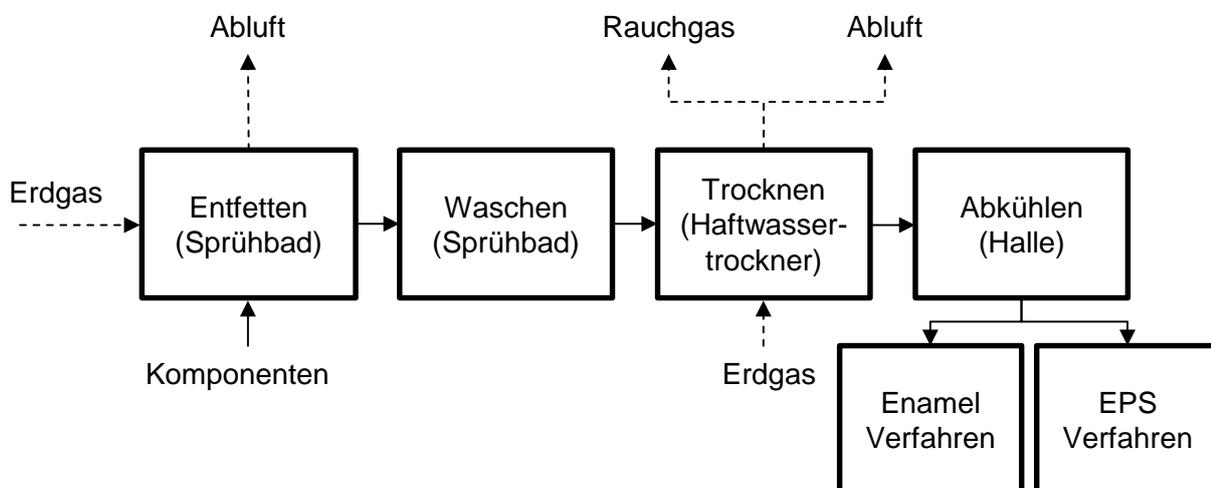


Abbildung 14: Beschichtungsanlage – Vorbehandlung

Das EPS-Verfahren ist in Abbildung 15 dargestellt. Beim EPS-Verfahren werden die Komponenten mit organischem Pulverlack beschichtet. Hierfür wird in einem ersten Schritt eine elektrisch geladene Pulverwolke um die zu beschichtenden Komponenten erzeugt und die Komponenten werden elektrostatisch aufgeladen. Infolgedessen haftet der Pulverlack an den Komponenten. Der Pulverlack bzw. die Beschichtung wird im zweiten Schritt in einem 200 °C heißen Einbrennofen verflüssigt, der in dem vorliegenden Fall mit Erdgas beheizt wird. Die Komponenten verlassen den Einbrennofen im Anschluss bei etwa 150 °C und kühlen in der Lagerhalle ab.

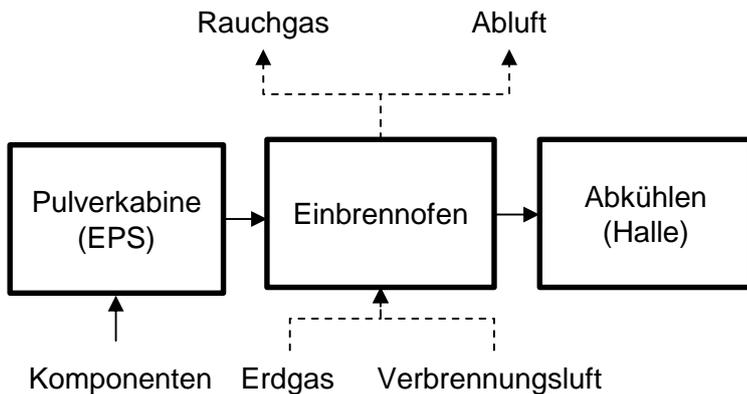


Abbildung 15: Beschichtungsanlage – EPS-Verfahren

Abbildung 16 stellt schließlich das Enamel-Verfahren dar. Hierbei werden in einem ersten Schritt nasse oder trockene Komponenten mit Enamel in einer Kabine beschichtet. In einem zweiten Schritt wird die Beschichtung in einem Brennofen bei Temperaturen zwischen 830 °C und 850 °C eingebrannt. Wurden die Komponenten nass beschichtet, so werden diese zuvor in einem sogenannten Schlickertrockner getrocknet, bevor sie etwa 150 °C heiß in den Ofen eintreten. Die Wärme für den Trockner wird hauptsächlich über das heiße Abgas des Brennofens bereitgestellt. Auch bei dem Enamel-Verfahren kühlen die Komponenten im letzten Schritt an der Umgebung in der Lagerhalle ab.

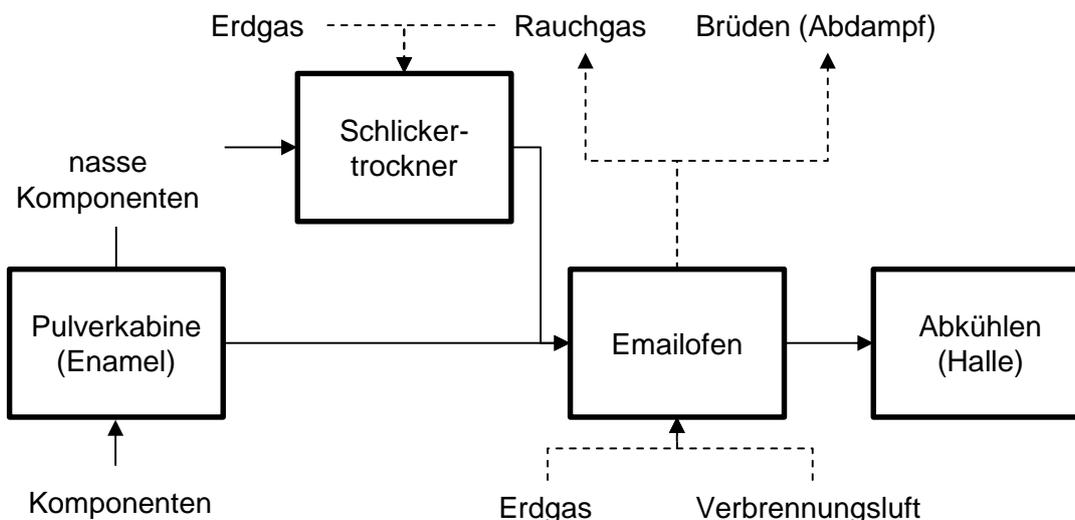


Abbildung 16: Beschichtungsanlage – Enamel-Verfahren

Die Betriebszeit der Fabrik beträgt 2.250 Stunden. In dem Bericht von Grieder (2011) werden die Prozessströme in Form von Kälte- und Wärmenachfragen für die Beschichtungsanlage entsprechend Pinch-Analyse tabellarisch aufgelistet. Dabei wird angenommen, dass ein Teil der Wärme der Rauchgase aus dem Email-Ofen nicht nur zum Beheizen des Schlickertrockners, sondern auch zum Beheizen des Haftwassertrockners verwendet werden kann. Diese Energieeffizienzmaßnahme wird bei der Darstellung mit einbezogen, indem der Wärmebedarf des Haftwassertrockners entsprechend reduziert wird. Die entsprechenden Prozessströme finden sich im Anhang in Tabelle 56 und stellen die Grundlage für die Fallstudie dar.

Eisengießerei

Für die zweite Fabrik wird ein fiktiver Gießereistandort unterstellt, in dem Eisenguss mit einem Heißwindkupolofen produziert wird. Die angenommene Jahresproduktion beträgt 200.000 Tonnen pro Jahr. Entsprechende Kennwerte zur Abbildung der fiktiven Gießerei sind dem Beispiel aus Umweltbundesamt (2011) entnommen. In dem Beispiel wird das aus dem Heißwind-Kupolofen tretende heiße Abgas in einem ersten Schritt nachverbrannt, um die Bildung von Dioxinen zu vermeiden. Dabei wird die Temperatur des Abgases von etwa 1200 °C auf 750 °C reduziert. In einem darauf aufbauenden Schritt wird das Abgas in einem Rekuperator zum Vorwärmen der Verbrennungsluft für den Kupolofen verwendet (Heißwinderzeugung). Die übrige im Abgas verbleibende Wärme wird im Anschluss zunächst an einen Thermoölkreislauf und dann an einen Heißwasserkreislauf abgegeben. Dabei wird der Thermoölkreislauf verwendet, um Wärme für einen benachbarten Standort zur Herstellung von Dampf bereitzustellen. Der Heißwasserkreislauf wird wiederum innerhalb der Gießerei verwendet. Insgesamt stehen 25 MW thermische Leistung im Abgasstrang zur Abwärmenutzung zur Verfügung. Davon werden etwa 7 MW für die Heißwind- und 6 MW für die Heißwassererzeugung genutzt. Für die überbetriebliche Abwärmenutzung und somit Wärmeintegration bleiben somit 12 MW übrig.

Für die Fallstudie wird angenommen, dass analog zum Praxisbeispiel ebenfalls nur 12 MW für die überbetriebliche Wärmeintegration zur Verfügung stehen, mit dem entsprechenden Temperaturbereich des Abgasstrangs zwischen 600° und 430 °C. Zur Abbildung der verfügbaren Leistung im Modell ist es notwendig, Dichten und Massenströme abzuleiten. Zudem wird eine spezifische ‚fiktive‘ Wärmekapazität angenommen, um die verfügbare Leistung im Modell konsistent abzubilden. Die entsprechend angenommenen Parameter sind in Tabelle 43 dargestellt.

Tabelle 43: Parameter Gießerei.

Komponente	Wert (gerundet)	Einheit	
Volumenstrom Abgas bei 750 °C	47.620	m ³ /h	Gegeben
Dichte Gichtgas bei 750 °C	0,4	kg/m ³	Annahme
Massenstrom Abgas	4,8	kg/s	Berechnet
T.ein	600	°C	Gegeben
T.aus	400	°C	Gegeben
Thermische Leistung (600 °C bis 400 °C)	12	MW	Gegeben
‚Fiktive‘ spezifische Wärmekapazität	14,75	kJ/kgK	Berechnet
Betriebszeit	4.500	Stunden	Gegeben

5.3.2. Validierung des Modells

Bei der energetischen Optimierung wird ein Wärmeübertragernetzwerk entworfen, dessen Energiebedarf dem theoretischen Minimum entspricht. Dies kann validiert werden, indem für das zu untersuchende System Summenkurven entsprechend Pinch-Analyse erstellt werden und die Ergebnisse des Modells mit dem theoretischen Minimum entsprechend der Summenkurven verglichen werden.

Im Rahmen der Arbeit wurde dies einmal für die Beschichtungsanlage alleine und für das Beschichtungswerk in Kombination mit der Gießerei durchgeführt. Bei der Kombination mit der Gießerei wird nur der extern übertragbare Wärmestrom der Gießerei hinzugefügt. Die erstellten Summenkurven sind in Tabelle 57 im Anhang dargestellt. Ein Vergleich der minimalen Leistungsbedarfe entsprechend Summenkurven und Modellwerten ist in Tabelle 44 gegeben. Es ist zu erkennen, dass der theoretisch minimale Leistungsbedarf mit dem Modell exakt ermittelt wird.

Tabelle 44: Validierung der Modellwerte für $dT_{\min} = 25 \text{ °C}$.

Summenkurven	Modellwerte
Beschichtungsanlage alleine	
<ul style="list-style-type: none">• Wärmebedarf: 483,8 kW• Kältebedarf*: 291,7 kW	<ul style="list-style-type: none">• Wärmebedarf: 483,8 kW• Kältebedarf*: 291,7 kW
Beschichtungsanlage mit benachbarter Gießerei	
<ul style="list-style-type: none">• Wärmebedarf: 0 kW• Kältebedarf*: 1187,5 kW	<ul style="list-style-type: none">• Wärmebedarf: 0 kW• Kältebedarf*: 1187,5 kW
<ul style="list-style-type: none">• bzw. verfügbare Restwärme	

5.3.3. Vergleich des Modells

Im Folgenden werden Vergleiche im Hinblick auf Netzwerkstruktur und optimale minimale Temperaturdifferenz zwischen Modellergebnissen und dem Bericht von Grieder (2011) durchgeführt.

Netzwerkstruktur

Netzwerkstrukturen werden im Anhang anhand von Kreuztabellen dargestellt, in denen die zu transportierende Wärmemenge zwischen den Prozessen aufgetragen ist. Dabei wird unterschieden zwischen dem Netzwerk entsprechend Werten aus Grieder (2011) und der energetischen und wirtschaftlichen Optimierung der Beschichtungsanlage mit dem entworfenen Modell (vgl. Tabelle 58 bis Tabelle 60). Zwecks Vergleich wurde für die minimale treibende Temperaturdifferenz 25 °C gewählt, da tiefere Analysen in Grieder (2011) auf derselben Temperatur basieren. Aus den Tabellen lassen sich der ermittelte minimale Energiebedarf und die Anzahl der notwendigen Wärmeübertrager ableiten. Diese Größen sind je nach Fall in Abbildung 17 aufgetragen.

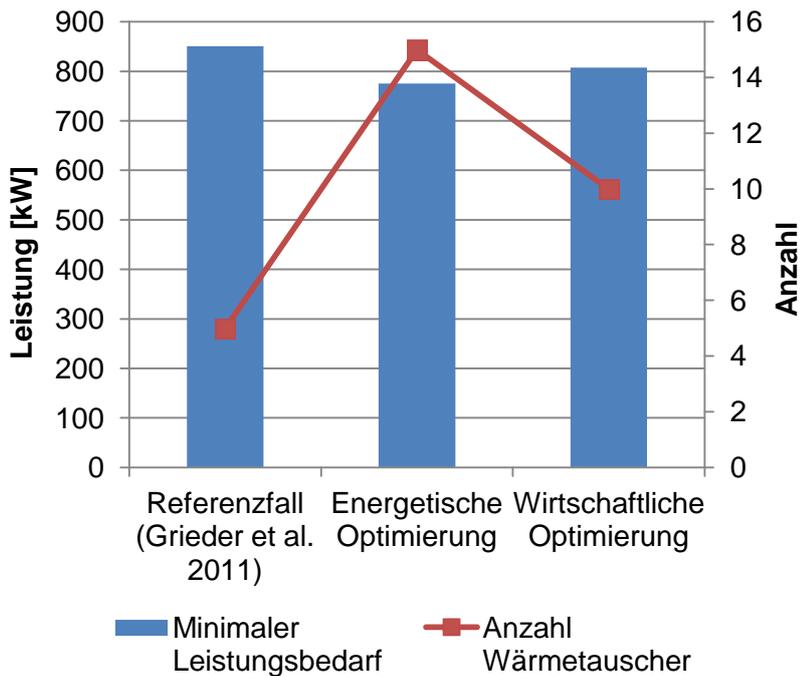


Abbildung 17: Anzahl Wärmeübertrager in der Beschichtungsanlage je nach Ansatz

Auf der Abbildung ist zu erkennen, dass der minimale Energiebedarf zwischen den Varianten um bis zu 10 % variiert. Die Anzahl der Wärmeübertrager schwankt dagegen stärker und ist bezogen auf Grieder (2011) bis zu dreimal so hoch. Hier offenbart sich der Unterschied zwischen Entwurfs- und Ziel-Optimierung, denn die Anzahl der Wärmeübertrager wurde bei Grieder (2011) bereits im Hinblick auf Aspekte der praktischen Umsetzbarkeit minimiert. In dem Modell wird die Anzahl der Wärmeübertrager nicht berücksichtigt, was zu Verbindungen mit relativ kleinen Wärmemengen führen kann. Die Designs der resultierenden Netzwerke sind somit „spaghettartig“ und würden in der Praxis nicht als technisch plausibel angesehen werden.

Optimales dT_{min}

In Grieder (2011) wird die optimale Temperaturdifferenz für die Beschichtungsanlage anhand von jährlichen Betriebskosten mit dem Programm PinCH ermittelt. Dabei wird ein globales Optimum bei 45 K und ein lokales Optimum bei 25 K ermittelt. Mit dem entwickelten Modell wurde ebenfalls die optimale Temperaturdifferenz anhand von Betriebskosten bestimmt. Dabei wurden ausschließlich Kosten für Wärmeübertrager berücksichtigt, um Vergleichbarkeit zu erzielen. Die treibende Temperaturdifferenz wurde in fünf Kelvin-Schritten variiert. Die diesbezügliche Entwicklung des Wärmetransports im Wärmeübertragernetzwerk und der entsprechende Bedarf für Wärme und Kälte sind in Abbildung 18 aufgetragen. Beim Kältebedarf ist darauf hinzuweisen, dass in der Beschichtungsanlage abzukühlende Prozesse vorhanden sind, bei denen Wärme auch an die Umgebung bzw. durch Schornsteine abgeleitet werden könnte. Kälte bezeichnet im engeren Sinne somit abzuführende Wärme.

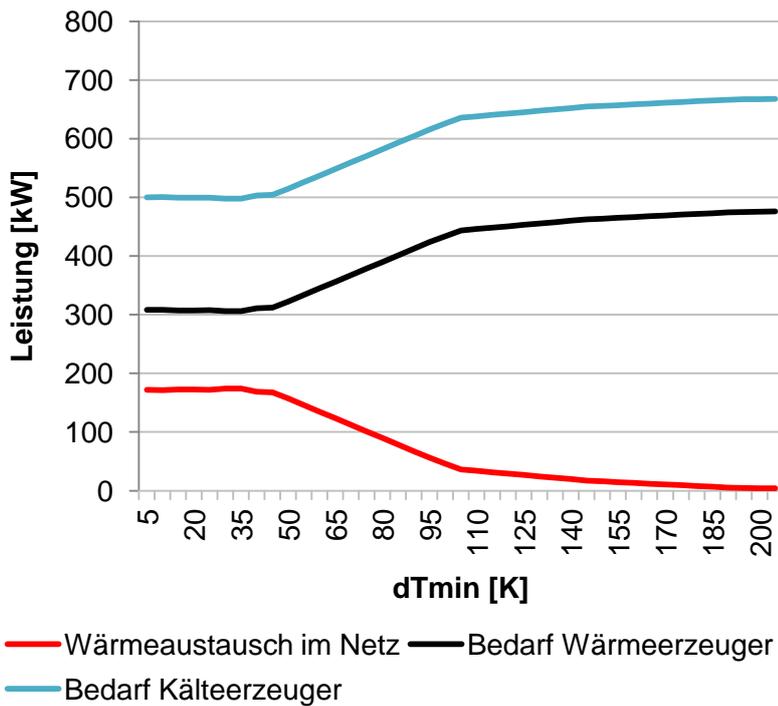


Abbildung 18: Variation dTmin für die Beschichtungsanlage – Leistungen

Die annuisierten Gesamtkosten in Abhängigkeit der treibenden Temperaturdifferenz sind in Abbildung 19 dargestellt. Es ergibt sich für die Modellergebnisse ein global optimales Optimum für die treibende Temperaturdifferenz bei 25 Kelvin. Dies entspricht dem lokalen Optimum in Grieder (2011).

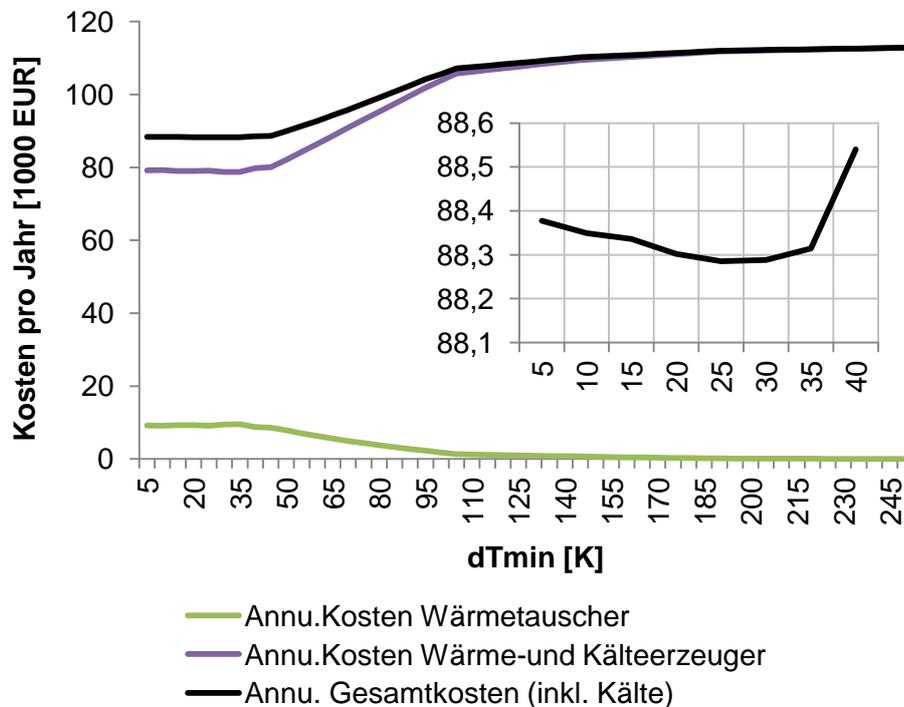


Abbildung 19: Variation dTmin für die Beschichtungsanlage – Kosten

5.3.4. Technisches und wirtschaftliches Potenzial

Das technische und wirtschaftliche Potenzial hängt von der Entfernung zwischen den betrachteten Fabriken ab. Entsprechend der Definitionen wird das Potenzial immer auf den gegenwärtigen Zustand bezogen.

Für den gegenwärtigen Zustand wird die Beschichtungsanlage entsprechend optimierter Art aus Grieder (2011) angenommen (vgl. Tabelle 45). In Tabelle 45 ist in einer Kreuztabelle der Leistungsbedarf für Wärmeerzeuger der Beschichtungsanlage ohne überbetriebliche Wärmeintegration, d. h. im konkreten Fall ohne Anschluss an die Gießerei, angegeben. Für 2.250 Betriebsstunden ergibt sich auf Basis des Leistungsbedarfs ein Wärmebedarf von etwa 1.170 MWh pro Jahr. Ein Anschluss der Gießerei kann diesen Bedarf senken. Das Modell ermittelt somit, wie viel Wärme über den Abgasstrang der Gießerei in Abhängigkeit der Entfernung an die Beschichtungsanlage geliefert werden könnte. Diese mögliche überbetriebliche Liefermenge reduziert somit den Leistungsbedarf für Wärmeerzeuger der Beschichtungsanlage und stellt somit das technische oder wirtschaftliche Potenzial für überbetriebliche Wärmeintegration für die betrachtete Nachbarschaft dar.

Das resultierende technische und wirtschaftliche Potenzial für die mit dem Modell ausgewertete exemplarische Nachbarschaft ist schließlich in Abbildung 20 gegeben.

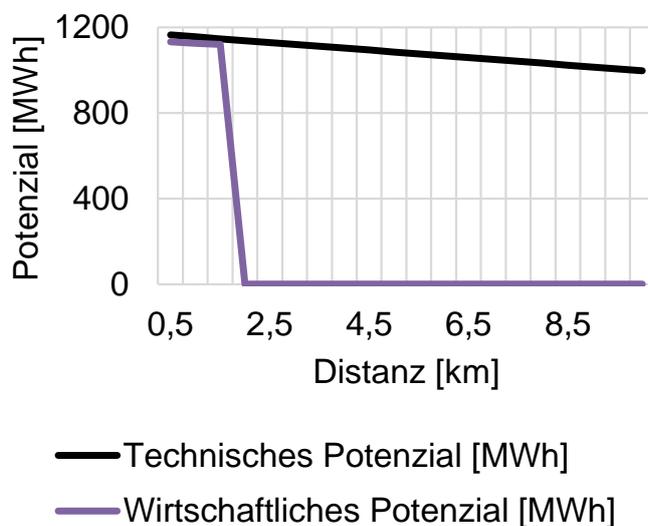


Abbildung 20: Technisches und wirtschaftliches Potenzial für die exemplarische Nachbarschaft

Tabelle 45: Kreuztabelle für Beschichtungsanlage (Werte entsprechend Grieder (2011)).

Heiß (links) über Kalt (rechts) in [kW]	Entfetten (Badheizung)	EPS-Ofen (Kammerheizung)	Schlickertrockner (Kammerheizung)	EPS-Ofen (Verbrennungsluft)	Schlickertrockner (Verbrennungsluft)	Haftwassertrockner (Kammerheizung)	Kälterzeuger	Summe
Entfetten (Kammer- abluft)	-	-	-	-	-	-	73,3	73,3
EPS-Ofen (Rauch- gase)	7,4	-	-	-	-	-	13,0	20,4
EPS-Ofen (Kammer- abluft)	34,7	-	-	-	-	-	34,9	69,6
Email- Ofen (Brüden)	14,1	-	-	-	-	-	56,4	70,5
Schlicker- trockner (Kammer- abluft)	-	-	-	2,8	-	-	30,0	32,8
Haftwasser- trockner (Kammer- abluft)	91,4	-	-	-	-	-	121,8	213,2
Wärme- erzeuger	9,0	173,0	157,0	9,4		173,0	-	521,4
Summe	156,6	173,0	157,0	9,4	2,8	173,0	329,3	850,8

5.3.5. Sensitivitätsrechnungen

Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wird der Einfluss der Kostenfaktoren, die für die überbetriebliche Wärmeintegration im Modell zusätzlich eingebracht wurden, untersucht. Im Rahmen der Sensitivitätsrechnungen wird nur noch die wirtschaftliche Optimiervariante des Modells betrachtet, da diese maßgeblich durch Modellannahmen und Modelllogik beeinflusst wird. Auf eine direkte Ausweisung der wirtschaftlichen Potenziale wird an der Stelle verzichtet, sondern es werden Leistungsdiagramme für die mit dem Modell generierten Netzwerke dargestellt. Dies ist für den Zweck der Sensitivitätsrechnung (dem Aufzeigen des Einflusses von im Modell eingebrachten Kostenfaktoren) zielführender, da so die Modelllogik besser dargestellt werden kann. Für die Sensitivitätsrechnungen werden grundsätzlich zwei Modellvarianten (direkt/indirekt) unterschieden. Bei der direkten Variante wird die Wärme des heißen Rauchgasstroms der Gießerei nicht auf ein Wärmeübertragermedium übertragen, wohingegen bei der indirekten Variante Wasserdampf als Wärmeübertragermedium verwendet wird (vgl. Kapitel 5). Zudem werden Kosten für die Wärmeabfuhr, also die Abkühlung heißer Rauchgasströme nicht mitberücksichtigt. Zentrale Eingangsparameter sind in Tabelle 46 gegeben.

Tabelle 46: Eingangsparameter Sensitivitätsrechnungen.

Betriebsstunden Beschichtungswerk	2.250
Betriebsstunden Gießerei	4.500
Brennstoffpreis in EURct./kWh	4,15
Strompreis in EURct./kWh	16,5
Kalkulatorischer Zins pro Jahr	3 %
Abschreibungsdauer in Jahren	30

Im ersten Teil der Analyse wird die Modelllogik anhand von Leistungsdiagrammen, die über die Entfernung differenziert sind, exemplarisch dargestellt. Danach wird jeweils einer der zusätzlich eingebrachten Kostenfaktoren für die Fallstudie angewendet und es wird die Entfernung zwischen den betrachteten Standorten schrittweise erhöht. Zudem werden für jeden Faktor zusätzlich zentrale Annahmen und Parameter variiert.

In Kapitel 5.3.6 werden schließlich zentrale Schlussfolgerungen aus den Sensitivitätsrechnungen zusammengefasst. Darauf aufbauend werden in Kapitel 5.4 Ansätze für Weiterentwicklungen aufgezeigt.

Darstellung der Modelllogik

Abbildung 21 zeigt die Wärmebereitstellung in Abhängigkeit der Entfernung für die betrachteten Standorte für die Modellvariante mit direkter sowie indirekter Wärmeübertragung. Diese ist nach zentralen Wärmeerzeugern und Wärmeintegration (Wärmenetz) differenziert, wobei zudem zwischen überbetrieblicher und innerbetrieblicher Wärmeintegration unterschieden wird. Bei dem Modelldurchlauf wurden zunächst ausschließlich Kosten für zentrale Wärmeerzeuger, Wärmeübertrager und Rohrleitungen mit einbezogen. Dabei sind in der Abbildung grundsätzlich drei charakteristische Bereiche zu erkennen, wobei der Wechsel zwischen den Bereichen mit steigenden Entfernungen stattfindet.

- Im ersten Bereich ist nahezu der komplette Anteil der Wärmeversorgung auf externe Wärmeintegration zurückzuführen.
- Im zweiten Bereich geht der Anteil der Wärmeversorgung durch externe Wärmeintegration zurück und wird durch eine Zunahme bei der innerbetrieblichen Wärmeintegration substituiert.
- Im dritten Bereich geht der Anteil der Wärmeversorgung durch externe Wärmeintegration weiter zurück und wird diesmal jedoch durch eine Zunahme der Wärmeleistung bei den zentralen Wärmeerzeugern kompensiert.

