

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Energiesysteme

INDUSTRIELLE ABWÄRME  
IN DEUTSCHLAND

-Bestimmung von gesichertem Aufkommen und technischer bzw. wirtschaftlicher Nutzbarkeit-

SARAH BRÜCKNER

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktor-Ingenieurs**

genehmigten Dissertation

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Dirk Weuster-Botz

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Spliethoff
2. Prof. Dr.-Ing. Ulrich Wagner

Die Dissertation wurde am 22.06.2016 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 26.10.2016 angenommen.



# Abstract

In the presented work, the waste heat potential from the German manufacturing sector is evaluated and its technical and economic boundaries investigated. For the first time in a Germany wide study, these values are based on real company data. Former studies for Germany used waste heat ratios, either based on (expert) judgment or from literature. These former approaches hold large uncertainties and can therefore only account for a first rough estimation. The scope of this work, however, is to evaluate a sound lower boundary value for the industrial waste heat potential in Germany.

Therefore, approximately 81.000 data sets from industrial companies from 15 of the 16 federal states in Germany have been evaluated. These data sets have been collected in the framework of the German emission regulations. Unfortunately the quality of the data concerning exhaust gas volume, temperature and input energy is low: There are unrealistic values for temperatures, energy input etc. Thus, to evaluate the data a method to check for plausibility and usability of the data has been developed. Following scientific standards, the method is reproducible, can be applied to data from different base years and leads to a lower boundary value for the industrial waste heat in Germany. For 2008 the lower boundary value for the industrial waste heat in Germany in exhaust gas streams based on the evaluated companies is 127 PJ/a, when the exhaust gas streams are cooled to 35°C. Waste water, radiation or other sources of waste heat are not considered in this lower boundary value, only exhaust gas stream. The influence of the assumptions and uncertainties of the evaluation are analyzed and discussed as well.

The analysis of the waste heat potential showed that the largest amount of waste heat is produced in North Rhine-Westphalia while the largest waste heat to input energy ratio occurs in Schleswig-Holstein. Based on the different industrial sectors, 88% of the waste heat (111 PJ/a) is produced within only six sectors. The three largest waste heat producing sectors are the metal industry, followed by glass and ceramic and the chemical sector. The highest waste heat to input energy ratios are in the sectors „other car manufacturing” (38%), „electrical equipment manufacturing” (31%) and „textile production” (29%). As an overall ratio for Germany, round about 13% of the input energy is released as waste heat in exhaust gas stream.

These values are based on 56% to 57% of the final energy consumption of the German industry, not including electricity consumption. The range of the values is based on different assumptions for the boundary definition of the industrial sector. To scale the evaluated waste heat potential to the unaccounted share, different extrapolation approaches were carried out. The results range from 218 PJ/a to 252 PJ/a and therefore only divert by 34 PJ/a.

When investigating the usability of the waste heat potential technical and economic boundaries were considered. Exemplary as technologies zeolith thermal storages, thermal and mechanic heat pumps and absorption chillers are considered. For the applicability of technologies the required operating temperature is crucial. For applications in which the waste heat can be used to 100°C approximately 56 PJ/a of waste heat are available as lower boundary value, for 70°C 82 PJ/a and for waste heat used until 35°C 127 PJ/a (see above). Further analysis showed that 95% of the lower boundary level waste heat potential is produced in only 784 companies.

Further constrains of the technical waste heat potential are energy demands. Thus the heat and cold demand is investigated: The industrial and commercial cold demand in Germany is 104 PJ/a. The technical analysis of absorption chillers showed that approximately 77% of this demand can be

covered by waste heat. Form heat applications, the industrial heat demand below 100°C (452 PJ/a) largely exceeds the waste heat potential of 102 PJ/a above 100°C. Therefore the heat demand does not limit the technical waste heat potential. As a special case, drying applications below 250°C have been investigated as application cases for zeolith storage systems: there is a theoretic demand of 173 PJ/a facing a potential of approximately 80 PJ/a.

For a general economic analysis, a method developed by ZAE Bayern is adapted for three different cases of waste heat use: an absorption chiller producing cold and heat production with a compression and an absorption heat pump. A specific maximum acceptable investment cost per unit energy for each technology is estimated. In order to do so, three different investor types, Enthusiast, Real Estate and Industry, are defined to represent different expectations in interest rate, payback period and the resulting annuity factor. The resulting maximum acceptable investment cost is compared to current specific investment costs per unit energy as a function of full load operating hours of the system in order to evaluate the economic readiness of the three technologies.

For the present day technology cost, absorption chillers are profitable for Real Estate investor types when operated at full load for at least 2500 h per year. For an industrial or residential application with for example 1000h full load operation per year, the investment cost has to decrease to 370 and 510 €/kW, respectively. More than 7000 full load hours per year are needed in order to be profitable for industrial investors. This shows that the design of the system is crucial to its economic success. Only well designed systems with continuous operation are economically feasible for absorption chillers.

Mechanical vapor compression heat pumps are profitable for industrial applications, if these exceed 4000 full load operating hours per year. For the other two investor types, profitability is reached at 1000 full load operating hours. Absorption heat pumps are profitable starting at 2500 hours of full load operation for industrial investor types, while for the rest even less operating hours (1000h/a) are economically feasible.

Summing up, in this work a method to evaluate a conservative lower boundary value for the industrial waste heat of the entire German industry was developed. The potential was itemized according to the waste heat temperature and analyzed according to the applicability of heat pumps, absorption chillers and zeolith storages. The developed evaluation method follows scientific standards of reproducibility, clarity and verifiability. In addition it can be transferred to data for different years. Thus, a new quality standard for the accounting of industrial waste heat in Germany is reached.





# Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird das Abwärmeaufkommen aus der deutschen Industrie erhoben und technische und wirtschaftliche Begrenzungen dieses Abwärmepotenzials werden betrachtet. Erstmals werden dazu in einer landesweiten Studie reale Daten ausgewertet. Bisherige Arbeiten für Deutschland haben mit Abwärmefaktoren gearbeitet, die bestenfalls aus früheren Studien für andere Länder stammten, teilweise aber auch mehr oder weniger frei angenommen wurden. Die früheren Ansätze bergen große Ungenauigkeiten und können deshalb nur als eine erste grobe Abschätzung dienen. Diese Arbeit hat zum Ziel ein sicheres unteres Abwärmeaufkommen für die deutsche Industrie zu ermitteln.

Dafür werden rund 81.000 Datensätze von Industriebetrieben aus 15 der 16 Bundesländern ausgewertet, die aus den Emissionserhebungen nach der Bundesimmissionschutzverordnung (BImSchV) stammen. Da die Daten zu Abgastemperatur, Volumenstrom und Eingangsenergie stark fehlerbehaftet sind, wurde ein teil-automatisiertes Verfahren entwickelt, um die Daten auf Plausibilität und Verwertbarkeit zu prüfen. Die so entwickelte Methode ist nachvollziehbar, auf andere Jahre übertragbar und liefert eine sichere untere Grenze des Abwärmeaufkommens. Für 2008 liegt dieses, basierend auf den ausgewerteten Betrieben, bei 127 PJ/a, wenn die Abwärme bis 35°C genutzt werden kann. Abwärme aus Abwasser, Strahlungswärme oder andere Abwärmequellen werden hierbei nicht betrachtet. Der Wert bezieht sich nur auf die in Abgasströmen in der Industrie enthaltene Abwärme. Der Einfluss der in die Auswertung eingeflossenen Annahmen und Unsicherheiten wird ebenfalls diskutiert.

Die Auswertung hat gezeigt, dass das größte Abwärmeaufkommen in Nordrhein-Westfalen zu finden ist, das größte Verhältnis von Abwärme zu eingesetzter Brennstoffenergie jedoch in Schleswig-Holstein. Der Bereich Industrie kann in verschiedene Sektoren aufgeteilt werden. Auf diese Sektoren bezogen fallen fast 88% (111 PJ/a) der Abwärme in den sechs größten abwärmeproduzierenden Sektoren an: Den größten Anteil hat der Sektor „Metallerzeugung und -bearbeitung“, gefolgt von der „Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden“ und der „Chemieindustrie“. Prozentual gesehen sind die größten Abwärmefaktoren, also der größte Abwärmeanteil gesehen auf den Energieeinsatz, in den Sektoren „Sonstiger Fahrzeugbau“ mit 38%, „Herstellung von elektrischer Ausrüstung“ mit 31% und „Herstellung von Textilien“ mit 29% zu finden. Insgesamt wird bundesweit durchschnittlich 13% der eingesetzten Brennstoffenergie als Abwärme freigesetzt. In der Auswertung wurden mindestens 57% des Endenergieeinsatzes der Industrie erfasst. Dabei wurde nicht der Stromverbrauch berücksichtigt, dafür aber der Verbrauch des Bereichs „Gewerbe, Handel und Dienstleistungen“ (GHD). Wird der GHD-Verbrauch nicht berücksichtigt steigt der Erfassungsgrad auf 58%.

Um das erhobene Abwärmeaufkommen auf den nicht erfassten Anteil zu extrapolieren wurden verschiedene Ansätze betrachtet und ausgewertet. Ebenso wurden Unsicherheiten, die sich aus unterschiedlichen Bilanzgrenzen ergeben, untersucht. Je nach angewendetem Verfahren und Datenbasis ergibt sich ein skaliertes Abwärmeaufkommen für Deutschland von 218 PJ/a bis 252 PJ/a. Die Ergebnisse haben somit eine relativ geringe Divergenz von nur 34 PJ/a.

Bei der Analyse der Nutzbarkeit des erhobenen Abwärmeaufkommens wurden die technischen und wirtschaftlichen Begrenzungen des Potenzials untersucht. Dabei wurden als Technologien exemplarisch Zeolith-Wärmespeicher, Absorptionskälteanlagen und thermische und mechanische Wärmepumpen betrachtet. Für die technischen Begrenzungen spielt die Temperatur der Abwärme eine

wichtige Rolle und die Frage bis auf welches Temperaturniveau diese abgekühlt bzw. genutzt wird. Für Anwendungen, die bis 100°C die Abwärme ausnutzen können, ergab sich ein Potenzial von rund 56 PJ/a. Bei einer Nutzung bis 70°C stehen 82 PJ/a zur Verfügung und bei der Nutzung bis 35°C 127 PJ/a. Eine detailliertere Analyse zeigte, dass 95% des gesicherten Abwärmeaufkommens aus nur 784 Betrieben stammt.

Weitere technische Beschränkungen ergeben sich aus der Analyse der Bedarfsseite. Dazu wird der Kälte- und Wärmebedarf untersucht: Der Kältebedarf von gewerblichen Abnehmern beträgt 68 PJ/a, der Bedarf an Industriekälte 36 PJ/a. Daraus ergibt sich insgesamt ein Bedarf von 104 PJ/a. Aus der Analyse der zur Verfügung stehenden Techniken der Absorptionskälteanlagen hat sich gezeigt, dass dieser Bedarf mit Abwärme mit mindestens 70°C versorgt werden kann, wenn diese bis 35°C genutzt wird. Das Angebot an Abwärme liegt in diesem Bereich bei 115 PJ/a. Unter Berücksichtigung des thermischen Wirkungsgrads (Annahme 0,7) ist die Deckung eines großen Teils des Kältebedarfs (ca. 77%) von 104 PJ/a möglich. Dafür muss allerdings eine detailliertere Analyse der Temperaturbereiche erfolgen.

Der Wärmebedarf der Industrie im Niedertemperaturbereich (<100°C) liegt bei 452 PJ/a. Davon können 102 PJ/a mit Abwärme über 100°C gedeckt werden wenn diese bis 35°C ausgenutzt werden kann. Als Sonderfall wurde, als Anwendungsfall für Zeolith-Wärmespeicher, der Bedarf an Trocknungswärme unter 250°C untersucht: Der theoretische Bedarf liegt bei 173 PJ/a, das Angebot an Abwärme im notwendigen Temperaturbereich liegt bei etwa 80 PJ/a. Somit zeigt diese erste Analyse des Wärmebedarfs keine Einschränkung des Potenzials auf Basis der ausgewerteten Betriebe. Auch beim extrapolierten Abwärmeaufkommen, könnte dieses theoretisch noch vollständig genutzt werden. Räumliches und zeitliches Zusammentreffen wurden dabei allerdings nicht berücksichtigt.

Für die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit wurde ein am ZAE Bayern für Energiespeicher entwickeltes Verfahren für Wärmepumpen und Absorptionskälteanlagen adaptiert. Dabei werden drei potenzielle Investorengruppen für den Einsatz der Technologien betrachtet: die Industrie, der Gebäudebereich und Enthusiasten. Die Wirtschaftlichkeitsanalyse der vorgestellten Technologien hat gezeigt, dass Absorptionskälteanlagen für Anwendungen im Gebäudebereich mit mehr als 2500 Volllaststunden im Jahr interessant sind. Für eine Anwendung in der Industrie oder im Gebäudebereich bei einer exemplarischen Volllaststundenzahl von 1000 h/a, müssten hingegen die Investitionskosten auf 370 bzw. 510 €/kW sinken. Sonst sind Absorptionskälteanlagen in der Industrie erst ab 7000 Volllaststunden pro Jahr wirtschaftlich. Das heißt nur sehr gut ausgelegte Anlagen im Dauerbetrieb können derzeit wirtschaftlich umgesetzt werden. Typische Anwendungsfelder dafür sind Kühllhäuser, Supermarktkälte oder Industrieprozesse.

Elektrische Wärmepumpen lohnen sich in der Industrie schon ab 4000 Volllaststunden pro Jahr, für die beiden anderen Zielgruppen schon ab 1000 Stunden im Volllastbetrieb pro Jahr. Auch Absorptionswärmepumpen sind bei Anwendungen mit mehr als 2500 Volllaststunden pro Jahr für alle drei Zielgruppen wirtschaftlich interessant, ab 1000 Stunden pro Jahr im Gebäudebereich oder für Enthusiasten. Entscheidend für die Einsatzmöglichkeit der Wärmepumpen sind somit das Lastprofil der Anwendung und die Dimensionierung der Anlagen, um hinreichend viele Volllaststunden zu erreichen.

Zusammenfassend wurde in dieser Arbeit eine Methode entwickelt, um einen sicheren unteren Grenzwert für das industrielle Abwärmeaufkommen in der gesamten deutschen Industrie zu erheben. Das gewonnene Potenzial wurde nach der Abwärmtemperatur aufgeschlüsselt und im Bezug auf die technische und wirtschaftliche Nutzbarkeit für Wärmepumpen, Absorptionskälteanlagen und Zeolith-Speicher betrachtet. Die entwickelte Methode zur Auswertung der realen Emissionsdaten ist wissenschaftlichen Standards entsprechend nachvollziehbar und überprüfbar. Sie lässt sich außerdem auf andere Jahre übertragen. Damit wurde für Deutschland eine neue Qualität in der Erfassung des industriellen Abwärmeaufkommens erreicht.

“Wir ertrinken in Informationen  
und hungern nach Wissen”

John Naisbitt



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Definitionen</b>	<b>1</b>
1.1	Einleitung . . . . .	1
1.1.1	Was ist Abwärme? . . . . .	1
1.1.2	Wo tritt industrielle Abwärme auf? . . . . .	2
1.1.3	Beispiele industrieller Abwärmeproduktion . . . . .	2
1.1.4	Kategorisierungsmöglichkeiten von Abwärmequellen . . . . .	3
1.1.5	Techniken zur Auskopplung von Abwärme: Wärmetauscher . . . . .	5
1.2	Definition und Abgrenzung: industrielle Abwärme . . . . .	6
1.2.1	Definition Abwärme . . . . .	6
1.2.2	Definition Industrie . . . . .	7
1.2.3	Definition Potenzial . . . . .	8
1.3	Ziel der Arbeit . . . . .	8
<b>2</b>	<b>Stand der Technik</b>	<b>11</b>
2.1	Kategorisierung von Methoden zur Potenzialerhebung . . . . .	11
2.2	Literaturübersicht . . . . .	12
2.2.1	Erhebungen (Bottom-Up) . . . . .	13
2.2.1.1	Befragungen . . . . .	13
2.2.1.2	Berichtspflichtige Daten . . . . .	13
2.2.1.3	Online-Abwärmeportale . . . . .	14
2.2.2	Berechnung bzw. Abschätzungen . . . . .	14
2.2.2.1	Bottom-Up Berechnung bzw. Abschätzungen . . . . .	14
2.2.2.2	Top-Down Abschätzungen . . . . .	16
2.2.3	Kombinierte Top-Down-/Bottom-Up-Ansätze . . . . .	17
2.3	Forschungslücke . . . . .	18
<b>I</b>	<b>Abschätzung des Abwärmepotenzials in Deutschland</b>	<b>21</b>
<b>3</b>	<b>Erhebung theoretisches Potenzial</b>	<b>23</b>
3.1	Datenbasis . . . . .	23
3.1.1	Genehmigungsbedürftige Anlagen . . . . .	23
3.1.2	Die Bagatellgrenze: Ausnahmen von der Berichtspflicht . . . . .	24
3.1.3	Auswertungsebene . . . . .	27
3.1.4	Vorliegende Daten . . . . .	27
3.2	Methode . . . . .	27
3.2.1	Datenauswertung und Plausibilitätstest . . . . .	28
3.2.2	Abwärmeaufkommen Industriebetriebe (Bottom-Up-Analyse) . . . . .	32
3.3	Darstellung der Ergebnisse . . . . .	36
3.4	Diskussion der Ergebnisse . . . . .	42
3.4.1	Vergleich der Kennzahlen . . . . .	42
3.4.2	Einordnung der Ergebnisse in den Forschungsstand . . . . .	42

3.5	Sensitivitätsanalyse . . . . .	43
3.5.1	Variable Dichte . . . . .	44
3.5.2	Referenztemperatur . . . . .	45
<b>4</b>	<b>Extrapolation Abwärmeaufkommen Deutschland (Top-Down-Ansatz)</b>	<b>47</b>
4.1	Methode . . . . .	47
4.1.1	Regionale Abschätzung . . . . .	47
4.1.2	Sektorale Abschätzung . . . . .	48
4.1.3	Berücksichtigung Gewerbe-, Handel-, Dienstleistungssektor (GHD) . . . . .	49
4.2	Ergebnisse . . . . .	49
4.3	Diskussion der Ergebnisse . . . . .	50
4.3.1	Einordnung der Ergebnisse in den Forschungsstand . . . . .	50
4.3.2	Übertragbarkeit der Faktoren . . . . .	52
<b>5</b>	<b>Spannweite Abwärmeaufkommen</b>	<b>55</b>
<b>II</b>	<b>Nutzbarkeit des Abwärmepotenzials</b>	<b>57</b>
<b>6</b>	<b>Technische Beschränkungen</b>	<b>59</b>
6.1	Technologien und technische Rahmenbedingungen . . . . .	59
6.1.1	Wärmepumpen und Absorptionskältemaschinen . . . . .	61
6.1.1.1	Mechanische Wärmepumpen . . . . .	61
6.1.1.2	Absorptionswärmepumpen . . . . .	62
6.1.2	Wärmespeicher . . . . .	64
6.1.3	Abwärmepotenzial unter technischen Rahmenbedingungen . . . . .	66
6.2	Bedarfsanalyse . . . . .	68
6.2.1	Kältebedarf . . . . .	68
6.2.2	Wärmebedarf . . . . .	69
6.3	Ermittlung des technischen Potenzials am Beispiel eines Zeolith-Speichers . . . . .	70
<b>7</b>	<b>Wirtschaftliche Begrenzungen</b>	<b>75</b>
7.1	Methode Wirtschaftlichkeitsanalyse . . . . .	75
7.1.1	Verfahren für Speicher . . . . .	75
7.1.2	Adaption für Absorptionskälteanlagen . . . . .	77
7.1.3	Adaption für Wärmepumpen . . . . .	78
7.2	Ergebnisse . . . . .	79
7.2.1	Absorptionskälteanlagen . . . . .	79
7.2.2	Mechanische Wärmepumpen . . . . .	79
7.2.3	Absorptionswärmepumpen . . . . .	81
7.2.4	Diskussion der Ergebnisse und Sensitivitätsanalyse . . . . .	81
<b>8</b>	<b>Ergebnis Nutzbarkeitsanalyse</b>	<b>85</b>
<b>9</b>	<b>Schlussfolgerungen und Ausblick</b>	<b>87</b>
9.1	Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen . . . . .	87
9.2	Ausblick und weiterführende Fragen . . . . .	88
9.2.1	Deutschland . . . . .	88
9.2.2	Europa . . . . .	89
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>97</b>

# Nomenklatur

AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen
GHD	Gewerbe, Handel, Dienstleistung
LAK	Landesarbeitskreis Energiebilanzen
ANF	Anuitätenfaktor
$c_p$	Wärmekapazität
COP	coefficient of performance
EG	Erfassungsgrad
$f_{AW}$	Abwärmefaktor
$H_u$	Heizwert
i	Renditeerwartung
m	Masse
$N_{Zyklen}$	Anzahl Speicherzyklen pro Jahr
n	Betriebsstunden
P	Leistung
Q	sensible Wärme
q	Verzinsungsfaktor
$\rho$	Dichte
SEP	spezifischen Einsparungen (€/kWh)
$SSK_{max}$	maximal zulässigen spezifischen Speicherkosten (€/kW)
SIK	spezifischen Investitionskosten (€/kW)
EER	Energy Efficiency Ratio
SP	Strompreis (€/kWh)
SSK	spezifische Speicherkosten
SWK	spezifische Wärmeerzeugungskosten
T	Temperatur
t	Amortisationszeit

$\dot{V}$	Volumenstrom
WP	Wärmepreis (€/kWh)
W	Arbeit
AKA	Absorptionskälteanlage
AW	Abwärme
BE	Betrieb
Br	Brennstoff
BU	Bundesrepublik
el	elektrisch
EX	Extrapoliert
gas	Abgas
Ind	Industrie
konv	konventionelle Technologie
LA	(Bundes-) Land
max	maximal zulässig
SE	Sektor
VL	Volllast
a	Anzahl Abgasströme je Betrieb
b	Anzahl Betriebe je Sektor
L	Anzahl aller Bundesländer ohne Saarland
s	Anzahl Sektoren
t	Anzahl Brennstoffströme je Betrieb

# Kapitel 1

## Einleitung und Definitionen

### 1.1 Einleitung

Dieses Bild kennt jeder: Man ist mit Auto, Bus oder Bahn unterwegs und sieht am Horizont die riesigen Schloten der Fabriken im Sonnenuntergang rauchen. In diesen Fabriken wird alles mögliche produziert: Autos, Kochlöffel, Spielzeug... Doch auch die Abgase enthalten oft noch ein wertvolles Produkt, die Abwärme. Diese hat oftmals noch ein hohes Temperaturniveau und damit viel Exergie, die genutzt werden könnte. Leider gibt es derzeit keine belastbaren Zahlen dazu, wie viel Abwärme in Deutschland in der Industrie entsteht. Andererseits werden jeden Tag neue Projekte gestartet, um die Abwärme aus Produktionsprozessen zu verstromen, zu speichern oder in Wohngebäuden zu nutzen. In der vorliegenden Arbeit geht es darum, wieviel Abwärme (und auf welchem Temperaturniveau) es in Deutschland aus industriellen Produktionsprozessen gibt. Außerdem soll untersucht werden, unter welchen technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen es sinnvoll ist, diese Abwärme zu nutzen.