Das Diagramm zeigt somit plausibel die Modelllogik auf. Im ersten Bereich (bei kurzen Distanzen) ist die überbetriebliche Wärmeintegration aufgrund höherer Temperaturdifferenzen im Vorteil. Mit steigenden Entfernungen wird dieser Vorteil durch ebenfalls steigende Investitionen für Rohrleitungen immer kleiner und dies führt ab einer bestimmten Entfernung dazu, dass ein Teil der überbetrieblichen Wärmeintegration durch energetisch zulässige Verbindungen bei der innerbetrieblichen Wärmeintegration substituiert wird. Ein Teil der überbetrieblichen Wärmeintegration verbleibt jedoch, weil diese Verbindungen spezifisch immer noch günstiger sind, als auf zentrale Wärmeerzeuger zurückzugreifen. Im dritten Bereich (bei hohen Entfernungen) wird auch dieser Vorteil durch die Kosten für Rohrleitungen kompensiert. Die überbetriebliche Wärmeintegration wird dann nicht mehr gewählt und durch zentrale Wärmeerzeuger substituiert. Zudem ist zu erkennen, dass der Wechsel zwischen den Bereichen bei der indirekten Variante früher stattfindet. Bei der indirekten Wärmeintegration wird ein Wärmeübertrager zusätzlich je überbetriebliche Verbindung benötigt, was einen Nachteil darstellt. Vorteilhaft ist, dass die Rohrdurchmesser zum Transport der Wärme kleiner sind. Dieser Vorteil überwiegt den Nachteil insgesamt jedoch nicht (ohne Berücksichtigung von Arbeitsmaschinen).

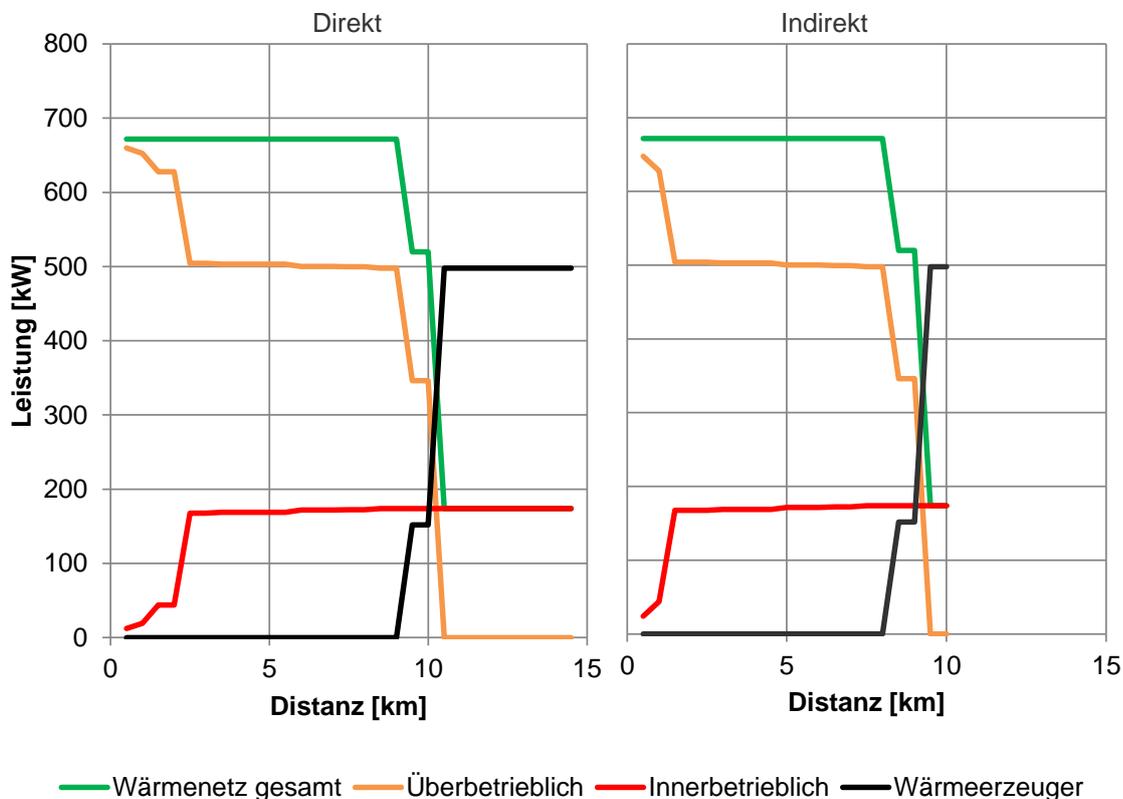


Abbildung 21: Zusammensetzung der Wärmeleistung

Anmerkung: inkl. Wärmeübertrager- und Rohrleitungskosten

Einfluss Rohrleitungen und Wärmeverluste

Abbildung 22 zeigt die überbetriebliche Wärmebereitstellung durch die Gießerei für die Beschichtungsanlage in Abhängigkeit der Entfernung, wobei ausschließlich Kosten für Wärmeübertrager und Rohrleitungen berücksichtigt worden sind. Zudem sind die spezifischen Investitionen für die Rohrleitungen einmal um 75 % reduziert und einmal um 100 % erhöht worden. Für beide Modellvarianten ist zu erkennen, dass bei Annahme besonders niedriger Investitionen für die Rohrleitungen (25 %) überbetriebliche Wärmübertragung bis zu einer Entfernung von über 35 Kilometern stattfindet, bei hoch angesetzten Investitionen (200 %) beträgt diese Entfernung lediglich rund 5 Kilometer.

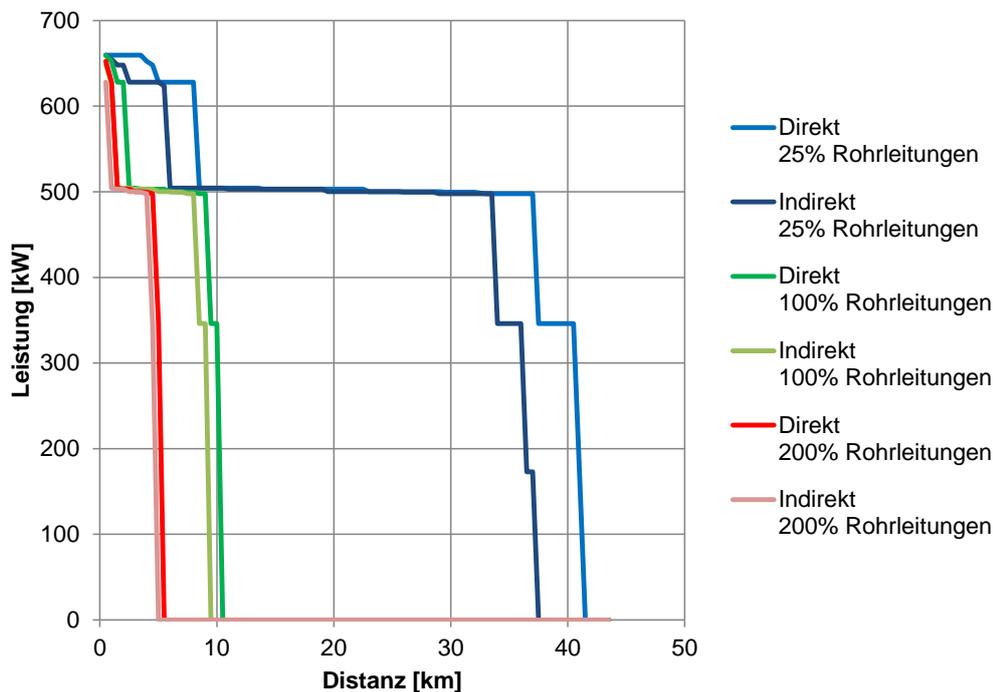


Abbildung 22: Überbetriebliche Wärmeleistung mit Wärmeübertrager- und Rohrleitungskosten

In Abbildung 23 sind neben Kosten für Wärmeübertrager und Rohrleitungen auch Kosten für Wärmeverluste mit berücksichtigt. Dies führt dazu, dass die maximalen Entfernungen mit überbetrieblicher Wärmeintegration deutlich fallen, von etwa zehn Kilometer auf etwa fünf bis sechs Kilometer (für die 100 %-Fälle).

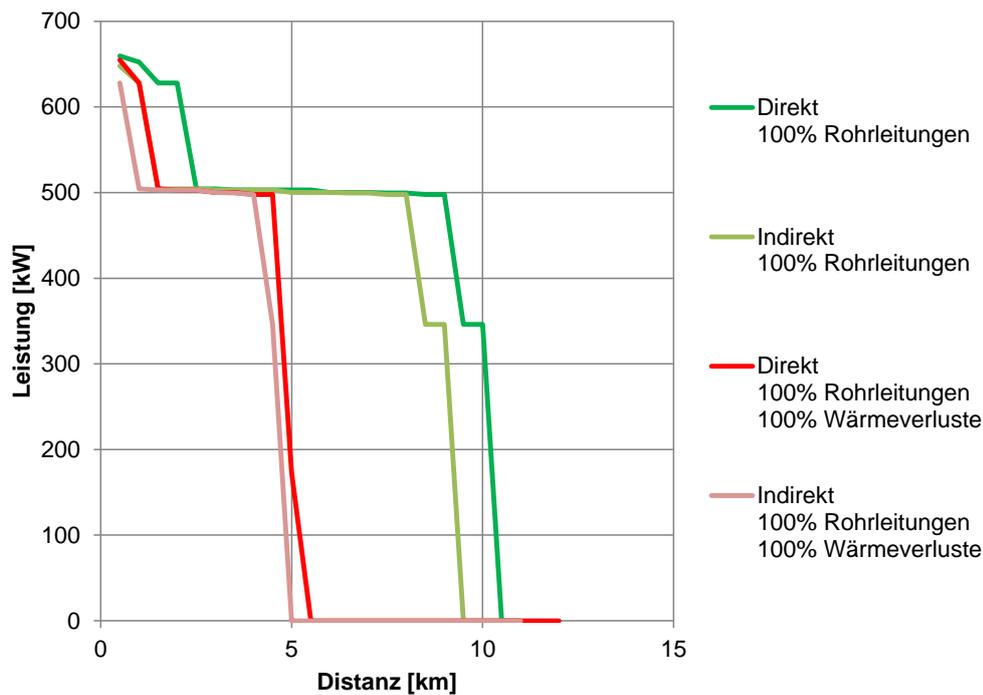


Abbildung 23: Überbetriebliche Wärmeleistung

Anmerkung: mit Wärmeübertrager-, Rohrleitungs- und Wärmeverlustkosten

Einfluss Arbeitsmaschinen

In Abbildung 24 ist äquivalent zu den vorangegangenen Kapiteln die überbetriebliche Wärmebereitstellung für beide Modellvarianten dargestellt, wobei neben den Investitionen für Wärmeübertrager und Rohrleitungen zusätzlich Betriebskosten und Investitionen für Arbeitsmaschinen berücksichtigt sind. Bezogen auf den Fall mit 100 % Rohrleitungskosten geht die maximale Entfernung bei beiden Varianten etwa drei bis vier Kilometer zurück.

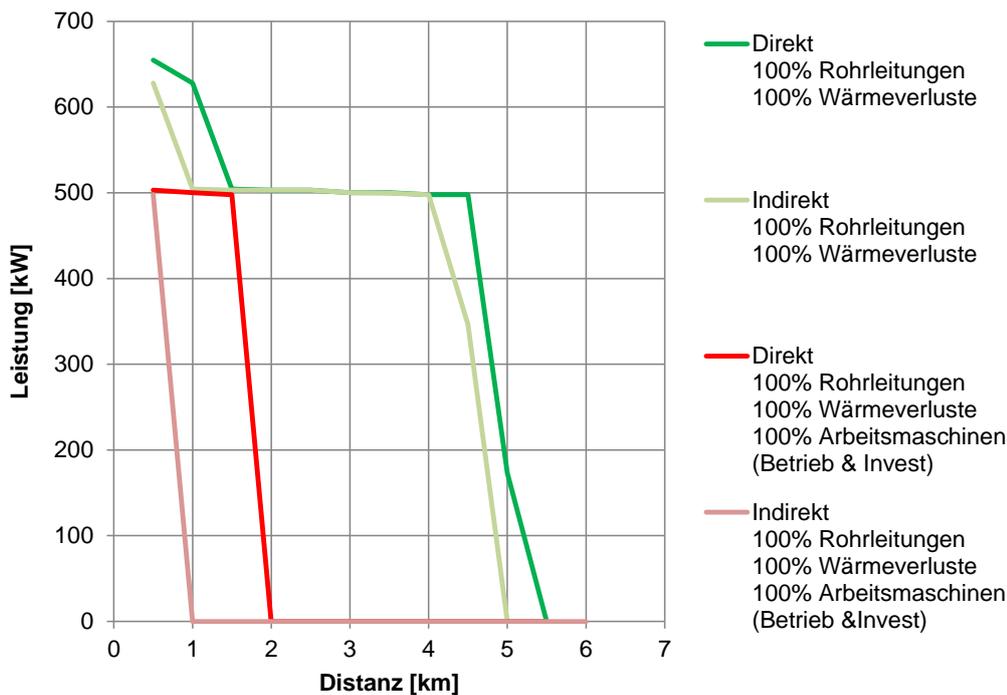


Abbildung 24: Überbetriebliche Wärmeleistung

Anmerkung: mit Kosten wie bei Abbildung 23 inklusive Arbeitsmaschinen

Einfluss Dynamik

Abbildung 25 zeigt den Einfluss der Einbeziehung zeitlicher Differenzen bei den Produktionsbetrieben. Im Modell werden hierfür zwei Zeitscheiben mit je 2.250 Stunden hinterlegt, wobei in der ersten Zeitscheibe beide Betriebe bei Volllast produzieren (Teillastfaktor $PF_{1,1} = PF_{1,2} = 1$). Für den zweiten Zeitpunkt wird der Teillastfaktor der Gießerei auf Volllast belassen ($PF_{2,2} = 1$) und der Teillastfaktor der Beschichtungsanlage wird auf einen sehr niedrigen Wert reduziert ($PF_{2,1} = 0,0001$). Wenn nun eine Verbindung für die erste Zeitscheibe erstellt wird, dann bewirkt die Randbedingung aus Gleichung (5.54), dass auch eine Verbindung der gleichen Kombination für die zweite Zeitscheibe erstellt werden muss (proportional zur Teillast). Infolgedessen werden auch für die zweite Zeitscheibe Kosten veranschlagt. Wenn nun in der zweiten Zeitscheibe wenig Wärme transportiert wird, dann sind diese spezifischen Kosten aufgrund der Methodik vergleichsweise höher als in der ersten Zeitscheibe. Der Grund hierfür ist, dass die spezifischen Kosten auf die maximal austauschbare Menge zwischen Energieangebot und Energienachfrage bezogen und spezifiziert werden, bspw. bei den Rohrleitungen (vgl. Gleichung (5.29)). Diese Vorgehensweise bewirkt somit, dass zeitliche Differenzen zwischen den Produktionsbetrieben dazu führen, dass die überbetriebliche Wärmeintegration weniger wirtschaftlich bewertet wird. Für die Modellvariante mit direktem Wärmetransport lässt sich infolgedessen beobachten, dass bei Einbeziehung zeitlicher Differenzen die überbetriebliche Wärmeintegration nur über kürzere Distanzen gewählt wird. Bei der indirekten Wärmeintegration wird ab einer Entfernung von 500 Metern keine überbetriebliche Wärmeintegration mehr veranschlagt.

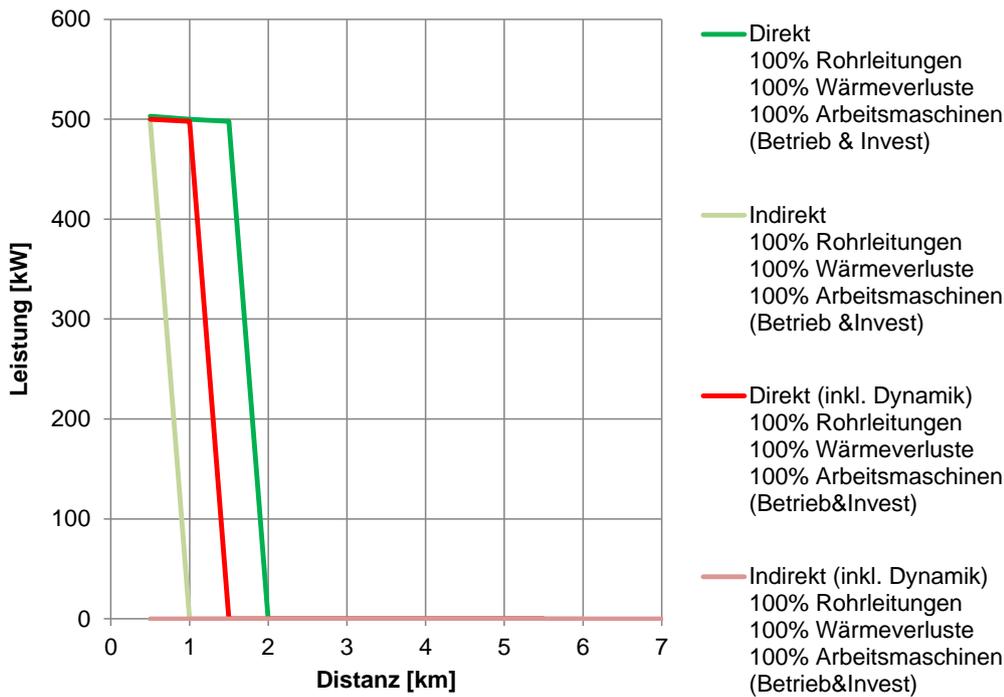


Abbildung 25: Einfluss der Dynamik für die Fallstudie

Einfluss Wärmeübergangszahlen

Die errechneten Investitionen für Wärmeübertrager sind ein zentraler Faktor im Modell, da diese unabhängig davon, ob die Wärmeintegration innerbetrieblich oder überbetrieblich stattfindet, mit einbezogen werden. Im Modell werden notwendige Flächen für Wärmeübertrager auf Basis der logarithmischen Temperaturdifferenz und angenommenen Wärmeübergangszahlen errechnet. Im VDI-Wärmeatlas werden Bandbreiten für Wärmeübergangszahlen nach Art der Medienkombination (flüssig/flüssig, flüssig/gasförmig usw.) differenziert für Rohrbündelwärmeübertrager angegeben (vgl. Tabelle 47).

Tabelle 47: k-Werte Bereich nach VDI.

Medienkombination	k-Wert Bereich [W/(m ² K)]
Gas innerhalb und außerhalb der Rohre (je 1 bar)	5 bis 35
Flüssigkeit innerhalb und Gas(1 bar) außerhalb der Rohre, oder umgekehrt	15 bis 70
Flüssigkeit innerhalb und außerhalb der Rohre	150 bis 1200

Für das Modell wird in der Grundkonfiguration der Wert in der Mitte der Bandbreite für die jeweilige Medienkombination als Wärmeübergangszahl angenommen, also bspw. 20 W/(m²K) für Gas/Gas-Kombinationen. Dieser Wert kann in der Praxis jedoch abweichen und daher wurden diesbezüglich Sensitivitäten für die Varianten 1-a und 2-a gerechnet. Dabei wurden jeweils der obere und untere Grenzwert der Bandbreiten aus Tabelle 47 für die Wärmeübergangszahlen angenommen, also bspw. 5 W/(m²K) für Gas-Gas-Verbindungen für den unteren Grenzwert. Es werden somit im Folgenden drei Fälle unterschieden; Hoch, Mittel und Niedrig.

Abbildung 26 zeigt den Einfluss der zuvor erläuterten Variation auf die maximale Entfernung mit überbetrieblichem Wärmetransport für die Modellvariante mit direktem Wärmetransport. Bei niedrigen Wärmeübergangszahlen wird ab einem Kilometer Entfernung keine Wärme überbetrieblich transportiert. Bei hohen Wärmeübergangszahlen wird tendenziell etwas mehr Wärme überbetrieblich transportiert, als dies bei mittleren Übergangszahlen der Fall ist. Abbildung 27 zeigt die entsprechende Zusammensetzung der Wärmeleistung differenziert nach überbetrieblichem, innerbetrieblichem Wärmetransport und zentralen Wärmeerzeugern. Dabei ist zu erkennen, dass sich die innerbetriebliche Wärmeleistung in allen drei Fällen ähnlich verhält, d. h. auch bei Variationen der Wärmeübergangszahlen bleiben viele innerbetriebliche Verbindungen in diesem Fall wirtschaftlich.

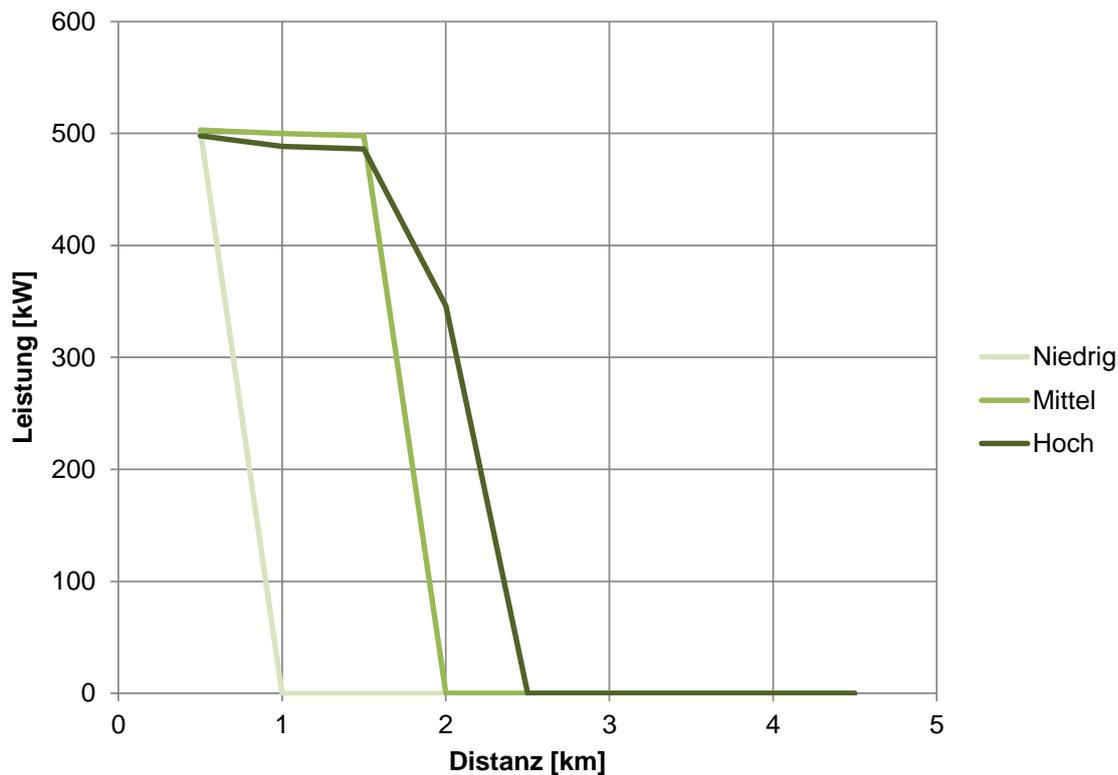


Abbildung 26: Überbetriebliche Wärmeintegration bei Variation der k-Werte (direkte Variante)

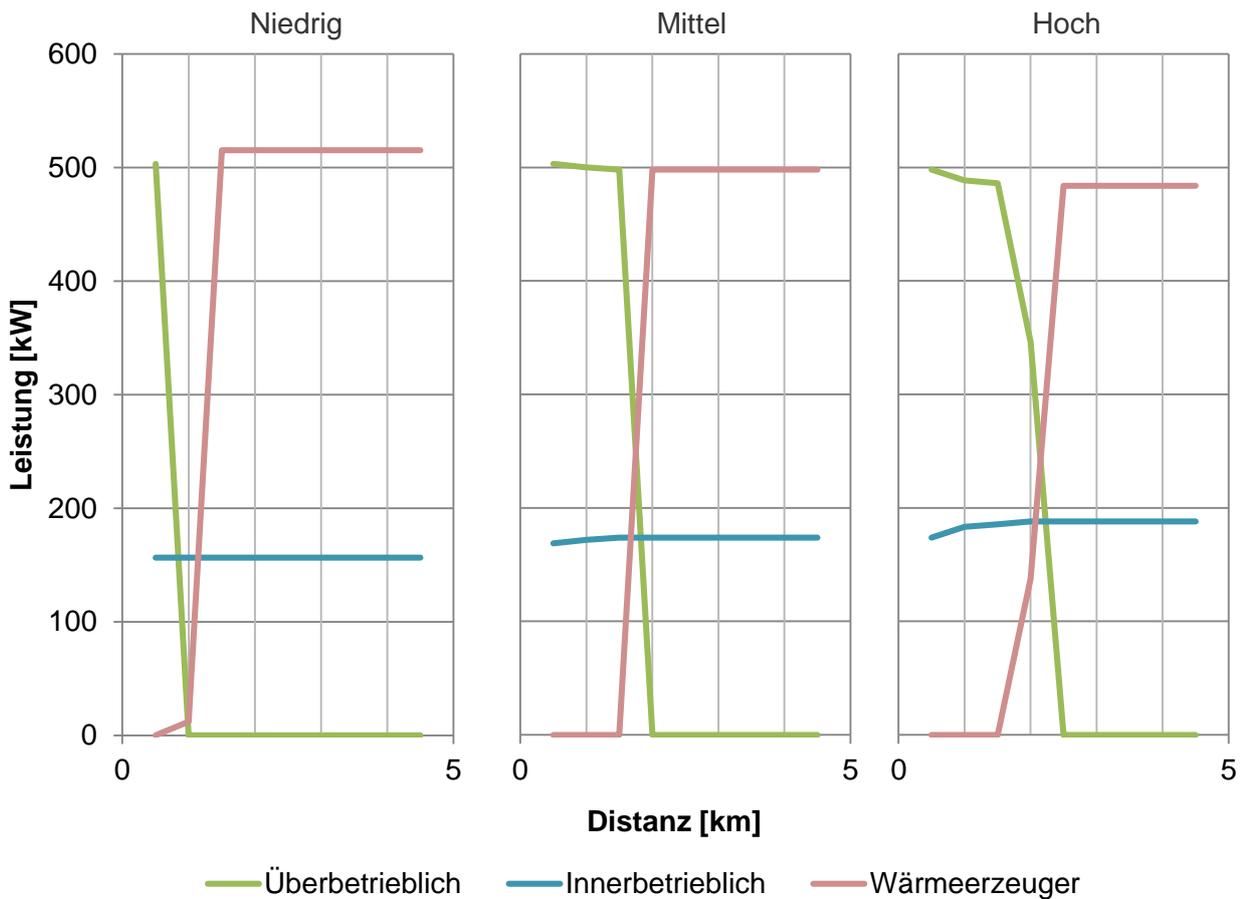


Abbildung 27: Zusammensetzung der Wärmeleistung bei Variation der k-Werte (direkte Variante)

Bei der Modellvariante mit indirektem Wärmetransport ist das Verhalten strukturell äquivalent und daher wird auf entsprechende Abbildungen an dieser Stelle verzichtet.

Wärmegestehungskosten

Abschließend ist der Einfluss der unterschiedlichen Kostenfaktoren auf die Entwicklung des überbetrieblichen Wärmetransports über die Entfernung zusammenfassend in Abbildung 28 dargestellt. Dabei handelt es sich jeweils um 100 %-Fälle, d. h. Investitionen etc. werden entsprechend der Ursprungskonfiguration angenommen.