#### 1.1.1 Was ist Abwärme?

[Glatzel 2001] definiert Abwärme als “alle ein System verlassenden fühlbaren und latenten Wärmeströme mit Ausnahme der ... Zielenergie”. Eine ähnliche Definition wird auch im Entwurf der Wärmeschutzverordnung von 1991 verwendet: Dort wird als Abwärme “die eine Anlage verlassende Wärme (verstanden), ausgenommen die Wärme, deren Erzeugung der Zweckbestimmung der Anlage entspricht.” Somit fällt unter den Begriff Abwärme nicht die in Heizkraftwerken (HKW), Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) oder Block-Heiz-Kraftwerken (BHKW) erzeugte Wärme. Ob die ausgekoppelte Wärme aus einem konventionellen Kraftwerk unter die oben genannte Definition der Abwärme fällt, hängt davon ab, ob für die Abwärmegewinnung die Stromproduktion verringert wird. Da dies in den meisten Fällen der Fall ist, wird sie in dieser Arbeit nicht unter Abwärme gezählt.

Eine ebenfalls häufig verwendete Definition von Abwärme ist die der Wärme, die nicht intern genutzt werden kann und an die Umwelt abgegeben wird. Aus dieser Definition heraus ergibt sich auch das Argument dafür, Abwärme als  $CO_2$ -freie Wärme zu interpretieren. Gegen diese Definition und die resultierende Schlussfolgerung spricht sich [Svensson 2011] in ihrer Arbeit aus. Sie beruft sich dabei auf Studien aus den Jahren 2007 und 2008, die gezeigt haben, dass in Schweden, wo die Nutzung von industrieller Abwärme in Fernwärmenetzen verbreitet ist, einige Unternehmen gezielt auf eine Steigerung der Effizienz in den Anlagen verzichten um Fernwärme erzeugen zu können. Svensson plädiert deshalb dafür die Annahme, Abwärme aus der Industrie sei  $CO_2$ -neutral, zu überdenken. Andererseits wird auch bei Maßnahmen zur Effizienzsteigerung nur die eingesparte  $CO_2$ -Menge beachtet und nicht die für die Maßnahme eingesetzte Energie bzw.  $CO_2$ -Menge. Dies geschieht nur bei einer Lebenszyklusbetrachtung. Auch solche Maßnahmen könnten insofern in der Gesamtbilanz keine wirkliche  $CO_2$ -Einsparung darstellen. Das zeigt wie schwierig es ist von wirklichen  $CO_2$ -Einsparungen oder  $CO_2$ -Neutralität zu sprechen. Da es außerdem derzeit in Deutschland

keinen Markt für Abwärme gibt, wird in dieser Arbeit an der Annahme, dass industrielle und gewerbliche Abwärme als  $CO_2$ -neutral angesehen werden kann, festgehalten.

Abwärme kann in der Industrie in zwei Formen auftreten, entweder wird sie diffus durch Strahlung und Konvektion an den Oberflächen abgegeben, oder sie wird an ein Medium gebunden abgegeben, zum Beispiel über das Abgas, Abluft, Dämpfe, Kühlwasser, Kühltöle oder Prozesswasser ([EU-Consult und bifa Umweltinstitut 2008]). Auch in den produzierten Gütern kann Abwärme gebunden sein. Dabei kann die Abwärme am einfachsten aus Flüssigkeiten zurückgewonnen oder genutzt werden, da Gase eine geringere Energiedichte haben und einen schlechteren Wärmeübergang. (Vgl. [EU-Consult und bifa Umweltinstitut (2008)])

Eine allgemeine Definition geben [Pehnt u. a. 2010]: Sie definieren Abwärmequellen als Produktionsmaschinen oder -anlagen, die Verlustwärme an die Umgebung abgeben, also Öfen, Abwässer aus Wasch-, Färbe- oder Kühlprozessen und Motoren genauso wie die in Produktionshallen anfallende Abluft.

Die sensible Wärme wird dabei über

$$Q = c_p * m * \Delta T \quad (1.1)$$

beschrieben wobei

$$\Delta T = T_{Abwärme} - T_{Umgebung} \quad (1.2)$$

Darüber hinaus gibt es noch den latenten Anteil der Abwärme, der zum Beispiel bei der Kondensation eines Dampfstroms zu Wasser bei konstanter Temperatur entsteht.

### 1.1.2 Wo tritt industrielle Abwärme auf?

Bei der Frage, wo viel industrielle Abwärme auftritt, muss zunächst zwischen der absoluten Menge und dem Anteil der Abwärme an der eingesetzten Energie unterschieden werden. Die Menge ist hinsichtlich der weiteren Nutzung interessant. Allerdings sind die Mengen naturgemäß nicht auf andere Länder oder Regionen übertragbar und von der im betrachteten Gebiet ansässigen Industrie abhängig. Trotzdem lassen sich zwischen verschiedenen Regionen Übereinstimmungen finden: [McKenna und Norman 2010] und [Hammond und Norman 2012] haben das Abwärmeaufkommen im Vereinigten Königreich (UK) untersucht. Die größten Rückgewinnungspotenziale sind dort in der Eisen- und Stahl- bzw. in der Chemie-Industrie zu finden, gefolgt von den Sektoren Zement, Kalk, Glas, Nahrungsmittel und Aluminium. [Werschy 2010] kommt für Deutschland auf ähnliche Ergebnisse: Die größten Rückgewinnungspotenziale identifiziert er in den Bereichen Stahlerzeugung, Nichteisenmetalle, Härtereien und bei der Herstellung von Glas und Keramik.

Im Allgemeinen zählt man fünf Industriesektoren zu den wesentlichen Abwärmeproduzenten: Metallindustrie, Chemie, Nahrungsmittel, Papier und die Glas- und Keramikindustrie, zu der auch die Verarbeitung von Steinen und Erden und somit die Zementindustrie zählen ([Blesl u. a. 2011; Berthou und Bory 2012; McKenna und Norman 2010; Hammond und Norman 2012; Werschy 2010; Chung u. a. 2013]).

Im Gegensatz zu diesen absoluten Abwärmemengen kann alternativ der Anteil der Abwärme an der eingesetzten Energie betrachtet werden (ähnlich einem Wirkungsgrad). Dieses Verhältnis ist universeller und zumindest bedingt übertragbar: Es gibt „nur“ eine Abhängigkeit über Technologie-Präferenzen und Prozesse. Allerdings gibt dieser Kennwert eher eine Antwort auf die Frage nach dem Optimierungs- bzw. Einsparpotenzial. In Verbindung mit Statistiken zur eingesetzten Energiemenge können daraus aber auch Aussagen zur Abwärmemenge getroffen werden.

### 1.1.3 Beispiele industrieller Abwärmeproduktion

Beispiele von Abwärmequellen sind Produktionsprozesse, die Dampf oder Heißgas erzeugen (zum Beispiel für Trocknungsprozesse), warme Bäder zum Waschen, Galvanisieren, Eindampfen oder zur Destillation verwenden oder bei denen die Produkte, Rohstoffe oder Werkzeuge erwärmt werden.

Auch bei thermischen Trennprozessen oder beim Pasteurisieren fällt Abwärme an. (Vgl. Pehnt u. a. 2010) Allerdings liegt die Abwärme auf stark unterschiedlichen Temperaturniveaus [Pehnt u. a. 2010]: So entsteht bei Reinigungsprozessen Abwärme bei etwa 60°C, in der Grundstoffindustrie (Roheisen, Stahl, Zement, Glas) auf einem Temperaturniveau von über 1000°C.

Ein klassisches Beispiel für Abwärme auf hohem Temperaturniveau sind Industrieöfen. Eine Untersuchung aus dem Jahr 2000 hat gezeigt, dass gut 40% der in der Industrie umgesetzten Endenergie in Industrieöfen genutzt wird [Meyer 2000]. Durch die hohen Investitionskosten der Öfen und ihrem oftmals sehr hohen Einfluss auf die Produktqualität, sowie die Zersplitterung der Branche in kleine bis mittelständische Betriebe, handelt es sich um einen sehr innovationsträgen Sektor, der jedoch ein großes Abwärmepotenzial bietet [Meyer 2000]. Gleichzeitig sind die Temperaturen hier mit bis zu 1600°C (Meyer 2000) auch so hoch, dass es sich lohnt die Abwärme als Prozesswärme weiterzuverwenden. Etwas geringere Temperaturen werden von [EU-Consult und bifa Umweltinstitut 2008] genannt: Im "Leitfaden zur Abwärmenutzung in Kommunen" werden bei den Abwärmemetemperaturen von Ofenabgasen die höchsten Temperaturen bei Glasöfen genannt, mit 600-1300°, Warmöfen, die bei der Umformung von Metallen eingesetzt werden mit 300-1200°, und Brennöfen in der Keramikindustrie bei 150-1000°. Die große Spanne der Abgastemperaturen der oben genannten Öfen kommt durch die Betrachtung mit oder ohne Wärmerückgewinnung (Regenerator) zustande. (Vgl. EU-Consult und bifa Umweltinstitut 2008 ) In der folgenden Tabelle 1.1 sind beispielhaft Abgastemperaturen aus verschiedenen Sektoren aufgeführt.

#### 1.1.4 Kategorisierungsmöglichkeiten von Abwärmequellen

Eine Kategorisierung von industriellen Abwärmequellen ist unter verschiedenen Gesichtspunkten möglich: Sie können nach den Sektoren unterschieden werden, nach Prozessen bzw. den entsprechenden Anlagen oder auch der eingesetzten End- oder Nutzenergieart, aus der die Abwärme entsteht. Alternativ kann auch eine Sortierung nach verschiedenen Eigenschaften der Abwärmequellen sinnvoll sein: Wenn z.B. ein bestimmter Temperaturbereich oder eine Leistungsklasse relevant sind. Eine Übersicht über verschiedene Möglichkeiten zur Klassifizierung von Abwärmequellen ist in Abbildung 1.1 dargestellt.

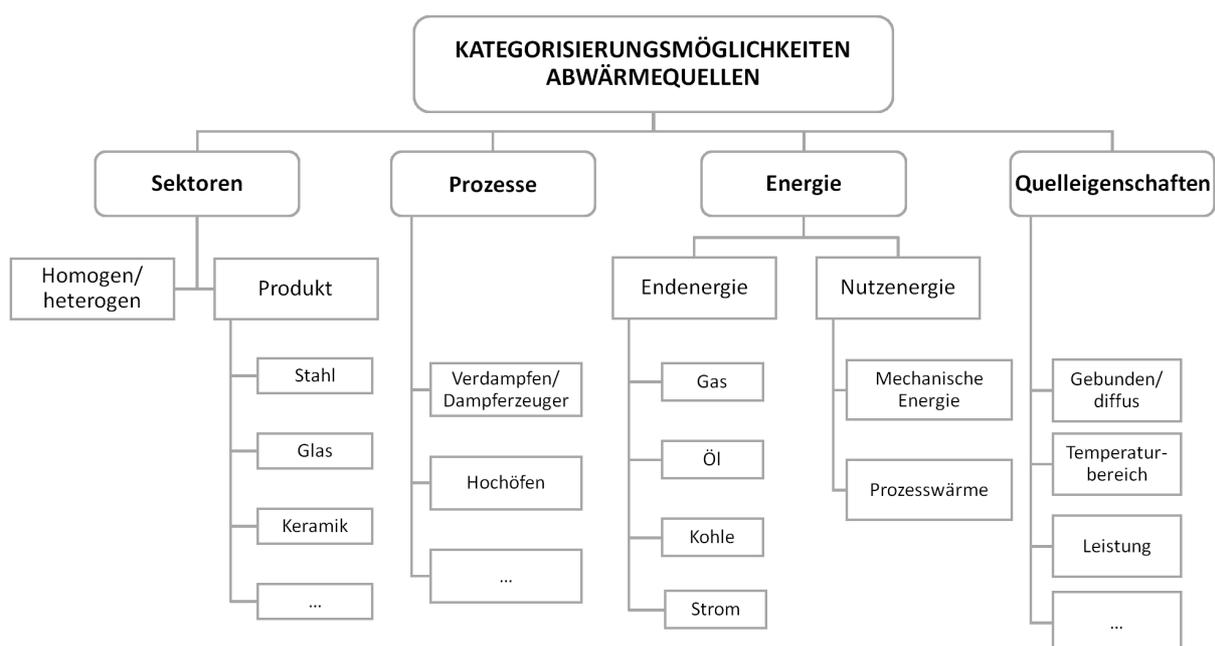


Abbildung 1.1: Kategorisierungsmöglichkeiten von Abwärmequellen nach Sektoren, Prozessen, Energie oder Eigenschaften der Quellen

Tabelle 1.1: Übersicht über typische Abwärmemetemperaturen in verschiedenen Sparten und Prozessen nach Werschy 2010; Boddy 1994; EU-Consult und bifa Umweltinstitut 2008; Schmitz und Linckh 2012; DOE 2008

Industriesektor	Abwärmetemperatur	Quelle
Stahlerzeugung	1600°C	Werschy 2010
	1450 – 1550°C	DOE 2008
	20-600°C	Boddy 1994
Stahlheizöfen	930 – 1040°C	DOE 2008
		EU-Consult und bifa
		Umweltinstitut 2008
Warmöfen	300-1200°C	Schmitz und Linckh 2012
	430 – 650°C	DOE 2008
Nichteisenmetallurgie	1100°C	Werschy 2010
Härtereien	1050°C	Werschy 2010
Galvaniken	100°C	Werschy 2010
Mineral verarbeitende Industrie (z.B. Zementwerke)	1500°C	Werschy 2010
Zementbrennofen	450 – 620°C	DOE 2008
Maschinen- und Fahrzeugbau (Lackierung)	200°C	Werschy 2010
Chemische Industrie	1000°C	Werschy 2010
	45-340°C	Boddy 1994
Erdöl- und Erdgasgewinnung	600°C	Werschy 2010
Glas- und Keramik	1800°C	Werschy 2010
Glasöfen	600-1300°C	EU-Consult und bifa
	1300 – 1540°C	Umweltinstitut 2008
	900 – 1300°C	DOE 2008
		Schmitz und Linckh 2012
mit Regenerator	600 – 800°C	Schmitz und Linckh 2012
Glas schmelzen	140-200°C	Boddy 1994
	400-700°C	Schmitz und Linckh 2012
		EU-Consult und bifa
		Umweltinstitut 2008
Keramikindustrie (Brennöfen)	150-1000°C	Schmitz und Linckh 2012
Pharmaindustrie	400°C	Werschy 2010
Gummi- und Kunststoffwaren	300°C	Werschy 2010
Be- und Verarbeitung von Papier und Holz	200°C	Werschy 2010
Landwirtschaft u. Viehhaltung	150°C	Werschy 2010
Informations- und Datenverarbeitung	60°C	Werschy 2010
Elektrotechnik und Optik	300°C	Werschy 2010
Lebensmittelindustrie (Molkerei, Schlachthöfe, Brauereien)	200°C	Werschy 2010
Dampfkessel	200 – 300°C	Schmitz und Linckh 2012
Textilindustrie/Wäscherei	100°C	Werschy 2010
Abwasserwirtschaft (Klärgasnutzung)	1200°C	Werschy 2010
Abfallwirtschaft	1150°C	Werschy 2010

Werden die Abwärmequellen nach den erzeugenden Sektoren unterschieden, kann man die Sektoren entweder über ihr dominierendes Produkt definieren, oder weitergehend zwischen homogenen und heterogenen Sektoren unterscheiden. Eine solche Unterscheidung wurde zum Beispiel von [McKenna 2009] getroffen. Er unterteilt die Industrien in möglichst homogene Sektoren, die möglichst an allen Standorten den gleichen Prozess verwenden. Die Prozesse haben somit in der Regel nur ein Endprodukt und sind vor allem im Bereich der Erstverarbeitung zu finden. Beispiele sind die Keramik-Industrie, Papier, Aluminium, Zement, KWK-Anlagen, Glas und Kalk. Das Gegenstück, die heterogenen Sektoren, beschreibt McKenna als Industrien mit vielen Prozessen und vielen Produkten, in denen jeder einzelne Standort separat betrachtet werden muss. Darunter fallen zum Beispiel die Chemieindustrie, die Nahrungsmittelindustrie und die Eisen- und Stahlindustrie. [Beyene und Moman 2006] schlagen vor jeweils einen Kernprozess zu definieren und die Industrien und somit die Abwärmequelle dann nach diesen Prozessen zu kategorisieren statt sie nach Endprodukten zu unterteilen. Sie wenden sich damit vor allem gegen die in den USA verwendete „Standard Industrial Classification“ (SIC), die in energietechnischen Fragen zu großen Abweichungen innerhalb der einzelnen Gruppen führt. Statt dessen schlagen sie eine Unterteilung in 26 Fertigungsprozesse vor, die „Process Oriented Energy Intensity Classification“. Die vorgeschlagenen Prozessgruppen sind ([Beyene und Moman 2006], p.10): „Assembly, Baking, Boiling, Bonding, Chilling, Curing, Cutting, Drying, Extursion, Grinding, Heat Treating, Incineration, Injection Molding, Lamination, Machining, Melting, Mixing, Molding, Painting, Plating, Press, Press and Punch, Printing, Sintering, Soldering and Welding“.

[EU-Consult und bifa Umweltinstitut 2008] klassifiziert statt nach Produktionsprozessen sogar nach Produktionsanlagen (z.B Glasöfen, Brennöfen etc.). [Werschy 2010] hingegen unterscheiden Industriesektoren und geben zu diesen dann das Temperaturniveau der Abwärme an, ebenso wie [Pehnt u. a. 2010]. Bei letzteren werden zusätzlich allerdings auch Produktionsprozesse mit Temperaturniveaus genannt.

Das zeigt, dass auch eine Kombination von verschiedenen Kriterien sinnvoll sein kann. So können zum Beispiel die Quelleneigenschaften als Untergliederung der anderen Kategorien eingesetzt werden oder auch als Filter: Zum Beispiel können Abwärmequellen nach Sektoren aufgeschlüsselt werden, als Einschränkung aber nur Quellen im Niedertemperaturbereich betrachtet werden.

Die IEA weißt in ihrer Studie zur industriellen Energieeffizienz und  $CO_2$ -Emissionen ([International Energy Agency 2007]) darauf hin, dass die Verwendung von Energie in den unterschiedlichen industriellen Sektoren sehr unterschiedlich und komplex ist und warnt deshalb, dass Aggregationslevel, Grenzen und Gruppierungen von Industrien sehr sorgfältig gewählt werden müssen.

In der vorliegenden Arbeit wird das Abwärmeeinkommen nach Industriesektoren aufgeteilt, die nach Ihren (Haupt-) Produkten unterschieden werden. In Abbildung 1.1 entspricht dies dem ganz linken Zweig (Sektoren) mit der Unterkategorie „Produkt“.

### 1.1.5 Techniken zur Auskopplung von Abwärme: Wärmetauscher

Neben dem Vorhandensein der Abwärme ist die Möglichkeit zur Nutzbarmachung der Abwärme wichtig. „Ein simples Rohr mit zwei Wärmetauschern an den Enden“ ([Glatzel 2001]) zur Nutzung industrieller Abwärme in Wohngebäuden; ganz so einfach ist es leider in den meisten Fällen nicht. Die meisten Techniken industrielle Abwärme zu nutzen wurden in den 70er Jahren zur Zeit der Ölkrise entwickelt, mit den fallenden Ölpreisen dann aber zunächst wieder zurück gedrängt [Glatzel 2001].

Egal wie die Abwärme hinterher verwendet werden soll: Nur in Ausnahmefällen kann das Abgas direkt verwendet werden. In der Regel wird die darin enthaltene Wärme über einen Wärmetauscher ausgekoppelt, deshalb sollen die wesentlichen Arten hier in Kürze vorgestellt werden:

Wärmetauscher werden verwendet um Wärme von einem Stoffstrom auf einen anderen zu übertragen. Im Fall der Abwärme spricht man auch von Wärmeauskoppelung. Bezüglich der Medien, die die Wärme aufnehmen beziehungsweise abgeben, unterscheidet man drei Arten von Wärmetauschern: (Vgl. z.B. [Werschy 2010])

1. Flüssig/Flüssig: Beide Medien, sowohl das aufnehmende als auch das abgebende, liegen in der flüssigen Phase vor. Ein Beispiel für einen solchen Fall ist die Abwärme, die aus Kühlwasser auf Brauchwasser übertragen wird.
2. Gas/Flüssig: Eines der beiden Medien liegt in der Gasphase vor, das andere ist eine Flüssigkeit. Ein solcher Fall liegt zum Beispiel vor, wenn die Wärme aus einem Abgas an eine Flüssigkeit abgegeben wird.
3. Gas/Gas: Beide Medien liegen als Gase vor. Ein geläufiges Beispiel hierfür ist die Wärmerückgewinnung in der Hauslüftungsanlage, wo mit Hilfe der Abluft die Frischluft vorgewärmt wird.

Außerdem unterscheidet man noch den Wärmeaustauschmechanismus: Hier unterscheidet man zwischen regenerativen und rekuperativen Wärmetauschern. (Vgl. [Pehnt 2010; Pehnt u. a. 2010; Werschky 2010])

Regenerative Wärmetauscher sind deutlich weniger weit verbreitet (Vgl. [Pehnt u. a. 2010; Werschky 2010]) und erlauben neben dem Austausch von Wärme auch einen geringfügigen Stoffaustausch sowie einen Feuchtigkeitsaustausch. Ein Beispiel dafür sind Rotationswärmetauscher, die oftmals in der Haustechnik eingesetzt werden. Sie erlauben neben dem Wärmeaustausch auch einen Feuchtigkeitsaustausch von Zu- und Abluft ([Pehnt 2010]).

Im Gegensatz dazu sind bei Rekuperatoren die Stoffströme komplett von einander getrennt und die Wärmeübertragung läuft über Konvektion und Leitung durch bzw. über die Trennwand. Die Wärmetauscher unterscheidet man außerdem nach Gegenstrom-, Gleichstrom- und Kreuzstrom-Übertragern ([Pehnt 2010]). Bei Gegenstrom-Übertragern fließen die beiden Stoffströme in entgegengesetzter Richtung aneinander vorbei, wodurch sich immer ein relativ großer Temperaturunterschied einstellt. Beim Gleichstrom-Übertrager fließen beide Ströme in die gleiche Richtung und die Temperaturen nähern sich immer weiter an. Beim Kreuzstrom-Übertrager fließen die beiden Ströme senkrecht zueinander. Die höchsten Wirkungsgrade erzielt man in der Regel mit einer Gegenstrom-Wärmeübertragung ([Pehnt 2010]).

## 1.2 Definition und Abgrenzung: industrielle Abwärme

### 1.2.1 Definition Abwärme

In Anlehnung an die zuvor vorgestellten Definitionen wird in der vorliegenden Arbeit Abwärme als die Wärme verstanden, die ein System verlässt und nicht Ziel des Systems bzw. des Prozesses war. Anders formuliert: Abwärme wird als die Wärme verstanden die von einem System abgegeben wird, bei dem Wärme keines der geplanten Produkte ist. Es wird weiterhin nur in Abgas oder Abluft gebundene Wärme berücksichtigt. Somit wird keine Strahlungswärme berücksichtigt oder Wärme, die noch in Festkörpern gebunden ist; Es wird nur Wärme berücksichtigt, die als Abgas oder Abluft vorliegt und die nur noch „weg gekühlt“ oder anderweitig an die Umgebung abgegeben wird und durch deren Nutzung kein Eingriff in den Produktionsprozess stattfindet. Veränderungen der Produktionsprozesse sind oft sehr heikel, da die gewonnene Abwärme nicht einen in irgendeiner Weise durch den Eingriff hervorgerufenen Produktionsausfall kompensieren kann. Wärme aus Kraftwerken oder KWK-Prozessen fällt nicht unter diese Definition der Abwärme, da das Ziel der Anlagen neben der Stromproduktion auch die Wärmeproduktion ist. Neben den Abgasen ist auch im Abwasser gebundene industrielle Abwärme enthalten. Allerdings hat [Broberg u. a. 2012] gezeigt, dass die Abwärme im Temperaturbereich von 25-55°C anfällt, der Großteil sogar bei oder unter 35°C. Damit ist die dort entstehende Abwärme nur in Sonderfällen nutzbar und wird hier vernachlässigt. Zur besseren Lesbarkeit wird im Folgenden Abgas und Abluft allgemein als Abgas bezeichnet.

Tabelle 1.2: Nationale Klassifikation der Wirtschaftszweige, Ausgabe 2008 (WZ 2008), Abschnitt C -Verarbeitendes Gewerbe, Statistisches Bundesamt

WZ 2008 - ABSCHNITT C – VERARBEITENDES GEWERBE
10 Herstellung von Nahrungs- und Futtermitteln
11 Getränkeherstellung
12 Tabakverarbeitung
13 Herstellung von Textilien
14 Herstellung von Bekleidung
15 Herstellung von Leder, Lederwaren und Schuhen
16 Herstellung von Holz-, Flecht-, Korb- und Korkwaren (ohne Möbel)
17 Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus
18 Herstellung von Druckerzeugnissen; Vervielfältigung von bespielten Ton-, Bild- und Datenträgern
19 Kokerei und Mineralölverarbeitung
20 Herstellung von chemischen Erzeugnissen
21 Herstellung von pharmazeutischen Erzeugnissen
22 Herstellung von Gummi- und Kunststoffwaren
23 Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden
24 Metallerzeugung und -bearbeitung
25 Herstellung von Metallerzeugnissen
26 Herstellung von Datenverarbeitungsgeräten, elektronischen und optischen Erzeugnissen
27 Herstellung von elektrischen Ausrüstungen
28 Maschinenbau
29 Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen
30 Sonstiger Fahrzeugbau
31 Herstellung von Möbeln
32 Herstellung von sonstigen Waren
33 Reparatur und Installation von Maschinen und Ausrüstungen

### 1.2.2 Definition Industrie

In Deutschland werden Betriebe standardmäßig nach der Klassifizierung WZ 2008 (WZ: Wirtschaftszweige) bzw. deren Vorgänger/Nachfolger eingruppiert. Unter Abschnitt C dieser Klassifizierung fällt das verarbeitende Gewerbe. Die einzelnen Wirtschaftszweige nach WZ 2008 Abschnitt C sind in Tabelle 1.2 aufgeführt. In dieser Arbeit werden unter „Industrie“ alle Betriebe aufgefasst, die zu den Sektoren C10-C33 des verarbeitenden Gewerbes gehören mit Ausnahme des Sektors C19 „Kokerei und Mineralölverarbeitung“, da hier Sekundärenergie in Endenergie umgewandelt wird. Diese Definition wird auch von der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen ([www.AGEB.de](http://www.AGEB.de)) und dem Länderarbeitskreis „Umweltökonomische Gesamtrechnungen der Länder“ ([www.ugrdl.de](http://www.ugrdl.de)) verwendet. Unter diese Definition des produzierenden Gewerbes fällt nicht der Bereich (End-) Energieerzeugung (Abschnitt D, Sektor 35).

Bei der Erstellung der Energiebilanzen auf Landes- und Bundesebene wird als Abgrenzung zum Bereich Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD) eine Grenze von 20 Mitarbeitern zwischen GHD und Industrie gezogen ([UGRDL 2014; AGE 2014; LAK 2014]). Diese Grenze wird in der vorliegenden Arbeit nicht übernommen: Es werden alle Betriebe aus dem eben beschriebenen Bereich ausgewertet, für die Daten vorliegen. Auf Grund einer später noch genauer erläuterten Bagatellgrenze in den vorliegenden Daten werden jedoch auch hier kleine Betriebe mit einem geringen Endenergieverbrauch nicht berücksichtigt.

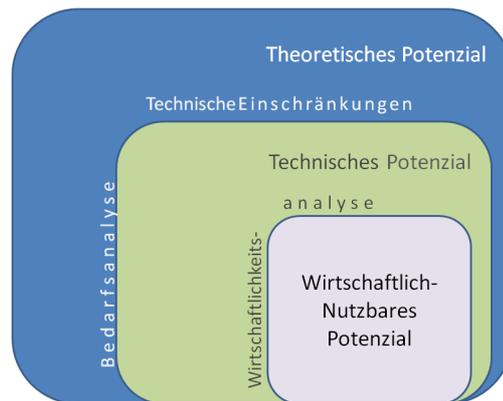


Abbildung 1.2: Potenzialtheorie: Begrenzungen von theoretischem, technischem und wirtschaftlich-nutzbarem Potenzial; eigene Darstellung nach [Brueckner u. a. 2014], [Roth u. a. 1996], [Metz u. a. 2007] Schema veröffentlicht in [Brueckner u. a. 2015], ähnlich zu finden in [Blesl u. a. 2008]

### 1.2.3 Definition Potenzial

Für das Potenzial der industriellen Abwärme eines Landes muss man zwischen dem theoretischen, dem technischen und dem wirtschaftlichen oder realisierbaren Potenzial unterscheiden. Die letzteren beiden Potentiale sind eine Teilmenge des theoretischen oder physikalischen Potentials, wie Abbildung 1.2 veranschaulicht.

Das theoretische Potenzial ist in der Definition von [Roth u. a. 1996] nur durch die technischen Daten der produzierenden Anlage und die gesetzlichen Auflagen durch das Bundes-Immissionsschutzgesetz begrenzt; also durch physikalische Einschränkungen. Deshalb wird es bei [Metz u. a. 2007] auch als physikalisches Potenzial bezeichnet. Im Gegensatz dazu wird das technische Abwärmepotenzial nach [Roth u. a. 1996] zusätzlich durch das Temperaturniveau und die Handhabbarkeit eingeschränkt. Als nicht handhabbar gilt dabei Wärme, die nicht an ein Medium gebunden ist, also diffus abgegeben wird und nur sehr schwer eingefangen werden kann. Dabei ist das notwendige Temperaturniveau von der betrachteten Technologie abhängig. Außerdem wird das technische Potenzial durch den theoretischen Wärmebedarf begrenzt, denn die technische Nutzbarkeit setzt das Vorhandensein eines Wärmeabnehmers voraus. Im Gegensatz zum wirtschaftlichen oder realisierbaren Potenzial wird beim technischen Potenzial allerdings nicht berücksichtigt, ob z.B. der Transport wirtschaftlich darstellbar ist. Das zeigen erst die Wirtschaftlichkeitsanalysen, die das realisierbare oder wirtschaftliche Potenzial begrenzen. Das realisierbare oder wirtschaftliche Potenzial ist schließlich Teilmenge des technischen Abwärmepotentials. Dabei werden finanzielle Aspekte berücksichtigt, ebenso wie organisatorische, vertragliche und rechtlich-institutionelle Rahmenbedingungen.

Nach der Studie im Auftrag des Umweltbundesamts zur Nutzung industrieller Abwärme ([Roth u. a. 1996]) fallen nur 44% der Abwärme in Deutschland als gebundener Wärmestrom an. Davon ist auf Grund des zeitlichen Anfalls der Wärme und interner Nutzung nur etwa die Hälfte extern nutzbar und noch weniger in vorhandene Verteilsysteme einspeisbar; so ergibt sich aus der Studie ein technisches Potenzial für die externe Nutzung industrieller Abwärme von weniger als 20% der gesamten industriellen Abwärme. Leider erläutern [Roth u. a. 1996] die angenommenen Kriterien, die zu dieser Aussage führen, (z.B. die zeitliche Komponente) nicht näher.

## 1.3 Ziel der Arbeit

In Kapitel 2 wird der Stand der Forschung zur Erhebung des Abwärmepotentials von Ländern vorgestellt und die Forschungslücke aufgezeigt, die mit dieser Arbeit geschlossen werden soll: Derzeit gibt es keine wissenschaftlich fundierte, sorgfältige Erhebung der Abwärme in Deutschland. Bisherigen Arbeiten haben entweder mit pauschalen Abwärmefaktoren gearbeitet ([Persson u. a. 2014], [Grote u. a. (2015)]), die angezweifelt werden können, oder diese aus andern Ländern übertragen

[Pehnt u. a. 2010]. Beide Verfahren bergen große Ungenauigkeiten, da im einen Fall spekuliert und pauschaliert wird und im anderen Fall nicht bekannt ist, inwieweit sich die industriellen Sektoren der Länder gleichen und somit eine Übertragbarkeit rechtfertigen. Diese Verfahren können deshalb nur eine grobe erste Abschätzung liefern.

Das Ziel der Arbeit ist es diese Forschungslücke zu schließen und das theoretische Abwärmeaufkommen der deutschen Industrie mit einem kombinierten Bottom-Up-/Top-Down-Ansatz zu quantifizieren. Im Gegensatz zu den bisherigen Arbeiten werden dabei reale Daten für ganz Deutschland ausgewertet, eine gesicherte untere Grenze des Abwärmeaufkommens ermittelt und im Anschluss eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Dadurch soll, im Gegensatz zu nicht wissenschaftlichen Studien, die Belastbarkeit der Analyse beurteilt werden. Außerdem sollen die technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen für verschiedene Abwärmenutzungstechnologien beschrieben werden, die über den üblichen Rahmen der Abwärmenutzung durch einen Wärmeübertrager hinausgehen: Zeolith-Wärmespeicher, thermische und mechanisch Wärmepumpen und Absorptionskältemaschinen.

Zunächst werden frühere Arbeiten auf dem Gebiet der Abwärmepotenzialerhebung untersucht und systematisiert. Dazu wird in Kapitel 2 eine Kategorisierung der verschiedenen Ansätze vorgestellt. Im Anschluss werden die früheren Arbeiten darin eingeordnet.

Im Anschluss wird im ersten Teil der Arbeit ein Verfahren zur Auswertung von Emissionsdaten der einzelnen Betriebe der deutschen Industrie entwickelt. Mit diesem Verfahren können teilautomatisiert die rund 81.000 Datensätze ausgewertet werden, um so die sicher zur Verfügung stehende Abwärme zu bestimmen. Dabei geht es darum einen konservativen unteren Grenzwert des theoretischen Potenzials zu bestimmen. Es geht nicht darum, das maximal mögliche Abwärmeaufkommen zu bestimmen. Aus der Auswertung lassen sich außerdem Schlüsse ziehen, in welchen Sektoren besonders viel Abwärme anfällt und in welchen Regionen. In einem folgenden Schritt wird in Form von einem Top-Down-Ansatz das Abwärmeaufkommen auf die nicht ausgewerteten Betriebe extrapoliert werden. Dabei werden in der Arbeit verschiedene Ansätze vorgestellt und angewendet um die Auswirkungen der verschiedenen Annahmen zu untersuchen.

Im zweiten Teil der Arbeit wird nach einer Bewertung und Einordnung der Ergebnisse die Nutzbarkeit der vorhandenen Abwärme unter technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen untersucht. Dabei werden wie erwähnt Zeolith-Wärmespeicher, Wärmepumpen und Absorptionskältemaschinen betrachtet. Die Nutzbarkeit der Ergebnisse in Kombination mit Wärmebedarfsanalysen wird am Beispiel des Wärmespeichers vorgestellt.



# Kapitel 2

## Stand der Technik

### 2.1 Kategorisierung von Methoden zur Potenzialerhebung

Die hier vorgestellte Kategorisierung von Methoden zur Potenzialerhebung wurde zuvor in [Brueckner u. a. 2014] veröffentlicht. In anderen vorhergehenden Arbeiten wurden die Methoden zur Abschätzung des Abwärmeaufkommens entweder nach Genauigkeit oder nach der Datenbeschaffung kategorisiert: [Blesl u. a. 2008] unterscheidet die Methoden in drei Genauigkeitsstufen: eine grobe Methode basierend auf wenigen statistischen Daten, eine Methode mittlerer Genauigkeit mit Koeffizienten und detaillierten Literaturdaten und eine präzise Methode basierend auf Messwerten. [Pehnt u. a. 2010] unterschieden die verschiedenen Ansätze nach Methoden, die auf Wirkungsgrad, Fragebögen oder Messwerten basieren.

Wie in [Brueckner u. a. 2014] vorgestellt können die Methoden allgemeiner in drei verschiedene Kategorien unterteilt werden: Die Betrachtungsebene oder der Maßstab der Studie, die Datenbeschaffung (Umfrage oder Berechnung) und der verfolgte Ansatz (Top-Down oder Bottom-Up). Der verfolgte Ansatz ist allerdings nur bei abschätzungs-basierten Verfahren relevant, da Umfragen/Fragebögen immer ein Bottom-Up-Verfahren sind. Im folgenden sollen die drei Kategorien genauer beschrieben werden:([Brueckner u. a. 2014])

#### 1. Maßstab der Studie

Hier wird unterschieden, ob eine einzelne Fabrik oder Firma untersucht wird, ein Sektor, eine Stadt, eine Region oder ein Land.

#### 2. Datenbeschaffung

Bei der Datenbeschaffung muss generell unterschieden werden, ob die Daten erhoben oder errechnet wurden. Erhobene Daten können entweder Messwerte sein oder Daten, die über einen Fragebogen, eine Umfrage oder über Berichtspflichten erhoben wurden. Auch freiwillige Angaben in Online-Datenbanken fallen unter diese Kategorie. Allerdings ist die Abgrenzung teilweise unscharf, da sich hinter erhobenen Daten auch abgeschätzte oder errechnete Daten verbergen können sofern es sich nicht um Messwerte handelt. Errechnete Daten können Wirkungsgrade oder Energiekennwerte als Basis haben: Erstere werden über die Eingangsenergie berechnet, letztere basieren normalerweise auf einer Kenngröße, die mit der Größe der Firma korreliert -Anzahl Mitarbeiter, Umsatz, Menge produzierter Güter. Im „Wärmeatlas Baden-Württemberg“ [Blesl u. a. 2008] wurden für einen Betrieb verschiedene Verfahren zur Bestimmung der Abwärme verglichen: Zwischen der Berechnung mit Kennwerten, die auf der Betriebsart basierten und der mit prozess- basierten Wirkungsgraden konnte kein Unterschied festgestellt werden. Andere und genauere Werte konnten nur über Messwerte erreicht werden und haben sich um einen Faktor 4 von den vorherigen Werten unterschieden. Allerdings sind Messungen im Hochtemperaturbereich nicht trivial und ebenfalls oft unpräzise [Mlir-  
tensson 1992], zum Beispiel durch Strahlungseinflüsse.

#### 3. Betrachtungsansatz: Bottom-Up oder Top-Down

Die geläufigste Unterscheidung von Modellierungsverfahren ist zwischen Top-Down- und Bottom-Up-Modellen. Hierbei wird die Betrachtungsrichtung berücksichtigt: Werden verschiedene Einzelfallstudien oder Experimente zu einem allgemeinen Ergebnis zusammengefasst, spricht man von einem

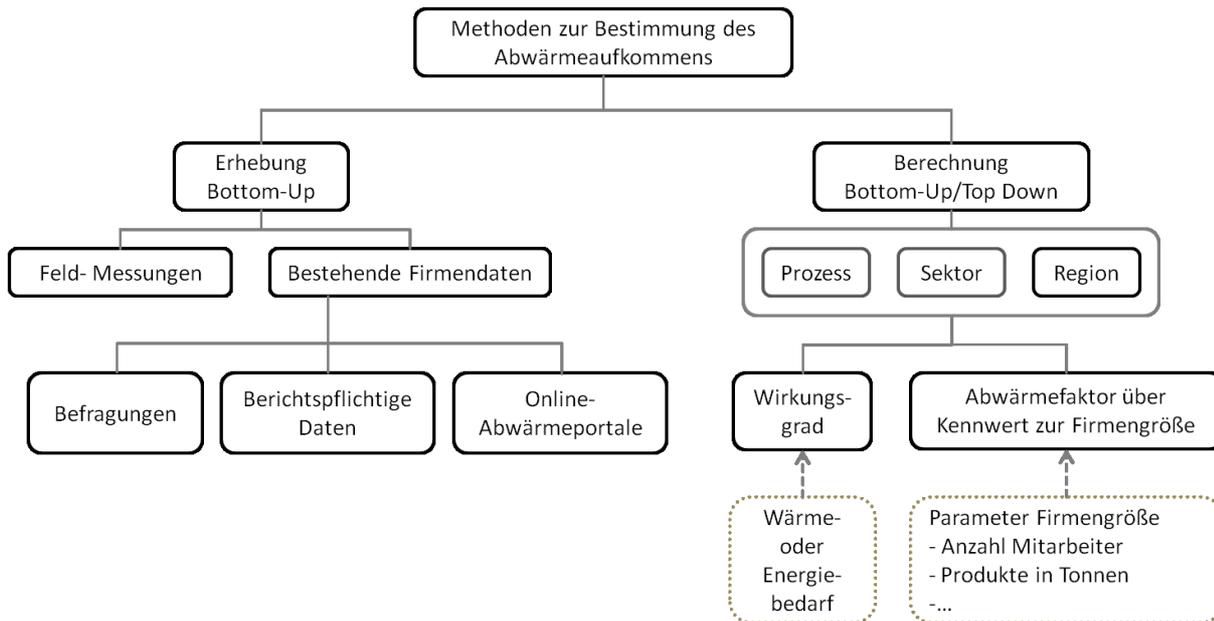


Abbildung 2.1: Kategorisierung von Methoden zur Bestimmung des Abwärmeaufkommens in Regionen nach Maßstab der Studie, Datenbeschaffung und Betrachtungsansatz aus [Brueckner u. a. 2014]

Bottom-Up-Ansatz, also einem von unten nach oben gerichteten Ansatz. Werden andererseits allgemeine Ergebnisse oder Kennwerte auf einen Einzelfall angewendet, spricht man von einem nach unten gerichteten Top-Down-Ansatz. Dementsprechend sind Umfragen oder Fragebögen und Messverfahren immer Bottom-Up-Methoden. Berechnungen hingegen können sowohl Bottom-Up als auch Top-Down durchgeführt werden. Die Unterscheidung ist hier auch immer von der betrachteten Ebene bzw. dem Maßstab der Studie abhängig: Wenn für einen Betrieb die Abwärmemengen über einen Energiekennwert für Betriebe abgeschätzt wird, ist das für den Betrieb ein Top-Down-Ansatz; geschieht dies jedoch für viele Betriebe, um die Wert anschließend regional zu aggregieren und eine Aussage über das Abwärmeaufkommen einer Stadt zu treffen, ist es für die Stadt ein Bottom-Up-Ansatz. Ebenfalls ein Beispiel von einem Top-Down-Ansatz sind die im Zusammenhang mit Abwärme oft gefundenen Experteneinschätzungen oder Daumenregeln (wie zum Beispiel "20% des eingesetzten Brennstoffs kann als Abwärme zurückgewonnen werden"). Eine Zusammenfassung der verschiedenen Ansätze ist ein Abbildung 2.1 zu sehen.

Anders als in der Theorie werden in der Praxis oft Mischformen angewendet: So werden Top-Down-Analysen –über Kennwerte oder Wirkungsgrade– mit Bottom-Up-Analysen von einzelnen Branchen, Regionen oder Betrieben kombiniert. Im Folgenden soll eine Übersicht über angewendete Verfahren gegeben werden.

## 2.2 Literaturübersicht

Im Folgenden sollen die bisher in der Literatur existierenden Studien zur Abschätzung des industriellen Abwärmepotenzials von Regionen oder Ländern vorgestellt und in die zuvor beschriebene Klassifizierung einsortiert werden. Dabei werden keine Veröffentlichungen berücksichtigt, die sich auf einzelne Sektoren beschränken, wie z.B. [Zhang 2012; Mlirtensson 1992]. Weiterhin werden nur Studien und Berichte berücksichtigt, die Angaben zur Methode machen, wie die Abwärmeangaben zustande gekommen sind. Die hier dadurch ausgeschlossenen nicht-wissenschaftlichen Arbeiten werden in [Miro u. a. 2015] vorgestellt. Dieses für die Wissenschaft ungewöhnliche Vorgehen zeigt schon, wie gering die vorhandene Datenlage ist. Das gilt besonders wenn es um Veröffentlichungen in wissenschaftlichen Journalen geht. Die hier vorgestellte Literaturübersicht wurde in wesentlichen Teilen

zuvor in [Brueckner u. a. 2014] veröffentlicht. Der unter Erhebungen einsortierte Fall der Feld-Studie, also von Messungen der Abwärmemengen, ist in der Literaturübersicht nicht zu finden, da dieses Verfahren in seiner reinen Form bei der Betrachtung von Regionen und Ländern zu aufwendig ist.