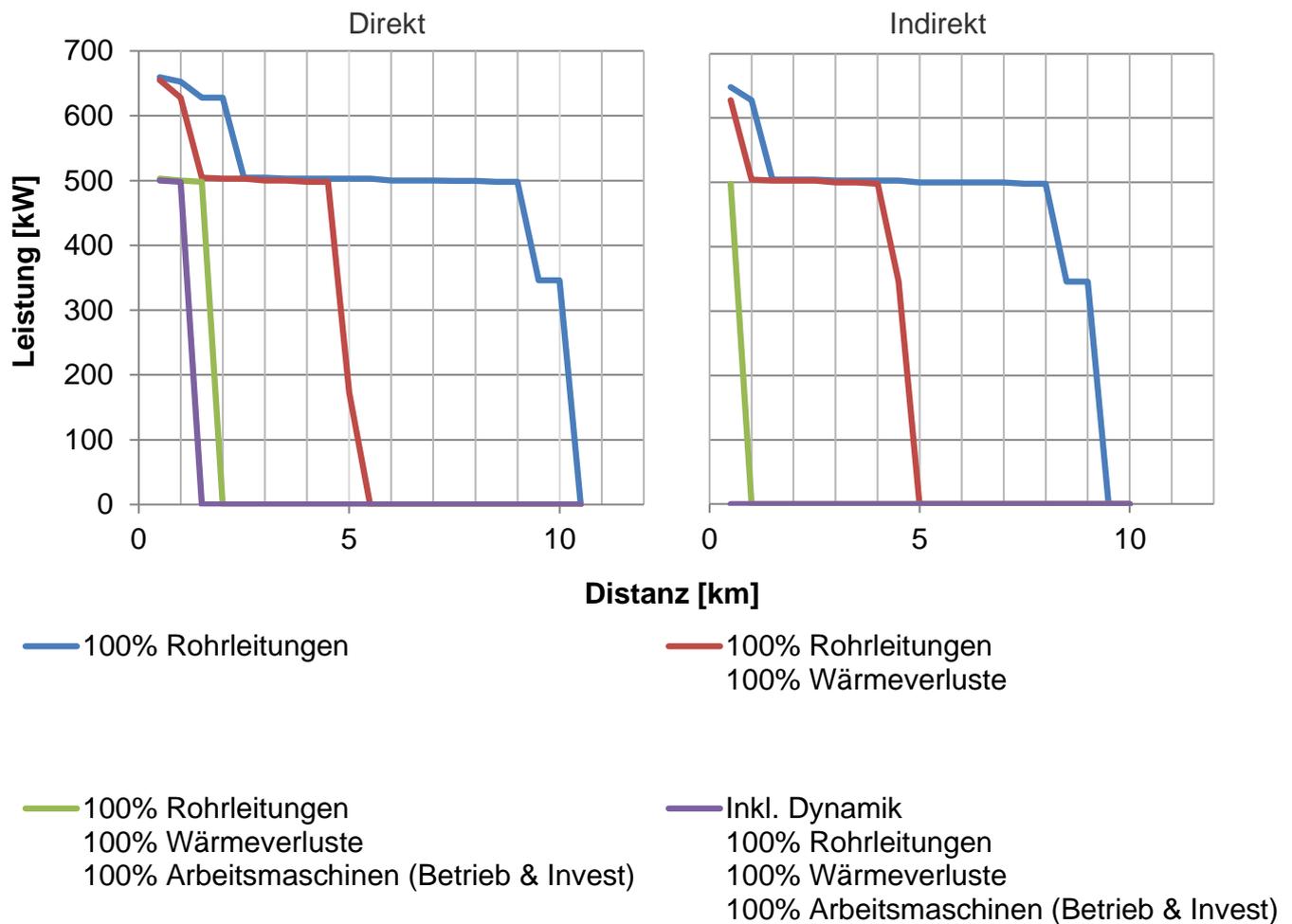


Abbildung 28: Maximale Distanzen mit überbetrieblichem Wärmetransport für die Fallstudie

Die aus den Abbildungen und den Modellrechnungen resultierenden Wärmegestehungskosten der überbetrieblichen Wärmeintegration sind in Abbildung 29 dargestellt. Dabei sind die Kosten, die bei der maximalen wirtschaftlichen Distanz bei Hinzufügen aller Kostenfaktoren auftreten, durch eine horizontal gestrichene Linie gekennzeichnet. Bei der direkten Modellvariante findet ein überbetrieblicher Wärmetransport unter Berücksichtigung aller Kostenfaktoren bis etwa 1,5 Kilometer statt, bei der indirekten Variante bis etwa 500 Meter. Die Wärmegestehungskosten für die überbetriebliche Wärmeintegration betragen in beiden Fällen rund 4,5 EURct/kWh. Entsprechende relative Kostenbestandteile sind in Abhängigkeit der Entfernung in Abbildung 30 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die relativen Anteile für Rohrleitungen und Wärmeverluste mit der Entfernung steigen.

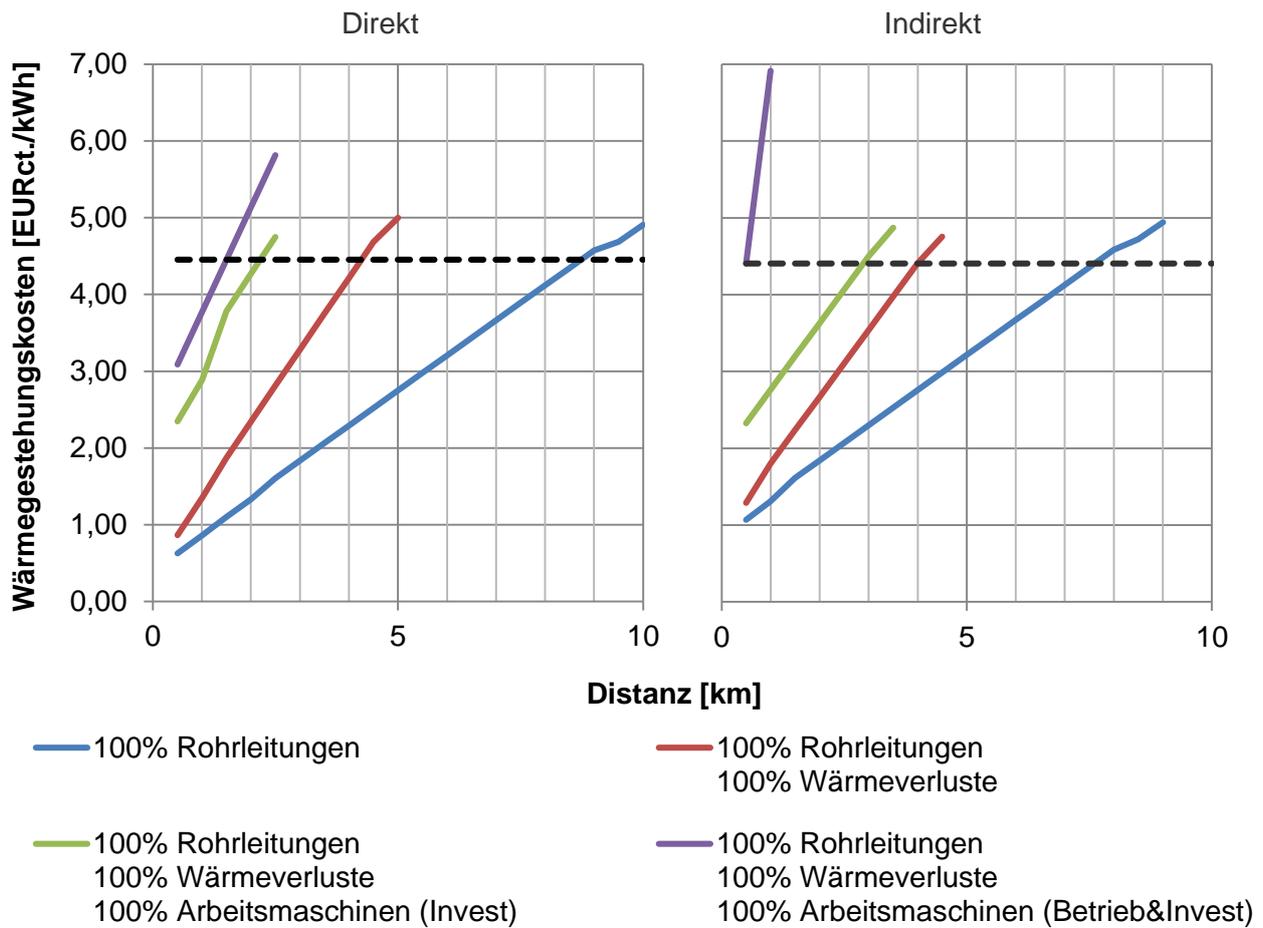


Abbildung 29: Wärmegestehungskosten der überbetrieblichen Wärmeintegration die Fallstudie

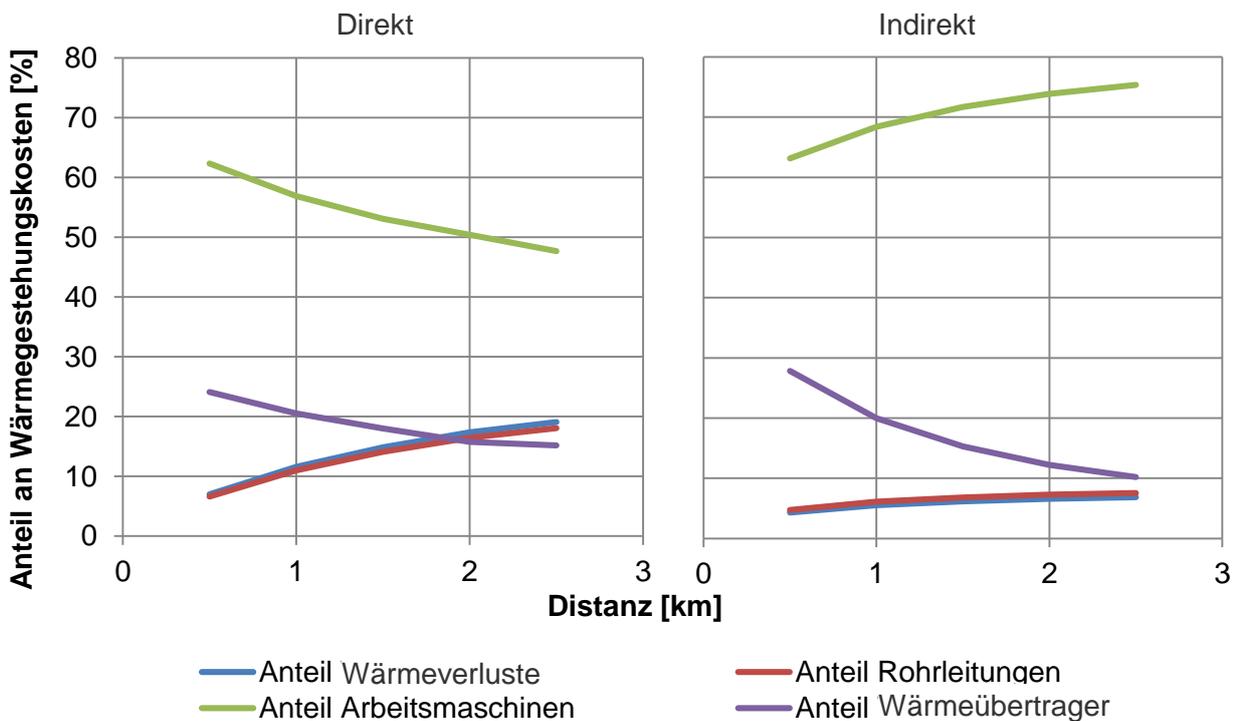


Abbildung 30: Anteile der eingebrachten Kostenfaktoren an Wärmegestehungskosten

5.3.6. Ergebnisse: Sensitivität und Modellbewertung

Mit dem in diesem Kapitel entwickelten Modell kann das technische und wirtschaftliche Potenzial für die überbetriebliche Wärmeintegration für eine Kombination von Produktionsstandorten berechnet werden. Prinzipiell kann es somit als Grundlage zur Berechnung des technischen und wirtschaftlichen Potenzials für die überbetriebliche Wärmeintegration in Deutschland dienen.

Mit dem entwickelten Modell wurde im Vorangegangenen eine Fallstudie inklusive Validierung und Sensitivitätsrechnungen durchgeführt. Im Folgenden werden diesbezüglich zentrale Ergebnisse zusammengefasst, die sich auf drei Bereiche beziehen.

- Ersten werden zentrale Erkenntnisse aus den Sensitivitätsrechnungen im Hinblick auf den Einfluss zusätzlich eingebrachter Kostenfaktoren in das Modell zusammengefasst.
- Zweitens wird das Modell im Hinblick auf die Eignung zur Bewertung der überbetrieblichen Wärmeintegration anhand zentraler Vor- und Nachteile diskutiert.
- In einem Folgekapitel werden schließlich Ansatzpunkte zur Weiterentwicklung aufgezeigt.

Ergebnisse: Einfluss (zusätzlich) eingebrachter Faktoren

Wärmeübertrager

Zur Variation von Investitionen für Wärmeübertrager können grundsätzliche spezifische Investitionen für die Wärmeübertrager, aber auch entsprechende Wärmeübergangszahlen variiert werden. In der Fallstudie wurden Wärmeübergangszahlen variiert, da dann ebenfalls die Konkurrenz zwischen überbetrieblicher und innerbetrieblicher Wärmeintegration exemplarisch aufgezeigt wird.

In der Fallstudie werden bei niedrigen Wärmeübergangszahlen bei sehr kurzen Entfernungen ($< 500\text{m}$) keine innerbetrieblichen Verbindungen gewählt, da sich die niedrigen Wärmeübergangszahlen auch nachteilig auf die innerbetriebliche Wärmeintegration auswirken. Es werden stattdessen überbetriebliche Verbindungen gewählt, da sich dort die höheren logarithmischen Temperaturdifferenzen vorteilhaft auswirken. Bei etwas höheren Entfernungen ($> 1\text{ km}$) werden dann keine überbetrieblichen Verbindungen mehr gewählt.

Die Netzwerke mit hohen und mittleren Wärmeübergangszahlen unterscheiden sich untereinander kaum. Werden diese Netzwerke mit den Netzwerken mit niedrigen Wärmeübergangszahlen verglichen, so gibt es grundsätzlich zwei Unterschiede. Zum einen sind die maximalen Entfernungen bis zu denen ein überbetrieblicher Wärmetransport stattfindet höher und zum anderen findet auch bei kurzen Entfernungen innerbetriebliche Wärmeintegration statt. Dies heißt, dass sich bei mittleren und hohen Wärmeübergangszahlen der Vorteil der höheren logarithmischen Temperaturdifferenz im Fallbeispiel nicht auswirkt. Variationen der Wärmeübergangszahlen verursachen in der Methodik also nicht nur Variationen der maximal wirtschaftlichen Entfernungen, sondern beeinflussen auch Netzwerkstrukturen maßgeblich. Dies gilt somit äquivalent für die Kosten von Wärmeübertragern.

Rohrleitungen und Wärmeverluste

Die Einbeziehung von Rohrleitungskosten hat erheblichen Einfluss auf die maximal wirtschaftliche Entfernung der überbetrieblichen Wärmeintegration. Dies wird insbesondere anhand der Variation der spezifischen Rohrleitungskosten deutlich. Beispielsweise beträgt die maximale wirtschaftliche Distanz mit ursprünglich angenommenen Rohrleitungskosten etwa zehn Kilometer. Eine 75 %-Reduktion der spezifischen Kosten erhöht die maximal wirtschaftliche Distanz jedoch um bis zu dreißig Kilometer. Werden für den Fall mit ursprünglichen Rohrleitungskosten zusätzlich Wärmeverluste für die Rohrleitungen mit einbezogen, dann reduziert sich die maximale wirtschaftliche Distanz auf etwa fünf Kilometer.

Arbeitsmaschinen

Die Sensitivitätsanalyse hat ergeben, dass die Einbeziehung von Betriebskosten für Arbeitsmaschinen ebenfalls sehr wichtig ist. Durch Hinzufügen von Investitionen und Betriebskosten für Arbeitsmaschinen reduziert sich die maximale wirtschaftliche Distanz in beiden Fällen zusätzlich um mehrere Kilometer.

Dynamik

Die zusätzlich eingebrachte Formulierung zur Abbildung von Produktionszeiten (vgl. Kapitel 5.2.5) wird verwendet, wenn sich die Produktionszeiten der Betriebe unterscheiden. In der methodischen Umsetzung werden für Verbindungen zwischen zwei Standorten auch Kosten veranschlagt, wenn kein Wärmetransport zwischen den Standorten stattfindet. Mit dieser Vorgehensweise können fixe Betriebskosten für überbetriebliche Verbindungen in der Methodik aufgenommen werden. Die maximal wirtschaftlichen Entfernungen reduzieren sich dann entsprechend.

Ergebnisse: Diskussion des Modells

Auf Basis der in der Fallstudie gerechneten Sensitivitäten ergeben sich zentrale Vorteile und Nachteile bei der Bewertung der überbetrieblichen Wärmeintegration mit dem entwickelten Modell. Diese werden im Folgenden aufgelistet.

Nachteile:

- Die Rohrleitungsgeometrie und somit auch die Abbildung von Druckverlusten ist stark vereinfacht. Insbesondere bei Rohrleitungen könnten die Druckverluste in der Realität stark von Modellrechnungen abweichen, da bspw. Krümmungen etc. starken Einfluss auf die Druckverluste haben. Diese sind in einem Modell jedoch schwer zu antizipieren.
- Zeitliche Differenzen bei den Produktionszeiten zwischen den Betrieben werden durch Hinzufügen zusätzlicher Randbedingungen adressiert. Bei der vorgestellten Vorgehensweise hängen fixe Kostenbestandteile für Zeiten, in denen kein Wärmeaustausch stattfindet, jedoch implizit von der Lösung ab. Sie werden somit nicht vorab fix spezifiziert, sondern relativ dargestellt. Prinzipiell lassen sich jedoch auch fixe, leistungsabhängige Kosten spezifizieren. Hier müssten jedoch zunächst Erfahrungswerte aus der Praxis erfasst und eingearbeitet werden.

Vorteile:

- Mit Hilfe des vorgestellten Ansatzes lassen sich relevante Investitionen für überbetriebliche Wärmeübertragernetzwerke wie Wärmeübertrager, Rohrleitungen, Arbeitsmaschinen usw. plausibel adressieren. Auch wenn es sich um keine technische Detailplanung handelt, so lässt sich mit dem Ansatz vergleichsweise schnell das notwendige Investitionsvolumen in Abhängigkeit der zu überbrückenden Entfernung abschätzen.
- Auf Basis der ermittelten Werte können Wärmegestehungskosten für potenzielle Wärmeübertragernetzwerke vergleichsweise zügig errechnet werden. Im Rahmen von Investitionsentscheidungen in betriebliche Infrastruktur stellt dies somit eine wertvolle zusätzliche Information dar.
- Die Netzwerkgenerierung und Bewertung ist automatisiert auf viele unterschiedliche Standort- bzw. Prozesskonfigurationen in vergleichsweise kurzer Zeit anwendbar. Beispielsweise dauerte die Generierung der Netzwerke für die Fallstudie für Entfernungen bis zehn Kilometer etwa zehn Minuten. Werden zusätzlich automatisierte Auswertungen einprogrammiert, so erlaubt der Ansatz, somit Potenziale für geographische abgegrenzte Regionen deutlich schneller abzuschätzen, als dies mit manuellen Methoden möglich ist. Im Rahmen der übergeordneten Fragestellung, bei dem eine systematische Vorgehensweise zur Ermittlung von Energieeinsparpotenzialen durch überbetriebliche Wärmeintegration entwickelt wird, stellt dies einen zentralen Vorteil dar.

5.4. Mögliche Modellweiterentwicklungen

Die Sensitivitätsrechnungen in der Fallstudie zeigen, dass Investitionen und Betriebskosten für Arbeitsmaschinen schon bei geringen Entfernungen maßgeblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der überbetrieblichen Wärmeintegration haben. In der Modellogik wurde die Rohrleitungsgeometrie stark vereinfacht angenommen und nicht optimiert. Eine konsequente Weiterentwicklung des vorgestellten Ansatzes besteht somit darin, auch die Rohrleitungsdurchmesser durch Optimierung im Hinblick auf Betriebskosten zu bestimmen. Das Problem wäre dann jedoch nicht mehr linear formuliert, da der Druckverlust proportional zu $1/D^4$ ist, was unter Umständen bedeutend höhere Rechenzeiten zur Folge hätte. Eine solche Weiterentwicklung könnte beispielsweise in einer sequentiellen Optimierung umgesetzt werden. Dabei würde im ersten Schritt ein energetisch optimales Wärmeübertragernetzwerk generiert werden. Im zweiten Schritt müssten dann optimale Rohrleitungsdurchmesser im Hinblick auf Druckverluste für das im ersten Schritt ermittelte Netzwerk generiert werden. Dies könnte ebenfalls durch eine Optimierung geschehen. Die resultierenden Investitionen und Kosten aus beiden Schritten würden dann zur Bewertung verwendet werden. Dabei handelt es sich dann jedoch nicht um ein globales Optimum, denn schließlich werden die Rohrleitungsdurchmesser lediglich auf Basis der energetischen Optimierung ermittelt und nicht initial in die Netzwerkgenerierung mit einbezogen. Um dem entgegenzukommen könnte hier ein iteratives Verfahren denkbar sein. Die spezifischen Kosten für Druckverluste, die nach dem zweiten Schritt ermittelt worden sind, könnten genutzt werden, um wiederum initial ein Netzwerk zu entwerfen. Dieses iterative Verfahren könnte solange wiederholt werden, bis die Wirtschaftlichkeit des Netzwerks nicht mehr höher wird.

Auch bei einer Weiterentwicklung der Methode wäre es jedoch fragwürdig, inwieweit Druckverluste auf Basis fiktiv konstruierter Rohrleitungspläne tatsächlich realitätsnah abgebildet werden können.

Schließlich haben Armaturen und Biegungen bedeutenden Einfluss auf den Druckverlust von Rohrleitungssystemen. Inwieweit solche Bauteile notwendig sind, hängt in erster Linie von den baulichen Gegebenheiten vor Ort ab.

Für die übergeordnete Fragestellung sollen Kosten für die Wärmeverteilung in überbetrieblichen Wärmenetzwerken auch ohne eine technische Detailplanung antizipiert werden. Ein weiterer Ansatz besteht somit darin, Kosten für die Wärmeverteilung nicht mehr auf Basis technischer Zusammenhänge zu hinterlegen, sondern auf Basis vorhandener Erfahrungswerte abzuleiten und zu verwenden. Im konkreten Fall könnten beispielsweise Kosten für Wärmeübertrager weiterhin auf Basis der bereits formulierten Zusammenhänge ermittelt werden und Kosten für die Wärmeverteilung würden zudem auf Basis von Kennwerten hinzugezogen werden. Hier wäre der Vorteil, dass Expertenwissen in das Modell mit eingearbeitet werden könnte. Dies verursacht jedoch Aufwände bei der Erhebung von Daten. Für den Bereich der Wärmeintegration wäre es beispielsweise denkbar, Beratungsunternehmen, die Projekte im Bereich Wärmeintegration durchgeführt haben, zu kontaktieren und die entsprechenden Projekte im Hinblick auf Wärmeverteilungskosten auszuwerten.

6. Modell zur Lokalisierung von Nachbarschaften (Bottom-Up II/II)

Im vorliegenden Kapitel wird ein raumanalytisches Modell zur Lokalisierung aussichtsreicher Nachbarschaften von Produktionsstandorten für die überbetriebliche Wärmeintegration entwickelt und für Deutschland angewendet. Das Kapitel ist dabei wie folgt strukturiert:

Eingangs wird die Raumanalyse durch eine allgemeingültige Definition eingeführt. Daran anschließend wird eine qualitative Abwägung von allgemeinen raumanalytischen Methoden für die Modellentwicklung durchgeführt. Hierfür werden denkbare Methoden zur Lösung der Fragestellung kurz eingeführt und abschließend wird die Wahl einer bestimmten Methode, die im weiteren Verlauf verwendet wird, begründet (vgl. Kapitel 6.1). Auf Basis des Vorangegangenen werden Grundlagen der verwendeten Methode in Kapitel 6.2 vorgestellt, dessen Kern es ist, Nachbarschaftsverhältnisse zwischen Objekten unterschiedlicher Art auszuwerten. Die Methode wird in Kapitel 6.3 für Betriebe des verarbeitenden Gewerbes für Deutschland angewandt und so werden diesbezügliche Nachbarschaften ermittelt.

Mit den aus dem vorigen Schritt ermittelten Nachbarschaften lassen sich zwar Aussagen über die Häufigkeit der Nachbarschaft bestimmter Wirtschaftszweige treffen, doch sind Aussagen über Potenziale für die überbetriebliche Wärmeintegration noch nicht möglich, da bisher keine energiebezogenen Aspekte mit einbezogen worden sind. Das Modell ist somit im Hinblick auf den Zweck nicht vollständig. Daher werden die ermittelten Nachbarschaften in einem nächsten Schritt um energiebezogene Informationen, die auf Ebene von Wirtschaftszweigen vorliegen, ergänzt. Auf Basis der Synthese von ermittelten Nachbarschaften mit energiebezogenen Informationen werden zudem Kriterien zur gezielteren Auswertung der ermittelten Nachbarschaften im Hinblick auf die überbetriebliche Wärmeintegration definiert (vgl. Kapitel 6.4). Das endgültige Modell besteht somit aus drei Elementen: der Methode zur Nachbarschaftsauswertung, der Anreicherung von energiebezogenen Informationen und der Anwendung von Kriterien zur Sortierung der Nachbarschaften (vgl. Abbildung 31). Das Modell wird abschließend für Deutschland angewendet und die Ergebnisse werden zusammengefasst (vgl. Kapitel 6.5). In den folgenden Unterkapiteln werden die entsprechenden Bestandteile sequentiell durchgearbeitet.

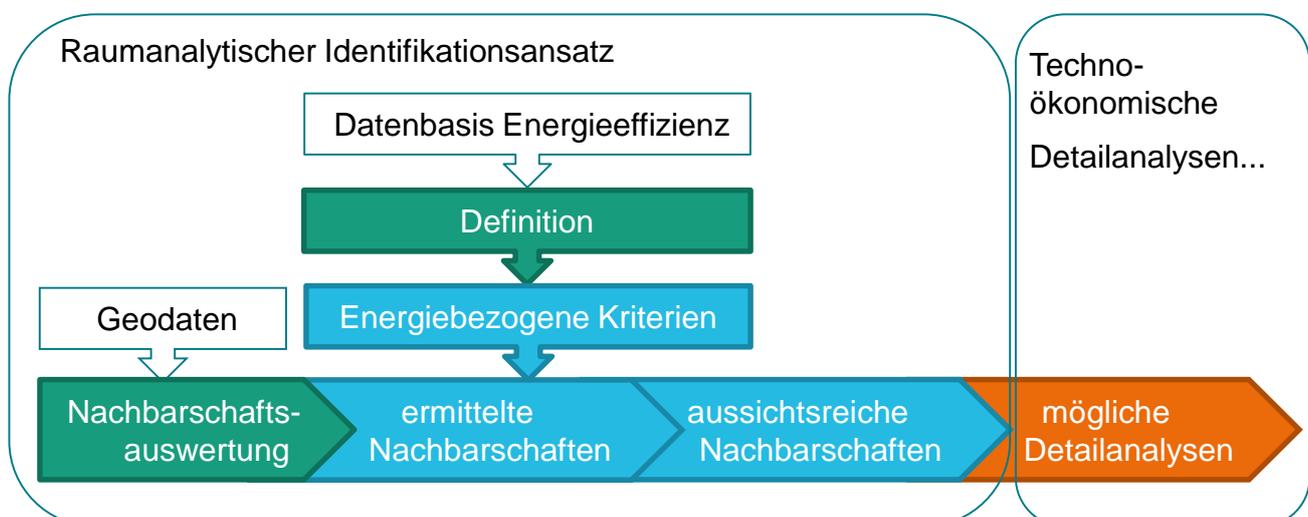


Abbildung 31: Modell zur Identifikation aussichtsreicher Nachbarschaften

6.1. Methodenwahl: Raumanalyse

„Raumanalyse, *spatial analysis*, dient einerseits dazu, Strukturen, räumliche Disparitäten, Verflechtungen und Prozesse in vorgegebenen Raumeinheiten wie z.B. Verwaltungseinheiten, Planungsräumen u.Ä. aufgrund exogener Kriterien abgegrenzter Gebiete zu analysieren. Für diesen Ansatz ist es typisch, dass der Untersuchungsraum festliegt; seine Grenzen sind oftmals sogar gesetzlich geregelt. **Andererseits kann es Aufgabe der Raumanalyse sein, Gebiete mit einer bestimmten Merkmalsausprägung zu ermitteln. In diesem Fall ist die Raumabgrenzung das Ergebnis der Untersuchung.** Hierbei finden zwei verschiedene Methoden Verwendung: beim datenorientierten Ansatz wird die räumliche Verteilung von ausgewählten Daten und Merkmalskombinationen untersucht. Aufgrund der Verteilungsmuster wird dann die Raumabgrenzung vorgenommen. Im Gegensatz hierzu wird bei der problemorientierten Raumanalyse zunächst ein Problemkomplex definiert und dann die Aufgabe gestellt, entsprechend strukturierte Räume zu ermitteln und abzugrenzen. Grundsätzlich ist zu beachten, dass das Ergebnis einer jeden Raumausgliederung von den gewählten Abgrenzungskriterien, den Merkmalsabstufungen und weiteren Vorgaben wie der räumlichen Aggregationsstufe (lokal, regional usw.) abhängt.“ (Spektrum Akademischer Verlag)

Im Rahmen der übergeordneten Fragestellung dient die Raumanalyse dem Auffinden von Gebieten mit Agglomerationen von Produktionsbetrieben, die aussichtsreiche Merkmale für die überbetriebliche Wärmeintegration haben. Es sollen somit Gebiete mit bestimmten Merkmalsausprägungen ermittelt werden und dies kann prinzipiell entweder mit dem raumorientierten oder datenorientierten Ansatz erfolgen. Im Folgenden wird für die Fragestellung der datenorientierte Ansatz verfolgt. Dies ist darin begründet, dass für die problemorientierte Raumanalyse strukturierte Räume (bspw. in Form von Karten) mit relevanten Informationen für die Fragestellung vorhanden sein müssen. Solche oder ähnliche Medien liegen jedoch nicht vor. Beim datenorientierten Ansatz können prinzipiell Standortinformationen von Unternehmen zur Auswertung herangezogen werden. Für die Bewertung der überbetrieblichen Wärmeintegration ist die Entfernung zwischen möglichen Partnerbetrieben ein zentraler Faktor und daher sind grundsätzlich Methoden der Raumanalyse zur Messung der räumlichen Konzentration denkbare methodische Ansätze. Diese basieren häufig auf statistischen Ansätzen.