## 2.2.1 Erhebungen (Bottom-Up)

### 2.2.1.1 Befragungen

Ein Beispiel für eine Erhebung der industriellen Abwärme auf Basis von Befragungen stammt aus Norwegen aus dem Jahr 2009 [Sollesnes und Helgerud 2009]: Die Studie wurde von Enova SF durchgeführt. Enova SF wird vom Öl- und Energie-Ministerium finanziert und wurde 2001 gegründet um die nachhaltigere Erzeugung und den bewußteren Verbrauch von Energie zu fördern ([ENOVA 2013]). Für die Studie wurden landesweit Betriebe aus den Bereichen Nahrungsmittelindustrie, Holzverarbeitung (einschließlich Papierindustrie), Chemieindustrie, Zement- und Bauindustrie, Aluminium- und Eisenlegierungsindustrie befragt sowie einige energieintensive Betriebe aus der Ölverarbeitung und Müllverbrennungsanlagen. Im Ergebnis konnten 72 Betriebe und 4 Müllverbrennungsanlagen ausgewertet werden. Die Industriebetriebe stellen zusammen 69% des gesamten Endenergieverbrauchs der norwegischen Industrie dar. Das gefundene Abwärmepotenzial lag bei 69,84 PJ/a (19,4 TWh/a) für Wärme über 25°C mit 0°C Referenztemperatur. Das entspricht 36% des Endenergiebedarfs der befragten Unternehmen oder 25% des Bedarfs der betrachteten Branchen. Bei dem hier betrachteten Potenzial handelt es sich auf Grund der betrachteten Referenz- und Minimaltemperatur um ein theoretisches Potenzial.

Eine weitere Erhebung hat [Chung u. a. 2013] 2013 in Korea durchgeführt. Die landesweite Befragung wurde von der „Korea Energy Management Corporation“ finanziert. Insgesamt nahmen 2/3 der Industriebetriebe an der Befragung teil, die zusammen 68% des industriellen Energieverbrauchs ausmachen. Es ergab sich ein Abwärmepotenzial von 384 PJ/a. Das entspricht 11,7% der eingesetzten Energie. Leider wurden dabei keine Angaben zu Temperaturen gemacht.

### 2.2.1.2 Berichtspflichtige Daten

[Bonilla u. a. 1997] und [Lopez u. a. 1998] haben 1996 und 1997 in zwei Studien das Abwärmepotenzial der im Baskenland angesiedelten Industrie erhoben; aufgeschlüsselt nach verschiedenen Trägermedien und eingeteilt in 8 verschiedene Temperaturniveaus. Dafür nutzten sie Daten von 260 Industrieunternehmen in der ersten Studie [Bonilla u. a. 1997] und 290 [Lopez u. a. 1998] in der zweiten. Als Datenbasis für beide Erhebungen wurden berichtspflichtige Daten der EVE (el Ente Vasco de la Energia - Energieagentur der Baskischen Regierung) verwendet. Beide Studien kommen auf ein Abwärmepotenzial von 51 PJ/a, das sind gut 14 TWh/a. Laut [Lopez u. a. 1998] werden dabei 40,5% des industriellen Energiebedarfs im Baskenland ungenutzt als Abwärme freigesetzt. Der Großteil dieses Potenzials liegt mit 23% im Bereich 80-120°C, gefolgt von dem Temperaturbereich über 1200°C mit 21% und dem 400-800°C-Bereich mit 19%. Nach Trägermedien sortiert ist das größte Potenzial im Bereich von Gasströmen (32% [Bonilla u. a. 1997] bzw. 33% [Lopez u. a. 1998]), gefolgt von Festkörpern mit 27%. Mit diesen Zahlen mag es erstaunen, dass in der vorliegenden Arbeit die Wärme aus Festkörpern nicht betrachtet wird. Dies liegt jedoch weniger an der Vernachlässigbarkeit der Menge sondern mehr an dem hohen technischen Aufwand, die Wärme aus den Festkörpern wie z.B. den Produkten zurückzugewinnen ohne in den Produktionsprozess und die Eigenschaften des Produkts einzugreifen. Da das erhobene Abwärmeaufkommen nur durch das Trägermedium begrenzt wurde, handelt es sich bei dieser Erhebung um ein theoretisches Potenzial.

Bereits aus dem Jahr 1982 stammt die Berechnung des industriellen Abwärmeaufkommens von [Latour u. a. 1982] für die USA. Die Abwärme wurde dabei aus den Abgasdaten des *National Emission Data System* (NEDS) gewonnen und mit Hilfe von Experteneinschätzungen und Quervergleichen mit anderen Studien verifiziert. Daneben wurde noch Abwärme aus Abwasser und Kühlflüssigkeiten berücksichtigt, insgesamt aber nur die energieintensiven Teile bestimmter Industriesektoren: Papier, Chemie, Erdölraffinerien, Glas und Zement und Eisen und Stahl. Bei diesen energieintensiven Sek-

toren wurde 37% des industriellen Endenergieverbrauchs als Abwärme abgegeben, 23% davon über Abgas und 14% über Flüssigkeiten. Die Ergebnisse beziehen sich auf Daten von 1977.

### 2.2.1.3 Online-Abwärmeportale

Streng genommen handelt es sich bei Abwärmeportalen nicht um Abwärmeerhebungen, da die Teilnahme meist eher zufällig und immer freiwillig ist. Daher wird darüber nicht das Abwärmeeaufkommen einer Region erhoben. Dafür haben Abwärmeportale einen hohen praktische Nutzen: Das hauptsächliche Ziel dieser Portale ist die Vernetzung von verschiedenen Akteuren, indem Bedarf und Angebot räumlich parallel dargestellt werden. Die eingespeisten Daten sind somit intrinsisch motiviert um Projektpartner zu finden, weshalb sie vermutlich eine höhere Genauigkeit haben als externe Berechnungen. Beispiele für Abwärmeportale gibt es in Thüringen [Thüringen 2013], Bayern [Geoportal Bayern 2013], Sachsen [Sachsen 2013] und den Niederlanden [Niederlande 2013].

## 2.2.2 Berechnung bzw. Abschätzungen

### 2.2.2.1 Bottom-Up Berechnung bzw. Abschätzungen

Alternativ zu Erhebungen können auch Berechnungen bzw. Abschätzungen verwendet werden. So wurde 2004 in den USA das Abwärmepotenzial der Industrie abgeschätzt [Pelligrino u. a. 2004]. Dazu wurde für sowohl für einzelne Maschinen (z.B. Kocher zur Dampferzeugung), Prozesse (z.B. Papier-trocknung) als auch aggregiert für ganze Sektoren (z.B. Textilsektor) Wirkungsgrad bzw. Verlustgrade angegeben. Die Abschätzung des Anteils der unvermeidbaren oder rückgewinnbaren Abwärme wurde dabei über Expertengespräche, Literatur und Pilotprojekte gewonnen. Insgesamt wurde ein Abwärmeeaufkommen von 1501 PJ/a bzw. 1751 PJ/a beziffert, je nachdem wie die Grenzen des industriellen Sektors gezogen werden. Der Fokus der Arbeit lag dabei auf den energieintensiven Industriesektoren Chemie, Öltraffinerien, Holzverarbeitung, Eisen und Stahl, Nahrungsmittelverarbeitung und Bergbau bzw. Zement.

2008 wurde für die USA ein ähnlicher Ansatz vom US Department of Energy im Industrial Technologies Program (heute Advanced Manufacturing Office) verfolgt. Ebenfalls auf Wirkungsgraden basierend wurden Abwärmeverluste für die Glasindustrie, Zementverarbeitung, Eisen- und Stahlverarbeitung, Aluminiumschmelzen und Hochöfen veröffentlicht [DOE 2008]. Die Wirkungsgrade wurden dabei aus Schätzungen bzgl. der Abgaszusammensetzung, dem Massenfluss und der Temperatur des Abgases berechnet. Das resultierende Abwärmeeaufkommen für die USA wurde mit 1559 PJ/a angegeben.

Ebenfalls eine prozess- basierte Analyse führten [Dupont und Sabora 2009] für Frankreich durch. Der Fokus liegt dabei auf Luft-Kompressoren, Kühlern und Reinigungssystemen und einem Temperaturbereich von 35-70°C um die Abwärme mit Wärmepumpen zu kombinieren. Auch hier wurde das Abwärmeeaufkommen über Wirkungsgrade bestimmt. Der größte Anteil der Abwärme entsteht dabei in der Lebensmittelverarbeitung (>60%) bei Kühlern (>70%). Insgesamt liegt das Abwärmeeaufkommen bei 51-53 PJ/a (die Angaben sind innerhalb der Veröffentlichung leicht abweichend).

An der Universität Stuttgart wurde ebenfalls mit Bottom-Up-Analysen gearbeitet: In einer ersten Studie, dem Wärmeetlas Baden-Württemberg [Blesl u. a. 2008], wurde das Abwärmeeaufkommen für vier verschiedene Städte abgeschätzt, basierend auf Literatur- und Erfahrungswerten. Zur Berechnung der Abwärme in den jeweiligen Betrieben bzw. Prozessen wird von der Wärmemenge, die der Prozess mit der höchsten Temperatur liefert, der Wärmebedarf der weiteren Verbrauchsstellen abgezogen. Die sich daraus ergebende Differenz wird als Abwärme betrachtet oder „nicht weiter nutzbare Restwärmemenge“ [Blesl u. a. 2008, S.15]. Als mögliche Wärmelieferanten wurden dabei nur Betriebe berücksichtigt, die eine gewisse Mindestmenge ganzjährig liefern können. Von den vier analysierten Regionen, wurde das höchste Abwärmepotenzial in einer Region mit einer Gießerei ermittelt, die fast 70% dieses Potenzials ausmacht. Vom gleichen Institut wurde 2011 eine detailliertere Studie für das gesamte Bundesland durchgeführt [Blesl u. a. 2011]. Dazu wurde für jeden Sektor auf Basis von Fallstudien das wirtschaftliche Abwärmepotenzial abgeleitet, insgesamt etwa 29 PJ/a (8 TWh/a).

Wie schon in der vorhergehenden Studie wurde das Abwärmepotenzial in drei Temperaturbereiche eingeteilt: 5 PJ/a (1267 GWh/a)  $<100^{\circ}\text{C}$ , 0,8 PJ/a (215 GWh/a) bei  $100\text{-}500^{\circ}\text{C}$ , 24 PJ/a (6645 GWh/a)  $>500^{\circ}\text{C}$ .

Bei [Grote u. a. 2015] wird das theoretische Abwärmepotenzial in Deutschland für 2008 überschlägig mit Wirkungsgraden abgeschätzt. Die Autoren berechnen auf Basis von Literaturwerten den Prozesswärmebedarf der einzelnen Industriesektoren (WZ2008, Sektoren 05-33) aus dem Primärenergieverbrauch (Datenbasis [AGEB 2014]). Dann wird angenommen, dass 60% des Prozesswärmebedarfs als Abwärme anfällt und 90% davon in Wärmeanwendungen genutzt werden können oder 15% als Strom. Daraus ergibt sich ein Abwärmepotenzial von 814 PJ/a (226 TWh/a) für Wärme und 137 PJ/a (38 TWh/a) für Strom. Ähnliche Potenziale wurden 2010 in einer vorhergehenden Kurzstudie mit zwei Varianten einer sehr ähnlichen Systematik abgeschätzt die ebenfalls auf Wirkungsgraden basiert ([IZES 2010]): Dort wurde die Analyse auf die energieintensiven Sparten fokussiert, die zusammen 93,5% des Primärenergieverbrauchs der deutschen Industrie abdecken. Für eine reine Wärmenutzung ergab sich ein Abwärmepotenzial von 832-972 PJ/a (231-270 TWh/a) für Wärme und 130-159 PJ/a (36-44 TWh/a) für Strom. Leider schwanken die Ergebnisse innerhalb der Veröffentlichung und zwischen [IZES 2010] und [Grote u. a. 2015]. Die Unterschiede sind jedoch gering und vermutlich auf unterschiedliche Rundung zurückzuführen.

Eine Studie von Boddy für das Vereinigte Königreich von 1994 ([Boddy 1994]) gibt an, wie viel der thermischen Eingangsenergie auf welchem Temperaturniveau aus einem Prozess zurückgewonnen werden kann (z.B. Ofenabgase: 27% der Eingangsenergie bei  $361^{\circ}\text{C}$ ). Diese 1994 veröffentlichte Studie mit der Wirkungsgrad-Methode bezieht sich jedoch teilweise auf Studien von 1985 und älter.

[McKenna 2009; McKenna und Norman 2010] haben für das Vereinigte Königreich (UK) ein technisch nutzbares Potenzial von 36-72 PJ/a (10-20 TWh/a) berechnet, basierend auf den Daten des „UK National Allocation Plan for the EU Emission Trading Scheme“. Die Bandbreite der Werte wurde gewählt um den großen Unsicherheiten Rechnung zu tragen, mit denen viele der Daten und Abschätzungen verbunden sind. Die Abwärme wird dabei in 5 Temperaturniveaus eingeteilt ( $<100^{\circ}$ ,  $100\text{-}500^{\circ}$ ,  $500\text{-}1000^{\circ}$ ,  $1000\text{-}1500^{\circ}$ ,  $>1500^{\circ}\text{C}$ ) sowie in möglichst homogene Sektoren. Da für die einzelnen Industriestandorte keine Daten bzgl. des Energieverbrauchs vorhanden waren und sind, wurde ein neues Verfahren entwickelt, bei dem der Energieverbrauch auf Grund der staatlich erhobenen Emissionsdaten ermittelt wird. Dafür werden die Emissionen für die einzelnen Sektoren jeweils aufgeteilt in prozessbedingte und verbrennungsbedingte Emissionen. Über den Haupt-Brennstoff wird dann ein Emissionsfaktor bestimmt und darüber auf den Brennstoffverbrauch zurückgerechnet. Um aus dem Brennstoffverbrauch die Abwärme abzuschätzen wurden stets konservative Annahmen getroffen. Für jeden Sektor wurde die technisch mögliche Wärmeauskopplung betrachtet. Bei Sektoren, in denen keine Daten vorlagen, wurde der Wert mit 5-10% der eingesetzten Energie abgeschätzt. Dabei zeigte sich, dass das größte Potenzial in Großbritannien im Temperaturbereich zwischen  $100\text{-}500^{\circ}\text{C}$  vorliegt, im Bereich Eisen- und Stahlindustrie, Chemie, Aluminium und dem nicht-metallischen Mineralsektor. Es zeigte sich ebenfalls, dass die Sektoren mit dem größten Wärmerückgewinnungspotenzial nicht mit den Sektoren mit dem höchsten Energieverbrauch übereinstimmen (Eisen& Stahl, Chemie, Lebensmittelindustrie, Papier, Zement, Glas und Aluminium). Die Wärmerückgewinnung ist somit nicht direkt proportional zum Energieverbrauch. Die in [McKenna und Norman 2010] angewendete Methodik wurde zuvor in [McKenna 2009] ausgearbeitet. Das Verfahren ist besonders sensibel gegenüber den genaueren Emissionswerten, dem Anteil an Verbrennungsemissionen, der Brennstoffzusammensetzung, dem spezifische Energieverbrauch und der Kapazität der Anlagen. Später wurde die Arbeit von [Hammond und Norman 2012] fortgeführt. Das in dieser Studie berechnete Abwärmepotenzial von 37-73 PJ/a weicht von den Ergebnissen von 36-71 PJ/a der vorherigen Studien ab. Der Unterschied kommt dadurch zustande, dass in der späteren Studie auch elektrische Energie, die zum Heizen verwendet wird, berücksichtigt wurde. In der Arbeit von 2012 wurden die Temperaturintervalle zwischen  $100\text{-}500^{\circ}$  weiter aufgespalten: Für die UK für den  $100\text{-}200^{\circ}$ -Bereich wurden fast ausschließlich die Eisen- und Stahlindustrie als Abwärmelieferant identifiziert. Im Bereich  $100\text{-}200^{\circ}$  steht an erster Stelle die Zementindustrie als Abwärmeproduzent vor Chemie, Aluminium, Nahrungsmittel, Papier & Keramikindustrie. Diese 2012 als Conference

Paper veröffentlichten Ergebnisse wurden 2014 noch einmal im Zusammenhang mit verschiedenen Nutzungstechnologien veröffentlicht [Hammond und Norman 2014].

Ein ähnliches Verfahren wurde für die EU verwendet: 2013 wurden in der zweiten Vorstudie zur European-Heatroadmap [Connolly u. a. 2013] Abwärmewerte für die 27 einzelnen Länder der Europäischen Gemeinschaft angegeben. Für Deutschland wurde dies mit 525 PJ/a beziffert. In einer anschließenden wissenschaftlichen Publikation im Folgejahr wurden genauere Angaben zur Methode veröffentlicht: [Persson u. a. 2014]. Demnach wurden  $CO_2$ -Emissionsdaten vom „European Pollutant Release and Transfer Register“ (E-PRTR) genutzt und über einen durchschnittlichen Emissionsfaktor die eingesetzte Primärenergie berechnet. Dies gelang mit einer Genauigkeit von 5%. Die Abwärme wurde mit sektorspezifischen Standard-Wirkungsgraden abgeschätzt. Dabei wurden für die meisten der berücksichtigten Sektoren (Chemie und Petrochemie, Eisen und Stahl, Nichteisenmetalle, Steine und Erden und die Papierindustrie) ein Abwärmefaktor von 25% der eingesetzten Primärenergie angenommen, nur in der Lebensmittelindustrie weicht er mit 10% ab sowie bei Raffinerien mit 50%. Diese Werte sind so gewählt worden, dass sie die größtmögliche Wärmerückgewinnung abschätzen. Für Deutschland wird in der Studie ein Abwärmeeinkommen von 566 PJ/a prognostiziert. Damit weichen die Ergebnisse leicht von denen des vorherigen Projektes ab.

Insgesamt ähnelt das von [Persson u. a. 2014] angewendete Verfahren sehr dem des Teams aus dem vereinigten Königreich ([Hammond und Norman 2012], [McKenna 2009], [McKenna und Norman 2010]). Allerdings verwenden die beiden Forschergruppen unterschiedliche Datenbanken für die  $CO_2$ -Quellen. Außerdem wird in den Ergebnissen für das Vereinigte Königreich nach unterschiedlichen Temperaturen unterschieden und bei den Emissionen zwischen solchen unterschieden, die auf Verbrennungsprozesse zurückzuführen sind und solchen, die durch die Produktion selber entstehen. Das wird in der Studie für die EU-27 vereinfacht.

Die neueste Studie ist aus dem Jahr 2015 aus der Türkei: [Utlu 2015]. Darin wird das Abwärmeeinkommen über 21 Jahre, von 1990 bis 2011 ausgewertet. Dabei werden neben der Abwärme im Abgas auch die Wärme im Produkt und Wandverluste berücksichtigt und in drei Temperaturbänder unterteilt (hoch 650-1650°C, mittel 235-650°C, niedrig 22-235°C). Für jeden Sektor wird, über elektrische und thermische Wirkungsgrade für die einzelnen Temperaturbändern und über den Anteil der Energieträgern, ein Sektorwirkungsgrad bestimmt. Diese wiederum sind genau wie die Temperaturniveaus der Prozesse aus früheren Studien und Literaturwerten gewonnen. Die gewonnenen Sektorwirkungsgrade werden dann mit Daten zum Energieverbrauch aus der Energiestatistik kombiniert. Neben den quantitativen Angaben zur Abwärme wird hier auch der Exergiegehalt aufgezeigt.

### 2.2.2.2 Top-Down Abschätzungen

Bei Top-Down-Abschätzungen werden häufig Ergebnisse aus anderen Zusammenhängen übertragen: Im Rahmen des Projektes „Wissenschaftliche Begleitforschung zu übergreifenden technischen, ökologischen, ökonomischen und strategischen Aspekten des nationalen Teils der Klimaschutzinitiative“ [Pehnt u. a. 2010] werden Potenzialstudien aus den USA [Pelligrino u. a. 2004], Norwegen [Sollesnes und Helgerud 2009] und Österreich ([Wien 2008], Methode unveröffentlicht) vorgestellt und deren Kennwerte auf Deutschland angewendet. In Norwegen wurde als Referenztemperatur 0° angenommen. Es ergibt sich für Deutschland ein Abwärmepotenzial von 316 PJ/a oder 88 TWh/a im Abwärmebereich über 140°C und 160 PJ/a (44 TWh/a) für den Wärmebereich von 60-140°C. Im Hochtemperaturbereich entfallen 42% des Abwärmeeinkommens allein auf den Eisensektor.

[Ammar u. a. 2012] hat selber keine Potenzialabschätzung zur Abwärmenutzung vorgenommen, nutzt aber die Daten einer 1994 in London veröffentlichten Studie von [Boddy 1994] um die Abwärmemengen der größten industriellen Prozesse in Großbritannien aufzuzeigen. Dort fallen demnach allein 52 PJ/a (14,5 TWh/a) im Temperaturbereich unter 100°C an und 82 PJ/a (23,01 TWh/a) Abwärme zwischen 100-400°C. Hierbei wird jedoch weder das gesamte Potenzial berücksichtigt noch die in dieser Arbeit verwendete Definition von Abwärme, da in den aufgezeigten Abwärmemengen auch Strahlungswärme und Abwasserwärme enthalten sind.

Im Rahmen des Ecoheatcool Projektes wurde der europäische Kälte- und Wärmebedarf und -markt untersucht ([Werner und Constantinescu 2006], [Werner 2006]). Das Projekt war Teil des „Intelligent Energy Europe“ Programms von 2005 bis 2006 der Europäischen Kommission [Euroheat and power 2013]. Durchgeführt wurde das Projekt von Euroheat–Power dem europaweiten Fernwärmeverband [AGFW 2013]. In [Werner und Constantinescu 2006] wurde im 4. Arbeitspaket ein in Schweden [Land u. a. 2002] entwickeltes Verfahren auf 32 Staaten in Europa (EU-32<sup>1</sup>) angewendet um das Abwärmepotenzial abzuschätzen. Bei diesem Verfahren wird das Abwärmepotenzial auf Grund von Erfahrungswerten abgeschätzt. Für die EU-32-Staaten ergibt sich auf Grund von diesen Erfahrungswerten und dem Energiebedarf der einzelnen Sektoren ein realisierbares Abwärmepotenzial von 1106 PJ/a. Dies ist jedoch ein wirtschaftliches Potenzial.

In [Forman u. a. 2016] wurde ebenfalls mit einem Top-Down-Ansatz das globale Abwärmeaufkommen für die Industrie, Transport, Handel und Haushalt. Für den industriellen Bereich wurde darin ein theoretisches Abwärmeaufkommen von 54233 PJ/a abgeschätzt.

Eine besondere Art von Top-Down-Berechnungen sind Kennwerte auf Basis von Experteneinschätzungen:

[Glatzel 2001] hat angenommen, dass 40% der industriellen Prozesswärme als Abwärme zur Verfügung stehen. Bei dieser Abschätzung wird die technische Realisierbarkeit zunächst nicht bewertet. Im „Leitfaden zur Abwärmenutzung in Kommunen“ des Bayerischen Landesamtes für Umwelt [EU-Consult und bifa Umweltinstitut 2008] wird davon ausgegangen, dass 20-30% der eingesetzten Energiemenge (Gas, Öl, Strom, etc.) als Abwärme zurückgewonnen werden können.

### 2.2.3 Kombinierte Top-Down-/Bottom-Up-Ansätze

Neben den oben klassifizierten Methoden gibt es in der Literatur auch Kombinationen der Ansätze. Die geläufigste Kombination ist dabei ein kombinierter Top-Down-/Bottom-Up-Ansatz. Dabei werden in der Regel Datensätze zunächst in einem Bottom-Up-Ansatz ausgewertet und anschließend mit einem Top-Down-Ansatz extrapoliert. Das Gegenbeispiel ist eine zunächst vorgenommene Top-Down-Abschätzung, die anschließend anhand von Beispielen verifiziert wird.

Ein Beispiel für einen solchen Top-Down/Bottom-Up-Ansatz ist das HERAKLES Projekt der Ruhr Universität Bochum und des IUAT in Duisburg. Herakles steht für *Handlungsunterstützendes Expertensystem zur Einführung regenerativer und rationeller Anwendungen in kommunalen Energieversorgungsstrukturen*. In seiner letzten Erweiterung wurde bei HERAKLES [Drath 2002; Kattenstein u. a. 2002; IUTA 2000] auch industrielle Abwärme als Wärmequelle aufgenommen und 2002 auf WZ-Klassifizierung gebracht. Dabei wurden die Industriesektoren nach WZ93 klassifiziert. Um die Abwärme abzuschätzen werden für die verschiedenen Industriesektoren Abwärmefaktoren anhand eines Datensatzes für die Stadt Duisburg als Bottom-Up-Analyse bestimmt [Gebhardt 1999; IUTA 2000]. Die gewonnen Kennzahlen werden dann auf NRW übertragen (Top-Down-Ansatz). Es werden nur gefasste Energieströme berücksichtigt, die auf zwei unterschiedlichen Temperaturniveaus ausgewertet werden. Für NRW ergibt sich daraus ein Abwärmepotenzial von  $\sim 50$  PJ/a ( $\sim 14$  TWh/a) bei einer Abkühlung auf  $70^\circ$  und  $\sim 25$  PJ/a ( $\sim 7$  TWh/a) bei einer Abkühlung auf  $120^\circ\text{C}$  [Drath 2002].

Das Schwedische Statistikamt und die Schwedische Fernwärmeorganisation [Land u. a. 2002; Cronholm u. a. 2009] haben ebenfalls Abwärmekennwerte (Abwärme pro Brennstoffverbrauch) berechnet. Dafür wurde für die Klassifizierung der Sektoren die schwedische Version des Europäischen NACE Codes verwendet (SNI -Swedish Standard Industrial Classification). Allerdings wurde die Auswertung zur Abschätzung des Potenzials für weitere Fernwärmesysteme erhoben. Deshalb werden nur Betriebe mit einem Energieverbrauch, der mindestens dem Äquivalent von 11 GJ (3 GWh) Öl entspricht und die in der Nähe von Siedlungen liegen, berücksichtigt. Als Siedlung werden dabei Ortschaften mit mehr als 200 Einwohnern und weniger als 200 m Abstand zwischen den Gebäuden gewertet. Unter diesen Voraussetzungen wurden 80 Gemeinden untersucht, von denen 10 zuvor

---

<sup>1</sup>EU 25: Belgien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Italien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, Niederlande, Österreich, Polen, Portugal, Schweden, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechien, Ungarn, Vereinigtes Königreich und Zypern + die damals assoziierten Staaten: Bulgarien, Kroatien, Rumänien und Türkei sowie Island, Norwegen und die Schweiz

noch kein Fernwärmesystem hatten. Innerhalb dieser Gemeinden wurden 994 Betriebe berücksichtigt. Aus den Daten der Firmen wurden vom schwedischen Statistikamt Kennwerte entwickelt, mit Daten aus der Literatur abgeglichen, und diese dann auf den gesamten Brennstoffverbrauch des SNI-Sektors in Schweden übertragen. So konnte in [Land u. a. 2002] ein Abwärmehaufkommen von 34 PJ/a (9,5 TWh) zur Anwendung im Fernwärmesystemen berechnet werden. Dabei handelt es sich um ein technisches Potenzial. In [Cronholm u. a. 2009] wurde ein Abwärmehaufkommen von 22 bis 28 PJ/a (6,2 - 7.9 TWh) berechnet.

Eine neuere Studie mit einer großangelegten Befragung in Schweden wurde 2012 von [Broberg u. a. 2012] durchgeführt. In einem Bottom-Up-Ansatz wurden zwei repräsentative Bezirke untersucht. Von 85 befragten Firmen haben 49% an der Befragung teilgenommen. Davon haben 43% die Abwärmemengen geschätzt, 57% berechnet oder gemessen. Aus der Bottom-Up-Analyse ergab sich ein Abwärmehaufkommen von etwa 5 PJ/a (1480 GWh/a). Bezogen auf die eingesetzte Endenergie in den Betrieben ist das ein Abwärmefaktor von 14%. Bei der Übertragung dieser Ergebnisse auf Schweden ergab sich ein theoretisches Abwärmepotenzial von 76 PJ/a (21 TWh/a) unter Berücksichtigung von Abgas, Abluft und Abwasser.

Für Frankreich hat [Berthou und Bory 2012] 70 Fragebögen zu Abwärme aus Ofen-Abgasen und 60 zu Dampf aus Trocknungsanlagen ausgewertet und die Ergebnisse auf Energieverbrauchsdaten des *Centre d'Etudes et de Recherches Economiques sur l'Energie* (CEREN) übertragen. Die CEREN-Daten decken dabei 70% der französischen Industrie ab. Dabei ergab sich ein Abwärmehaufkommen von ~360 PJ/a (100 TWh/a).

[element energy u. a. 2014] haben das technische und ökonomische Abwärmehaufkommen für das Vereinigte Königreich erhoben. Dazu wurde zunächst das theoretische Potenzial in einem kombinierten Top-Down/Bottom-Up-Ansatz abgeschätzt: 73 der größten Industriestandorte wurden mit Hilfe von Literaturwerten analysiert, das Ergebnis mit Experteneinschätzungen abgeglichen und anhand von 11 Einzelanalysen (Bottom-Up) unterstützt. Daraus ergab sich ein theoretisches Abwärmehaufkommen von 173 PJ/a (48 TWh/a), aufgeteilt in drei Temperaturbereiche (<250°C, 250-500°C und >500°C). Der größte Anteil der Abwärme (76 PJ/a) trat dabei in Form von Kühlwasser im Temperaturbereich unter 250°C auf. Mit Hilfe einer umfangreichen Datenbank die Abwärmequellen, Wärmebedarf und Nutzungstechnologien miteinander verknüpft wurde ein technisches Abwärmepotenzial von 40 PJ/a (11 TWh/a) berechnet sowie ein wirtschaftliches Potenzial von 25 PJ/a (7 TWh/a).

Die Stadt Wien erwähnt in einer von ihr veröffentlichten Broschüre zur Abwärme [Wien 2008], dass für die Stadt das Abwärmepotenzial mit einer kombinierten Top-Down-/Bottom-Up-Methode abgeschätzt wurde. Top-Down wurden dabei statistische Daten und Erfahrungswerte aus realisierten Abwärmeprojekten ausgewertet. Bottom-Up wurde mit Firmenbesuchen und Firmeninterviews das jeweilige Abwärmepotenzial erhoben. Detaillierte Angaben zum Vorgehen finden sich leider nicht. Als Ergebnis wurden jedoch das produzierende Gewerbe und die Industrie und private und öffentliche Dienstleister als große Abwärmepotenzialträger identifiziert. Als nutzbares Abwärmepotenzial aus der Sachgüterproduktion (vor allem Nahrungs- und Genussmittel, Fahrzeugbau, Chemie und Petrochemie sowie Papier- und Druckgewerbe) wird für die Stadt Wien 0,2-0,4 PJ/a (52-119 GWh/a) angegeben.

## 2.3 Forschungslücke

Wie [Bergmeier 2003] beschreibt, ist das Interesse an industrieller Abwärme nicht neu, sondern kam in Deutschland schon 1920 auf und hat seitdem mehrere Revivals erlebt. Trotzdem gibt es kaum aktuelle Angaben zum industriellen Abwärmehaufkommen. Diese Datenlücke wird auch von [Persson u. a. 2014; Utlu 2015; Hirzel u. a. 2013; BERR 2008] aufgezeigt und beklagt. Für Deutschland gibt es derzeit nur eine wissenschaftliche Veröffentlichung zum Abwärmehaufkommen [Persson u. a. 2014] sowie drei Werte aus Projektberichten [Pehnt u. a. 2010; Connolly u. a. 2013; Grote u. a. 2015]:

In dem Bericht der wissenschaftlichen Begleitforschung zur Klimaschutzinitiative 2010 ([Pehnt u. a. 2010]) wurden Werte aus Norwegen, den USA und Ergebnisse aus der Stadt Wien kombiniert, von Experten beurteilt und auf Deutschland übertragen. Im Temperaturbereich über 60°C wurde dar-

aus ein Abwärmeaufkommen von 476 PJ/a abgeschätzt. In der gleichen Größenordnung (525 PJ/a) wird das Abwärmeaufkommen in der zweiten Vorstudie zur *European Heat Roadmap* [Connolly u. a. 2013] angegeben, aber ohne die verwendete Methode zu beschreiben. Im Zusammenhang mit dem gleichen Projekt steht jedoch auch die wissenschaftliche Veröffentlichung [Persson u. a. 2014] aus dem letzten Jahr; allerdings mit einem rund 8% höheren Wert für das Abwärmeaufkommen von 566 PJ/a. Hier wurde der Wert auf  $CO_2$ -Emissionsdaten aus dem *“Pollutant Release and Transfer Register“ (E-PRTR)* basiert, aus dem der Primärenergiebedarf rückgerechnet wurde. Die Abschätzung der Abwärme wurde mit Sektorwirkungsgraden von 25% bzw. 10% getroffen und berücksichtigt nur die Sektoren Chemie und Petrochemie, Eisen und Stahl, Nicht-Eisen-Metalle, Steine und Erden, Papier und Lebensmittelindustrie. Die so gewonnene Abwärmeabschätzung soll die höchst mögliche Rückgewinnung berücksichtigen, kann und will aber ebenfalls nur eine erste Abschätzung sein [Persson u. a. 2014]. Auch [Grote u. a. 2015] machen nur einer erste Abschätzung des Abwärmeaufkommens und arbeiten dabei mit pauschal angenommenen Wirkungsgraden. Bei den Abwärmefaktoren besteht dabei, wie bei [Persson u. a. 2014], kein Bezug zu Literaturwerten.

Somit fehlt noch immer eine sorgfältige Erhebung der Abwärme in Deutschland. Bisherigen Arbeiten haben entweder mit pauschalen Faktoren gearbeitet [Persson u. a. 2014], die angezweifelt werden können, oder diese aus andern Ländern übertragen [Pehnt u. a. 2010]. Beide Verfahren bergen große Ungenauigkeiten, da im einen Fall stark pauschaliert wird und im anderen Fall nicht bekannt ist, inwieweit sich die industriellen Sektoren der Länder gleichen, und somit eine Übertragbarkeit rechtfertigen. Diese Verfahren können deshalb nur eine grobe erste Abschätzung liefern.

Diese Lücke soll in der vorliegenden Arbeit geschlossen werden. Hierzu wird in dieser Arbeit ein Verfahren vorgestellt mit dem reale Daten ausgewertet werden können und so das Abwärmepotenzial bestimmt. Dazu werden die von den Firmen verpflichtend berichteten Emissionsdaten nach dem Bundesimmissionsschutzgesetz (BimSchG) ausgewertet (siehe Kapitel 3.1). Bis auf Ungenauigkeiten bei der Erstellung der Daten in den Firmen handelt es sich um reale Abwärmewerte. Mit der in Kapitel 3.2 vorgestellten Methode werden diese Daten gefiltert, aufbereitet und ausgewertet. Es wird eine Methode vorgestellt, die nachvollziehbar ist, eine sichere untere Grenze liefert und auf andere Jahre übertragbar ist. Dadurch wird eine neue Qualität im Bereich der Angaben zum Abwärmepotenzial in Deutschland erreicht, die in dieser Form, in nur wenigen anderen Ländern (Norwegen, Schweden, Vereinigtes Königreich, Korea und das Baskenland) vorliegt.



Teil I

**Abschätzung des Abwärmepotenzials  
in Deutschland**



# Kapitel 3

## Erhebung theoretisches Potenzial

Im folgenden Kapitel soll ein Verfahren vorgestellt werden, um die in Deutschland vorhandenen Daten zum industriellen Abwärmeeufkommen auszuwerten. Dafür wird zunächst die verwendete Datenbasis beschrieben. Anschließend wird die entwickelte Methode vorgestellt sowie die damit gewonnenen Ergebnisse.

### 3.1 Datenbasis

Die vorliegenden Daten zur Bestimmung des Abwärmeeufkommens im produzierenden Gewerbe stammen aus der alle vier Jahre stattfindenden Emissionserhebung der Länder: Laut der Emissionserklärungsverordnung (11. BImSchV) müssen alle Betreiber von Anlagen, die nach der 4. BImSchV genehmigungspflichtig sind, alle 4 Jahre eine Emissionserklärung abgeben. Ausgenommen sind nur die unter §1 der 11. BImSchV aufgeführten Ausnahmen (siehe Punkt „Ausnahmen von der Berichtspflicht“). Die Emissionserklärung wird vom jeweiligen Bundesland aufgenommen, geprüft und verwaltet. Die Basis dieser Verordnung ist das BundesImmissionschutzgesetz (BImSchG). Der Zweck dieses Gesetzes ist es, das Entstehen schädlicher Umwelteinwirkungen durch Betriebe zu verhindern bzw. zu verringern (§1 BimSchG). Die entstehenden Emissionen können entweder durch Messungen, Berechnungen oder Schätzungen ermittelt werden (§5 11. BImSchV):

**Messungen** können als Einzelmessung oder als kontinuierlich fortlaufende Messung gemessen werden.

**Berechnungen** erfolgen durch die Verwendung von Emissionsfaktoren, Energie- und Massenbilanzen oder auf der Basis von Analyseergebnissen.

**Schätzungen** werden hingegen über Daten von Anlagen mit der gleichen Leistung oder Kapazität und vergleichbaren Betriebsbedingungen gemacht. Somit werden nicht die Emissionswerte einer konkreten Anlage verwendet.

Die herangezogenen Werte der Vergleichsanlage können wiederum Massenbilanzen, Messergebnisse oder Leistungs- und Auslegungsdaten sein (§ 5 11.BImSchV). Der Anteil der geschätzten und gemessenen Daten ist je nach Bundesland unterschiedlich: Für Mecklenburg Vorpommern wurden 2008 83% der Emissionsdaten berechnet, 10% gemessen und 7% geschätzt. In Sachsen wurden im gleichen Jahr 57% der Daten berechnet, 35% gemessen und 9% geschätzt.

#### 3.1.1 Genehmigungsbedürftige Anlagen

Alle genehmigungsbedürftigen Anlage müssen eine Emissionserklärung nach der 11.BImSchV auf Basis des BundesImmissionschutzgesetz (BimSchG) abgeben. Welche Anlagen genehmigungsbedürftig sind, ist in der 4. BImSchV aufgeführt. In 3.1 sind für jede Kategorie einige exemplarische Anlagen genannt. Bei den Bezeichnungen der Anlagen handelt es sich zum Großteil um wörtliche Übernahmen aus dem Gesetzestext (4. BImSchV, Stand 2007), bis auf Änderungen zur besseren

Verständlichkeit. Eine vollständige Liste ist im Anhang zur 4. BImSchV zu finden (4. BImSchV, Stand 2007).

In den meisten Kategorien gibt es einen Grenzwert, unter dem die Anlagen nicht berücksichtigt werden. Diese Bagatellgrenze wird im folgenden Kapitel erläutert.

### 3.1.2 Die Bagatellgrenze: Ausnahmen von der Berichtspflicht

Die in 3.1.1 aufgeführten Anlagen sind die Anlagen, die generell nach der 4. BImSchV genehmigungsbedürftig sind. Unter die 11. BImSchV fallen die Anlagen jedoch nur, wenn sie mindestens 12 Monate am selben Standort betrieben werden oder unter Kategorie 8 („Verwertung und Beseitigung von Abfällen und sonstigen Stoffen“) fallen. In einigen Fällen ist die Berichtspflicht neben der Begrenzung durch einen Schwellwert auf gewerbliche Nutzung begrenzt (vgl. §1 11. BImSchV). Neben höheren Grenzwerten für die Emissionserklärung als für die Genehmigungspflicht gibt es auch einige weitere Ausnahmefälle, bei denen die Erklärungspflicht aufgehoben wurde: Zum Beispiel sind Windkraftanlagen mit einer Gesamthöhe von mehr als 50 Metern genehmigungsbedürftig, eine Emissionserklärung muss jedoch nicht abgegeben werden. Die weiteren Ausnahmen sind im Folgenden aufgeführt:

- Elektromsppannanlagen
- Anlagen zur Herstellung von Formstücken unter Verwendung von Zement oder anderen Bindemitteln
- Anlagen, die aus einem oder mehreren maschinell angetriebenen Hämmern oder Fallwerken bestehen
- Anlagen zur Herstellung oder Reparatur von Blechbehältern oder Containern
- Anlagen zur Herstellung von Stahlrohren
- Anlagen zum Bau von Schienenfahrzeugen
- Anlagen zur Herstellung von Metallpulver durch Stampfen
- Anlagen für den Bau und die Montage von Kraftfahrzeugen oder deren Motoren
- Anlagen für den Bau und die Instandsetzung von Luftfahrzeugen
- Anlagen zur Herstellung von Schmierstoffen
- Anlagen zur Herstellung von Papier, Karton oder Pappe mit einer Produktionsleistung von weniger als 20 t/d
- bei Anlagen zum Halten oder zur Aufzucht von Geflügel, Pelztieren, Rindern oder Schweinen sind nur Betriebe mit mehr als 40.000 Hennen-, Junghennen-, Mastgeflügel- oder Truthühnermastplätzen berichtspflichtig
- Anlagen zum Schlachten von Tieren
- Anlagen zur Herstellung von Fleisch- oder Gemüsekonserven
- Anlagen zum Räuchern von Fleisch- oder Fischware mit mehr als 75 t geräucherter Ware pro Tag
- Anlagen zur Trocknung von Grünfütter
- Brauereien mit weniger als 3000 Hektolitern Bier pro Tag
- Anlagen zur Herstellung von Speisewürzen mit weniger als 75 t bzw. 300 t Speisewürze pro Tag bei der Herstellung aus tierischen bzw. pflanzlichen Rohstoffen

Tabelle 3.1: Beispiele genehmigungsbedürftiger Anlagen nach 4. BImSchV

Kategorie	Beispielanlagen
Wärmeerzeugung, Bergbau, Energie	Anlagen zur Erzeugung von Strom, Dampf, Warmwasser, Prozesswärme oder erhitztem Abgas Verbrennungsmotoren zum Antrieb von Arbeitsmaschinen Gasturbinenanlagen zum Antrieb von Arbeitsmaschinen
Steine und Erden, Glas, Keramik, Baustoffe	Steinbrüche Anlagen zur Herstellung von Zementklinker oder Zement Anlagen zur Herstellung von Glas Anlagen zum Brennen keramischer Erzeugnisse oder zum Schmelzen mineralischer Stoffe
Stahl, Eisen und sonstige Metalle einschließlich Verarbeitung	Anlagen zum Rösten, Schmelzen und Sintern von Erzen Anlagen zum Herstellen und Schmelzen von Roheisen oder Stahl Anlagen zum Schmelzen, Legieren oder zur Raffination von Nicht-Eisenmetallen Gießereien Anlagen zur Oberflächenbehandlung Anlagen zum Umformen und Verarbeiten von Metallen
Chemische Erzeugnisse, Arzneimittel, Mineralölraffination und Weiterverarbeitung	Anlagen zur Herstellung von Stoffen durch chemische Umwandlung Herstellung von Grundarzneimitteln Destillation und Raffination von Erdöl oder Erdölerzeugnissen Herstellung von Lacken und Pflanzenschutzmitteln
Oberflächenbehandlung mit organischen Stoffen, Herstellung von bahnenförmigen Materialien aus Kunststoffen, Sonstige Verarbeitung von Harzen und Kunststoffen	Anlagen zum Beschichten, Imprägnieren, Kaschieren, Lackieren oder Tränken von Gegenständen
Anlagen zur Verarbeitung von Polyester- oder Epoxidharzen Holz, Zellstoff	Anlagen zur Gewinnung von Zellstoffen aus Holz Anlagen zur Herstellung von Papier, Karton oder Pappe Anlagen zur Herstellung von Holzfaserplatten
Nahrungs-, Genuss- und Futtermittel, landwirtschaftliche Erzeugnisse	Anlagen zum Halten oder zur Aufzucht von Tieren Anlagen zum Schlachten von Tieren Erzeugung von Speisefetten Herstellung von Fleisch- oder Gemüsekonserven Räucheröfen Trocknungsanlagen Brauereien
Anlagen zum Rösten von Kaffee, Kaffee-Ersatzprodukten, Getreide, Kakao oder Nüssen Verwertung und Beseitigung von Abfällen und sonstigen Stoffen	Anlagen zur thermischen Verwertung/Verbrennung z.B. von Holzabfall, Altöl oder Deponiegas Kompostierungsanlagen
Lagerung, Be- und Entladung von Stoffen und Zubereitungen	Anlagen zur Lagerung von chemischen Erzeugnissen
Sonstiges	Anlagen zur Vorbehandlung oder zum Färben von Fasern und Textilien Prüfstände für oder mit Verbrennungsmotoren ständige Teststrecken für Kraftfahrzeuge

- Anlagen zum Rösten oder Mahlen von Kaffee (inkl. Abpackung), Kaffee-Ersatzprodukten, Getreide, Kakaobohnen oder Nüssen mit weniger als 300 t gerösteten Erzeugnissen pro Tag
- Anlagen zur Herstellung von Süßwaren oder Sirup mit einer Produktionsleistung von mehr als 75 t (tierische Rohstoffe) bzw. 300 t (pflanzliche Rohstoffe) pro Tag
- Anlagen zur Behandlung oder Verarbeitung von Milch
- Anlagen zum Befeuchten oder Trocknen von Tabak
- Anlagen zur Sortierung von Hausmüll
- Anlagen zur Erzeugung von Kompost
- Anlagen zur biologischen Behandlung von Abfällen
- Anlagen zum Lagern und Zerkleinern von Schrott
- Anlagen zur physikalisch-chemischen Behandlung von Abfällen
- Anlagen zur Behandlung von gefährlichen Abfällen
- Anlagen zur zeitweiligen Lagerung von gefährlichen Abfällen und Schlämmen
- Anlagen zum Lagern von gefährlichen und nicht gefährlichen Abfällen
- Anlagen der Kategorie 9 „Lagerung, Be- und Entladen von Stoffen und Zubereitung“ mit Ausnahme von Anlagen zur Lagerung von mehr als 5000 t bzw. 10000 t brennbarer Flüssigkeit je nach Flammpunkt, und Anlagen zum Be- und Entladen von staubenden Schüttgütern, wenn mehr als 400 t pro Tag bewegt werden (Ausnahme Erdaushub und Gestein bei der Gewinnung von Bodenschätzen sowie Getreide, Ölsaaten oder Hülsenfrüchte)
- Anlagen zur Herstellung, Bearbeitung, Verarbeitung, Wiedergewinnung oder Vernichtung von explosionsgefährlichen Stoffen
- Anlagen zur Herstellung von Zellhorn
- Anlagen zur Herstellung von Zusatzstoffen zu Lacken oder Druckfarben
  
- Anlagen zum Schmelzen oder Destillieren von Naturasphalt
- Pechsiedereien
- Prüfstände für oder mit Verbrennungsmotoren mit einer Feuerungswärmeleistung von weniger als 10 MW oder Gasturbinen/Triebwerke mit weniger als 100 MW
- Renn- oder Teststrecken für Kfz
- Schießstände für Handfeuerwaffen
- Kälteanlagen

Sind Anlagenteile oder Nebeneinrichtungen trotzdem erklärungs-pflichtig, so muss die Emissionserklärung nur für diesen Teil geben werden.