Ein weit verbreiteter Ansatz ist es, die räumliche Konzentration von Objekten mit Hilfe des Gini-Koeffizienten zu messen. In der volkswirtschaftlichen Forschung wird dieser Ansatz beispielsweise zur Messung der Konzentration von Wirtschaftszweigen in abgegrenzten Gebieten angewendet. Ein weiteres gängiges Maß zur Messung der räumlichen Konzentration von räumlichen Objekten ist die sogenannte univariate K-Funktion (Eckey et al. 2009). Für die übergeordnete Fragestellung eignen sich diese methodischen Ansätze jedoch nicht, da auch Betriebe aus unterschiedlichen Wirtschaftszweigen aussichtsreiche Merkmale für die überbetriebliche Wärmeintegration haben können und somit einen Verbund eingehen könnten.

In der regional-ökonomischen Forschung gibt es weitere methodische Ansätze, in denen die räumliche Abhängigkeit zwischen mehreren (häufig zwei) Wirtschaftszweigen ausgewertet wird. Beispiele sind die Decay- und Bi-Square-Funktion. Bei diesen Ansätzen wird eine räumliche Abhängigkeit zwischen zwei Wirtschaftszweigen festgestellt, wenn die Standorte der Wirtschaftszweige häufiger in räumlicher Nähe (Nachbarschaft) zueinander anzutreffen sind als Standorte anderer Wirtschaftszweige. Hierfür wird das zu analysierende Untersuchungsgebiet in Teilgebiete aufgeteilt und es wird im Prinzip innerhalb dieser

Gebiete gezählt, wie häufig Standorte der jeweils zu untersuchenden Wirtschaftszweige innerhalb des Gebiets liegen. Die maximale Entfernung zwischen den Standorten wird somit durch die Grundfläche der Gebiete bestimmt und daher kann der Abstand zwischen den Standorten stark variieren. Für die Fragestellung erscheinen diese Ansätze daher nicht aussichtsreich.

Ein weiterer aussichtsreicher Forschungsstrang der Raumanalyse beschäftigt sich mit dem Aufdecken von Nachbarschaftsverhältnissen zwischen räumlichen Objekten, sogenannten Kollokationsmustern. Dabei bezeichnet ein Kollokationsmuster eine Teilmenge von räumlichen Objekten, die häufig Nachbarschaftsbeziehungen zueinander besitzen (Huang et al. 2004). In vielen Fachdisziplinen wurden Kollokationsmuster bereits entdeckt oder werden gesucht. Ein Beispiel ist die Ökologie, in der die räumliche Nachbarschaft von unterschiedlichen Arten ausgewertet wird. Ein diesbezügliches Kollokationsmuster ist die Nachbarschaft von ägyptischen Krokodilwächtern und Nilkrokodilen. Die Zusammenstellung räumlicher Objekte liegt üblicherweise in Form von Geodaten vor und daher wird dieser Begriff im Folgenden synonym verwendet. Ansätze zur Entdeckung von Kollokationsmustern in Geodaten können grundsätzlich in statistisch- und Data-Mining-basierte Methoden unterteilt werden (van Canh und Gertz 2012).

Statistisch basierte Methoden messen die räumliche Korrelation zwischen räumlichen Objekten. Ein gängiges Maß ist in diesem Zusammenhang die bivariate K-Funktion. Im Gegensatz zur univariaten K-Funktion wird hier die räumliche Konzentration zwischen zwei unterschiedlichen räumlichen Objekten gemessen. Es kann also beispielsweise die räumliche Konzentration und somit Korrelation von Fabriken, die zwei unterschiedlichen Wirtschaftszweigen angehören, gemessen werden. Ausführliche Details zum methodischen Hintergrund und zur Umsetzung der Methode sind in Eckey et al. (2009) beschrieben.

Data-Mining basierte Methoden zum Identifizieren von Kollokationsmustern werden in der Literatur häufig auch unter dem Begriff „spatial co-location pattern mining“ bezeichnet. Solche Methoden werden in erster Linie zum Analysieren besonders großer Datensätze verwendet und sie repräsentieren wiederum ein Teilgebiet des „spatial data mining“, also der Raumanalyse mittels Methoden des Data Mining. „Spatial data mining“ kann grundsätzlich als Prozess zur Entdeckung von interessanten, hilfreichen und nicht trivialen Mustern in großen Geodaten bezeichnet werden. Beim „spatial co-location pattern mining“ werden üblicherweise Kriterien definiert, anhand derer Kollokationsmuster identifiziert werden. Ein gängiges Kriterium ist der Häufigkeitswert des Musters nach Shekhar und Yan (2001). Prinzipiell können die Kriterien jedoch flexibel angepasst werden.

Tabelle 48 listet alle zuvor vorgestellten Methoden nochmal auf und bewertet diese vor dem Hintergrund der Fragestellung qualitativ.

Tabelle 48: Bewertung raumanalytischer Methoden für die Fragestellung.

Methoden	Kurzbeschreibung	Einschätzung
Gini-Koeffizient	Messen die räumliche Konzentration von räumlichen Objekten gleicher Art (bspw. Unternehmen desselben Wirtschaftszweigs).	Da Objekte gleicher Kategorie sein müssen, für die Frage nicht geeignet.
Univariate K-Funktion		
Decay-Funktion	Messen die räumliche Konzentration von räumlichen Objekten unterschiedlicher Kategorie (bspw. Unternehmen aus unterschiedlichen Wirtschaftszweigen). Beim Ansatz wird rasterartig vorgegangen.	Rasterartige Vorgehensweise erscheint nicht praktikabel, denn je nach Wahl der Rastergröße (Rechteck) variiert der Abstand zwischen den Standorten innerhalb des Rasters. Es wird lediglich aufgenommen, ob ein Standort im Raster ist oder nicht.
Bi-Square-Funktion		
Bivariate K-Funktion	Misst die räumliche Konzentration von räumlichen Objekten aus zwei unterschiedlichen Kategorien.	Messung ist auf zwei Kategorien beschränkt. Für die Fragestellung müssten daher viele unterschiedliche Kombinationen untersucht werden. Erscheint nicht praktikabel.
spatial co-location pattern mining	Sucht nach Kollokationsmustern (vereinfacht Nachbarschaftsbeziehungen) zwischen Objekten unterschiedlicher Kategorie. Dabei werden die Muster durch maximale Abstände und Häufigkeitskriterien definiert. Diese sind somit flexibel gestaltbar.	Definition der Kriterien ist flexibel gestaltbar. Es können mehr als zwei Kategorien einbezogen werden. Für die Fragestellung erscheint dieser Ansatz am praktikabelsten.

Insgesamt erscheint für die übergeordnete Fragestellung eine Data-Mining basierte Methode somit am besten geeignet. Dies hat insbesondere die im Folgenden aufgelisteten Gründe.

- **Kriterien für Muster:** Die Struktur von Data-Mining-Ansätzen erlaubt es Kriterien zur Erkennung von Mustern flexibel zu definieren. Es wäre somit prinzipiell möglich, ein Kriterium speziell für die überbetriebliche Wärmeintegration zu entwickeln und anzuwenden.
- **Technische Umsetzung:** Die technische Umsetzung von „spatial co-location pattern mining“-Methoden lässt sich prinzipiell in Python durch Kombination geeigneter Bibliotheken durchführen. Die Art der Umsetzung erlaubt es nicht, nur Kollokationsmuster zu identifizieren, sondern auch alle zugehörigen Ausprägungen bzw. Realisierungen der Muster auszuleiten. Dies ermöglicht es, zusätzliche Analysen durchzuführen.

6.2. Nachbarschaftssuche mit dem Kollokationsmusterminer

Im weiteren Verlauf des Kapitels wird eine programmtechnische Umsetzung einer „spatial co-location pattern mining“-Methode zur Extraktion von Nachbarschaften zwischen Produktionsstandorten in Deutschland angewendet. Die diesbezüglich verwendete Methode basiert auf Shekhar und Yan (2001) und ist zudem in van Canh und Gertz (2012) ausführlich beschrieben. Die Umsetzung der Methode erfolgte im Rahmen einer Masterarbeit am Geodätischen Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (Ko 2015). Das Programm ist in Python programmiert und wird im Folgenden als Kollokationsmusterminer bezeichnet. Ausgehend von Geodaten, die in räumliche Objekte klassifiziert sind, ist es Ziel des Kollokationsmusterminers, sogenannte Kollokationsmuster in den vorliegenden Daten zu identifizieren. Dabei können unterschiedliche Kriterien zur Definition eines Kollokationsmusters angewendet werden. In diesem Kontext ist es gängig, Häufigkeitskriterien und maximale Entfernungen zwischen den räumlichen Objekten als Kriterien zu definieren. In diesem Fall stellen Kollokationsmuster somit Nachbarschaften zwischen räumlichen Objekten dar, die mit einer gewissen Häufigkeit auftreten und eine gewisse maximale Entfernung nicht überschreiten. Das im Kollokationsmusterminer definierte Kriterium zum Identifizieren von Kollokationsmustern ist der Häufigkeitswert auf Basis von Shekhar und Yan (2001), das wiederum ein relativ definiertes Häufigkeitskriterium mit einem maximalen Nachbarschaftsabstand kombiniert. Im Folgenden wird die Methodik des Kollokationsmusterminers vereinfacht beschrieben. Für den Begriff räumliche Objekte wird der Begriff Klasse zur verständlicheren Beschreibung synonym verwendet.

Ziel des Kollokationsmusterminers ist es, Kollokationsmuster zu filtern. Dabei wird vereinfacht der folgende Ablauf durchgeführt, der anhand eines Beispiels mit den Klassen A und B im Folgenden dargestellt wird.

1. Potenzielle Kollokationsmuster: Zunächst werden alle möglichen Kollokationsmuster anhand der verfügbaren Klassen generiert. In Abbildung 32 ist exemplarisch ein 2er-Kollokationsmuster aufgeführt).

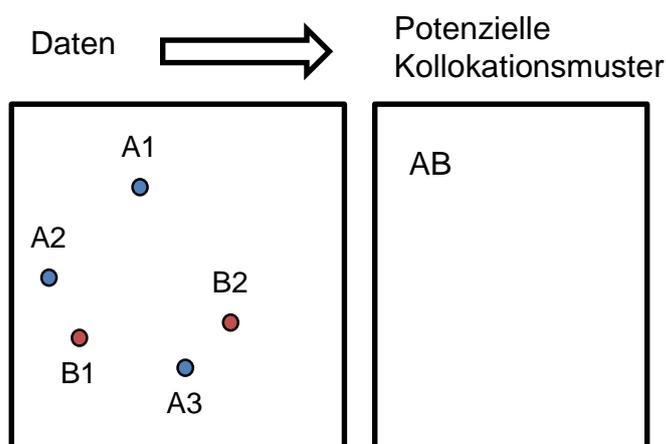


Abbildung 32: Kollokationsmusterminer – Schritt 1

2. Realisierung der potenziellen Kollokationsmuster: In diesem Schritt werden alle Objekte der Klassen des potenziellen Kollokationsmusters identifiziert, die den vorgegebenen maximalen Nachbarschaftsabstand nicht überschreiten (Realisierungen).

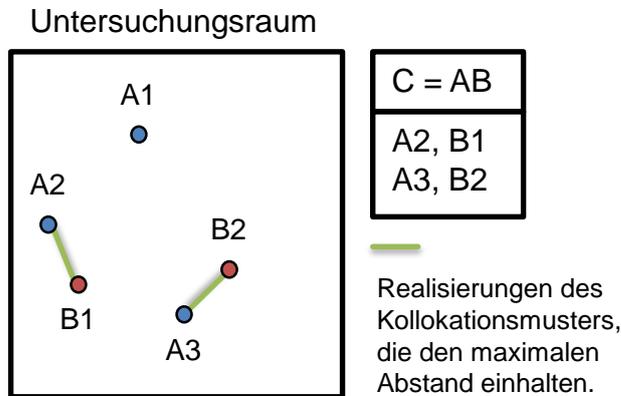


Abbildung 33: Kollokationsmusterminer – Schritt 2

3. Häufige Kollokationsmuster filtern: Hier wird entschieden, ob das zu untersuchende potenzielle Kollokationsmuster auch ein häufiges Kollokationsmuster ist. Zum diesbezüglichen Filtern wird das Häufigkeitskriterium nach Shekhar und Yan (2001) verwendet. Hierfür wird zunächst die Häufigkeit der Realisierungen je betroffene Klasse auf die Anzahl der jeweiligen Objekte in der Klasse bezogen. Der Häufigkeitswert für das potenzielle Kollokationsmuster ist dann als der niedrigste Wert der zuvor berechneten Werte definiert (vgl. Tabelle 49 für das Beispiel). Liegt der Häufigkeitswert der Realisierung nun über einem Schwellwert, dann wird das potenzielle Kollokationsmuster gefiltert bzw. als Kollokationsmuster ausgegeben. Dabei kann der Schwellwert variabel vorgegeben werden.

Tabelle 49: Kollokationsmusterminer – Schritt 3.

$\text{Häufigkeit}(C, A) = \frac{2 * \text{Realisierungen}}{3 * \text{Objekte in Klasse A}} = \frac{2}{3}$
$\text{Häufigkeit}(C, B) = \frac{2 * \text{Realisierungen}}{2 * \text{Objekte in Klasse B}} = 1$
$\text{Häufigkeitswert}(C) = \min(\text{Häufigkeit}(C, A); \text{Häufigkeit}(C, B)) = \frac{2}{3}$

Die Realisierung eines häufigen Kollokationsmusters wird im Folgenden mit ermittelte Nachbarschaft bezeichnet. Anhand der Berechnung des Häufigkeitswerts nach Shekhar und Yan (2001) wird deutlich, dass potenzielle Kollokationsmuster mit Kombinationen von Klassen, bei denen alle Klassen vergleichsweise wenige Objekte enthalten, tendenziell eher den Schwellwert überschreiten, verglichen mit potenziellen Kollokationsmustern, bei denen alle Klassen vergleichsweise viele Objekte enthalten.

Im Rahmen der Fragestellung ist dies ein Nachteil der Methode, da keine Informationen über wärmebezogene Kriterien einbezogen werden und so unter Umständen interessante Muster alleine aufgrund von relativen Häufigkeiten aussortiert werden, wenn der Schwellwert zu hoch angesetzt wird.

Die Anwendung des Kollokationsmusterminers erlaubt somit die Beantwortung der folgenden Fragestellungen im Rahmen der übergeordneten Thematik.

- Welche Kombinationen von Wirtschaftszweigen kommen häufig in Nachbarschaft zueinander vor?
- Wo sind die Fabriken der diesbezüglichen Wirtschaftszweige lokalisiert? Wo liegen diese Nachbarschaften?

6.3. Extraktion der Nachbarschaften für Deutschland

Im Folgenden wird der Kollokationsmusterminer für Deutschland wie folgt angewendet. Es werden alle 2er-Kollokationsmuster gefiltert, die einen Abstand von 10 Kilometern nicht überschreiten (2er, d. h. Nachbarschaften zwischen zwei Produktionsstandorten). Der Schwellwert für den Häufigkeitswert wird dabei so niedrig gesetzt, dass keine potenziellen Kollokationsmuster aufgrund des Schwellwerts ausgeschlossen werden. Für die so ermittelten Kollokationsmuster werden alle ermittelten Nachbarschaften ausgeleitet (inkl. Ortsangabe und Wirtschaftszweig). Im Prinzip werden somit alle Standortkombinationen von zwei Produktionsstandorten gefiltert, die einen Abstand von 10 Kilometern zueinander nicht überschreiten (im Folgenden mit 2er-Kombinationen bezeichnet). Als Geodaten wird das Europäische Schadstofffreisetzungs- und verbringungsregister (E-PRTR) verwendet, welches im Folgenden kurz näher erläutert wird.

6.3.1. Verwendete Geodaten

Das E-PRTR ist die europäische Implementierung des „Kiev Protocol on Pollution Release and Transfer Registers“, bei dem es sich um ein rechtsverbindliches Rahmenwerk über Schadstoff- und Verbringungsregister handelt (United Nations Economic Commission for Europe (UNECE)). Im Register werden Schadstoffe, die innerhalb der europäischen Union und weiteren europäischen Staaten in Luft, Wasser oder Boden eingebracht werden, erfasst. Gemeinsam mit dem Vorgängerregister (EPER) sind zurzeit Daten für die Zeiträume 2007 bis 2015 öffentlich verfügbar. Zudem wird die Datenbank kontinuierlich aktualisiert. Hierfür müssen Unternehmen ihren Schadstoffausstoß jährlich melden. Dabei hat das Europäische Parlament einen Rahmen für die Meldepflicht festgelegt (Europäische Union (EU)). Die Meldepflicht für bestimmte Schadstoffe, bspw. Schwefeldioxid ergibt sich in der Regel aus bestimmten jährlichen Schwellwerten, die überschritten werden müssen. Ziel ist es, die Schwellwerte so anzusetzen, dass etwa 90 % der industriellen Schadstoffemissionen erfasst werden (Wursthorn et al. 2011). Jeder in der Datenbank enthaltene Produktionsstandort ist mit einer eindeutigen Nummerierung klassifiziert. Zudem sind die Produktionsstandorte mit Längen- und Breitengrad lokalisiert und darüber hinaus ist jedem Produktionsbetrieb eine vierstellige Wirtschaftszweigklassifikation entsprechend der Systematik der Wirtschaftszweige in der Europäischen Gemeinschaft (NACE) zugeordnet.

Das E-PRTR wird aus den im Folgenden genannten Gründen als aussichtsreiche öffentliche Datenquelle für die übergeordnete Fragestellung angesehen.

- Energieintensive Produktionsstandorte sind prinzipiell aussichtsreiche Kandidaten für die überbetriebliche Wärmeintegration. In der Regel emittieren solche Produktionsstandorte auch erhebliche Schadstoffmengen.
- Das E-PRTR enthält Lageinformationen zu Produktionsstandorten in Form von Längen- und Breitengraden.
- Durch die gegebene Kodierung der Produktionsstandorte mit Wirtschaftszweigklassen können branchenspezifische Informationen auf die Produktionsstandorte angewendet werden.

Das E-PRTR hat jedoch auch Nachteile im Hinblick auf die Fragestellung.

- Es sind weder Energieverbräuche noch Produktionsmengen gegeben. Energierrelevante Daten sind somit nicht unmittelbar verfügbar und können auch nicht über spezifische Energieverbräuche aus der Literatur zur Produktion bestimmter Güter abgeschätzt werden. Für viele Standorte sind CO₂-Emissionen für die Standorte enthalten. Diese Emissionswerte werden in einem europäischen Verbundprojekt bereits dazu genutzt, mit Hilfe von branchenspezifischen Kennwerten Energieverbrauch und anfallende Abwärme dieser Standorte zu schätzen (vgl. Persson et al. 2014). Inwieweit die CO₂-Emissionen für die diesbezügliche Abschätzung jedoch gute Ergebnisse liefern, ist nicht validiert.
- Es werden nur Produktionsstandorte aufgelistet, die bestimmte Schwellwerte überschreiten. Werden somit Umweltreinigungsmaßnahmen an den Standorten verbessert, so können Standorte evtl. aus der Datenbank herausfallen oder Standorte mit besonders hohen Umweltstandards sind erst gar nicht enthalten. Dies wären unter Umständen sogar Unternehmen mit einer ambitionierten Haltung gegenüber umweltschonenden Produktionsverfahren und somit evtl. auch gegenüber Energieeffizienzmaßnahmen. Inwieweit die Schwellwerte an den Stand der Technik der Produktionsstandorte angepasst werden (bspw. durch Anheben von Schwellwerten), ist unklar.

6.3.2. Ermittelte Nachbarschaften

Insgesamt wurden für Deutschland für das E-PRTR 123 Kollokationsmuster mit insgesamt rund 8.300 ermittelten Nachbarschaften ausgeleitet. Für 25 % der Kollokationsmuster war die Anzahl der ermittelten Nachbarschaften rund 10 oder weniger. Weitere 25 % der Muster hatten bis zu rund 30 ermittelte Nachbarschaften und weitere 25 % der Muster hatten schon bis zu rund 80 ermittelte Nachbarschaften. Die meisten ermittelten Nachbarschaften (1.005) traten bei der Kombination der Wirtschaftszweige „Metallbearbeitung“ und „NE-Metalle und Gießereien“ auf. Der Mittelwert der Anzahl an ermittelten Nachbarschaften ist rund 68 und die Standardabweichung rund 120. Die Quantile für die Anzahl der ermittelten Nachbarschaften sind in Abbildung 34 dargestellt. Zudem sind die Kollokationsmuster mit den fünf höchsten Anzahlen ermittelter Nachbarschaften exemplarisch in Tabelle 50 dargestellt.

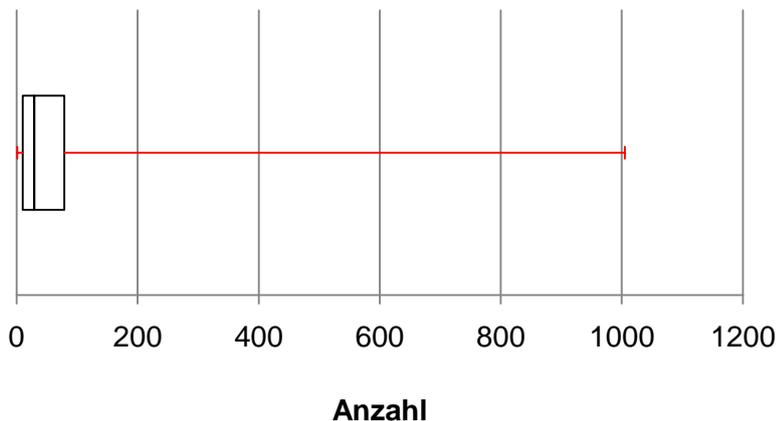


Abbildung 34: Quantile für die Anzahl der Muster

Tabelle 50: Häufige Kollokationsmuster im E-PRTR für Deutschland.

Wirtschaftszweig 1	Wirtschaftszweig 2	Realisierungen
Metallbearbeitung	NE-Metalle, -gießereien	1.005
Sonst. chemische Industrie	Grundstoffchemie	493
Metallbearbeitung	Grundstoffchemie	420
Sonst. Verarbeitendes Gewerbe	Metallbearbeitung	327
NE-Metalle, -gießereien	Grundstoffchemie	301

6.4. Ergänzung um energiebezogene Aspekte

Die im vorangegangenen Schritt ermittelten Nachbarschaften können geographisch zwar lokalisiert werden, doch kann bisher keine Aussage darüber getroffen werden, welche der ermittelten Nachbarschaften für die überbetriebliche Wärmeintegration aussichtsreich sind. Nun könnten theoretisch alle ermittelten Nachbarschaften mit dem techno-ökonomischen Modell aus Kapitel 5 bewertet werden, um diesbezüglich eine Aussage zu treffen. Da eine ermittelte Nachbarschaft aus zwei Standorten besteht, ist die Anzahl der zu untersuchenden Standortpaarungen jedoch besonders hoch (8.300). Eine solche Vorgehensweise würde enorme Rechenzeiten erfordern. Zudem macht die Anwendung des Modells aus Kapitel 5 nur bei entsprechend detaillierten Daten für die Produktionsstandorte Sinn. Der Aufwand zur Erfassung dieser Daten ist nur schwer abzuschätzen. Daher erscheint es sinnvoll, die ermittelten Nachbarschaften um energiebezogene Informationen zu ergänzen, um den Suchraum weiter einzuschränken. Dies ist bspw. auf der Ebene von Wirtschaftszweigen durchführbar, da hierfür sowohl Geodaten als auch energiebezogene Informationen vorliegen. Dies wird im Folgenden differenziert nach Wirtschaftszweigen durchgeführt.

- Im nächsten Schritt werden daher energiebezogene Informationen zu jeder ermittelten Nachbarschaft zugeordnet. Dies geschieht auf Basis von Informationen, die den Wirtschaftszweigen der Nachbarschaften zugeordnet sind. Dies sind im konkreten Fall die nach Temperaturen differenzierten aggregierten Wärmebedarfe der Wirtschaftszweige. Die ermittelten Nachbarschaften werden somit mit energiebezogenen Informationen synthetisiert (vgl. 6.4.1).

- Die vorangegangene Synthese führt zu charakteristischen Prozesswärmeprofilen, auf dessen Basis ein Kriterium zur Auswertung der ermittelten Nachbarschaften definiert wird (vgl. 6.4.2).
- Abschließend werden die ermittelten Nachbarschaften im Hinblick auf das zuvor definierte Kriterium ausgewertet (vgl. 6.5).

6.4.1. Prozesswärmestruktur

Die den ermittelten Nachbarschaften zugeordneten energiebezogenen Informationen wurden auf Basis der Studie „Datenbasis zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen in der Zeitreihe 2005 - 2014“ generiert (Rohde et al. 2017). Hierfür wurden die absoluten Endenergiebedarfe für Prozesswärme je Temperaturbereich auf den gesamten Endenergiebedarf für Prozesswärme je Wirtschaftszweig für das Jahr 2014 bezogen. Infolgedessen liegt der relative Anteil je Temperaturbereich je Wirtschaftszweig vor. Diese Aufteilung wird im Folgenden als Prozesswärmeprofil bezeichnet. Die Prozesswärmeprofile wurden im Anschluss den jeweils entsprechenden Wirtschaftszweigen der ermittelten Nachbarschaften entsprechend Tabelle 51 zugeordnet.

Tabelle 51: Aufteilung der Wirtschaftszweige für die Fallstudie.

Wirtschaftszweig	Nr. Nace-2008	Kommentar
Kokerei	19.10	zusätzlich
Mineralölverarbeitung	19.20	
Gew. v. Steinen u. Erden	8	Entsprechend (Rohde et al. 2017)
Ernährung und Tabak	10, 11, 12	
Papiergewerbe	17	
Grundstoffchemie	20.1	
Sonst. chemische Industrie	20 ohne 20.1	
Gummi- u. Kunststoffwaren	22	
Glas u. Keramik	23.1, 23.2, 23.4, 23.31	
Verarb. v. Steine u. Erden	23 ohne 23.1, 23.2, 23.4, 23.31	
Metallerzeugung	24.1	
NE-Metalle und Gießereien	24.4, 24.5	
Metallbearbeitung	24 ohne 24.1, 24.4, 24.5; 25	
Maschinenbau	28 ohne 28.23	
Fahrzeugbau	29, 30	
Sonst. Verarbeitendes Gewerbe	13, 14, 15, 15, 18, 28.23, 26,27, 31, 32, 33	
Wärme- und Kälteversorgung	35.30	

Die Zuordnung der Prozesswärmeprofile zu den ermittelten Nachbarschaften resultiert in zwei charakteristischen Kombinationen von Prozesswärmeprofilen.

- V- oder U-Profile: Bei dieser Kombination von zwei Prozesswärmeprofilen hat ein Produktionsstandort einen relativ hohen Prozesswärmebedarf auf höheren Temperaturniveaus und der andere Standort hat einen Prozesswärmebedarf auf relativ niedrigen Temperaturniveaus. Werden die Prozesswärmeprofile der beiden Standorte übereinander gelegt,

so bilden die Profile gemeinsam ein „V“ oder ein „U“ (vgl. Abbildung 35 und Abbildung 36) und daher werden solche Kombinationen von Prozesswärmeprofilen V- oder U-Profil genannt.

- L- oder J-Profil: Bei dieser Kombination von zwei Prozesswärmeprofilen haben beide Produktionsstandorte entweder einen relativ hohen Bedarf auf niedrigen Temperaturniveaus oder beide Standorte haben einen relativ hohen Bedarf auf hohen Temperaturniveaus. Werden beide Profile übereinander gelegt, so bilden die Profile gemeinsam ein „L“ oder ein „J“ und werden daher L- oder J-Profil genannt (vgl. Abbildung 37 und Abbildung 38).