Zur Einordnung der Bagatellgrenzen: Anlagen zum Rösten oder Mahlen von Kaffee müssen erst ab einer Produktionsmenge von 300 t pro Tag einen Emissionsbericht abgeben. Laut dem Deutschen Kaffeeverband lag die Jahresproduktion von Röstkaffee in Deutschland in 2012 bei 402.000 t [Kaffeeverband 2014]. Umgerechnet auf 365 Tage ist das im Mittel eine tägliche Produktionsmenge von 1101 t Kaffee pro Tag. Dieser Wert bezieht sich auf die Produktion für alle deutschen Kaffeeröstereien zusammen. Eine Rösterei die nicht unterhalb der Bagatellgrenze liegt müsste somit mehr als

Tabelle 3.2: Daten aus Emissionserklärungen

Zuordnung	Daten
Abgas	Temperatur, Volumenstrom, Betriebsdauer, Betriebs-ID, Betriebsart
Brennstoff	Bezeichnung, Brennwert, eingesetzte Menge/Masse, Betriebs-ID
Betrieb	Betriebs-ID, Sektor nach WZ 2008/NACE

1/4 der gesamten täglichen Produktionsmenge in Deutschland verarbeiten. Oder anders gesagt: In ganz Deutschland fallen maximal 3 Röstereien unter die Berichtspflicht, 4 wenn man nur von 300 Arbeitstagen ausgeht.

### 3.1.3 Auswertungsebene

In der Emissionserklärung wird jede Emissionen verursachende Anlage einzeln aufgeführt. Eine so große Genauigkeit ist für ein bundesweite Erhebung nicht notwendig. In einigen Fällen ist eine Analyse auf *Anlagenebene* sogar kontraproduktiv: Eine wirkliche Trennung der Produktionsprozesse innerhalb eines Werks bzw. innerhalb eines Betriebes in einzelne Anlagen bzw. die Zuteilung der Emissionen und des Brennstoffverbrauchs zu den Anlagen ist oftmals nur theoretisch bzw. rechnerisch möglich (z.B. bei kaskadischer Energienutzung). Durch diese Scheingenauigkeit können bei der Plausibilitätsanalyse Ungereimtheiten auftreten, die dann zu einem Ausschluss der Daten führen würden. Deshalb werden die Daten nur auf *Betriebsebene* analysiert.

### 3.1.4 Vorliegende Daten

In 3.2 sind die aus den Emissionserklärungen verwendeten Daten aufgeführt. Die Daten liegen auf Betriebsebene für das Jahr 2008 vor für alle Bundesländer außer dem Saarland. Die zuständige Behörde konnte leider die Daten nicht zur Verfügung stellen.

Die Daten wurden von den in 3.3 gelisteten Ministerien und Ämtern zur Verfügung gestellt.

Für die einzelnen Betriebe liegen die Abgasvolumenströme und deren Temperaturniveau sowie die Betriebsstunden vor. Außerdem liegen Angaben zu der Art und Menge des in dem Betrieb eingesetzten Brennstoffs vor. Es werden die Sektoren des verarbeitenden Gewerbes betrachtet. Diese fallen nach WZ2008 unter den Abschnitt C, Sektor 10 bis 33 (siehe Einleitung). Die WZ2008 Klassifizierung ist die nationale Version des Europäischen NACE Code (Nomenclature statistique des activités économiques dans la Communauté européenne) und verwendet die gleichen Sektorabgrenzungen mit deutschen Bezeichnungen. Zur Bestimmung der Abwärmemenge, die im produzierenden Gewerbe in Deutschland entsteht, werden Daten der Sektoren 10-33 (ohne 19) aus der Emissionserklärung 2008 auf Basis der 11. BImSchV für die einzelnen Bundesländer ausgewertet. Dabei werden nur Emissionsvorgänge im Normalbetrieb mit mindestens 10 Betriebsstunden und einem minimalen Abgasvolumenstrom von 10 m<sup>3</sup>/h berücksichtigt.

## 3.2 Methode

Die hier vorgestellte Methode wurde in wesentlichen Teilen zuvor in [Brückner u. a. 2015] veröffentlicht.

Wie im vorherigen Kapitel erläutert, handelt es sich bei den genutzten Daten nicht um Werte die erhoben werden um Aussagen zum Abwärmeaufkommen zu machen, sondern um Angaben zum Emissionsschutz. Die Daten werden somit zweckentfremdet. Deshalb muss jedoch ein besonderes Augenmerk auf die Plausibilität und Verwendbarkeit der einzelnen Datensätze gelegt werden. Die dazu gefundenen Kriterien werden im Folgenden vorgestellt. In einem zweiten Schritt kann dann aus den geprüften Daten das Abwärmeaufkommen der Industriebetriebe errechnet werden. Insofern handelt es sich um einen zweistufigen Prozess:

Tabelle 3.3: Quellennachweis Emissionsdaten 2008

Bundesland	Datenquelle
Baden-Württemberg	Landesamt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
Bayern	Bayerisches Landesamt für Umwelt
Brandenburg	Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz
Berlin	Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt
Bremen	Senator für Umwelt, Bau und Verkehr
Hamburg	Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt
Hessen	Hessisches Emissionskataster Industrie 2008 - Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie
Mecklenburg-Vorpommern	Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern
Niedersachsen	Niedersächsisches Ministerium für Energie, Umwelt und Klimaschutz
Nordrhein-Westfalen	Landesamt für Umwelt
Rheinland-Pfalz	Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht
Sachsen	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
Sachsen-Anhalt	Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt
Schleswig-Holstein	Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume
Thüringen	Thüringer Landesamt für Umwelt und Geologie

1. Datenverwertbarkeit und Plausibilitätstest:  
Datenaufbereitung, Standardisierung und Prüfung auf Plausibilität und Verwertbarkeit
2. Abwärmeaufkommen Industriebetriebe:  
Bestimmung des Abwärmeaufkommens der in der Datenbasis vorhandenen Industrieunternehmen als Bottom-Up-Berechnung.

### 3.2.1 Datenauswertung und Plausibilitätstest

In dem schon beschriebenen Projekt „HERAKLES“ [Drath 2002; Kattenstein u. a. 2002] in NRW aus dem Jahr 2002 wurden ebenfalls die Emissionsdaten die nach der 11. BImSchV erhoben wurden, genutzt um eine Abschätzung des Abwärmeaufkommens in Nordrhein-Westfalen zu treffen. Allerdings wurden dabei nur die Betriebe und Daten der Stadt Duisburg ausgewertet und die Werte auf Landesebene mit Hilfe von den aus der Stadtanalyse gewonnenen Kennzahlen extrapoliert. Da es sich bei dem verwendeten Datensatz nur um 41 Arbeitsstätten (also Betriebe) mit insgesamt 409 Emissionsvorgängen handelt, konnte die Auswertung und Überprüfung der Daten noch manuell und ohne Auswertungssystematik erfolgen. Die Plausibilität der Daten konnte und wurde empirisch geprüft und ggf. durch Nachfragen beim jeweiligen Betrieb oder Annahmen von Daten aus vergleichbaren Firmen ergänzt oder korrigiert. In der vorliegenden Arbeit werden erstmals reale Datensätze für ganz Deutschland ausgewertet. Eine solche manuelle Überprüfung der Daten ist bei einer Auswertung der gesamtdeutschen Daten (ohne das Saarland) mit mehreren tausend Datensätzen nicht möglich. Tabelle 3.4 zeigt eine Übersicht über die Anzahl der ausgewerteten Emissionsvorgängen aus den einzelnen Bundesländern (außer Saarland).

Zusätzlich verhindern die geltenden Datenschutzbestimmungen die Offenlegung der Firmennamen. Deshalb wurde eine Systematik zur Überprüfung der anonymen Daten entwickelt. Schematisch wird diese in Abbildung 3.2 dargestellt und später detaillierter erläutert. Als Datensatz werden in

Tabelle 3.4: Anzahl der ausgewerteten Emissionsvorgänge je Bundesland; Insgesamt wurden über 80.000 Emissionsvorgänge ausgewertet.

Bundesland	#Anzahl Emissionsvorgänge
Baden-Württemberg	12422
Bayern	2532
Brandenburg	778
Berlin	3147
Bremen	645
Hamburg	1252
Hessen	4199
Mecklenburg-Vorpommern	9141
Niedersachsen	1259
Nordrhein Westfalen	19100
Rheinland-Pfalz	6451
Sachsen	13529
Sachsen-Anhalt	2666
Schleswig-Holstein	3892
Thüringen	429
<b>Summe</b>	<b>81442</b>

der folgenden Beschreibung alle Daten eines Betriebes verstanden, also seine verschiedenen Abgas- und Brennstoffströme sowie Daten zur Sektorzugehörigkeit. Da die Daten -wie schon erläutert- für die Bestimmung des Abwärmeaufkommens zweckentfremdet werden, müssen sie vor der Auswertung auf Plausibilität und Verwertbarkeit geprüft werden. Bei der großen Anzahl an ausgewerteten Daten ist es nicht möglich im Einzelfall zu prüfen, ob die Daten richtig sind. Darüber könnte nur eine Messung vor Ort beim jeweiligen Betrieb Auskunft geben, und auch eine solche Messung ist fehlerbehaftet. Die einzige Option ist deshalb die Überprüfung der Daten auf Plausibilität und das Ausschließen fehlerhafter Angaben. Dazu wurde ein Verfahren zur Plausibilitätsprüfung der Daten entwickelt, das im Folgenden vorgestellt werden soll. Dabei wurden 6 häufige Fehler identifiziert und die vorliegenden Daten daraufhin getestet und Maßnahmen getroffen um trotzdem zu einem belastbaren Ergebnis zu kommen. Fehlerhafte oder wahrscheinlich fehlerhafte Datensätze wurden dazu aussortiert. Die Analyse hat gezeigt, dass gut 40% der in den Daten angegebenen Brennstoffenergie auf Grund von Fehlern aussortiert werden musste. Das zeigt, wie wichtig die sorgfältige Prüfung der Eingangsdaten ist. Ohne diese Überprüfung wären die Ergebnisse, auf Grund der großen Fehlerzahl, nicht belastbar. Die häufigsten Fehler sind:

- F1 Uneindeutige Zusortierung eines Betriebes zu einem Sektor
- F2 Unvollständige Datensätze: keine Angabe zur Brennstoffart und/oder zum Heizwert
- F3 unplausible Temperaturen
- F4 Datensatz des Betriebes inkonsistent: Abwärmeenergie übersteigt Brennstoffenergie
- F5 Fehlende Unterscheidung zwischen Brennstoff und Produktrohstoff
- F6 angegebene Brennstoffmenge übersteigt den Endenergieverbrauch des Landes

#### **F1** Uneindeutige Zusortierung eines Betriebes zu einem Sektor

Eine nicht eindeutige Zusortierung zu einem Sektor kann zum Einen vorliegen, wenn kein Sektor angegeben ist. Zum Anderen sind bei einigen Betrieben mehrere Sektoren angegeben. Zur Berechnung des Abwärmeaufkommens können diese Betriebe genutzt werden, solange sie ansonsten plausibel sind und sichergestellt ist, dass sie durch die doppelte Zusortierung nicht doppelt gerechnet werden. Solche uneindeutigen Zusortierungen sind in drei der fünfzehn untersuchten Bundesländer aufgetreten. In zwei davon war der Einfluss der Doppelung mit unter 1% des Endenergieverbrauchs des Landes sehr gering. Im letzten Fall entsprach die uneindeutige Zusortierung der Energie jedoch in Summe 10%

Tabelle 3.5: Typische Heizwerte von Brennstoffen aus [Lucas 2004]

Brennstoff	Heizwert	Einheit
CH <sub>4</sub>	50012	kJ/kg
Benzin	42000	kJ/kg
Diesel	42000	kJ/kg
Braunkohle	8000	kJ/kg
Steinkohle	32000	kJ/kg
Heizöl EL	42000	kJ/kg
Holz	15000	kJ/kg

des Endenergiebedarfs. Zur Berechnung der Kennzahlen dürfen die nicht eindeutigen Sektoren nicht verwertet werden, da eine Aufteilung von Brennstoff und Abwärme des entsprechenden Betriebes auf unterschiedliche Sektoren nicht möglich ist.

### F2 keine Angabe von Brennstoffart und/oder Heizwert

Eine Chance Datensätze zu korrigieren und so doch noch für die Auswertung nutzen zu können besteht teilweise, wenn Angaben zum Heizwert fehlen: Bei Datensätzen mit einer eindeutigen Brennstoffbezeichnung (z.B. Braunkohle) die keinen Heizwert angegeben haben, kann dieser noch manuell ergänzt werden. Dafür wurden typische Heizwerte für den jeweiligen Brennstoff aus der Literatur verwendet (Vgl. Tabelle 3.5).

Für Braunkohlenstaub wurden ein Heizwert von 22000 kJ/kg [Konstantin 2009] angenommen. In einigen Fällen konnten die Daten zum Heizwert auch durch Angaben des gleichen Betriebs für einen anderen Brennstoffstrom mit gleicher Brennstoffbezeichnung oder von ähnlichen Betrieben übernommen werden (z.B.: Biogas 25000 kJ/kg, Methanol 14000 kJ/kg). Bei unspezifischen Brennstoffangaben wie „Abfall“ oder „Synthesegas“ war die Ergänzung durch Standardwerte aus der Literatur nicht möglich. Wenn eine Ergänzung nicht möglich war oder wenn weder eine eindeutige Bezeichnung des Brennstoffs noch ein Heizwert vorlagen, musste der Betrieb als ungültig gewertet werden. Das gleiche gilt für Betriebe, bei denen gar keine Angaben zum Brennstoffverbrauch vorlagen. Für diese Betriebe ist es nicht möglich zu überprüfen, ob der Datensatz und die enthaltenen Angaben sinnvoll sind.

### F3 unplausible Temperaturen

Ebenso als ungültig gewertet wurden Datensätze mit Abluft- oder Abgastemperaturen von 0°C oder weniger, da diese Temperaturen nicht sinnvoll sind und in der Regel durch Default-Werte zustande kommen. Außerdem werden nur Abgasströme ausgewertet, deren Temperatur über 35°C liegt. In Hamburg (als Beispiel für einen geringen Wert) waren knapp 6,5% der Abgasströme ohne Informationen zur Temperatur bzw. mit Temperaturen von 0°C oder weniger. In Baden-Württemberg, als Spitzenwert, lag diese Quote sogar bei 67%.

### F4 Datensatz des Betriebes inkonsistent: Abwärmeenergie übersteigt Brennstoffenergie

Ein weiteres Plausibilitätskriterium ist die Überprüfung, dass der Energiegehalt des in dem Betrieb verwendeten Brennstoffs in einem Jahr größer ist als die entstehende Abwärme. Nach dem 1. Gesetz der Thermodynamik, dem Energieerhaltungssatz, sollte keine Energie verloren gehen und die eingesetzte Energie der entstehenden Abwärme entsprechen. In der hier betrachteten Auswertung wird jedoch nur gebundene Abwärme über 35°C berücksichtigt. Über Strahlung oder Konvektion an die Umgebung abgegebene Wärme fehlt in der Betrachtung. Deshalb ist die Bilanz auf der Abwärmeseite nicht geschlossen und es kann mehr Energie zugeführt werden, als als Abwärmestrom ausgewertet wird. Dass mehr Abwärme als Eingangsenergie entsteht ist jedoch in der Regel nicht plausibel. Diese Betriebe werden deshalb in der Auswertung nicht berücksichtigt. In einzelnen Ausnahmefällen führt

dieses Kriterium zu einem fehlerhaften Aussortieren von Betrieben: Besonders in der Chemieindustrie kann durch exotherme Prozesse ein Überschuss an Abwärme entstehen, da die Stoffe auf der Produktionsseite nicht in die Energiebilanz einbezogen werden. In der Auswertung kann dies bei 26 Betrieben der Fall sein, die zusammen eine Abwärmemenge von 0,023 PJ/a produzieren. Eine weitere mögliche Fehlerquelle bei diesem Kriterium: Auf der Eingangsseite wird der elektrische Strom, der in die Betriebe und Prozesse einfließt, nicht berücksichtigt. Der elektrische Wirkungsgrad ist in den meisten Fällen sehr hoch und die verbleibende entstehende Abwärme wird meist über Strahlung an die Umgebung abgegeben und ist nicht nutzbar [Blesl u. a. 2011]. Ausnahmen sind Prozesse wie das elektrische Schmelzen von Aluminium. Diese Betriebe würden den Plausibilitätstest in der Regel nicht bestehen und dementsprechend fehlerhaft aussortiert. Da es sich bei dem Ziel der Auswertung jedoch um einen unteren gesicherten Grenzwert handelt, liegt der Fehler auf der sicheren Seite.

#### **F5** Fehlende Unterscheidung zwischen Brennstoff und Produktrohstoff

Ein ähnliches Problem tritt im Sektor 19 „Kokerei und Mineralölverarbeitung“ auf, unter den u.a. Raffinerien fallen. Hier wird in vielen Fällen beim verwendeten Brennstoff nicht zwischen dem Einsatz als Rohstoff für die Weiterverarbeitung und dem reinen energetischen Einsatz unterschieden. Auch aus diesem Grund wird der Sektor 19 in der Auswertung nicht betrachtet. Zum anderen kann argumentiert werden, dass der Sektor 19 eher in den Bereich der Umwandlungsbilanzen fällt und nicht in den Bereich der Endenergienutzung. Dieser Argumentation folgen auch die Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen ([www.AGEB.de](http://www.AGEB.de)) und der Arbeitskreis der Umweltökonomischen Gesamtrechnungen der Länder ([www.UGRDL.de](http://www.UGRDL.de)) bei der Aufstellung der offiziellen Energiebilanzen. Auch hier muss auf das Ziel der Auswertung, einen konservativen, gesicherten unteren Grenzwert des Abwärmeaufkommens in der deutschen Industrie zu erhalten, verwiesen werden.

#### **F6** Angegebene Brennstoffmenge übersteigt den Endenergieverbrauch des Landes

In einigen Fällen muss vermutet werden, dass bei der Datenangabe ein Fehler bei der Eingabe z.B. der Einheiten gemacht wurde. So finden sich Betriebe, deren Brennstoffenergieverbrauch größer ist als der vom Länderarbeitskreis der AGEB ([www.lak-energiebilanzen.de](http://www.lak-energiebilanzen.de)) angegebene Endenergieverbrauch des Bundeslandes oder knapp darunter. Bei einer Überschreitung wurden die Betriebe als ungültig gewertet (insgesamt 3 Betriebe). Eine differenziertere Betrachtung ist bei Betrieben notwendig, die zwar einen extrem hohen Brennstoffverbrauch aufweisen, aber noch unterhalb des Endenergieverbrauchs des Landes liegen. Durch die anonymisierten Daten besteht hier die Gefahr, Großkonzerne, die auf Grund ihrer Größe den Endenergieverbrauch eines Landes dominieren mit fehlerhaften Datensätzen zu verwechseln. Dazu wurden die Endenergiebilanzen der Länder herangezogen [LAK 2014], die eine Aufschlüsselung nach Sektoren aufweisen und untersucht, was der Anteil am Gesamtendenergiebedarf des Landes vom energietechnisch größten Sektor ist. Das Ergebnis ist in Abbildung 3.1 dargestellt.

Die größte Dominanz zeigt sich hier in Bremen, dessen Endenergieverbrauch mit 83% vom Sektor 24 „Metallerzeugung und -bearbeitung“ dominiert wird. Werden für diesen Sektor die Daten aus den Emissionserklärungen analysiert, zeigt sich das der Sektor durch einen einzelnen Betrieb dominiert wird, ebenfalls mit einem Anteil von etwa 83%. Dieser Betrieb hat am Landesendenergieverbrauch einen Anteil von 58%. Dies kann also als ein Indiz für eine normale Dominanz gewertet werden. Deshalb wird als Kriterium für einen ungültigen Betrieb neben einer Dominanz des Betriebs am Sektor von über 90% zusätzlich eine Dominanz des Sektors am Landesverbrauch von mindestens 80% gefordert. Bei den zwei Betrieben, auf die das Kriterium zutraf, lag der Anteil der Betriebe am Landesverbrauch bei über 79%.

Zur Auswertung des Abwärmeaufkommens werden die Daten aus den Emissionserklärungen anhand der beschriebenen Fehler auf Plausibilität geprüft. Die dafür verwendete Systematik ist in Abbildung 3.2 veranschaulicht. Dabei werden die Eingangsdaten zunächst vereinheitlicht und die Daten heraus gefiltert, die nicht den Grundannahmen entsprechen (nur Anlagen im Normalbetrieb mit über 10 Betriebsstunden pro Jahr und mindestens 10 m<sup>3</sup>/h Volumenstrom). Daraus ergeben sich die Daten für die teil-automatisierte Auswertung. Danach werden die Daten zunächst in sich

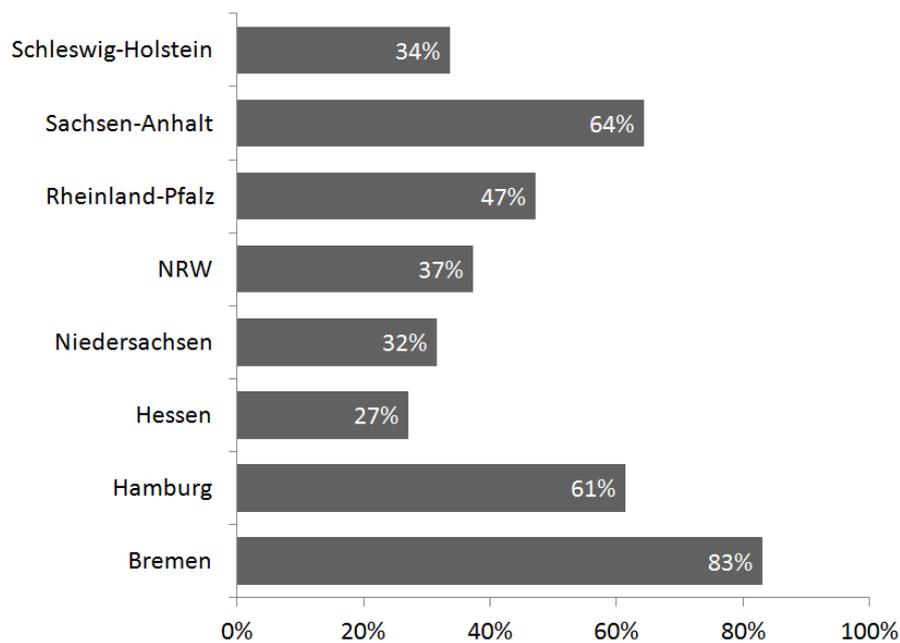


Abbildung 3.1: Anteil des stärksten Sektors am Landesendenergieverbrauch der Industrie für ausgewählte Bundesländer, veröffentlicht in [Brückner u. a. 2015]: Der größte Anteil eines Sektors am Landesendenergieverbrauch tritt mit über 80% in Bremen auf

geprüft (Fehler F1 bis F3), dann auf Ebene des Betriebs (Fehler F4 und F5) und anschließend auf Landesebene (Fehler F6).

### 3.2.2 Abwärmeaufkommen Industriebetriebe (Bottom-Up-Analyse)

Nach der Prüfung der Daten auf Plausibilität kann das industrielle Abwärmeaufkommen aus den ausgewerteten Betrieben bestimmt werden. Dafür wird für jeden Abgasstrom die enthaltene Abwärme berechnet:

$$Q_{gas} = \dot{V}_{gas} * \rho_{gas} * c_{p,gas} * \Delta T \quad (3.1)$$

mit

$$\Delta T = T_{gas} - T_0 \quad (3.2)$$

Die Referenztemperatur  $T_0$  wird dabei mit  $35^\circ\text{C}$  angenommen. Unter  $35^\circ\text{C}$  ist eine sinnvolle technische Nutzung der Abwärme ohne Wärmepumpe in der Regel nicht möglich. Ausnahmen sind die Nutzung zur Erderwärmung in der Landwirtschaft oder Fischzucht (vgl. [Sollesnes und Helgerud 2009]), die aber als solche hier nicht betrachtet werden sollen. Diese Anwendungen haben, ebenso wie Niedertemperatur-Heizanwendungen von Gebäuden, nur in den Übergangs- und Wintermonaten bedarf. Die industrielle Abwärme fällt jedoch auch im Sommer an. Deshalb sollen hier nur Anwendungsfälle mit ganzjährigem Bedarf betrachtet werden. Und unter  $35^\circ\text{C}$  wird die Abgabe der Abwärme an die Umgebung im Sommer sehr schwierig und die Arbeitsfähigkeit somit sehr gering. Selbst große und optimierte Kühltürme wie die des Kernkraftwerks Isar II können im Sommer die Abwärme bei minimal  $30^\circ\text{C}$  abgeben (Information Werksbesichtigung Isar II, Sommer 2011). Deshalb erscheint eine Referenztemperatur von  $35^\circ\text{C}$  sinnvoll.

Zur Vereinfachung der Abwärmeberechnung wurden in einem ersten Ansatz eine konstante Wärmekapazität und Dichte des Abgasstromes angenommen. Dies basiert auf der Annahme, dass sich die Abgaszusammensetzung für die unterschiedlichen Brennstoffe zwar ändert, in jedem Fall aber im Bezug auf Wärmekapazität und Dichte von Stickstoff dominiert wird. Dieser Ansatz wurde von [Gebhardt 1999; Drath 2002; Kattenstein u. a. 2002] aufgestellt und validiert. Dementsprechend werden

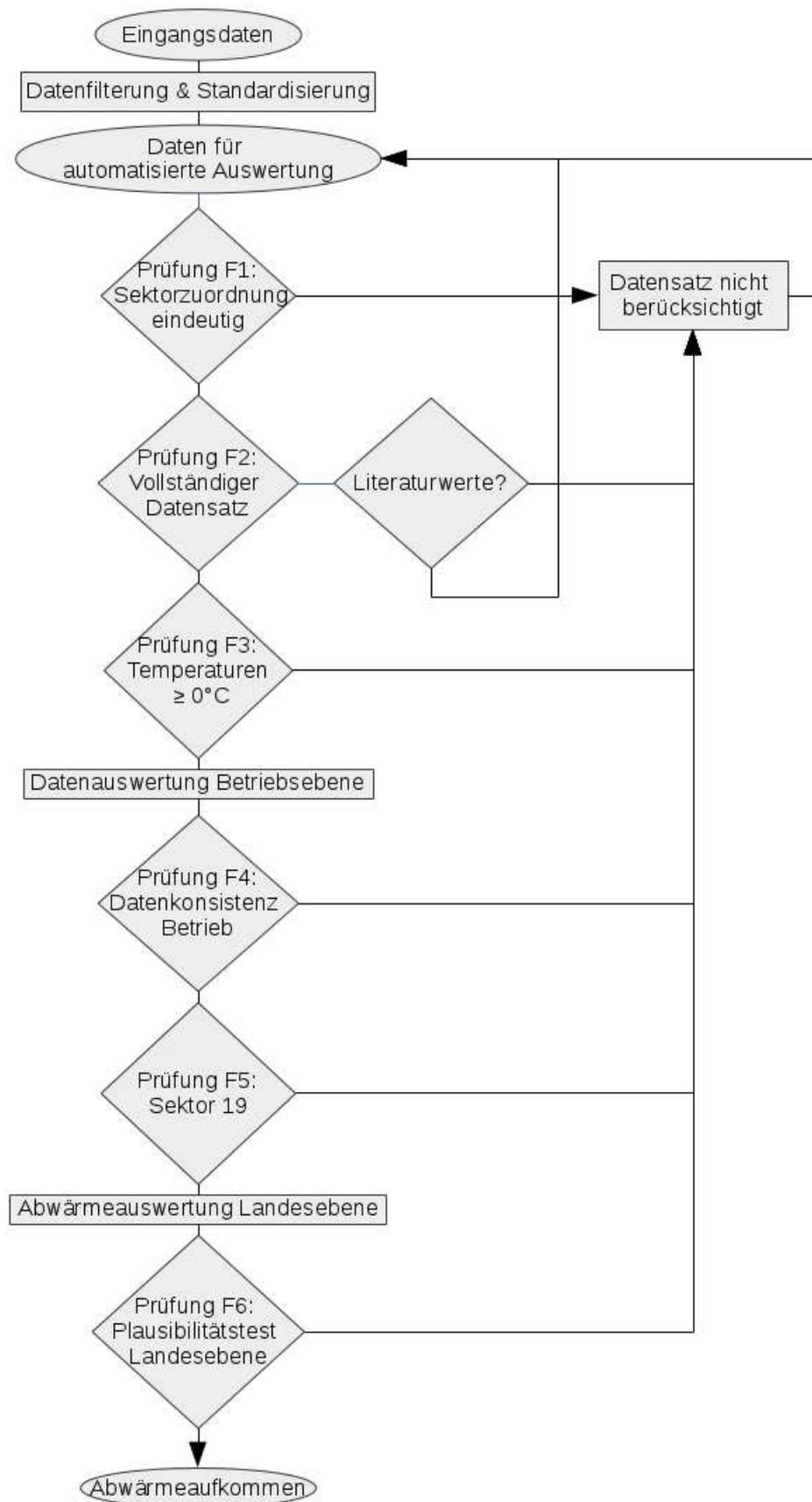


Abbildung 3.2: Verfahrensschema Datenauswertung mit verschiedenen Plausibilitätstests

die folgenden Werte angenommen:

$$c_{p,gas} = 1,007 \text{kJ/kgK} \quad (3.3)$$

$$\rho_{gas} = 1,293 \text{kg/m}^3 \quad (3.4)$$

Der Einfluss der Temperaturabhängigkeit der Dichte des Abgasstroms wird in Kapitel 3.5.1 untersucht und diskutiert. Die Dichte von reinem Stickstoff liegt unter den hier angenommen Werten. Die Dichte von  $CO_2$  jedoch darüber.

Um den angenommenen Wert für die Wärmekapazität zu bewerten wurde eine konservative Abschätzung der Wärmekapazität für Heizöl und Erdgas vorgenommen. Dafür wird angenommen, dass Erdgas im Wesentlichen aus  $C_1H_4$  bis  $C_3H_8$  und Heizöl aus  $C_9H_9$  bis  $C_{22}H_{46}$  bestehen. Bei einer vollständigen Verbrennung mit Luftüberschuss ( $\lambda=1,1$ ) zu  $CO_2$  und  $H_2O$  ergeben sich Volumenanteile im Abgas von 6,3 bis 12,7%  $CO_2$  bzw. 6,3% bis 12,7%  $H_2O$ . Für eine Referenztemperatur von  $50^\circ C$  liegt damit die Wärmekapazität im Bereich 1,03 bis 1,08  $kJ/(kg * K)$ . Der angenommene Wert ist somit eher niedrig und das resultierende Abwärmefaktor konservativ abgeschätzt. Siehe dazu auch Kapitel 9.2.1.

Alle Abwärmeströme eines Betriebs werden auf Betriebsebene zusammengefasst, da auf dieser Ebene die Informationen zum Brennstoffverbrauch vorliegen:

$$Q_{AW,BE} = \sum_a Q_{gas} \quad (3.5)$$

Dabei ist  $Q_{AW,BE}$  die Abwärmeenergie des Betriebs,  $Q_{gas}$  die Wärmeenergie des einzelnen Abgasstroms und  $a$  die Anzahl der Abgasströme die zum betrachteten Betrieb gehören.

Die Brennstoffenergie wird berechnet über

$$Q_{Br,BE} = \sum_t m_{Br} * H_u \quad (3.6)$$

Dabei ist  $t$  die Anzahl der Brennstoffströme,  $m_{Br}$  die eingesetzte Brennstoffmasse und  $H_u$  der untere Heizwert. Als weiterer Parameter wird ein Abwärmefaktor definiert und aus den vorliegenden Daten berechnet, ähnlich einem (Betriebs-) Wirkungsgrad, als entstehende Abwärme je Brennstoffverbrauch:

$$f_{AW} = \frac{Q_{AW}}{Q_{Br}} \quad (3.7)$$

Dieser Abwärmefaktor wird aus den ausgewerteten Daten, außer auf Betriebsebene, auch für Sektoren und auf Landesebene berechnet.

Die Abwärmeströme werden dann auf Landesebene zusammengefasst:

$$Q_{AW,LA} = \sum_s \sum_b Q_{AW,BE} \quad (3.8)$$

Dazu wird die Abwärmeenergie der einzelnen Betriebe in einem Sektor aufsummiert ( $b$ : Anzahl Betriebe im Sektor) und dann die Abwärme aller Sektoren ( $s$ ). Nach dem gleichen Schema wird auch die eingesetzte Brennstoffenergie berechnet:

$$Q_{Br,LA} = \sum_s \sum_b Q_{Br,BE} \quad (3.9)$$

Anschließend können die Ergebnisse auf Bundesebene (BU) zusammengefasst werden, indem die Abwärmeenergie und Brennstoffenergie der einzelnen Bundesländer (L) aufsummiert werden:

$$Q_{AW,BU} = \sum_L Q_{AW,LA} \quad (3.10)$$

$$Q_{Br,BU} = \sum_L Q_{Br,LA} \quad (3.11)$$

Tabelle 3.6: Übersicht Quellen und Bilanzgrenzen der verwendeten Daten zur Bestimmung vom Abwärmehaufkommen, Brennstoffeinsatz und industriellem Endenergieverbrauch

Variable	Bedeutung	Datenquelle	Bilanzgrenze
$Q_{AW}$	Abwärmehaufkommen der ausgewerteten Betriebe	aus BImSchV-Daten berechnet	Betriebe mit genehmigungsbedürftigen Anlagen nach 4. BImSchV aus WZ2008 Abschnitt C, Sektoren 10-33 ohne 19
$Q_{Br}$	Energiegehalt des eingesetzten Brennstoffs der ausgewerteten Betriebe	aus BImSchV-Daten berechnet	Betriebe mit genehmigungsbedürftigen Anlagen nach 4. BImSchV aus WZ2008 Abschnitt C, Sektoren 10-33 ohne 19
$Q_{Br,Ind}$	Endenergieverbrauch ohne Strom der Industrie + ggf. GHD	aus [AGEB 2014] bzw. [LAK 2014] auf Landesebene, GHD-Anteil aus [Schloman u. a. 2011]	Industrie: Betriebe nach WZ2008 Abschnitt C, Sektoren 10-33 ohne 19 mit >20 Mitarbeitern GHD: Betriebe mit <20 Mitarbeitern

Auf Grund der Plausibilitätsprüfung mussten vorhandene Datensätze aussortiert werden, andere Betriebe sind unterhalb der Bagatellgrenze: In jedem Fall wird über die ausgewerteten Daten nicht der Energieverbrauch der gesamten deutschen Industrie abgebildet. Deshalb ist es interessant aufzuzeigen, wie groß der Anteil der verwendeten Daten ist. Dafür wurde der Parameter des Erfassungsgrads definiert:

$$EG = \frac{Q_{Br,BU}}{Q_{Br,Ind}} \quad (3.12)$$

Er gibt an, welcher Anteil des bundesweiten industriellen Brennstoffbedarfs ( $Q_{Br,Ind}$ ) über die untersuchten Daten ( $Q_{Br,BU}$ ) dargestellt wurde und wie relevant insofern die erhaltenen Abwärmemengen sind. Zur Berechnung von  $Q_{Br,Ind}$  wurden Daten der AGEB (*Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen*) [AGEB 2014] und des Landesarbeitskreises (LAK) [LAK 2014] verwendet. Die Daten zum industriellen Brennstoffbedarf stammen somit aus einer anderen Quelle als die untersuchten Daten aus den Emissionsdaten. Leider sind dabei die Bilanzgrenzen unterschiedlich definiert. Bei den Endenergieverbrauchsdaten werden für den Bereich Industrie bei der AGEB bzw. LAK nur Betriebe mit mindestens 20 Mitarbeitern berücksichtigt und alle anderen in dem Bereich „Gewerbe, Handel und Dienstleistungen“ (GHD) einsortiert. Theoretisch können Betriebe mit weniger als 20 Mitarbeitern aber trotzdem unter die Berichtspflicht fallen und in den BImSchV-Daten enthalten sein. Um auf der sicheren Seite zu sein, kann aus dem GHD-Bereich (Gewerbe, Handel und Dienstleistungen) der Brennstoffbedarf der entsprechenden Wirtschaftszweige zum industriellen Brennstoffbedarf hinzugezogen werden. Da jedoch die Wahrscheinlichkeit groß ist, dass kleine Betriebe mit wenigen Mitarbeitern unter die Bagatellgrenze fallen, wird der Erfassungsgrad mit und ohne Berücksichtigung des GHD-Bereichs angegeben. Die Daten des GHD-Bereichs stammen dabei von [Schloman u. a. 2011]. Eine Übersicht über die Quellen aus denen die verschiedenen Werte übernommen bzw. die als Grundlage für die Berechnung dienen und deren Bilanzgrenze ist in Tabelle 3.6 zu finden.

Die Energieangaben zu dem Brennstoffen enthalten die eingesetzte Fernwärme. Die Fernwärme wird zwar in der ausgewerteten Datenbasis nicht berücksichtigt erzeugt aber auch Abwärme und ist damit für den Anteil der erfassten abwärmeverursachenden Eingangsenergie relevant.

### 3.3 Darstellung der Ergebnisse

Teile der hier vorgestellten Ergebnisse wurden schon in [Brückner u. a. 2015] veröffentlicht.

Aus der Bottom-Up-Analyse ergibt sich das Abwärmeaufkommen der untersuchten Industrie in Deutschland mit Ausnahme des Saarlands (dort konnten leider keine Daten zur Verfügung gestellt werden). Das Ergebnis ist in Abbildung 3.3 dargestellt. Dabei wird zu jeder Temperatur das kumulierte Abwärmeaufkommen, das oberhalb dieser Temperatur auftritt, dargestellt. Als Referenztemperatur wird hierbei  $35^\circ$  verwendet.

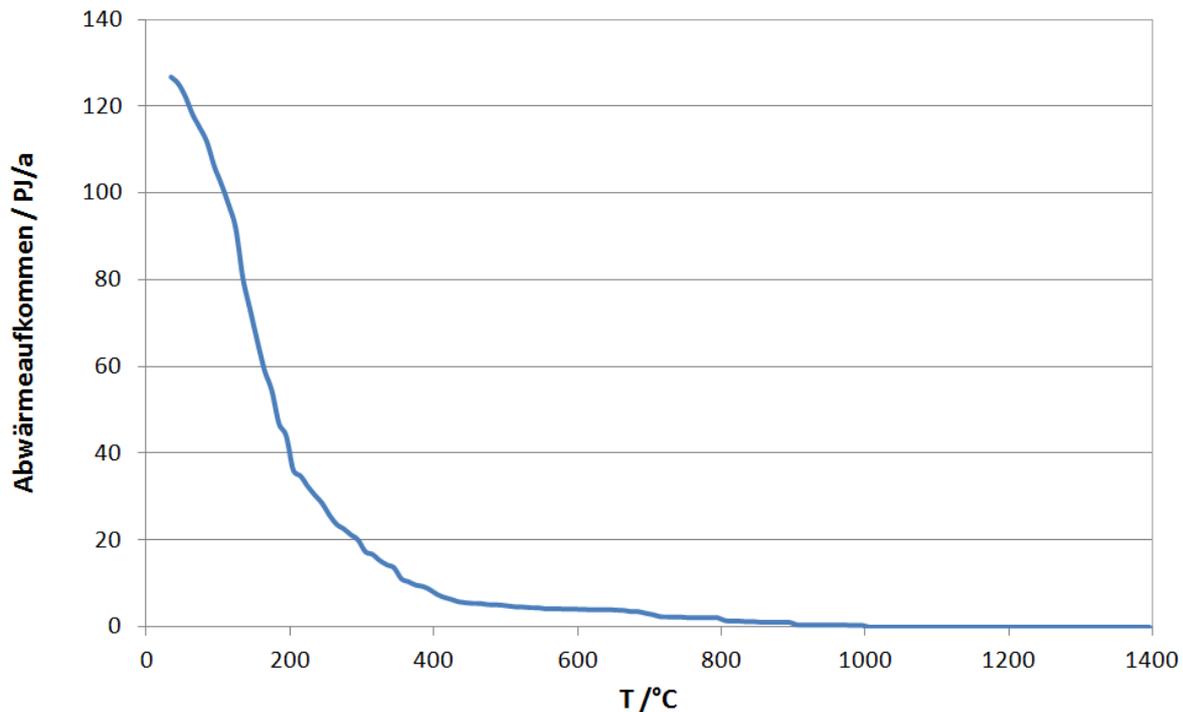


Abbildung 3.3: Abwärmeaufkommen aus den ausgewerteten Industriebetrieben 2008 in Deutschland (ohne Saarland) über die Abwärmtemperatur: Bei  $35^\circ\text{C}$  gibt es ein Abwärmeaufkommen von 127 PJ/a.

Insgesamt wurde ein Abwärmeaufkommen von 127 PJ/a gefunden, nur aus den ausgewerteten Daten. Durch die gewählte Darstellungsweise können aus dem Diagramm die Abwärmeaufkommen für verschiedene Nutzungstemperaturen ausgelesen werden. So ist ersichtlich, dass bei  $200^\circ\text{C}$  noch etwa 40 PJ/a an Abwärme anfallen. Neben der Quantität ist aber auch der Ort der Abwärme interessant. Deshalb wird in Abbildung 3.4 die Verteilung des Abwärmeaufkommens auf die Bundesländer dargestellt.