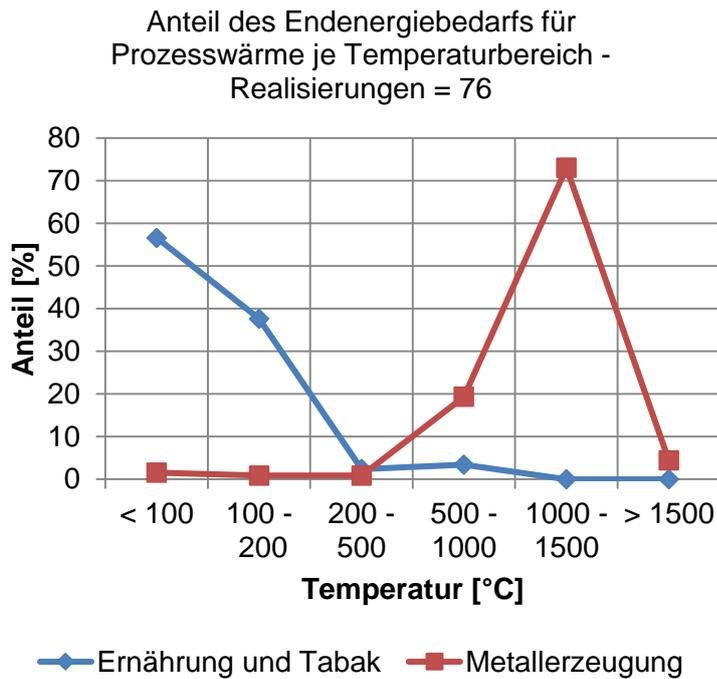


Abbildung 35: Typische V-Form

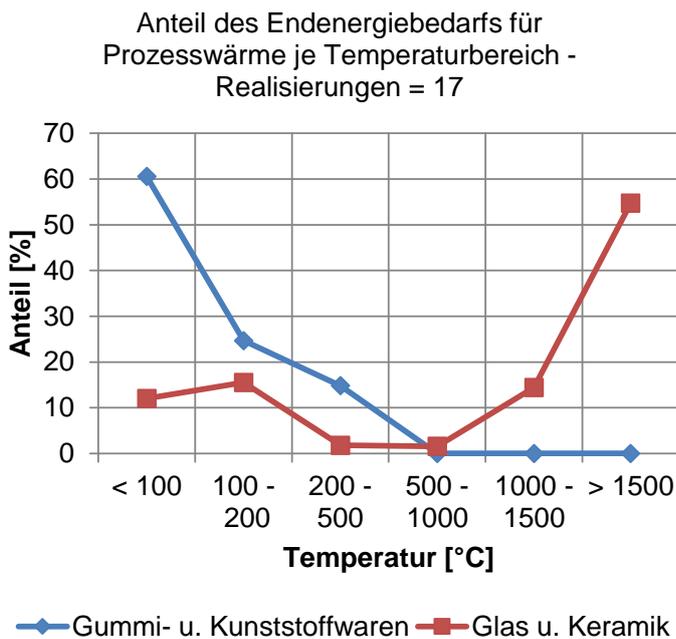


Abbildung 36: Typische U-Form

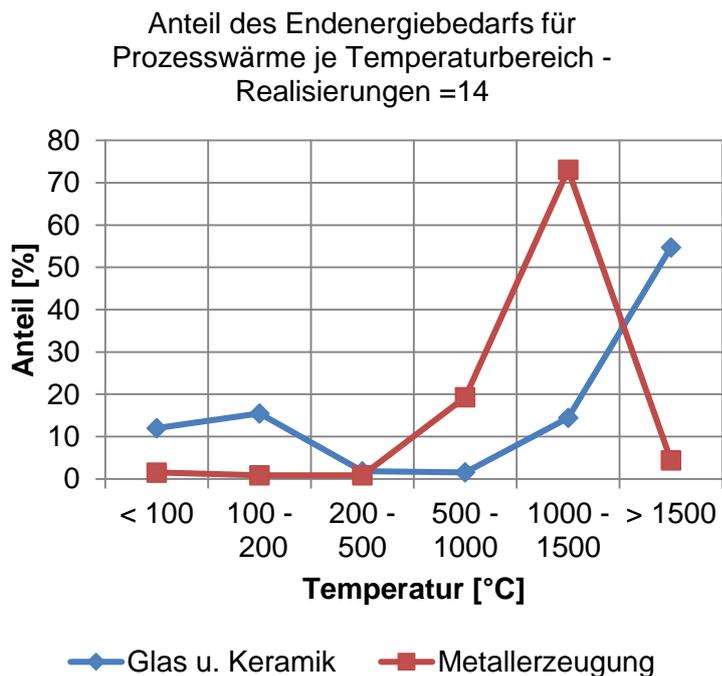


Abbildung 37: Typische J-Form

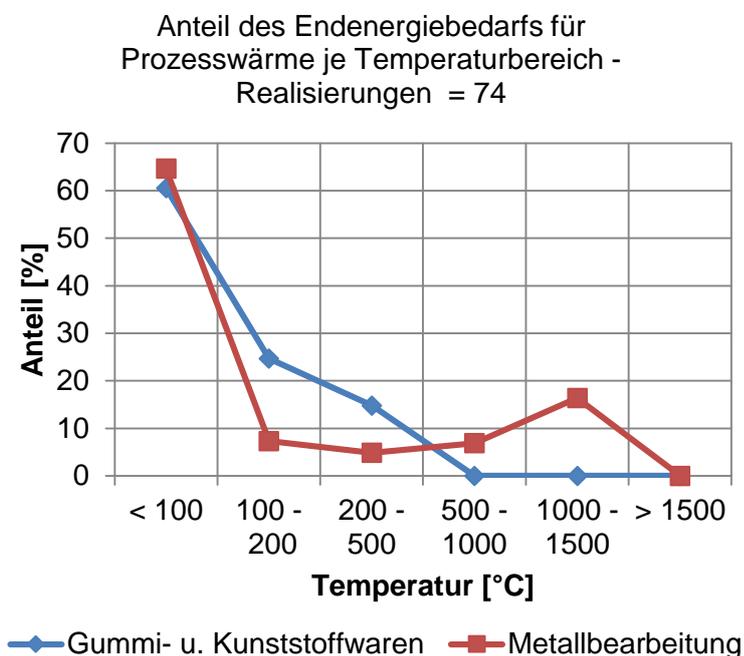


Abbildung 38: Typische L-Form

In Deutschland ist nur ein einziger dokumentierter Fall der überbetrieblichen Wärmeintegration für eine Nachbarschaft von zwei Betrieben bekannt. Dieser bezieht sich auf die Kombination einer Gießerei mit einem Hersteller von Fertiggerichten (Umweltbundesamt 2011). Legt man die Prozesswärmeprofile der Wirtschaftszweige dieser Nachbarschaft übereinander, so ist zu erkennen, dass diese eine typische V- oder U-Form entsprechend Abbildung 35 oder Abbildung 36 bilden.

6.4.2. Kriteriendefinition

Auf Basis der vorangegangenen Kapitel können nun unterschiedliche Kriterien zur Auswertung der ermittelten Nachbarschaften abgeleitet werden, anhand derer aussichtsreiche Nachbarschaften für die überbetriebliche Wärmeintegration identifiziert werden könnten. Grundsätzlich lassen sich diese wie im Folgenden aufgelistet gruppieren:

- Kriterium auf Basis der Anzahl oder
- Kriterium auf Basis der Prozesswärmeprofile.

Im Folgenden werden die unterschiedlichen Möglichkeiten im Hinblick auf eine Eignung für die Funktion grundsätzlich diskutiert und gegeneinander abgewogen.

Kriterium auf Basis der Anzahl

Bei der Wahl eines Kriteriums auf Basis der Anzahl könnte unterstellt werden, dass Kombinationen von zwei Wirtschaftszweigen, die eine hohe Anzahl an Nachbarschaften aufweisen, besonders aussichtsreich für die Anwendung der überbetrieblichen Wärmeintegration sind. Ein mögliches Argument wäre, dass aufgrund der hohen Anzahl an ermittelten Nachbarschaften ein kausaler Zusammenhang vermutet wird. Das heißt es gäbe einen Grund, warum die jeweiligen Wirtschaftszweige häufig in Nachbarschaft zueinander vorkommen. Dies könnte wiederum auf kausale Ursachen in der Wertschöpfungskette zurückzuführen sein, bspw. wenn ein Wirtschaftszweig Rohstoffe für einen anderen liefert. Falls solche kausalen Zusammenhänge hergeleitet werden könnten, dann wäre dies unter Umständen ein Vorteil für die Umsetzung von überbetrieblichen Kooperationen, denn es würden bereits Beziehungen zwischen den Wirtschaftszweigen und somit gegebenenfalls auch zwischen den benachbarten Produktionsstandorten bestehen. Zudem könnte argumentiert werden, dass bei einer hohen Anzahl an ermittelten Nachbarschaften für eine Kombination von Wirtschaftszweigen standardisierte oder generische Lösungen ausgearbeitet werden könnten, was wiederum spezifische Kosten senken würde. Nichtsdestotrotz besteht die zentrale Schwäche eines rein auf der Anzahl an ermittelten Nachbarschaften basierenden Kriteriums darin, dass keinerlei energiebezogene Informationen bei der Bewertung mit einbezogen werden. Unmittelbare Rückschlüsse auf die Anwendbarkeit der überbetrieblichen Wärmeintegration sind somit nicht möglich. Daher wird ein Kriterium auf Basis der reinen Anzahl gefundener Nachbarschaften als nicht aussichtsreich angesehen.

Kriterium auf Basis von Prozesswärmeprofilen

Für ein Kriterium auf Basis von Prozesswärmeprofilen spricht im Vergleich zum Vorangegangenen, dass sich technologische Charakteristika der Wirtschaftszweige im Wärmebedarf der Wirtschaftszweige widerspiegeln. Dies kann wiederum dazu genutzt werden, um technologisch aussichtsreiche Kombinationen von Wirtschaftszweigen für die überbetriebliche Wärmeintegration zu identifizieren und somit auch entsprechende Nachbarschaften von Produktionsstandorten in den Geodaten.

Ein Beispiel hierfür wären die Wirtschaftszweige „Metallerzeugung“ und „Papiergewerbe“, wobei im Zweig „Metallerzeugung“ unter anderem die Produktion von Primärstahl via Hochofenroute und im Zweig „Papiergewerbe“ die Produktion von Papier in Papierfabriken erfasst sind. Die Herstellung von Primärstahl via Hochofenroute benötigt hohe Prozesstemperaturen und zudem fällt Abwärme an, die

nur teilweise innerbetrieblich verwertet werden kann. Die Temperaturen der Abwärme betragen dabei zwischen 130 °C und 650 °C (Hirzel et al. 2013). Papierfabriken decken einen Großteil ihres Wärmebedarfs in der Regel durch Dampfsysteme ab (Fleiter et al. 2012a). Somit könnte die bei der Stahlproduktion anfallende Abwärme prinzipiell zur Wärmeversorgung der Papierfabrik genutzt werden. Die Kombination der Wirtschaftszweige „Metallerzeugung“ und „Papiergewerbe“ wäre in diesem Sinne somit aussichtsreich für die überbetriebliche Wärmeintegration. Werden die Prozesswärmeprofile beider Wirtschaftszweige übereinander gelegt, so ergibt sich ein typisches U-/oder V-Profil (entsprechend Abbildung 35 oder Abbildung 36).

Insgesamt erscheint ein Kriterium, welches auf Basis von Prozesswärmeprofilen entsprechende U-/oder V-Profile identifiziert zweckmäßig für die Suche nach geeigneten Nachbarschaften für die überbetriebliche Wärmeintegration. Dies ist zum einen durch Argumente gestützt, die dafürsprechen, dass ein Vorliegen von U-/oder V-Profile ein effektives Kriterium für die Suche nach aussichtsreichen Nachbarschaften zwischen Produktionsstandorten ist. Zum anderen ist dies jedoch auch durch Argumente gestützt, die dagegensprechen, dass die anderen Profile (L/J-Profile) ein effektives Kriterium zum Suchen sein könnten.

Was gegen Nachbarschaften mit L- oder J-Profilen spricht:

- Bei Vorliegen eines L-Profiles (vgl. Abbildung 38) ist davon auszugehen, dass beide Standorte relativ hohe Wärmebedarfe bei niedrigen Temperaturen haben. Nichtsdestotrotz liegen auch relativ geringe Wärmebedarfe für Prozesse mit höheren Temperaturen vor. Falls bei diesen Prozessen Abwärme erzeugt wird, ist jedoch davon auszugehen, dass diese zur Senkung der relativ hohen Bedarfe auf niedrigeren Temperaturniveaus eingesetzt wird. Dies ist darin begründet, dass innerbetriebliche Wärmekaskaden vorzuziehen sind (vgl. hierzu auch Kapitel 4.2.3). Da die Wärmebedarfe auf niedrigeren Temperaturniveaus relativ hoch sind, ist es plausibel anzunehmen, dass die erzeugte Abwärme somit vollständig innerbetrieblich verwertet werden könnte.
- Bei Vorliegen eines J-Profiles (vgl. Abbildung 37) ist davon auszugehen, dass beide Standorte Hochtemperaturprozesse einsetzen (bspw. Stahlproduktion, Gießereien usw.). Solche Prozesse erzeugen in der Regel relativ mehr Abwärme als Prozesse mit niedrigerem Temperaturbedarf. Beide Standorte haben zudem einen relativ niedrigen Wärmebedarf bei niedrigen Temperaturen. Falls die Hochtemperaturprozesse an beiden Standorten Abwärme produzieren würden, dann würde diese zunächst zur Verwertung innerbetrieblicher Wärmesenken verwertet werden. Da jedoch der Wärmebedarf bei niedrigen Temperaturen relativ niedrig ist, ist es plausibel anzunehmen, dass beide Standorte trotzdem noch Abwärme zur Verfügung haben könnten. Da die Wärmebedarfe im Hinblick auf beide Standorte ähnlich sind, wäre ein gegenseitiges Beliefern mit Wärme jedoch eher nicht plausibel.

Was für Nachbarschaften mit U- oder V-Profilen spricht:

- Bei einem U- oder V-Profil (vgl. Abbildung 35 oder Abbildung 36) kann davon ausgegangen werden, dass einer der beiden Standorte Hochtemperaturprozesse einsetzt (bspw. Stahlproduktion, Gießereien usw.). Solche Prozesse erzeugen in der Regel relativ mehr Abwärme als Prozesse mit niedrigerem Temperaturbedarf. Zudem hat der Standort mit den Hochtemperaturprozessen einen relativ niedrigen Wärmebedarf bei niedrigeren Temperaturen.

Falls die Hochtemperatur-prozesse Abwärme produzieren würden, würde diese somit zunächst zur Verwertung der innerbetrieblichen Wärmesenken verwertet werden. Dies ist darin begründet, dass davon ausgegangen werden kann, dass innerbetriebliche Wärmesenken priorisiert werden (vgl. dazu auch Kapitel 4.2.3). Da jedoch der Wärmebedarf dieses Standorts bei niedrigen Temperaturen relativ niedrig ist, ist es plausibel anzunehmen, dass an dem Standort auch abzüglich der Versorgung innerbetrieblicher Wärmesenken trotzdem noch Abwärme zur Verfügung stehen könnte. Diese Wärme könnte der Standort dann potenziell an den anderen Standort liefern, da dieser wiederum einen relativ hohen Wärmebedarf bei niedrigen Temperaturen hat.

- Die einzige in Deutschland bekannte umgesetzte Energieeffizienzmaßnahme der überbetrieblichen Wärmeintegration weist ebenfalls ein U- oder V-Profil auf.

Die reinvisuelle Bewertung, ob ein Prozesswärmeprofil eine V/U- oder J/L-Form aufweist kann jedoch subjektiv sein. Für die folgende Analyse wird daher ein Kriterium definiert, anhand dessen eine Einteilung in zwei Profilgruppen erfolgt. Dabei werden die relativen Unterschiede für die sechs Temperaturbereiche (<100 °C, 100 – 200 °C usw.) zwischen den Profilen als Grundlage zur Gruppierung verwendet. Erfüllt eine Kombination von zwei Prozesswärmeprofilen die Bedingung in (6.1), dann wird diese als V/U-Form bezeichnet, sonst als J/L-Form.

$$\left| \sum_{T_i}^{T_n} \text{Relativer Anteil}_{\text{Sektor } 1, T_i} - \text{Relativer Anteil}_{\text{Sektor } 2, T_i} \right| \geq 0,3, \quad (6.1)$$

für $i=1...3$ (niedrige Temperaturen) und $i=4...6$ (hohe Temperaturbereiche).

Bei einer aussichtsreichen Nachbarschaft handelt es sich dann um eine ermittelte Nachbarschaft, die das Kriterium aus 6.1 erfüllt.

6.5. Ergebnisse: aussichtsreiche Nachbarschaften

Die Anzahl der Kollokationsmuster je Profilgruppe ist schließlich in Tabelle 52 für einen Abstand von einem und zehn Kilometern gegeben. Für einen Abstand von zehn Kilometern erfüllen 60 der 123 Kollokationsmuster das Kriterium, auf die wiederum rund 36 % der ermittelten Nachbarschaften (etwa 3.000) zurückzuführen sind. Wird der Abstand auf einen Kilometer reduziert, dann beträgt die Anzahl der ermittelten Nachbarschaften, die das Kriterium erfüllen, etwa 375.

Tabelle 52: Anzahl der Kollokationsmuster und ermittelte Nachbarschaften je Profilkategorie.

Anzahl der Muster Anteil an Realisierungen		
Abstand = 10 km		
V-oder U-Form	60	36 %
L- oder J-Form	63	64 %
Summe	123	8.312
Abstand = 1 km		
V-oder U-Form	37	62 %
L- oder J-Form	41	38 %
Summe	78	607

Die ermittelten Nachbarschaften sind zur Veranschaulichung auf einer Karte in Abbildung 39 dargestellt. Dabei kennzeichnen grüne Linien ermittelte Nachbarschaften zwischen zwei Standorten, bei denen das Kriterium aus (6.1) erfüllt ist, wohingegen dies bei den roten Linien nicht der Fall ist.

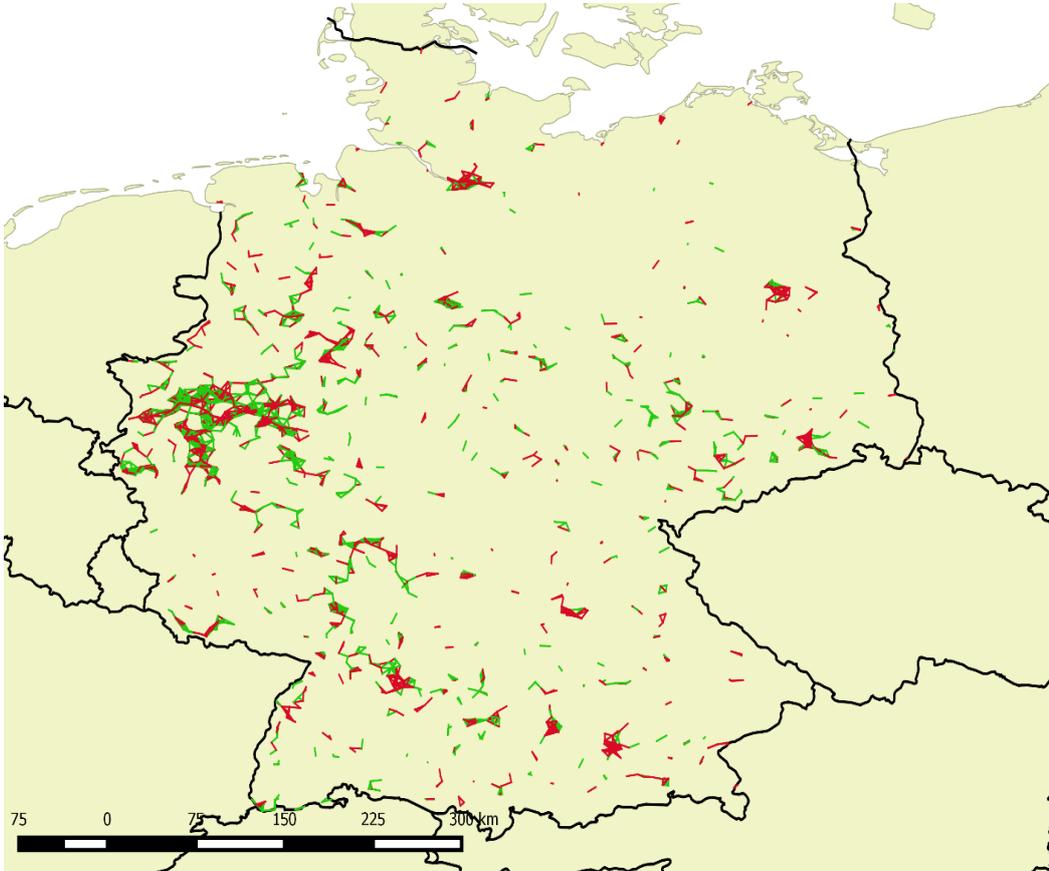


Abbildung 39: Karte zu Realisierungen der Analyse

Die Karte ist digital in einer GIS-Software (Q-Gis) hinterlegt und kann prinzipiell für weitere Analysen eingesetzt werden. Eine konkrete Nutzergruppe könnten bspw. Klimaschutzmanager von Kommunen sein. Das Aufgabenspektrum eines Klimaschutzmanagers kann unter anderem die Erstellung von Klimaschutzplänen oder kommunalen Wärmeplänen erfassen. Die Aufarbeitung des Industriesektors ist dabei besonders schwierig, da häufig wenig Information über temperaturabhängige Wärmebedarfe, eventuelle Abwärmepotenziale und mögliche Effizienzmaßnahmen für industrielle Symbiose vorhanden sind. Die vorgestellte Karte kann somit als Grundlage für ein Informationssystem zur Aufarbeitung des Industriesektors in diesem Kontext dienen. Typische zu beantwortende Fragen könnten dabei die folgenden sein.

Welche Produktionsstandorte sollte ich zur Erfassung von industriellen Abwärmepotenzialen (als erstes) kontaktieren?

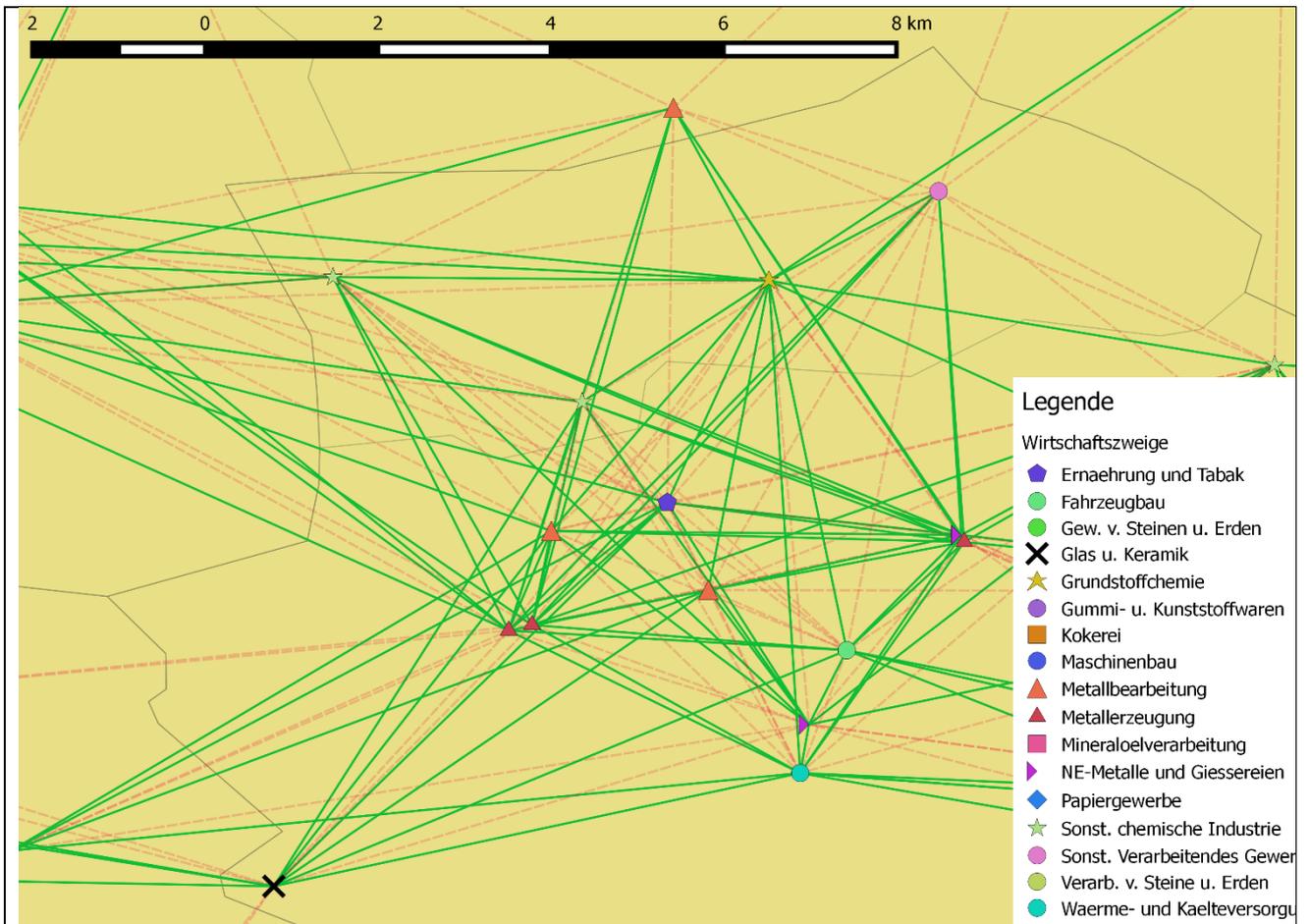
- In der interaktiven Karte können je Produktionsstandort der jeweilige Industriesektor und das Prozesswärmeprofil hinterlegt werden. Aussichtsreiche Standorte für die Frage sind in der Regel Standorte mit besonders hohen Prozesstemperaturen und es würde daher Sinn machen, diese Standorte als erstes zu kontaktieren.

Wo befinden sich Agglomeration von Produktionsstandorten mit aussichtsreichen Kriterien für die Umsetzung von Öko-Industrieparks?

- Agglomerationen, bei denen viele Verbindungen grün gekennzeichnet sind, wären interessant für weitere Untersuchungen. Hier könnten bspw. zunächst die Eignung für Wärmeverbünde in Form von zentralen Dampfnetzen geprüft werden.

In Abbildung 40 ist ein beispielhafter Kartenausschnitt dargestellt, anhand dessen die Funktionalität aufgezeigt wird. In der zugehörigen Karte ist zu erkennen, dass Produktionsstandorte aus unterschiedlichen Wirtschaftszweigen aufgeführt sind. Einige dieser Standorte sind mit grünen Linien verbunden und somit wird das Kriterium aus (6.1) erfüllt. Diese Kombinationen von Standorten wären aufgrund ihrer Prozesswärmeprofile aussichtsreiche Kandidaten für die überbetriebliche Wärmeintegration.

Der vorgestellte Ansatz könnte methodisch weiterentwickelt werden. Ein Aspekt wäre es, die Kriterien für die Temperaturprofile direkt in das verwendete Programm zum Suchen von Kollokationsmustern einzuarbeiten. Ein weiterer Ansatz bestünde darin, Kriterien für weitere Themenfelder auszuarbeiten, bspw. um Agglomerationen von Standorten für stoffliche Verwertungsnetzwerke zu identifizieren. Somit könnte der raumanalytische Ansatz gemeinsam mit dem Europäischen Schadstofffreisetzungs- und verbringungsregister (E-PRTR) auf weitere Themenfelder angewendet werden.



3	Metallerzeugung	1	Glas u. Keramik
3	Metallbearbeitung	1	Sonst. Verarbeitendes Gewerbe
2	Grundstoffchemie	1	Ernährung und Tabak
2	NE-Metalle und Giessereien	1	Wärme- und Kälteversorgung
2	Sonst. chemische Industrie		

Ansatzpunkte:

Diverse zu überprüfende Kombinationen (grüne Linien), bspw.:

- Metallerzeugung + Ernährung und Tabak oder
- Metallerzeugung + Sonst. chemische Industrie
(beide unmittelbar benachbart, etwa 3km).

Zudem befindet sich 1 x Wärme- und Kälteversorgung auf der Karte. Dies lässt auf ein Fernwärmenetz in der Nähe schließen. Es könnte somit auch die Einspeisung von Abwärme ins Fernwärmenetz geprüft werden. In Duisburg wird bereits Abwärme eines Stahlwerks in das Fernwärmenetz eingespeist. Für Bochum sind diesbezüglich Projekte vorgesehen, oder werden empfohlen (vgl. Bartelt et al. 2013). Das Kartensystem kann also genutzt werden, um ähnliche Konstellationen in anderen Regionen strukturiert zu suchen.

Abbildung 40: Beispielhafter Kartenausschnitt für Bochum.

6.6. Mögliche Integration in räumliche Entscheidungsunterstützungssysteme

Bezogen auf das Jahr 1990 plant Deutschland eine Reduktion der Treibhausgasemissionen von 80 % bis 95 % bis zum Jahr 2050. Um dieses Ziel zu erreichen, haben einige Bundesländer (bspw. Nordrhein-Westfalen) bereits Klimaschutzgesetze erlassen, die einen gesetzlichen Rahmen zur Planung von Reduktionsmaßnahmen bilden. In diesem Zusammenhang werden Klimaschutzpläne auf regionaler und kommunaler Ebene immer relevanter, da so Ziele von übergeordneten Ebenen mit Maßnahmen auf untergeordneten Ebenen miteinander verglichen und angepasst werden können. Zur Erstellung von Klimaschutzplänen oder dergleichen werden häufig sogenannte Klimaschutzmanager oder spezielle Beratungsunternehmen eingesetzt.

Die Erstellung regionaler oder kommunaler Klimaschutzpläne kann als komplexes raumanalytisches Problem aufgefasst werden (abgeleitet aus Densham 1991). Dies ist zum einen darin begründet, dass die zu planenden Maßnahmen häufig eine räumliche Dimension aufweisen, bspw. die Erweiterung von Fernwärmenetzen. Zum anderen kann es mehrere Ziele geben, die ggf. Zielkonflikte aufweisen. Beispielsweise könnte ein Ziel darin bestehen, den Anteil solarer Energie zur Wärmebereitstellung im Fernwärmenetz zu erhöhen. Ein weiteres Ziel könnte darin bestehen, den Flächenverbrauch der Kommune zu reduzieren. Der Anteil solarer Energie im Fernwärmenetz kann jedoch nur durch Einsatz solarthermischer Felder erhöht werden, was wiederum mit einem großen Flächenverbrauch einhergeht.

Des Weiteren kann das Problem der Erstellung eines Klimaschutzplans als schlecht strukturiertes Problem nach Simon (1973) aufgefasst werden. Nach Simon (1973) müssen für das Vorliegen eines gut oder wohlstrukturierten Problems alle Problemlösungsmöglichkeiten vorab, d. h. vor Lösung des Problems, definiert sein. Wenn hingegen während der Problemlösung neue Aspekte relevant werden und das Problem neu strukturiert werden muss, dann wird es zu einem schlechtstrukturierten Problem (Schweitzer 2016, Simon 1973). Bei der Erstellung von Klimaschutzplänen ist dies offensichtlich der Fall, denn es kann zu einer Vielzahl von unvorhergesehenen Ereignissen kommen. Ein Beispiel wären Bürgerinitiativen, die ggf. Anpassungen des Klimaschutzplans erfordern und nicht antizipiert werden konnten. Zudem werden Probleme der Stadtplanung grundsätzlich als schlechtstrukturiertes Problem aufgefasst (Streich 2011).

Densham (1991) stellt Ansätze zur Entwicklung von räumlichen Entscheidungsunterstützungssystemen zur Lösung schlechtstrukturierter raumanalytischer Probleme vor. Dabei empfiehlt er, keine eher eng angelegten Entscheidungsheuristiken anzuwenden, sondern vielmehr einen Prozess zur Erkundung von Lösungsmöglichkeiten zu etablieren. Ein solches System sollte einen Rahmen zur Integration von Datenbanken mit analytischen Methoden, graphischen Anzeigen, Tabellen- und Berichtsfunktionen enthalten. Im besten Fall ist zudem Expertenwissen von anderen Entscheidern enthalten.

Zur Erstellung eines räumlichen Entscheidungsunterstützungssystems für die Erstellung von Klimaschutzplänen müssten geeignete Daten und Methoden zunächst für viele unterschiedliche Themenbereiche zusammengestellt und ausgearbeitet werden. Im Rahmen dessen wäre auch ein Teilmodul zum Themenspektrum „Abwärmernutzung“ für kommunale Akteure hilfreich. Die in dieser Arbeit vorgestellten Ansätze können zur Entwicklung eines solchen Teilmoduls als Grundlage dienen. Die Fragestellung für ein solches Modul könnte wie folgt lauten:

Wo befindet sich Abwärme innerhalb der Kommune, die gegenwärtig nicht genutzt wird, jedoch einen Nutzen für Industrie und Gesellschaft haben könnte? Wie viel Abwärme fällt diesbezüglich an? Welcher Nutzung sollte die Abwärme zugeführt werden?

In diesem Kontext liefern Aspekte dieser folgenden Ansätze zur Beantwortung:

- Lokalisierung: Mit den Ansätzen aus Kapitel 6 lassen sich prinzipiell aussichtsreiche Industriestandorte mit möglicherweise ungenutzter Abwärme lokalisieren.

- Technologien:
 - Überbetriebliche Wärmeintegration: Mit der Methode aus Kapitel 5 lässt sich eine der verfügbaren Optionen zur Nutzung von industrieller Abwärme wirtschaftlich bewerten.
 - Weitere Technologien: Eine alternative Technologie bestünde in der Verstromung von Abwärme. Zur Bewertung kann die Annuitätenmethode angewendet werden.
 - Alternativen bzw. Technologievergleich: Hier müssten zusätzliche methodische Konzepte angewendet werden, um die Alternativen gegeneinander abzuwägen. Da die zur Verfügung stehenden Technologien unterschiedliche Vor- und Nachteile haben und somit andersartige Charakteristiken, könnten multikriterielle Ansätze hilfreich sein.

7. Zusammenfassung, Diskussion und Ausblick

Die vorliegende Dissertation befasst sich mit der Frage, wie sich Energieeinsparpotenziale durch überbetriebliche Wärmeintegration in Deutschland systematisch ermitteln lassen. Nach einer Zusammenfassung zum Stand des Wissens zu dieser Thematik wird die Forschungslücke strukturiert erarbeitet (Kapitel 3). Dabei wird festgestellt, dass bis dato keine systematischen Modelle zur Ermittlung von Energieeinsparpotenzialen durch überbetriebliche Wärmeintegration in Deutschland vorhanden sind. Vorangegangene Arbeiten zu dieser Thematik fokussieren im Kern auf die Analyse einzelner Prozesse. Dabei wird das gesamtwirtschaftliche Potenzial der Energieeffizienzmaßnahme „überbetriebliche Wärmeintegration“ nicht betrachtet. Konsequenterweise beschäftigt sich der weitere Teil der Arbeit mit der Entwicklung entsprechender systematischer Modelle, um diese Forschungslücke zu schließen.

In Kapitel 4 wird zunächst ein Modell entwickelt, mit dem das theoretische Energieeinsparpotenzial durch überbetriebliche Wärmeintegration in Deutschland ermittelt (quantifiziert) werden kann. Das Modell basiert auf einem Top-Down-Ansatz. Eine **zentrale Einschränkung** des Modells besteht darin, dass die Verteilung des Wärmebedarfs über die Temperaturbereiche wie in der zugrundeliegenden Energiestatistik angenommen wird. Dies stellt eine vereinfachende Abstraktion dar, denn schließlich werden in der Statistik eine Vielzahl von Unternehmen aggregiert. Zudem werden keine Distanzen und weitere technische Aspekte bei dem Ansatz mitberücksichtigt und daher kann mit dem Ansatz nur das **theoretische** Energieeinsparpotenzial für Deutschland ermittelt werden. Prinzipiell ist der Ansatz auf alle Regionen anwendbar, für die eine Energiestatistik vorliegt, die den Wärmebedarf nach Temperaturen und Industriezweigen differenziert ausweist. Abschließend wird in Kapitel 4 eine entsprechende theoretische Potenzialschätzung für Deutschland durchgeführt und so die Relevanz des Themas für das Energiesystem aufgezeigt. Insgesamt wird geschätzt, dass das **theoretische** Energieeinsparpotenzial durch überbetriebliche Wärmeintegration in Deutschland bis zu etwa 6 % bezogen auf den Endenergieverbrauch der Industrie beträgt.

Die folgenden Teile der Arbeit befassen sich mit dem Entwickeln von Modellen, mit denen das **technische** und **wirtschaftliche Energieeinsparpotenzial** durch überbetriebliche Wärmeintegration für Deutschland ermittelt werden kann. Hierfür ist im Prinzip ein Bottom-Up Ansatz notwendig, bei dem alle für die Option in Frage kommenden Nachbarschaften zwischen Produktionsstandorten in Deutschland identifiziert werden und deren technisches und wirtschaftliches Potenzial bewertet wird. Deshalb wird in Kapitel 5 zunächst ein techno-ökonomisches Modell zur Bewertung der überbetrieblichen Wärmeintegration entwickelt und für eine exemplarische Nachbarschaft validiert und getestet. Zudem wird in Kapitel 6 ein raumanalytisches Modell zur Lokalisierung von aussichtsreichen Nachbarschaften von Produktionsstandorten für die überbetriebliche Wärmeintegration entwickelt. Durch das Zusammenspiel der Modelle aus Kapitel 5 und Kapitel 6 kann das technische und wirtschaftliche Potenzial für die überbetriebliche Wärmeintegration in Deutschland somit sukzessive ermittelt werden (Bottom-Up Ansatz).

In der Fallstudie aus Kapitel 5 wird mit dem entwickelten techno-ökonomischen Modell jedoch gezeigt, dass zur detaillierten Bewertung des technischen und wirtschaftlichen Potenzials eine Vielzahl von Daten notwendig sind, die im konkreten Fall vor Ort erfasst bzw. in Machbarkeitsstudien technisch detailliert

festgelegt werden müssten. Die Notwendigkeit zur Erfassung dieser Daten wird in Sensitivitätsrechnungen aufgezeigt. Hierfür werden zentrale Eingangsparameter (bspw. Wärmeübertragungskoeffizienten) variiert und deren Effekt auf das wirtschaftliche Potenzial in Abhängigkeit der Entfernung wird aufgezeigt. In Extremfällen variieren die maximalen wirtschaftlichen Distanzen um bis zu zehn Kilometer.

Schließlich wird in Kapitel 6 anhand einer raumanalytischen Analyse die Anzahl der Nachbarschaften zwischen Produktionsstandorten abgeschätzt, für die eine detailliertere technische und wirtschaftliche Untersuchung aussichtsreich erscheint. Für eine Entfernung von maximal zehn Kilometern beträgt die Anzahl dieser Nachbarschaften rund 3.000. Sogar bei einer eher geringen Distanz von einem Kilometer beträgt die Anzahl der aussichtsreichen Nachbarschaften noch 375.

Aus der Kombination der Erkenntnisse aus Kapitel 5 und Kapitel 6 leiten sich folgende Erkenntnisse im Kontext der Forschungsfrage ab. Das **technische und wirtschaftliche Energieeinsparpotenzial** für die überbetriebliche Wärmeintegration hängt stark von Parametern ab, die für Einzelfälle standortbezogen erfasst werden müssen (Kapitel 5). Der diesbezügliche Aufwand kann nur ungenau abgeschätzt werden. Des Weiteren hat die Raumanalyse in Kapitel 6 gezeigt, dass die Anzahl an aussichtsreichen Nachbarschaften für die überbetriebliche Wärmeintegration besonders hoch ist. Es müssten somit Parameter für besonders viele Standorte erfasst werden, um das technische und wirtschaftliche Potenzial zu ermitteln. Infolgedessen ist der Aufwand zur Ermittlung des gesamten technischen und wirtschaftlichen Energieeinsparpotenzials durch überbetriebliche Wärmeintegration für Deutschland nur ungenau abschätzbar. Analysen zur Ermittlung des technischen und wirtschaftlichen Potenzials wären daher wohl eher nur schrittweise für kleinere regionale Eingrenzungen durchführbar. Dies stellt die zentrale Einschränkung des Bottom-Up-Ansatzes im Kontext der Fragestellung dar.

Aufgrund des Vorangegangenen wird ebenfalls in Kapitel 6 argumentiert, dass die Energieeffizienzoption „überbetriebliche Wärmeintegration“ in räumliche Entscheidungsunterstützungssysteme eingearbeitet werden könnte, die kommunale Raumplaner und Energieverantwortliche bei der Planung von Energieinfrastrukturen unterstützen. Ein diesbezüglicher Versuch wurde gegenwärtig in einem durch die EU Kommission geförderten Projekt bereits gestartet. Im Rahmen des durch die EU geförderten Projekts „hot maps“ werden dabei Aspekte dieser Arbeit aufgenommen und implementiert. Weitere Informationen finden sich auf der Internetseite des Projekts (Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung ISI).

In dieser Arbeit wurde nicht untersucht, unter welchen Randbedingungen Produktionsstandorte die Energieeffizienzoption „überbetriebliche Wärmeintegration“ adaptieren würden. Insbesondere in diesem Feld besteht weiterhin Forschungsbedarf. Mit dieser Frage verknüpft wurde auch nicht untersucht, welche dezidierten politischen Instrumente die Adaption der vorangegangenen Option beschleunigen würden. Hier besteht somit ebenfalls weiterer Forschungsbedarf. Zudem ist aufgefallen, dass für den Bereich der Wärmeintegration kaum Publikationen vorhanden sind, die sich dezidiert mit dem Abweichen von Plan- und Ist-Kosten bei tatsächlich realisierten Projekten beschäftigen. Es wurde lediglich eine wissenschaftliche Publikation aus dem Jahr 1985 gefunden, welche sich mit Investitionsschätzungen für Chemieanlagen beschäftigt und die Thematik somit peripher behandelt. Insbesondere im frühen Projektstadium, also bei niedrigen Planungsgraden werden dort

Schätzungenauigkeiten von +/- 40 % angegeben. Für komplexe Energieeffizienzoptionen, wie bspw. der überbetrieblichen Wärmeintegration, könnten solche Schätzungenauigkeiten eine große Rolle bei der Bereitschaft zur Adaption spielen. Dies wurde bereits in einigen Fachgesprächen, die mit Energiemanagern aus der Praxis durchgeführt worden sind angedeutet. Insbesondere hier besteht somit ebenfalls weiterer Forschungsbedarf.

8. Anhang

Der Anhang ist nach zugehörigen Kapiteln differenziert.

8.1. Zu Kapitel 3: Stand des Wissens

Tabelle 53: Anzahl Artikel und Suchtreffer je Fachzeitschrift

Titel der Fachzeitschrift	Suchtreffer								Artikel- anzahl
	2000 – 2015				1979 – 1999				
	S2	S3	S4	S5	S6./. S2	S7	S8	S9	
Applied Energy	34	1	-	1	2	-	-	-	37
Applied Thermal Engineering	56	2	-	-	7	-	-	-	58
Energy	49	3	-	-	8	-	-	-	59
Energy Conversion and Management	28	-	-	-	6	-	-	-	34
Energy Efficiency	6	-	-	-	-	-	-	-	6
Energy Policy	14	-	-	-	2	-	-	-	16
Energy Procedia	20	-	-	-	-	-	-	-	20
Heat Recovery Systems and CHP	-	-	-	-	14	-	-	-	14
International Journal of Ambient Energy	1	-	-	-	-	-	-	-	1
International Journal of Energy Research	11	-	-	-	5	-	-	-	16
International Journal of Energy Technology and Policy	-	-	-	-	-	-	-	-	-
International Journal of Low-Carbon Technologies	2	-	-	-	-	-	-	-	2
JOM	2	-	-	-	1	-	-	-	3
Journal of Cleaner Production	18	-	-	2	1	-	-	-	19
Journal of Heat Recovery Systems	-	-	-	-	20	-	-	-	20
Renewable and Sustainable Energy Reviews	10	-	-	-	-	-	-	-	10
Sustainable Energy Technologies and Assessments	1	-	-	-	-	-	-	-	1
Summen	252	6	-	3	66	-	-	-	316
./.. kürzt eine Subtraktion ab.									

8.2. Zu Kapitel 5: Methodik Wärmeintegration

Zu Wärmeverlusten (verwendete Kennzahlen):

Definitionen verwendeter dimensionsloser Kennzahlen:

- Nusselt-Zahl: Die Nusselt-Zahl charakterisiert die konvektive Wärmeübertragung eines strömenden Fluids. Sie kann als das Verhältnis der Wärmeübertragung durch Konvektion zu einer theoretischen Wärmeleitung des gleichen „ruhenden“ Fluids aufgefasst werden (A-to-Z Guide to Thermodynamics, Heat and Mass Transfer, and Fluids Engineering 2006). Die Nusselt-Zahl ist in Gleichung (8.1) definiert. Dabei steht α für den Wärmeübergangskoeffizienten, λ für die Wärmeleitfähigkeit des Fluids und CL ist die charakteristische Länge, die in Abhängigkeit von der Geometrie definiert ist (bspw. der Durchmesser bei einem durchströmten Rohr). Die Nusselt-Zahl kann mit Hilfe weiterer dimensionsloser Kennzahlen und Ähnlichkeitsgesetzen bzw. Korrelationsgleichungen bestimmt werden. Die Ähnlichkeitsgesetze unterscheiden sich dann zwischen erzwungener und freier (thermischer) Konvektion (VDI heat atlas 2010).

$$Nu = \frac{\alpha \cdot CL}{\lambda} \quad (8.1)$$

- Reynolds-Zahl: Die Reynolds-Zahl beschreibt für ein strömendes Fluid das Verhältnis von Trägheits- zu Zähigkeitskräften. Die Reynolds-Zahl bezieht sich auf die erzwungene Konvektion. Die Reynolds-Zahl ist in Gleichung (8.2) definiert. Dabei ist CL wieder die charakteristische Länge, ν bezeichnet die kinematische Viskosität und u die Strömungsgeschwindigkeit (A-to-Z Guide to Thermodynamics, Heat and Mass Transfer, and Fluids Engineering 2006).

$$Re = \frac{u \cdot CL}{\nu} \quad (8.2)$$

- Prandtl-Zahl: Die Prandtl-Zahl bezieht sich auf die Stoffeigenschaften eines Fluids. Sie beschreibt das Verhältnis zwischen kinematischer Viskosität und Temperaturleitzahl in einem Fluid. Die Prandtl-Zahl ist in Gleichung (8.3) definiert. Dabei ist a die Temperaturleitzahl (A-to-Z Guide to Thermodynamics, Heat and Mass Transfer, and Fluids Engineering 2006).

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\nu \cdot \rho \cdot c_p}{\lambda} \quad (8.3)$$

- Grashof-Zahl: Die Grashof-Zahl gibt für eine thermisch induzierte (freie) Konvektion das Verhältnis zwischen Auftriebskraft zu Trägheits- und Reibungskräften in der Strömung an. Dabei wird die Auftriebskraft durch Dichteunterschiede innerhalb des Fluids erzeugt, die wiederum auf Temperaturunterschiede zurückzuführen sind (A-to-Z Guide to Thermodynamics, Heat and Mass Transfer, and Fluids Engineering 2006). Die Grashof-Zahl für die freie Konvektion kann mit Hilfe von Ähnlichkeitsgesetzen auf Basis einer äquivalenten Reynolds-Zahl für die erzwungene Konvektion bestimmt werden (Stein 1990). Eine mögliche Analogie-Beziehung zwischen erzwungener und freier Konvektion an einer senkrecht stehenden Platte ist in Gleichung (8.4) definiert. Im Rahmen des Modells wird diese Beziehung ebenfalls für die freie Konvektion um einen Zylinder verwendet, was eine Vereinfachung darstellt. Dabei steht $Re_{\text{äq}}$ für die Reynolds-Zahl einer äquivalenten erzwungenen Konvektion. In dem Fall der Wärmeintegration beziehen sich die zu verwendenden Parameter für die Reynolds-Zahl demnach auf die Luft, die das Rohr umströmt (bspw. determiniert durch Umgebungsbedingungen in oder zwischen den Hallen/Anlagen).

$$Gr = 2,5 \cdot Re_{\text{äq}}^2 \quad (8.4)$$

- Rayleigh-Zahl: Die Rayleigh-Zahl beschreibt den vorwiegenden Effekt der Wärmeübertragung innerhalb eines Fluids. Unterhalb eines kritischen Werts ist die Wärmeübertragung im Fluid primär durch Wärmeleitung gegeben. Über dem kritischen Wert ist die Wärmeübertragung primär durch Konvektion gegeben (VDI heat atlas 2010). Die Rayleigh-Zahl ist in Gleichung (8.5) definiert.

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (8.5)$$

Korrelationsgleichungen Nusselt-Zahl

Für die **erzwungene Konvektion** zwischen Fluid und innerer Rohrhülle wird im Rahmen des Modells eine voll ausgebildete, laminare Strömung angenommen. Zudem wird angenommen, dass die Wandtemperatur annähernd konstant ist. Zur Darstellung der entsprechenden Nusselt-Zahl wird im Modell eine allgemeingültige Korrelationsgleichung aus dem VDI-Wärmeatlas verwendet (VDI heat atlas 2010). Der entsprechende Zusammenhang ist in Gleichung (8.6) abgebildet und die jeweiligen Kennzahlen beziehen sich dann auf das durchströmende Fluid. Die Abweichung zwischen Nusselt-Zahlen, die mit der Korrelationsgleichung ermittelt werden und numerisch ermittelten Werten beträgt laut VDI-Wärmeatlas maximal 1 %.

$$Nu_{Rohr,innen} = \sqrt[3]{3,66^3 + 0,7^3 + \left(1,615 \cdot \left(Re \cdot Pr \cdot \frac{d}{L}\right)^{1/3} - 0,7\right)} \quad (8.6)$$

Für die **freie (thermische) Konvektion**, die zwischen dem äußeren Radius der Isolierhülle und der Umgebungsluft stattfindet, wird ebenfalls eine Korrelationsgleichung entsprechend VDI-Wärmeatlas angenommen. Hierfür wird die Rohrleitung als horizontaler Zylinder angenommen. Der entsprechende Zusammenhang ist in Gleichung (8.7) abgebildet.

$$Nu_{Rohr,außen} = \left(0,60 + 0,387 \cdot [Ra \cdot f_3(Pr)]^{1/6}\right)^2, \quad (8.7)$$

$$\text{mit } f_3(Pr) = \left[1 + \left(\frac{0,559}{Pr}\right)^{9/16}\right]^{-16/9}$$

Berechnungsschema α_{innen} und $\alpha_{außen}$:

Im Folgenden werden die zuvor eingeführten Kennzahlen verwendet, um die Wärmeübergangszahlen α_{innen} und $\alpha_{außen}$ für eine frei und erdverlegte Leitung zu bestimmen. Die Darstellung erfolgt für beide Fälle getrennt in Flussdiagrammen mit jeweiligen Verweisen zu den Modellgrößen. Für die Ermittlung sind die zuvor vorgestellten dimensionslosen Kennzahlen und Korrelationsgleichungen für die Nusselt-Zahl erforderlich.

Tabelle 54: Berechnungsschema α_{innen} .

	(8.1) = (8.6), mit $\alpha = \alpha_{innen,jl,ik}$ $CL = DN_{jl,ik}$ $\lambda = \lambda_j$.	
	(8.6) = f ((8.2),(8.3)), mit $Re = Re_{innen,jl,ik}$ $Pr = Pr_{innen,jl,ik}$.	
	(8.2) für Re , mit $u = u_m$ (s. (5.32)) $CL = DN_{jl,ik}$ $\nu = \nu_j$.	(8.3) für Pr , mit $c_p = c_{p,j}$ $\rho = \rho_j$ $\nu = \nu_j$ und $\lambda = \lambda_j$.
Anmerkung: j , da sich die Stoffwerte innerhalb des Rohrs auf das Energieangebot der Kombination jl, ik beziehen.		

Tabelle 55: Berechnungsschema $\alpha_{au\ddot{a}u\text{en}}$.

	(8.1) = (8.6), mit $\alpha = \alpha_{au\ddot{a}u\text{en},jl,ik}$ $CL = f(DN_{jl,ik})$. $\lambda = \lambda_{Luft,20^\circ C}$.	
	(8.6) = f ((8.3), (8.5)), mit $Ra = Ra_{au\ddot{a}u\text{en},jl,ik}$ $Pr = Pr_{au\ddot{a}u\text{en},jl,ik}$.	
	(8.5) für Ra , mit $Pr = Pr_{au\ddot{a}u\text{en},jl,ik}$ $Gr = Gr_{au\ddot{a}u\text{en},jl,ik}$	(8.3) für Pr , mit $c_p = c_{p,Luft,20^\circ C}$ $\rho = \rho_{Luft,20^\circ C}$ $\nu = \frac{DynVisk_{Luft,20^\circ C}}{\rho_{Luft,20^\circ C}}$
	Pr wie oben. (8.4) für Gr [-]	[-]
	[-]	Re_{aq} mit Stoffwerten für Luft bei 20 °C. Für $u = u_{Luft}$.
Anmerkung: Bspw. für $u_{Luft}=0,4$ m/s in Räumen oder Hallen (vgl. Dr. Franc Sodéc 2008).		

8.3. Zu Kapitel 5:

8.3.1. Zur Beschichtungsfabrik

Tabelle 56: Prozessströme für die Beschichtungsanlage (aus Grieder 2011).

Bezeichnung		T.ein	T.aus	Massen-	cp	Leistung
		[°C]	[°C]	strom	[kJ/kgK]	[kW]
Entfetten Badheizung	Kalt	55	60	1,860	16,8400	156,6
EPS-Ofen Kammerheizung		195	200	34,600	1,0000	173,0
Schlickertrockner Kammerheizung		145	150	31,400	1,0000	157,0
EPS-Ofen Verbrennungsluft		9	55	0,203	1,0040	9,4
Schlickertrockner Verbrennungsluft		9	55	0,060	1,0040	2,8
Haftwassertrockner Kammerheizung (inkl. AWN)		155	160	31,460	1,1000	173,0
Entfetten Kammerabluft	Heiß	50	20	2,464	0,9910	-73,3
EPS-Ofen Rauchgase		260	20	0,077	1,1040	-20,4
EPS-Ofen Kammerabluft		200	20	0,385	1,0040	-69,6
Email-Ofen Brüden		95	20	0,936	1,0040	-70,5
Schlickertrockner Kammerabluft		150	20	0,229	1,1010	-32,8
Haftwassertrockner Kammerabluft (inkl. AWN)		160	20	1,169	1,3030	-213,2

Tabelle 57: Summenkurven für die Fallstudien.

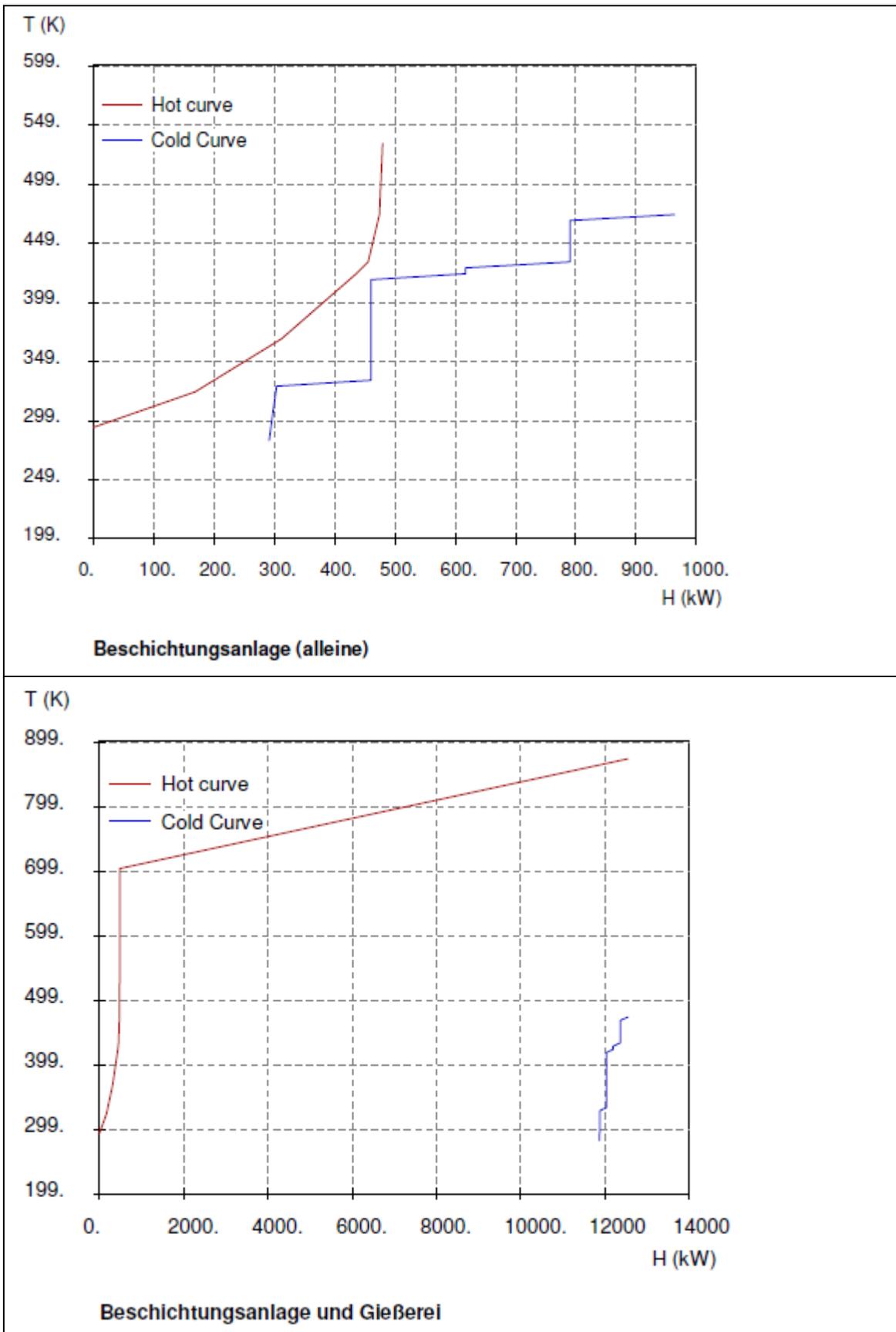


Tabelle 58: Kreuztabelle für Beschichtungsanlage (Werte nach (Grieder 2011)).

Heiß (links) über Kalt (rechts) in [kW]	Entfetten (Badheizung)	EPS-Ofen (Kammerheizung)	Schlickertrockner (Kammerheizung)	EPS-Ofen (Verbrennungsluft)	Schlickertrockner (Verbrennungsluft)	Haftwassertrockner (Kammerheizung)	Kälterzeuger	Summe
Entfetten (Kammer- abluft)	-	-	-	-	-	-	73,3	73,3
EPS-Ofen (Rauch- gase)	7,4	-	-	-	-	-	13,0	20,4
EPS-Ofen (Kammer- abluft)	34,7	-	-	-	-	-	34,9	69,6
Email- Ofen (Brüden)	14,1	-	-	-	-	-	56,4	70,5
Schlicker- trockner (Kammer- abluft)	-	-	-	2,8	-	-	30,0	32,8
Haftwasser- trockner (Kammer- abluft)	91,4	-	-	-	-	-	121,8	213,2
Wärme- erzeuger	9,0	173,0	157,0	9,4	-	173,0	-	521,4
Summe	156,6	173,0	157,0	9,4	2,8	173,0	329,3	850,8

Tabelle 59: Kreuztabelle für Beschichtungsanlage (Werte für energetische Optimierung).

Heiß (links) über Kalt (rechts) in [kW]	Entfetten (Badheizung)	EPS-Ofen (Kammerheizung)	Schlickertrockner (Kammerheizung)	EPS-Ofen (Verbrennungsluft)	Schlickertrockner (Verbrennungsluft)	Haftwassertrockner (Kammerheizung)	Kälterzeuger	Summe
Entfetten (Kammer- abluft)	-	-	-	-	-	-	73,3	73,3
EPS-Ofen (Rauch- gase)	2,6	3,0	0,9	1,4	-	3,8	8,8	20,4
EPS-Ofen (Kammer- abluft)	5,8	-	3,9	-	-	7,7	52,2	69,6
Email- Ofen (Brüden)	8,8	-	-	-	-	-	61,7	70,5
Schlicker- trockner (Kammer- abluft)	17,6	-	-	1,9	1,8	-	11,4	32,8
Haftwasser- trockner (Kammer- abluft)	121,9	-	-	6,1	1,0	-	84,3	213,2
Wärme- erzeuger	-	170,0	152,3	-	-	161,5	-	483,8
Summe	156,6	173,0	157,0	9,4	2,8	173,0	291,7	775,5

Tabelle 60: Kreuztabelle für Beschichtungsanlage (Werte für wirtschaftliche Optimierung).

Heiß (links) über Kalt (rechts) in [kW]	Entfetten (Badheizung)	EPS-Ofen (Kammerheizung)	Schlickertrockner (Kammerheizung)	EPS-Ofen (Verbrennungsluft)	Schlickertrockner (Verbrennungsluft)	Haftwassertrockner (Kammerheizung)	Kälterzeuger	Summe
Entfetten (Kammer- abluft)	-	-	-	-	-	-	73,3	73,3
EPS-Ofen (Rauch- gase)	7,7	-	3,4	3,0	-	-	6,4	20,4
EPS-Ofen (Kammer- abluft)	35,6	-	-	3,1	1,8	-	29,0	69,6
Email- Ofen (Brüden)	-	-	-	-	-	-	70,5	70,5
Schlicker- trockner (Kammer- abluft)	14,3	-	-	-	-	-	18,5	32,8
Haftwasser- trockner (Kammer- abluft)	99,0	-	-	3,3	1,0	-	110,0	213,2
Wärme- erzeuger	-	173,0	153,6	-	-	173,0	-	499,6
Summe	156,6	173,0	157,0	9,4	2,8	173,0	307,6	807,2

8.3.2. Zu Eisengießereien

Eisenguss wird zu großen Teilen mit Kupolöfen hergestellt. Bei Kupolöfen handelt es sich um Schachtschmelzöfen, die mit Koks befeuert werden. Bezogen auf die in den Ofen eingebrachte Energie liegt die Abwärme im Abgasstrang zwischen etwa 40 % und 60 % (Institut für Gießereitechnik 2008).

In Deutschland und Westeuropa wird der Anteil der Eisengussproduktion, die mit dem Kupolofen hergestellt wird auf insgesamt etwa 55 % beziffert (Europäische Kommission 2005). Etwa 90 % der Produktion sind wiederum auf den Heißwind-Kupolöfen zurückzuführen, bei dem ein Teil der Wärme im Abgas dazu genutzt wird die dem Ofen zuzuführende Verbrennungsluft vorzuwärmen. Die restlichen 10 % nutzen den Kaltwind-Kupolöfen, bei dem dies nicht der Fall ist. Die Umrüstung von Heißwind- auf Kaltwind-Kupolöfen ist aus energetischen Gesichtspunkten zu empfehlen, da im Mittel etwa 20 % weniger Koks pro Tonne produziertes Gusseisen verbraucht wird. Häufig ist diese Maßnahme ebenfalls wirtschaftlich (Europäische Kommission 2005).

Für eine Abschätzung der Abwärmepotenziale von Kupolöfen in Eisengießereien ist es daher sinnvoll, von Heißwind-Kupolöfen auszugehen. In Deutschland wurden im Jahr 2012 etwa 4,3 Millionen Tonnen Eisenguss hergestellt. Nimmt man an, dass etwa 55 % dieser Produktion mit Heißwind-Kupolöfen hergestellt wurden, so lässt sich für den Anteil von etwa 2,4 Millionen Tonnen ein theoretisches Abwärmepotenzial schätzen. Eine Abschätzung in Abhängigkeit von angenommenen Parametern ist in Tabelle 61 aufgelistet.

Tabelle 61: Geschätztes Abwärmepotenzial für Eisengießereien in Deutschland.

Parameter	Einheit	Minimal	Maximal
Koksverbrauch	kgKoks/t	90	135
Heizwert Kohle/Koks	kWh/kg	8,5	8,5
Energiebedarf	kWh/t	765	1148
Energieanteil im Abgas	%	36 %	57 %
Energiegehalt Abgas	kWh/t	275	654
jährliche Produktion	Mio. t	2,4	2,4
Abwärmepotenzial (theoretisch)	GWh	649	1541
Eigene Berechnung auf Basis von Institut für Gießereitechnik (2008).			

9. Verzeichnisse

9.1. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Warum Abwärme in der Industrie entsteht.	4
Tabelle 2: Fachzeitschriften der Literaturanalyse.	11
Tabelle 3: Verwendete Suchterme in Scopus.	12
Tabelle 4: Referenzvergleich zur Zunahme der Artikel für den Suchterm S6.	13
Tabelle 5: Merkmale – technische Ebene.	14
Tabelle 6: Merkmal – Fokus.	15
Tabelle 7: Merkmalsverteilung für die Kategorie Fokus in %.	16
Tabelle 8: Artikel mit Abwärmepotenzialen für abgegrenzte Regionen.	16
Tabelle 9: Merkmalsverteilung für die Kategorie technische Ebene in %.	17
Tabelle 10: Sektoral abgegrenzte Artikel mit Nutzung von Abwärme.	17
Tabelle 11: Aufteilung der Wirtschaftszweige für die Schätzung.	30
Tabelle 12: Abwärmeanteile der Wirtschaftszweige für die Schätzung.	34
Tabelle 13: Berechnungssystematik residuale Abwärme (je Wirtschaftszweig)	36
Tabelle 14: Durchgeführte Befragung zur Thematik industrielle Abwärme.	37
Tabelle 15: Verteilung der Befragten auf die Wirtschaftszweige.	37
Tabelle 16: Annahmen der eingeschränkten kaskadenartigen Verrechnung.	40
Tabelle 17: Wärmebedarf nach kaskadenartiger Verrechnung (in TWh).	42
Tabelle 18: Potenzielle Wärme zur externen Verschiebung (in TWh).	42
Tabelle 19: Theoretisches Energieeinsparpotenzial durch innerbetriebliche Wärmeintegration.	43
Tabelle 20: Theoretisches Energieeinsparpotenzial durch überbetriebliche Wärmeintegration.	43
Tabelle 21: Theoretisches Energieeinsparpotenzial durch Wärmeintegration insgesamt.	43
Tabelle 22: Bewertung der geschätzten Energieeinsparpotenziale für die Wärmeintegration.	44
Tabelle 23: Heiße und kalte Temperaturliste für das Beispiel – Werte in °C.	55
Tabelle 24: Exemplarische Aufteilung – Energienachfrage.	55
Tabelle 25: Exemplarische Aufteilung – Energieangebot.	55
Tabelle 26: Randbedingungen nach (Cerda et al. 1983).	56
Tabelle 27: Kostenfaktoren – energetische Optimierung.	57
Tabelle 28: Gleichung (5.12) mit grafischer Darstellung.	58
Tabelle 29: Spezifische Kosten für Wärmeübertrager im Modell.	60
Tabelle 30: Fälle für die Temperaturüberlappung.	64
Tabelle 31: Ermittlung des Massenstromes – indirekter Wärmetransport.	67
Tabelle 32: Annuität der Investition für Verrohrung	69
Tabelle 33: Annuität der Investition für Arbeitsmaschinen.	71
Tabelle 34: Druckverlustes für Rohre.	71
Tabelle 35: Kostenfaktor – Betriebskosten Pumpen.	72
Tabelle 36: Wärmewiderstandsnetzwerk für ein frei verlegtes Rohr.	74
Tabelle 37: Wärmeverlust für ein erdverlegtes isoliertes Rohr.	75
Tabelle 38: Wärmewiderstandsnetzwerk für ein erdverlegtes Rohr.	75
Tabelle 39: Wärmeverlustgleichung für eine erdverlegte Leitung.	76
Tabelle 40: Berechnung der Wärmeverluste im Modell.	77

Tabelle 41: Spezifische Kosten für zentrale Erzeuger im Modell.....	78
Tabelle 42: Kostenfaktoren – wirtschaftliche Optimierung.....	79
Tabelle 43: Parameter Gießerei.....	87
Tabelle 44: Validierung der Modellwerte für $dT_{min} = 25 \text{ °C}$	88
Tabelle 45: Kreuztabelle für Beschichtungsanlage (Werte entsprechend Grieder (2011)).....	92
Tabelle 46: Eingangsparameter Sensitivitätsrechnungen.....	93
Tabelle 47: k-Werte Bereich nach VDI.....	98
Tabelle 48: Bewertung raumanalytischer Methoden für die Fragestellung.....	110
Tabelle 49: Kollokationsmusterminer – Schritt 3.....	112
Tabelle 50: Häufige Kollokationsmuster im E-PRTR für Deutschland.....	115
Tabelle 51: Aufteilung der Wirtschaftszweige für die Fallstudie.....	116
Tabelle 52: Anzahl der Kollokationsmuster und ermittelte Nachbarschaften je Profilkategorie.....	121
Tabelle 53: Anzahl Artikel und Suchtreffer je Fachzeitschrift.....	130
Tabelle 54: Berechnungsschema <i>innen</i>	132
Tabelle 55: Berechnungsschema <i>außen</i>	133
Tabelle 56: Prozessströme für die Beschichtungsanlage (aus Grieder 2011).....	134
Tabelle 57: Summenkurven für die Fallstudien.....	135
Tabelle 58: Kreuztabelle für Beschichtungsanlage (Werte nach (Grieder 2011)).....	136
Tabelle 59: Kreuztabelle für Beschichtungsanlage (Werte für energetische Optimierung).....	137
Tabelle 60: Kreuztabelle für Beschichtungsanlage (Werte für wirtschaftliche Optimierung).....	138
Tabelle 61: Geschätztes Abwärmepotenzial für Eisengießereien in Deutschland.....	139

9.2. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kapitelstruktur	3
Abbildung 2: Potenziale für die Wärmeintegration	8
Abbildung 3: Konzept der Schätzung von Prozesswärmebedarfen in Rohde et al. (2017)	28
Abbildung 4: Struktur der theoretischen Potenzialschätzung	29
Abbildung 5: Aussagen der Befragten zur Abwärmenutzung in Ihrem Betrieb	37
Abbildung 6: Kaskadenartige Rechnung Grundstoffchemie (oben vor, unten nach der Verrechnung)	38
Abbildung 7: Kaskadenartige Rechnung Metallerzeugung (oben vor, unten nach der Verrechnung)	38
Abbildung 8: Pinch-Temperatur	49
Abbildung 9: Prozesszerlegung in Energienachfragen und Energieangebote	53
Abbildung 10: Beispiel für Bildung von Energienachfragen und Energieangeboten	55
Abbildung 11: Kostenbelegung – energetische Optimierung für das Beispiel	59
Abbildung 12: Geometrische Grundlage zur Schätzung von Kosten für Verrohrung	70
Abbildung 13: Isoliertes Rohr mit Bezeichnung verwendeter Radien	74
Abbildung 14: Beschichtungsanlage – Vorbehandlung	85
Abbildung 15: Beschichtungsanlage – EPS-Verfahren	86
Abbildung 16: Beschichtungsanlage – Enamel-Verfahren	86
Abbildung 17: Anzahl Wärmeübertrager in der Beschichtungsanlage je nach Ansatz	89
Abbildung 18: Variation dT_{min} für die Beschichtungsanlage – Leistungen	90
Abbildung 19: Variation dT_{min} für die Beschichtungsanlage – Kosten	90
Abbildung 20: Technisches und wirtschaftliches Potenzial für die exemplarische Nachbarschaft	91

Abbildung 21: Zusammensetzung der Wärmeleistung	94
Abbildung 22: Überbetriebliche Wärmeleistung mit Wärmeübertrager- und Rohrleitungskosten	95
Abbildung 23: Überbetriebliche Wärmeleistung	96
Abbildung 24: Überbetriebliche Wärmeleistung	97
Abbildung 25: Einfluss der Dynamik für die Fallstudie	98
Abbildung 26: Überbetriebliche Wärmeintegration bei Variation der k-Werte (direkte Variante)	99
Abbildung 27: Zusammensetzung der Wärmeleistung bei Variation der k-Werte (direkte Variante)	100
Abbildung 28: Maximale Distanzen mit überbetrieblichem Wärmetransport für die Fallstudie	101
Abbildung 29: Wärmegestehungskosten der überbetrieblichen Wärmeintegration die Fallstudie	102
Abbildung 30: Anteile der eingebrachten Kostenfaktoren an Wärmegestehungskosten	102
Abbildung 31: Modell zur Identifikation aussichtsreicher Nachbarschaften	107
Abbildung 32: Kollokationsmusterminer – Schritt 1	111
Abbildung 33: Kollokationsmusterminer – Schritt 2	112
Abbildung 34: Quantile für die Anzahl der Muster	115
Abbildung 35: Typische V-Form	117
Abbildung 36: Typische U- Form	117
Abbildung 37: Typische J-Form	118
Abbildung 38: Typische L-Form	118
Abbildung 39: Karte zu Realisierungen der Analyse	122
Abbildung 40: Beispielhafter Kartenausschnitt für Bochum.	124

9.3. Abkürzungsverzeichnis

Ggf.	Gegebenenfalls
S.	Seite
u.a.	unter anderem
usw.	und so weiter
vgl.	vergleiche
z.Bsp.	zum Beispiel

9.4. Symbole

Symbole und Einheiten werden grundsätzlich in den jeweiligen entsprechenden Kapiteln erläutert. Anbei findet sich eine Auswahl wichtiger Symbole für Kapitel 4 sowie Kapitel 5.

Wichtige Symbole für Kapitel 4

$RA_{Industrie\ i, Temperaturbereich\ A}$	Abwärme der Industrie i bezogen auf den Wärmebedarf im Temperaturbereich A
RA_{500}	Relativer Abwärmeanteil aus dem Temperaturbereich $> 500\text{ °C}$
$RA_{100-500}$	Relativer Abwärmeanteil aus dem Temperaturbereich $100-500\text{ °C}$
AS_{500}	Abwärme aus dem Temperaturbereich $> 500\text{ °C}$
$AS_{100-500}$	Abwärme aus dem Temperaturbereich $100-500\text{ °C}$
WB_{500}	Wärmebedarf Temperaturbereich $> 500\text{ °C}$
$WB_{100-500}$	Wärmebedarf Temperaturbereich $100-500\text{ °C}$
$WB_{<100}$	Wärmebedarf Temperaturbereich $< 100\text{ °C}$
$red_{WB_{100-500}}$	reduzierte Bedarfe, bspw. für $100-500\text{ °C}$ usw.

Wichtige Symbole für Kapitel 5

A_i	Wärmebedarf eines Prozesses A_i	
B_j	Wärmeangebot eines Prozesses B_j	
a_{ik}	Energienachfrage: Wärme, die Prozess i im Temperaturintervall k bis $k-1$ benötigt	
b_{jl}	Energieangebot: Wärme, die Prozess j im Temperaturintervall l bis $l-1$ bietet	
$q_{ik,jl}$	Die Wärmemenge, die von Energieangebot b_{jl} zu Energienachfrage a_{ik} transportiert wird. Die Lösungen für $q_{ik,jl}$ besagt somit welche Prozesse miteinander verbunden und wie groß die Wärmeübertrager zwischen den Prozessen sind	
$Q_{ij, Schätz}$	Wärme, die von Prozess B_j an Prozess A_i geliefert werden kann	
$V_{ij, Schätz}$	Volumenstrom, der zwischen Prozess A und B transportiert werden würde, um Wärme $Q_{ij, Schätz}$ zu übertragen	
$c_{WT, ik, jl}$	Spezifische Kosten [EUR/W],	- Wärmeübertrager
$c_{R, jk, il}$	zum Transport der	- Rohrleitungen
$c_{P/V, jl, ik}$	Wärmemenge	- Arbeitsmaschinen
$c_{WV, jl, ik}$	$q_{ik, jl}$ für	- Wärmeverluste
$C_{ik, jl}$	Kosten [EUR/W], die für den Transport einer Einheit entlang Verbindung $q_{ik, jl}$ angesetzt werden	

9.5. Literaturverzeichnis

AG Energiebilanzen e.V.: Bilanzen 1990-2014. Hg. v. AG Energiebilanzen e.V. Online verfügbar unter <http://www.ag-energiebilanzen.de/7-0-Bilanzen-1990-2014.html>, zuletzt geprüft am 03.03.2017.

Ahmad, S.; Linnhoff, B.; Smith, R. (1990): Cost optimum heat exchanger networks—2. targets and design for detailed capital cost models. In: *Computers & Chemical Engineering* 14 (7), S. 751–767. DOI: 10.1016/0098-1354(90)87084-3.

AJAH, A.; MESBAH, A.; GRIEVINK, J.; HERDER, P.; FALCAO, P.; WENNEKES, S. (2008): On the robustness, effectiveness and reliability of chemical and mechanical heat pumps for low-temperature heat source district heating: A comparative simulation-based analysis and evaluation. In: *Energy* 33 (6), S. 908–929. DOI: 10.1016/j.energy.2007.12.003.

Ammar, Yasmine; Chen, Yi; Joyce, Sharon; Wang, Yaodong; Roskilly, Antony P.; Swailes, David (2013): Evaluation of low grade heat transport in the process industry using absorption processes. In: *Applied Thermal Engineering* 53 (2), S. 217–225. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2012.04.056.

Ammar, Yasmine; Joyce, Sharon; Norman, Rosemary; Wang, Yaodong; Roskilly, Anthony P. (2012): Low grade thermal energy sources and uses from the process industry in the UK. In: *Applied Energy* 89 (1), S. 3–20. DOI: 10.1016/j.apenergy.2011.06.003.

Ammenberg, Jonas; Baas, Leenard; Eklund, Mats; Feiz, Roozbeh; Helgstrand, Anton; Marshall, Richard (2015): Improving the CO₂ performance of cement, part III: the relevance of industrial symbiosis and how to measure its impact. In: *Journal of Cleaner Production* 98, S. 145–155. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.01.086.

Andrews, R.; Pearce, J. M. (2011): Environmental and economic assessment of a greenhouse waste heat exchange. In: *Journal of Cleaner Production* 19 (13), S. 1446–1454. DOI: 10.1016/j.jclepro.2011.04.016.

Ansari, Nastaran; Seifi, Abbas (2013): A system dynamics model for analyzing energy consumption and CO₂ emission in Iranian cement industry under various production and export scenarios. In: *Energy Policy* 58, S. 75–89. DOI: 10.1016/j.enpol.2013.02.042.

Atkins, Martin J.; Walmsley, Michael R.W.; Neale, James R. (2010): The challenge of integrating non-continuous processes – milk powder plant case study. In: *Journal of Cleaner Production* 18 (9), S. 927–934. DOI: 10.1016/j.jclepro.2009.12.008.

Atkins, Martin J.; Walmsley, Michael R.W.; Neale, James R. (2012): Process integration between individual plants at a large dairy factory by the application of heat recovery loops and transient stream analysis. In: *Journal of Cleaner Production* 34, S. 21–28. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.01.026.

Begellhouse (2006): A-to-Z Guide to Thermodynamics, Heat and Mass Transfer, and Fluids Engineering

Aydemir, Ali; Braimakis, Konstantinos; Rohde, Clemens; Karellas, Sotirios; Ostrander, Berit (2015): Energy Saving Potentials for Industrial Steam Boilers-Findings from the Ecodesign Process. In: Proceedings of the 10th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers (INFUB), Gaia (Porto) 2015.

Aydemir, Ali; Rohde, Clemens; Möhren, Simon (2016): Energy savings of intercompany heat integration - A methodological framework (part I). In: 14. Symposium Energieinnovation (Konferenzband), Graz 2016.

Aydemir, Ali; Rohde, Clemens; Ko, Dorothea (2016): Energy savings of inter-company heat integration: tapping potentials with spatial analysis. ECEEE Industrial Summer Study Proceedings 2016 (2-072-16), Berlin 2016.

Bartelt, Dipl-Geogr Martin; Beck, Jessica; Donner, Dipl-Ing Oliver; Marambio, Dipl-Wirt-Ing Constanze; Michels, Dipl-Ing Armin; Schrader, Dipl-Ing Knut et al. (2013): Perspektiven der

Fernwärme im Ruhrgebiet bis 2050 Endfassung. Hg. v. Büro für Energiewirtschaft und technische Planung GmbH.

Bauer, T.; Forbes, I.; Pearsall, N. (2004): The potential of thermophotovoltaic heat recovery for the UK industry. In: *International Journal of Ambient Energy* 25 (1 SPEC. ISS), S. 19–25.

Bill, R.: Professur für Geodäsie und Geoinformatik, Universität Rostock (Hrsg.): Geoinformatik-Service, Lexikon. In: *Stichwort Räumliches Objekt*.

Blesl, Markus; Kempe, Stephan; Ohl, Michael; Fahl, Ulrich; König, Andreas; Jenssen, Till; Eltrop, Ludger (2009): Wärmetlas Baden-Württemberg-Erstellung eines Leitfadens und Umsetzung für Modellregionen.

Blesl, Markus; Ohl, Michael; Fahl, Ulrich (2011): Ganzheitliche Bewertung innovativer mobiler thermischer Energiespeicherkonzepte für Baden-Württemberg auf Basis branchen- und betriebsspezifischer Wärmebedarfsstrukturen: Endbericht.

Bonilla, J.J.c; Blanco, J.M.a; López, L.b; Sala, J.M.b (1997): Technological recovery potential of waste heat in the industry of the Basque Country. In: *Applied Thermal Engineering* 17 (3), S. 283–288. Online verfügbar unter <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0031103195&partnerID=40&md5=4fc86b76179c820884d07f630e89fef4>.

Broberg, Sarah; Backlund, Sandra; Karlsson, Magnus; Thollander, Patrik (2012): Industrial excess heat deliveries to Swedish district heating networks: Drop it like it's hot. In: *Energy Policy* 51, S. 332–339. DOI: 10.1016/j.enpol.2012.08.031.

Broberg Viklund, Sarah; Johansson, Maria T. (2014a): Technologies for utilization of industrial excess heat. Potentials for energy recovery and CO₂ emission reduction. In: *Energy Conversion and Management* 77, S. 369–379. DOI: 10.1016/j.enconman.2013.09.052.

Broberg Viklund, Sarah; Johansson, Maria T. (2014b): Technologies for utilization of industrial excess heat: Potentials for energy recovery and CO₂ emission reduction. In: *Energy Conversion and Management* 77, S. 369–379. DOI: 10.1016/j.enconman.2013.09.052.

Broberg Viklund, Sarah; Lindkvist, Emma (2015): Biogas production supported by excess heat – A systems analysis within the food industry. In: *Energy Conversion and Management* 91, S. 249–258. DOI: 10.1016/j.enconman.2014.12.017.

Brueckner, Sarah; Arbter, Rene; Pehnt, Martin; Laevemann, Eberhard (2017): Industrial waste heat potential in Germany—a Bottom-Up analysis. In: *Energy Efficiency* 10 (2), S. 513–525. DOI: 10.1007/s12053-016-9463-6.

Brueckner, Sarah; Miró, Laia; Cabeza, Luisa F.; Pehnt, Martin; Laevemann, Eberhard (2014): Methods to estimate the industrial waste heat potential of regions – A categorization and literature review. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 38, S. 164–171. DOI: 10.1016/j.rser.2014.04.078.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2016): Grünbuch Energieeffizienz. Diskussionspapier des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Online verfügbar unter <https://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/gruenbuch-energieeffizienz,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>, zuletzt geprüft am 02.12.2016.

Campana, F.; Bianchi, M.; Branchini, L.; Pascale, A. de; Peretto, A.; Baresi, M. et al. (2013): ORC waste heat recovery in European energy intensive industries: Energy and GHG savings. In: *Energy Conversion and Management* 76, S. 244–252. DOI: 10.1016/j.enconman.2013.07.041.

Cerda, Jaime; Westerberg, Arthur W.; Mason, David; Linnhoff, Bodo (1983): Minimum utility usage in heat exchanger network synthesis A transportation problem. In: *Chemical Engineering Science* 38 (3), S. 373–387. DOI: 10.1016/0009-2509(83)80156-0.

- Chae, Song Hwa; Kim, Sang Hun; Yoon, Sung-Geun; Park, Sunwon (2010):** Optimization of a waste heat utilization network in an eco-industrial park. In: *Applied Energy* 87 (6), S. 1978–1988. DOI: 10.1016/j.apenergy.2009.12.003.
- Chen, Wenying; Yin, Xiang; Ma, Ding (2014):** A Bottom-Up analysis of China's iron and steel industrial energy consumption and CO₂ emissions. In: *Applied Energy* 136, S. 1174–1183. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.06.002.
- Chen, Yang; Grossmann, Ignacio E.; Miller, David C. (2015):** Computational strategies for large-scale MILP transshipment models for heat exchanger network synthesis. In: *Computers & Chemical Engineering* 82, S. 68–83. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2015.05.015.
- Chertow, Marian R. (2000):** INDUSTRIAL SYMBIOSIS. Literature and Taxonomy. In: *Annu. Rev. Energy. Environ.* 25 (1), S. 313–337. DOI: 10.1146/annurev.energy.25.1.313.
- Costa, Andrea; Bakhtiari, Bahador; Schuster, Sebastian; Paris, Jean (2009):** Integration of absorption heat pumps in a Kraft pulp process for enhanced energy efficiency. In: *Energy* 34 (3), S. 254–260. DOI: 10.1016/j.energy.2008.07.019.
- Densham, Paul J. (1991):** Spatial decision support systems. In: *Geographical information systems: Principles and applications* 1, S. 403–412.
- Domschke, Wolfgang; Drexl, Andreas; Klein, Robert; Scholl, Armin (2015):** Einführung in Operations Research. 9., überarb. u. verb. Aufl. 2015. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Dr. Franc Sodec (2008):** Auslegungskriterien für thermische Behaglichkeit (technischer Bericht). Unter Mitarbeit von Dr. Franc Sodec. Hg. v. caverion GmbH.
- Dunn, Russell F.; Bush, Greg E. (2001):** Using process integration technology for CLEANER production. In: *Journal of Cleaner Production* 9 (1), S. 1–23. DOI: 10.1016/S0959-6526(00)00021-4.
- E. Dötsch (2011):** Induktionsofentechnologie und Energieeffizienz. In: *GIESSEREI* 06/2011 (98).
- Eckey, Hans-Friedrich; Kosfeld, Reinhold; Werner, Alexander (2009):** K-Funktionen als Instrument zur Analyse räumlicher (De-) Konzentrationsprozesse. Joint discussion paper series in economics.
- Element Energy; Ecofys; Imperial College; Stevenson, Paul (2014):** The potential for recovering and using surplus heat from industry. Hg. v. Department of Energy & Climate Change, United Kingdom. Online verfügbar unter <https://www.gov.uk/government/publications/the-potential-for-recovering-and-using-surplus-heat-from-industry>, zuletzt aktualisiert am 2014, zuletzt geprüft am 22.01.2016.
- El-Halwagi, Mahmoud M. (1997):** Pollution prevention through process integration: systematic design tools: Academic press.
- Erkman, S. (1997):** Industrial ecology. An historical view. In: *Journal of Cleaner Production* 5 (1-2), S. 1–10. DOI: 10.1016/S0959-6526(97)00003-6.
- Europäische Kommission (2005):** Reference Document on Best Available Techniques in the Smitheries and Foundries Industry.
- Europäische Union (EU):** Europäisches Register zur Erfassung der Freisetzung und Verbringung von Schadstoffen (PRTR). Verordnung (EG) 166/2006. Online verfügbar unter <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=uriserv:l28149>.
- European Commission (EC) (2016):** An EU Strategy on Heating and Cooling. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/1_EN_ACT_part1_v14.pdf, zuletzt aktualisiert am 01.04.2016.
- Fang, Hao; Xia, Jianjun; Zhu, Kan; Su, Yingbo; Jiang, Yi (2013):** Industrial waste heat utilization for low temperature district heating. In: *Energy Policy* 62, S. 236–246. DOI: 10.1016/j.enpol.2013.06.104.

- Fawkes, S. D.; Jacques, J. K. (1986):** Technical achievements in energy conservation by beverage-related processing industries: Breweries, dairies, distilleries and maltings. In: *Applied Energy* 25 (1), S. 41–70. DOI: 10.1016/0306-2619(86)90061-9.
- Fleiter, Tobias; Fehrenbach, Daniel; Worrell, Ernst; Eichhammer, Wolfgang (2012a):** Energy efficiency in the German pulp and paper industry – A model-based assessment of saving potentials. In: *Energy* 40 (1), S. 84–99. DOI: 10.1016/j.energy.2012.02.025.
- Fleiter, Tobias; Fehrenbach, Daniel; Worrell, Ernst; Eichhammer, Wolfgang (2012b):** Energy efficiency in the German pulp and paper industry – A model-based assessment of saving potentials. In: *Energy* 40 (1), S. 84–99. DOI: 10.1016/j.energy.2012.02.025.
- Fleiter, Tobias; Steinbach, Jan; Arens, Marlene; Aydemir, Ali; et al. (2016):** Mapping and analyses of the current and future (2020 - 2030) heating/cooling fuel deployment (fossil/renewables) - Work package 2: Assessment of the technologies for the year 2012. Hg. v. EUROPEAN COMMISSION: DIRECTORATE-GENERAL FOR ENERGY. Online verfügbar unter <https://ec.europa.eu/energy/en/studies/mapping-and-analyses-current-and-future-2020-2030-heatingcooling-fuel-deployment>, zuletzt geprüft am 11.03.2017.
- Forrest, John; Lougee-Heimer, robin:** CBC User Guide. Hg. v. IBM Research. Online verfügbar unter <http://www.coin-or.org/Cbc/index.html>, zuletzt geprüft am 22.11.2016.
- Forschungsdatenzentrum der Statistischen Ämter der Länder:** AFiD-Panel Industrieunternehmen.
- Frassine, Clemens; Rohde, Clemens; Hirzel, Simon (2016):** Energy saving options for industrial furnaces – the example of the glass industry. In Proceedings : Industrial Efficiency 2016, Going beyond energy efficiency to deliver savings, competitiveness and a circular economy. European Council for an Energy-Efficient Economy (ECEEE Industrial Summer Study). Berlin, 12-14 September 2016.
- Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung ISI:** HotMaps - An unique tool for heating and cooling planning. Fleiter, Tobias. Online verfügbar unter http://www.isi.fraunhofer.de/isi-en/e/projekte/318787_Hotmaps_Ft-2020-Kopie.php, zuletzt geprüft am 31.03.2017.
- Gebremedhin, Alemayehu (2003):** The role of a paper mill in a merged district heating system. In: *Applied Thermal Engineering* 23 (6), S. 769–778. DOI: 10.1016/S1359-4311(03)00018-8.
- Geldermann, Jutta; Treitz, Martin; Rentz, Otto (2006):** Integrated technique assessment based on the pinch analysis approach for the design of production networks. In: *European Journal of Operational Research* 171 (3), S. 1020–1032. DOI: 10.1016/j.ejor.2005.01.015.
- Ghenda, Jean (2010):** 10. CO₂-Monitoring-Fortschrittsbericht der Stahlindustrie in Deutschland: Berichtsjahr 2010: Stahl-Zentrum.
- Gitzhofer, Karlheinz (2007):** Erarbeitung eines deutschen Beitrages zur Revision des BVT Merkblattes für die Glas- und Mineralfaserindustrie. Unter Mitarbeit von Karlheinz Gitzhofer. Hg. v. Umweltbundesamt.
- Grieder, Thomas; DM Energieberatung AG (2011):** Prozessoptimierung mit der Pinch-Methode V-Zug AG. SCHLUSSBERICHT. Hg. v. Bundesamt für Energie (BFE) - Swiss, zuletzt geprüft am 27.01.2016.
- Grönkvist, Stefan; Sandberg, Peter (2006):** Driving forces and obstacles with regard to co-operation between municipal energy companies and process industries in Sweden. In: *Energy Policy* 34 (13), S. 1508–1519. DOI: 10.1016/j.enpol.2004.11.001.
- Hackl, Roman (2014):** A methodology for identifying transformation pathways for industrial process clusters. Toward increased energy efficiency and renewable feedstock. Göteborg, Sweden: Department of Energy and Environment, Chalmers University of Technology (Doktorsavhandlingar vid Chalmers Tekniska Högskola, Ny serie nr 3772).

-
- Hackl, Roman; Andersson, Eva; Harvey, Simon (2011):** Targeting for energy efficiency and improved energy collaboration between different companies using total site analysis (TSA). In: *Energy* 36 (8), S. 4609–4615. DOI: 10.1016/j.energy.2011.03.023.
- Hackl, Roman; Harvey, Simon (2013):** Framework methodology for increased energy efficiency and renewable feedstock integration in industrial clusters. In: *Applied Energy* 112, S. 1500–1509. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.03.083.
- Hammond, G. P.; Norman, J. B. (2014):** Heat recovery opportunities in UK industry. In: *Applied Energy* 116, S. 387–397. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.11.008.
- Herbst, Andrea; Toro, Felipe; Reitze, Felix; Jochem, Eberhard (2012):** Introduction to Energy Systems Modelling. In: *Swiss Journal of Economics and Statistics* 148 (2), S. 111–135. Online verfügbar unter <http://fachliteratur.isi.fraunhofer.de/isipublica-archiv-extern/isi12p127/Introduction-to-Energy-Systems-Modelling.pdf>.
- Herwig, Heinz; Moschallski, Andreas (2009):** Wärmeübertragung. Physikalische Grundlagen ; illustrierende Beispiele ; Übungsaufgaben mit Musterlösungen ; mit 41 Tabellen. 2., überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner (Studium).
- Hiete, Michael; Ludwig, Jens; Schultmann, Frank (2012):** Intercompany Energy Integration. In: *Journal of Industrial Ecology* 16 (5), S. 689–698. DOI: 10.1111/j.1530-9290.2012.00462.x.
- Hirzel, Simon; Sontag, Benjamin; Rohde, Clemens (2013):** Industrielle Abwärmenutzung. Kurzstudie. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.
- Hofer, Roland (1994):** Analyse der Potentiale industrieller Kraft-Wärme-Kopplung. Hg. v. IfE Schriftenreihe und 28. Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Kraftwerkstechnik (TU München).
- Holmgren, Kristina (2006):** Role of a district-heating network as a user of waste-heat supply from various sources – the case of Göteborg. In: *Applied Energy* 83 (12), S. 1351–1367. DOI: 10.1016/j.apenergy.2006.02.001.
- Huang, Yan; Shekhar, Shashi; Xiong, Hui (2004):** Discovering colocation patterns from spatial data sets: a general approach. In: *IEEE Transactions on Knowledge and data engineering* 16 (12), S. 1472–1485.
- Ibáñez-Forés, V.; Bovea, M. D.; Azapagic, A. (2013):** Assessing the sustainability of Best Available Techniques (BAT): methodology and application in the ceramic tiles industry. In: *Journal of Cleaner Production* 51, S. 162–176. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.01.020.
- Incropera, Frank P. (2007):** Fundamentals of heat and mass transfer. 6th ed. Hoboken, NJ: John Wiley.
- Institut für Gießereitechnik (2008):** Energieeffizienter Gießereibetrieb. Hg. v. Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie (BDG).
- Johnson, Iona; William, T.; Choate, W. T.; Amber Davidson, A. (2008):** Waste heat recovery: technology and opportunities in US industry. Hg. v. U.S. Department of Energy. Online verfügbar unter http://www1.eere.energy.gov/manufacturing/intensiveprocesses/pdfs/waste_heat_recovery.pdf, zuletzt geprüft am 26.04.2016.
- Klemeš, Jiří Jaromír; Kravanja, Zdravko (2013):** Forty years of Heat Integration. Pinch Analysis (PA) and Mathematical Programming (MP). In: *Current Opinion in Chemical Engineering* 2 (4), S. 461–474. DOI: 10.1016/j.coche.2013.10.003.
- Klugman, S.; Karlsson, M.; Moshfegh, B. (2009):** A Swedish integrated pulp and paper mill—Energy optimisation and local heat cooperation. In: *Energy Policy* 37 (7), S. 2514–2524. DOI: 10.1016/j.enpol.2008.09.097.
- Ko, Dorothea (2015):** Analyse räumlicher Nachbarschaften im industriellen Gewerbe mit Methoden des Data-Minings. Masterarbeit an der Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften

Geodätisches Institut Karlsruhe (GIK) und am Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) Betreuer: Dr.-Ing. Norbert Rösch & Ali Aydemir.

Linnhoff, B.; Ahmad, S. (1990): Cost optimum heat exchanger networks—1. Minimum energy and capital using simple models for capital cost. In: *Computers & Chemical Engineering* 14 (7), S. 729–750. DOI: 10.1016/0098-1354(90)87083-2.

Linnhoff, B.; Hindmarsh, E. (1983): The pinch design method for heat exchanger networks. In: *Chemical Engineering Science* 38 (5), S. 745–763. DOI: 10.1016/0009-2509(83)80185-7.

Linnhoff, Bodo; Flower, John R. (1978): Synthesis of heat exchanger networks. I. Systematic generation of energy optimal networks. In: *AIChE J.* 24 (4), S. 633–642. DOI: 10.1002/aic.690240411.

Linnhoff, Bodo; Lenz, Walter (1987): Wärme-Integration und Prozeßoptimierung. In: *Chemie Ingenieur Technik* 59 (11), S. 851–857. DOI: 10.1002/cite.330591106.

Liu, Xiaoyu; Chen, Dingjiang; Zhang, Wenjun; Qin, Weizhong; Zhou, Wenji; Qiu, Tong; Zhu, Bing (2013): An assessment of the energy-saving potential in China's petroleum refining industry from a technical perspective. In: *Energy* 59, S. 38–49. DOI: 10.1016/j.energy.2013.07.049.

Ljungstedt, Hanna; Pettersson, Karin; Harvey, Simon (2013): Evaluation of opportunities for heat integration of biomass-based Fischer–Tropsch crude production at Scandinavian kraft pulp and paper mill sites. In: *Energy* 62, S. 349–361. DOI: 10.1016/j.energy.2013.09.048.

Loh H.P.; Lyons, Jennifer; White, Charles (2002): Process Equipment Cost Estimation - Final Report. Hg. v. U.S. Department of Energy. National Energy Technology Laboratory, zuletzt aktualisiert am 2002, zuletzt geprüft am 27.01.2016.

Ludwig, Jens Michael (2012): Energieeffizienz durch Planung betriebsübergreifender Prozessintegration mit der Pinch-Analyse. Karlsruhe, Hannover: KIT Scientific Publishing; Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek.

Lyakishev, N. P.; Perlov, N. I. (1987): Technological progress and energy conservation in the iron and steel industry of the U.S.S.R. In: *Energy* 12 (10-11), S. 1169–1176. DOI: 10.1016/0360-5442(87)90071-5.

Ma, Guang-yu; Cai, Jiu-ju; Zeng, Wen-wei; Dong, Hui (2012): Analytical Research on Waste Heat Recovery and Utilization of China's Iron & Steel Industry. In: *Energy Procedia* 14, S. 1022–1028. DOI: 10.1016/j.egypro.2011.12.1049.

Marinos-Kouris, Dimitrios; Mourtsiadis, Andreas (2013): INDUSTRIAL SYMBIOSIS IN GREECE: A STUDY OF SPATIAL ALLOCATION PATTERNS. In: *FRESENIUS ENVIRONMENTAL BULLETIN* 22 (7 B), S. 2174–2181.

Martín, Ángel; Mato, Fidel A. (2008): Hint. An educational software for heat exchanger network design with the pinch method. In: *Education for Chemical Engineers* 3 (1), e6-e14. DOI: 10.1016/j.ece.2007.08.001.

McKenna, R. C.; Norman, J. B. (2010): Spatial modelling of industrial heat loads and recovery potentials in the UK. In: *Energy Policy* 38 (10), S. 5878–5891. DOI: 10.1016/j.enpol.2010.05.042.

Miró, Laia; Brückner, Sarah; Cabeza, Luisa F. (2015): Mapping and discussing Industrial Waste Heat (IWH) potentials for different countries. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 51, S. 847–855. DOI: 10.1016/j.rser.2015.06.035.

Miró, Laia; Brückner, Sarah; Cabeza, Luisa F. (2015): Mapping and discussing Industrial Waste Heat (IWH) potentials for different countries. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 51, S. 847–855. DOI: 10.1016/j.rser.2015.06.035.

Mitchel, Stuart (2009): An Introduction to pulp for Python Programmers. In: *The Python Papers Monograph*, Vol. 1 (2009), Available online at <http://ojs.pythonpapers.org/index.php/tpm>.

- Morandin, Matteo; Hackl, Roman; Harvey, Simon (2014):** Economic feasibility of district heating delivery from industrial excess heat: A case study of a Swedish petrochemical cluster. In: *Energy* 65, S. 209–220. DOI: 10.1016/j.energy.2013.11.064.
- Natural Resources Canada (2003):** Pinch Analysis: For the Efficient Use of Energy, Water and Hydrogen. Hg. v. Natural Resources Canada, zuletzt aktualisiert am 2003, zuletzt geprüft am 27.01.2016.
- NEELIS, M.; PATEL, M.; BLOK, K.; HALJE, W.; BACH, P. (2007):** Approximation of theoretical energy-saving potentials for the petrochemical industry using energy balances for 68 key processes☆. In: *Energy* 32 (7), S. 1104–1123. DOI: 10.1016/j.energy.2006.08.005.
- Nowicki, Cassandre; Gosselin, Louis (2012):** An Overview of Opportunities for Waste Heat Recovery and Thermal Integration in the Primary Aluminum Industry. In: *JOM* 64 (8), S. 990–996. DOI: 10.1007/s11837-012-0367-4.
- Nussbaumer, Thomas; Thalmann, Stefan (2017):** Dimensionierung von Fernwärmenetzen. In: *BWK - Das Energie-Fachmagazin* 2017 (69), S. 49–53.
- Oh, Se-Young; Binns, Michael; Yeo, Yeong-Koo; Kim, Jin-Kuk (2014):** Improving energy efficiency for local energy systems. In: *Applied Energy* 131, S. 26–39. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.06.007.
- Oluleye, Gbemi; Jobson, Megan; Smith, Robin (2015):** A hierarchical approach for evaluating and selecting waste heat utilization opportunities. In: *Energy*. DOI: 10.1016/j.energy.2015.05.086.
- Paolo Gentili et al. (2015):** Ecodesign Preparatory Study on Steam Boilers (ENTR Lot 7). Online verfügbar unter <http://www.eco-steamboilers.eu/eco-steamboilers-wAssets/docs/20141217-Steam-Boilers-Ecodesign-Final-Report.pdf>, zuletzt geprüft am 11.03.2017.
- Papoulias, Soterios A.; Grossmann, Ignacio E. (1983):** A structural optimization approach in process synthesis—II. In: *Computers & Chemical Engineering* 7 (6), S. 707–721. DOI: 10.1016/0098-1354(83)85023-6.
- Pehnt, Martin (2010):** Energieeffizienz. Ein Lehr- und Handbuch. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Pehnt, Martin; Bodeker, Jan; Arens, Marlene; Jochem, Eberhard; Idrissova, Farikha (2011):** Industrial waste heat-tapping into a neglected efficiency potential. In: European Council for an Energy-Efficient Economy (Hg.): Energy efficiency first: the foundation of a low-carbon society. ECEEE 2011 Summer Study : conference proceedings, 6-11 June 2011, Belambra Presquile de Giens, France. Unter Mitarbeit von European Council for an Energy-Efficient Economy. European Council for an Energy-Efficient Economy. Stockholm: ECEEE, S. 691–700.
- Pehnt, Martin; Bödeker, Jan; Arens, Marlene; Jochem, Eberhard; Idrissova, Farikha (2010):** Die Nutzung industrieller Abwärme-technisch-wirtschaftliche Potenziale und energiepolitische Umsetzung. In: *Arbeitspapier im Rahmen des Projekts „Wissenschaftliche Begleitforschung zu übergreifenden technischen, ökologischen, ökonomischen und strategischen Aspekten des nationalen Teils der Klimaschutzinitiative“*, IFEU, Fraunhofer ISI, IREES. Heidelberg, Karlsruhe, Download www.ifeu.de/nki.
- Persson, U.; Möller, B.; Werner, S. (2014):** Heat Roadmap Europe: Identifying strategic heat synergy regions. In: *Energy Policy* 74, S. 663–681. DOI: 10.1016/j.enpol.2014.07.015.
- Radgen, Peter (1996):** Energiesystemanalyse eines Düngemittelkomplexes. VDI-Verlag, 1996.
- Rane, Milind V.; Tandale, Madhukar S. (2005):** Water-to-water heat transfer in tube-tube heat exchanger: Experimental and analytical study. In: *Applied Thermal Engineering* 25 (17-18), S. 2715–2729. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2005.01.007.
- Rašković, Predrag; Stoiljković, Sreten (2009):** Pinch design method in the case of a limited number of process streams. In: *Energy* 34 (5), S. 593–612. DOI: 10.1016/j.energy.2008.04.004.

-
- Rattner, Alexander S.; Garimella, Srinivas (2011):** Energy harvesting, reuse and upgrade to reduce primary energy usage in the USA. In: *Energy* 36 (10), S. 6172–6183. DOI: 10.1016/j.energy.2011.07.047.
- Rasul, M. G.; Widiyanto, W.; Mohanty, B. (2005):** Assessment of the thermal performance and energy conservation opportunities of a cement industry in Indonesia. In: *Applied Thermal Engineering* 25 (17-18), S. 2950–2965. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2005.03.003.
- Rohde, Clemens; Fleiter, Tobias; Aydemir, Ali; et al. (2017):** Datenbasis zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen in der Zeitreihe 2005-2014: Sektor Industrie. Unter Mitarbeit von Prognos AG, Fraunhofer ISI und Ife/TU München. Hg. v. Umweltbundesamt.
- Roman Hackl; Eva Andersson; Simon Harvey (2011):** Targeting for energy efficiency and improved energy collaboration between different companies using total site analysis (TSA). In: *Energy* 36 (8), S. 4609–4615. DOI: 10.1016/j.energy.2011.03.023.
- Sächsische Energieagentur GmbH (SAENA) (2012):** Technologien zur Abwärmenutzung. Hg. v. Sächsische Energieagentur GmbH (SAENA). Online verfügbar unter http://www.saena.de/download/Broschueren/BU_Technologien_der_Abwaermenutzung.pdf, zuletzt aktualisiert am 2012, zuletzt geprüft am 27.01.2016.
- Schaefer, Helmut (1995):** Energiewirtschaftliche Bedeutung der Nutzung von Abfallenergie. In: *Abfallenergienutzung. Technische, wirtschaftliche und soziale Aspekte. Interdisziplinäre Arbeitsgruppe Optionen zukünftiger industrieller Produktionssysteme. Berlin: Akademie*, S. 42–60.
- Schlomann, B.; Gruber; Geiger; Kleeberger (2014):** Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) in Deutschland für die Jahre 2006 bis 2011. Hg. v. Fraunhofer Verlag.
- Schlomann, Barbara; Rohde, Clemens; Plötz, Patrick (2015):** Dimensions of energy efficiency in a political context. In: *Energy Efficiency* 8 (1), S. 97–115. DOI: 10.1007/s12053-014-9280-8.
- Schön, M.; Hafkesbrink, J.; others (2001):** CuRa: Cooperation für umweltschonenden Ressourcenaustausch zur Nutzung von Kostenreduktionspotenzialen. In: *Zusammenfassung wichtiger Ergebnisse. ISI-Arbeitspapier ISI-A-7-01 vom 30 (06)*, S. 2001.
- Schröter, M.; Weißfloch U.; Buschak, D. (2009):** Energieeffizienz in der Produktion - Wunsch oder Wirklichkeit? Modernisierung der Produktion: Mitteliungen aus der ISI-Erhebung. Hg. v. Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung -ISI- (Karlsruhe).
- Schweitzer, Markus (2016):** Kommunikation von Gestaltungsfaktoren. Ganzheitlich vernetzte Repräsentation im Entwurfsprozess. [Place of publication not identified]: Diplomica Verlag GmbH; Diplomica Verlag.
- Seck, Gondia Sokhna; Guerassimoff, Gilles; Maïzi, Nadia (2013):** Heat recovery with heat pumps in non-energy intensive industry: A detailed Bottom-Up model analysis in the French food & drink industry. In: *Applied Energy* 111, S. 489–504. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.05.035.
- Shekhar, Shashi; Yan, Huang (2001):** Discovering Spatial Co-location Patterns: A Summary of Results. In: *Advances in Spatial and Temporal Databases. Hrsg. von G.Goos et al. Bd. 2121. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg*.
- Shen, Weiguo; Cao, Liu; Li, Qiu; Zhang, Wensheng; Wang, Guiming; Li, Chaochao (2015):** Quantifying CO2 emissions from China's cement industry. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 50, S. 1004–1012. DOI: 10.1016/j.rser.2015.05.031.
- Sieniutycz, Stanislaw; Jeżowski, Jacek (2013):** Energy optimization in process systems and fuel cells. Second edition. Oxford: Elsevier Science.
- Sigloch, Herbert (2012):** Technische Fluidmechanik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Simon, Herbert A. (1973):** The structure of ill structured problems. In: *Artificial Intelligence* 4 (3-4), S. 181–201. DOI: 10.1016/0004-3702(73)90011-8.

-
- Smith, Robin (2005):** Chemical process design and integration. Chichester, West Sussex, England, Hoboken, NJ: Wiley.
- Sollesnes, Geir; Helgerud, Hans Even (2009):** Potenzialstudie for utnyttelse av spillvarme fra norsk industri. In: *Enova. Sorrell, S., O'Malley, E., Schleich, J., & Scott, S.(2004). The economics of energy efficiency: barriers to cost-effective investment. Cheltenham: Elgar.*
- Somers, C.; Mortazavi, A.; Hwang, Y.; Radermacher, R.; Rodgers, P.; Al-Hashimi, S. (2011):** Modeling water/lithium bromide absorption chillers in ASPEN Plus. In: *Applied Energy* 88 (11), S. 4197–4205. DOI: 10.1016/j.apenergy.2011.05.018.
- Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg (Hg.):** Raumanalyse - LEXIKON DER GEOGRAPHIE. Online verfügbar unter http://www.spektrum.de/lexikon/geographie/raumanalyse/6433&_druck=1, zuletzt geprüft am 09.12.2016.
- Spurk, Joseph; Aksel, Nuri (2010):** Strömungslehre. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Sreepathi, Bhargava Krishna; Rangaiah, G. P. (2014):** Review of Heat Exchanger Network Retrofitting Methodologies and Their Applications. In: *Ind. Eng. Chem. Res.* 53 (28), S. 11205–11220. DOI: 10.1021/ie403075c.
- Statistisches Bundesamt (2014):** Erhebung über die Energieverwendung der Betriebe des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden (2014). Statistisches Bundesamt. Online verfügbar unter www.destatis.de.
- Statistisches Bundesamt (Hg.) (2016):** Qualitätsbericht: Kostenstrukturerhebung im Verarbeitenden Gewerbe sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden.
- Stein, Werner Alexander (1990):** Neue Gleichungen für die Transportvorgänge bei überströmten Einzelkörpern (Teil 2). In: *Forsch Ing-Wes* 56 (5), S. 133–148. DOI: 10.1007/BF02574960.
- Stijepovic, Vladimir Z.; Linke, Patrick; Stijepovic, Mirko Z.; Kijevčanin, Mirjana Lj.; Šerbanović, Slobodan (2012):** Targeting and design of industrial zone waste heat reuse for combined heat and power generation. In: *Energy* 47 (1), S. 302–313. DOI: 10.1016/j.energy.2012.09.018.
- STRATEGO project (2015):** Enhanced Heating and Cooling Plans to Quantify the Impact of Increased Energy Efficiency in EU Member States. Hg. v. Denmark Aalborg University.
- Streich, Bernd (2011):** Stadtplanung in der Wissensgesellschaft. Ein Handbuch. 2. Aufl. Wiesbaden: VS Verlag.
- Svensson, Inger-Lise; Jönsson, Johanna; Berntsson, Thore; Moshfegh, Bahram (2008):** Excess heat from kraft pulp mills: Trade-offs between internal and external use in the case of Sweden—Part 1: Methodology. In: *Energy Policy* 36 (11), S. 4178–4185. DOI: 10.1016/j.enpol.2008.07.017.
- Tsatsaronis, George (2007):** Definitions and nomenclature in exergy analysis and exergoeconomics. In: *Energy* 32 (4), S. 249–253. DOI: 10.1016/j.energy.2006.07.002.
- Umweltbundesamt (2011):** Abwärmenutzung eines Kupolofens. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.
- United Nations Economic Commission for Europe (UNECE):** Introduction to Kyiv Protocol on Pollutant Release and Transfer Registers. Online verfügbar unter <https://www.unece.org/env/pp/prtr.html>, zuletzt geprüft am 24.02.2017.
- Utlu, Zafer; Parali, Ufuk (2013):** Investigation of the potential of thermophotovoltaic heat recovery for the Turkish industrial sector. In: *Energy Conversion and Management* 74, S. 308–322. DOI: 10.1016/j.enconman.2013.05.030.
- van Canh, Tran; Gertz, Michael (2012):** A Constraint neighborhood based approach for co-location pattern mining. In: *Knowledge and Systems Engineering (KSE), 2012 Fourth International Conference on.* IEEE, S. 128–135.
- VDI heat atlas (2010).** 2nd ed. Berlin, London: Springer (VDI-buch).

Wagner, Walter (2001): Strömung und Druckverlust. Mit Beispielsammlung. 5., überarb. und erw. Aufl. Würzburg: Vogel (Kamprath-Reihe).

Wang, Ke; Wang, Can; Lu, Xuedu; Chen, Jining (2007): Scenario analysis on CO₂ emissions reduction potential in China's iron and steel industry. In: *Energy Policy* 35 (4), S. 2320–2335. DOI: 10.1016/j.enpol.2006.08.007.

Wang, Lijun (2014): Energy efficiency technologies for sustainable food processing. In: *Energy Efficiency* 7 (5), S. 791–810. DOI: 10.1007/s12053-014-9256-8.

World Commission on Environment and Development (1987): Our Common Future. Online verfügbar unter <http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm>, zuletzt geprüft am 01.04.2016.

Wursthorn, Sibylle; Poganietz, Witold-Roger; Schebek, Liselotte (2011): Economic–environmental monitoring indicators for European countries. A disaggregated sector-based approach for monitoring eco-efficiency. In: *Ecological Economics* 70 (3), S. 487–496. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2010.09.033.

Yu, Bing; Li, Xiao; Shi, Lei; Qian, Yi (2015): Quantifying CO₂ emission reduction from industrial symbiosis in integrated steel mills in China. In: *Journal of Cleaner Production* 103, S. 801–810. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.08.015.

Zachoval, J.; Konečný, Z.; Navrátil, O. (1985): New ways in heat-exchange network design. In: *Journal of Heat Recovery Systems* 5 (5), S. 403–406. DOI: 10.1016/0198-7593(85)90170-5.

Zhang, Lifeng (2012): Waste Heat Recovery from Metal Industries. In: *JOM* 64 (8), S. 982–984. DOI: 10.1007/s11837-012-0393-2.

9.6. Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer ISI in Karlsruhe. In diesem Kontext bedanke ich mich bei zahlreichen Personen.

- Professor Schebek, für die Übernahme der Betreuung dieser Arbeit und für hilfreiche Ratschläge zur Strukturierung dieser Arbeit.
- Dr.-Ing. Clemens Rohde, für die Übernahme des Korreferats, des Mentorings und für stets konstruktives Feedback zur Ausgestaltung dieser Arbeit.
- Professor Linke, für die Übernahme des Korreferats und Hinweise zur Raumanalyse.
- Meinen Kollegen aus dem Geschäftsfeld Energieeffizienz für die tolle Zusammenarbeit in zahlreichen Projekten und erheiternde Pausen: Simon Hirzel, Antoine Durand, Fabian Voswinkel, Eftim Popovski, Markus Fritz, Marlene Arens und viele Weitere. Zudem Harald Bradke, unserem Abteilungsleiter, der immer bemüht war mir den notwendigen Freiraum zur Erstellung der Arbeit einzuräumen.
- Den ehemaligen Mitgliedern der ruhmreichen „Badmintonrunde“: Lisa Nabitz und Martin Pudlik.
- Meinen ehemaligen wissenschaftlichen Hilfskräften Simon Möhren und Dorothea Ko, für Ihre tatkräftige Unterstützung während Ihrer Zeit am Fraunhofer ISI.
- Kerstin Kopf für das Gegenlesen und Auffinden zahlreicher Kommafehler in der Entwurfsversion dieser Arbeit.
- Meinen Eltern und drei Geschwistern, die mir aus dem fernen Ruhrgebiet mentale Unterstützung gegeben haben.
- Meiner Lebenspartnerin Gunhild, die meine Zweifel ertragen und mich in der Endphase zur Erstellung dieser Arbeit emotional unterstützt hat. Zudem, meinem Sohn Oskar, der mir nach langen Arbeitstagen immer einen tollen Ausgleich gibt.