Offensichtlich entsteht der mit Abstand größte Teil der industriellen Abwärme in NRW. Um zu beurteilen, ob das an der großen Firmendichte in dem Bundesland liegt oder daran, dass die Betriebe dort besonders ineffizient arbeiten, ist das Verhältnis der Abwärme zum ausgewerteten Brennstoffeinsatz, also der Abwärmefaktor des Landes relevant und das Verhältnis des Endenergieverbrauchs von NRW zu den anderen Bundesländern. Deshalb sind in Abbildung 3.5 die Abwärmeströme im Verhältnis zu der Eingangsenergie, also dem eingesetzten Brennstoff in den analysierten Daten, und dem Endenergieverbrauch der Industrie im jeweiligen Bundesland dargestellt.

Wie man sieht, hat NRW einen knapp dreimal so hohen industriellen Endenergieverbrauch wie der zweitgrößte Verbraucher Bayern. Die ausgewertete Eingangsenergie ist sogar fast 3.5 mal so groß wie die von Rheinland-Pfalz, dem Zweitplatzierten.

In Abbildung 3.6 sind die Abwärmefaktoren ( $f_{\text{AW}}$ , 3.7) für die Bundesländer dargestellt.

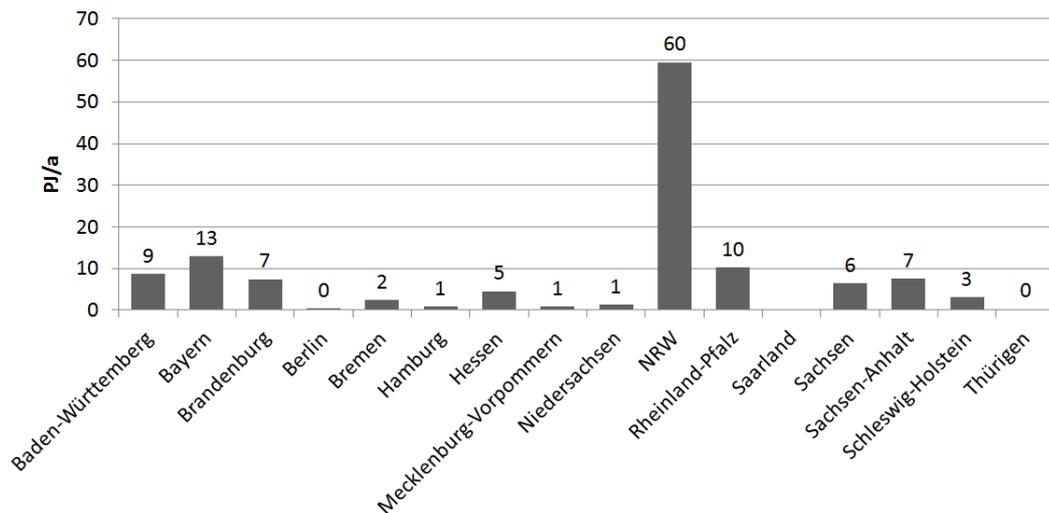


Abbildung 3.4: Abwärmeaufkommen in PJ/a der ausgewerteten Industriebetriebe 2008 aufgeschlüsselt nach Bundesländern: Spitzenreiter ist NRW mit gerundet 60 PJ/a

Bei den Abwärmefaktoren liegt NRW im Mittelfeld. Die Dominanz beim Abwärmeaufkommen ist somit primär auf den großen Energieeinsatz zurückzuführen. Den größten Abwärmefaktor unter den Bundesländern hat Schleswig-Holstein, gefolgt von Mecklenburg-Vorpommern und Bremen. Auf die gesamte Bundesrepublik bezogen liegt das durchschnittliche Abwärmeaufkommen bei 13% des Brennstoffeinsatzes.

Ist man auf der Suche nach Einsparpotenzialen, ist es interessant das Augenmerk auf Sektoren zu legen, deren Abwärmefaktoren besonders hoch sind. Dort könnten noch große Einsparpotenziale liegen. Tabelle 3.7 gibt das durchschnittliche Abwärmeaufkommen in den einzelnen Sektoren an.

Prozentual gesehen sind die größten Abwärmefaktoren, also der größte Abwärmeanteil gesehen auf den Energieeinsatz, in den Sektoren „Sonstiger Fahrzeugbau“ (Sektor 30) mit 38%, „Herstellung von elektrischer Ausrüstung“ (Sektor 27) mit 31% und „Herstellung von Textilien“ (Sektor 13) mit 29% zu finden.

Soll hingegen die Abwärme genutzt werden, sind die Sektoren interessant, bei denen die größten Abwärmemengen anfallen. Abbildung 3.7 und 3.8 zeigen die Verteilung des aus den Daten gewonnenen Abwärmeaufkommens auf die verschiedenen Sektoren, aufgeteilt auf die Haupt-Sektoren und Sektoren mit wenig Abwärme.

Alleine im Bereich Metallherzeugung entstehen gut 36 PJ/a Abwärme, fast 30 PJ/a in der Glasindustrie und über 24 PJ/a in der Chemieindustrie. Ebenfalls größere Abwärmemengen treten mit 12 PJ/a in der Papierindustrie auf. Das ist jedoch nur noch halb so viel wie in der Chemieindustrie.

Abbildung 3.9 gibt den Anteil der Sektoren am Abwärmeaufkommen an.

Rund 88% der Abwärme (111 PJ/a) fällt demnach alleine in den sechs größten abwärmeproduzierenden Sektoren an. Den größten Anteil am Abwärmeaufkommen hat mit 29% der Sektor Metallherzeugung und -bearbeitung (Sektor 24), gefolgt von der Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden (Sektor 23, 24%) und der Chemieindustrie (Sektor 20) mit 19%. Das sind drei der Sektoren die sich auch schon in früheren Studien als große Abwärmelieferanten herauskristallisiert haben. Dabei wird allerdings nur die über die Daten erfasste Abwärme abgebildet. Sektoren mit sehr geringem Erfassungsgrad wie „Maschinenbau“ (Sektor 28) mit gerade mal 4% oder Gummi- und Kunststoffwaren (Sektor 22) mit 10% könnten noch große Abwärmemengen beinhalten, die in dieser Abbildung nicht erfasst sind. Da beide Sektoren jedoch durchschnittliche Abwärmefaktoren haben und einen eher geringen Endenergieverbrauch ist das nicht zu erwarten.

Den größten Erfassungsgrad weisen das Papiergewerbe (84%), die Glas- und Keramikproduktion (81%) und der Chemiesektor (79%) auf. Der allgemeine Erfassungsgrad (Gl. 3.12) der ausgewerteten Daten liegt bei 56,8%. Wird der Endenergieverbrauch des GHD Sektors nicht mit berücksichtigt

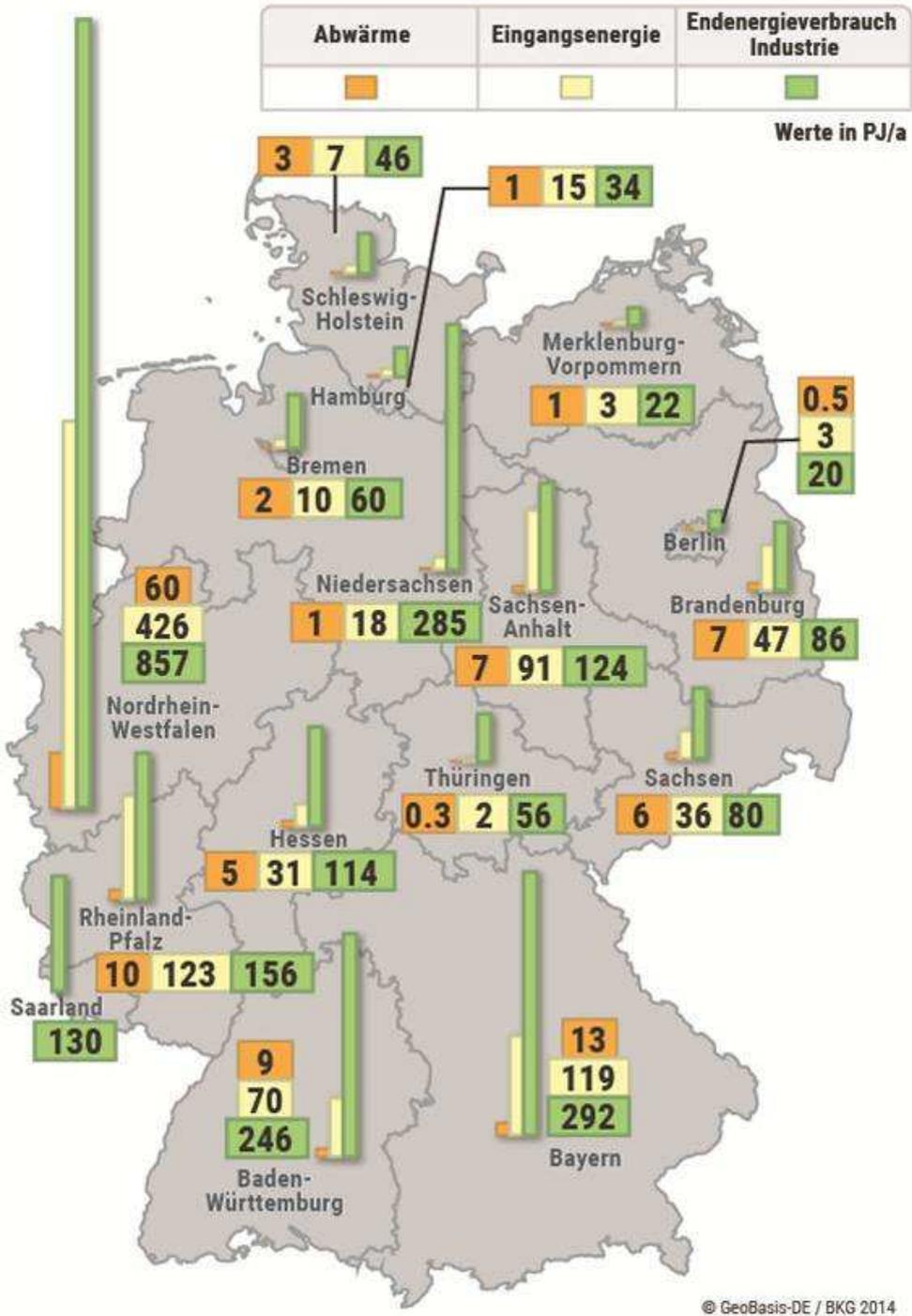


Abbildung 3.5: Abwärme  $Q_{AW,LA}$ , ausgewertete Brennstoffenergie  $Q_{Br,LA}$  (Eingangsenergie) und Endenergieverbrauch (inkl. Strom) der Industrie je Bundesland nach LAK (2014) in PJ/a, veröffentlicht in [Brückner u. a. 2015]

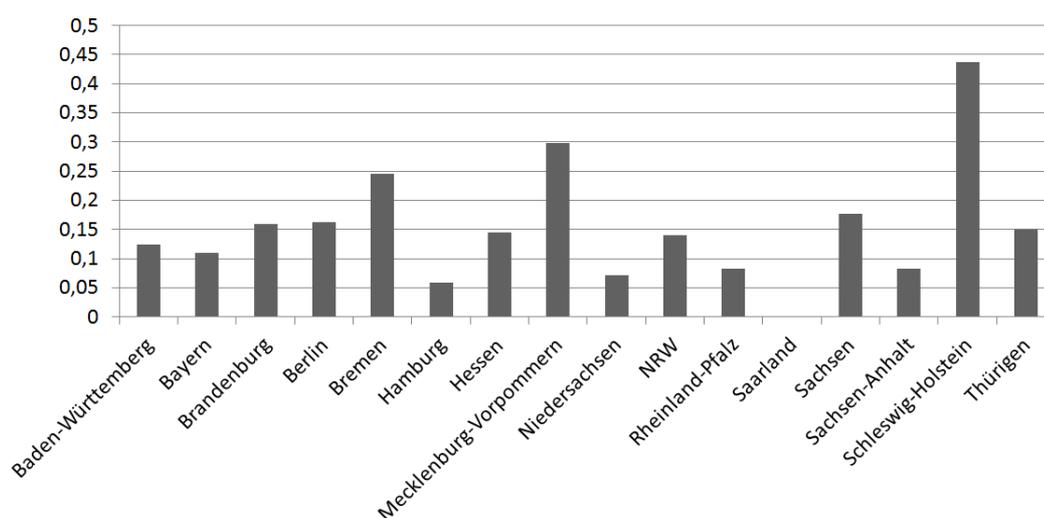


Abbildung 3.6: Abwärmefaktoren der Bundesländer: Anders als bei der Abwärmemenge haben hier Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern und Bremen die höchsten Werte

Tabelle 3.7: Aus der Auswertung gewonnene Abwärmefaktoren für die einzelnen Sektoren (nach WZ 2008)

WZ 2008	Sektorbezeichnung	Abwärmefaktor
10	Herstellung von Nahrungs- und Futtermitteln	0,10
11	Getränkeherstellung	0,14
12	Tabakverarbeitung	0,12
13	Herstellung von Textilien	0,29
14	Herstellung von Bekleidung	0,06
15	Herstellung von Leder, Lederwaren und Schuhen	0,20
16	Herstellung von Holz-, Flecht-, Korb- und Korkwaren (ohne Möbel)	0,10
17	Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus	0,09
18	Herstellung von Druckerzeugnissen; Vervielfältigung von bespielten Ton-, Bild- und Datenträgern	0,03
20	Herstellung von chemischen Erzeugnissen	0,09
21	Herstellung von pharmazeutischen Erzeugnissen	0,08
22	Herstellung von Gummi- und Kunststoffwaren	0,17
23	Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden	0,15
24	Metallerzeugung und -bearbeitung	0,19
25	Herstellung von Metallerzeugnissen	0,19
26	Herstellung von Datenverarbeitungsgeräten, elektronischen und optischen Erzeugnissen	0,18
27	Herstellung von elektrischen Ausrüstungen	0,31
28	Maschinenbau	0,16
29	Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen	0,12
30	Sonstiger Fahrzeugbau	0,38
31	Herstellung von Möbeln	0,12
32	Herstellung von sonstigen Waren	0,08
33	Reparatur und Installation von Maschinen und Ausrüstungen	0,05

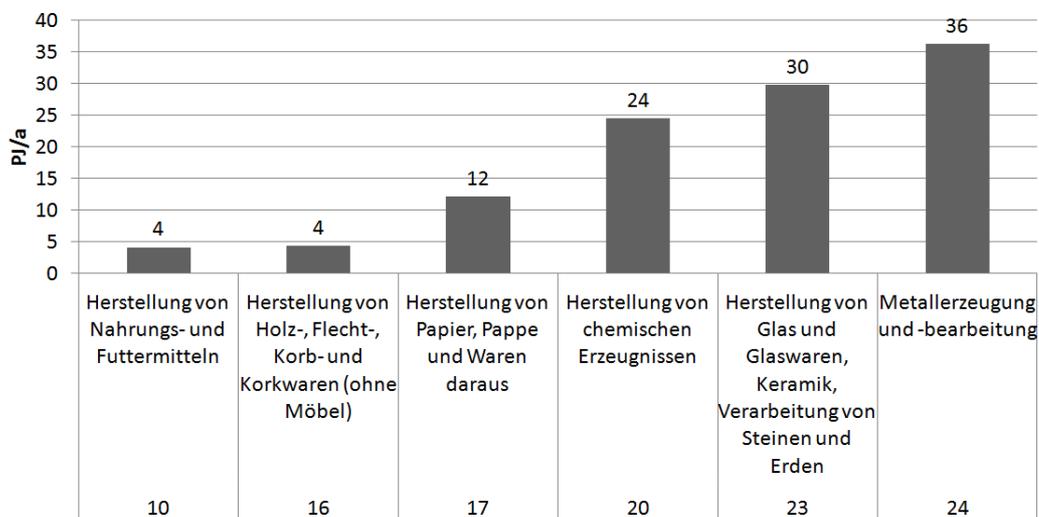


Abbildung 3.7: Abwärmeaufkommen der Sektoren mit dem größten Abwärmeaufkommen: Metallherzeugung, Glas und Keramik, Chemie sowie Papier und Pappe. Unter den Namen ist die Nummer des jeweiligen Wirtschaftszweig angegeben.

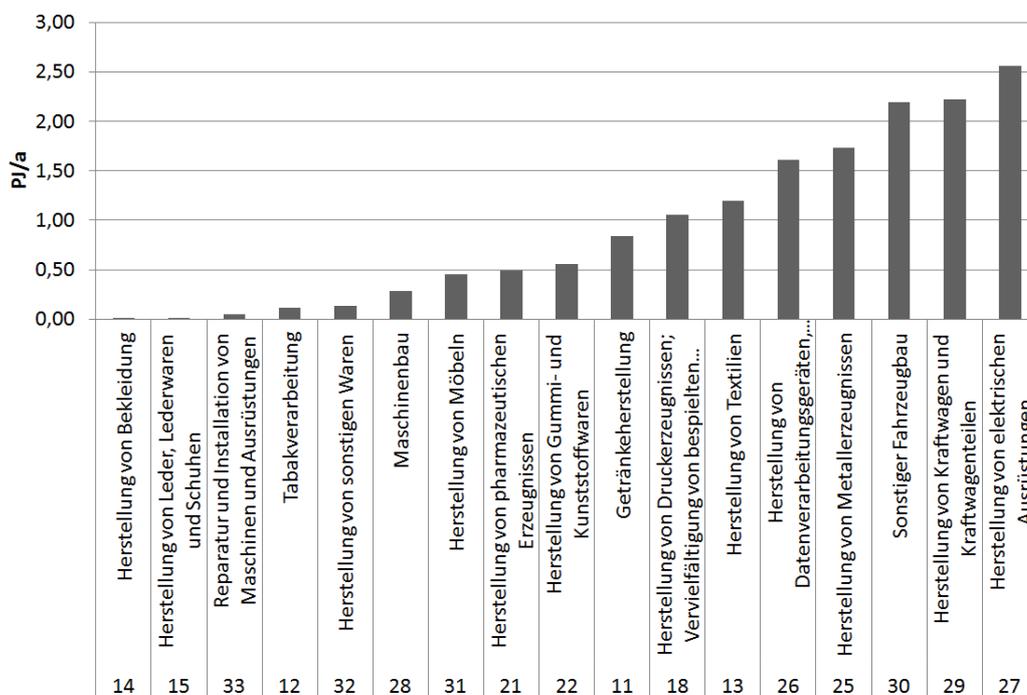


Abbildung 3.8: Abwärmeaufkommen der Sektoren mit geringem Abwärmeaufkommen

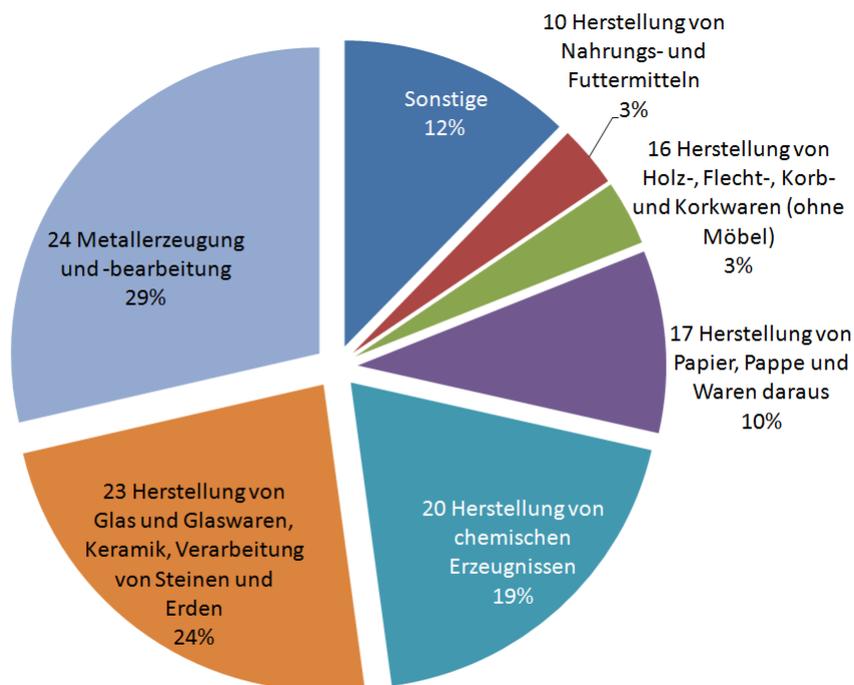


Abbildung 3.9: Verteilung des Abwärmeaufkommens nach Sektoren: 29% entsteht im Bereich Metallherzeugung, 24% im Bereich Glas und Keramik, 19% im Chemiesektor und noch 10% im Bereich Papier und Pappe. Die restlichen 18% entstehen in den restlichen Sektoren.

(siehe Kapitel 3.2), steigt der Erfassungsgrad sogar auf 58%. Somit wurde ein signifikanter Anteil der Industrie über die Auswertung erfasst.

## 3.4 Diskussion der Ergebnisse

Obwohl es sich bei den ausgewerteten Daten um mehr oder weniger reale Daten handelt, bleibt die Frage, inwieweit das Ergebnis richtig ist und es wirklich die untere Grenze darstellt. Um zu verhindern, dass die Ergebnisse durch Programmierungsfehler verfälscht werden, wurde der entwickelte Algorithmus in zwei verschiedenen Programmiersprachen (octave und python) implementiert und sichergestellt, dass die Ergebnisse übereinstimmen. Trotzdem ist es sinnvoll das Ergebnis mit schon bestehenden Abschätzungen aus der Vergangenheit zu vergleichen, auch wenn es kein Richtig oder Falsch gibt. Teile der hier präsentierten Ergebnisse wurden schon in [Brückner u. a. 2015] und [Miró u. a. 2016] vorgestellt.

### 3.4.1 Vergleich der Kennzahlen

Bei verschiedenen vorherigen Studien wurden ebenfalls Abwärmefaktoren für verschiedene Sektoren berechnet, zum Beispiel in Norwegen [Sollesnes und Helgerud 2009], Schweden (technisches Potenzial) [Land u. a. 2002], Deutschland [Pehnt u. a. 2010] und NRW [Kattenstein u. a. 2002]. Leider können bei diesen Studien die Faktoren nicht direkt verglichen werden, da sie auf einer vorherigen NACE- oder einer ganz anderen Klassifizierung beruhen. Die NACE-Klassifizierung wurde zuletzt 2006 geändert (NACE Rev. 2). Die Probleme, die sich aus den unterschiedlichen Klassifizierungen ergeben, werden auch in [Miró u. a. 2016] erläutert.

Was aber möglich ist, ist ein Vergleich der für verschiedene Länder angegebenen Abwärmemengen pro eingesetztem Brennstoff, also dem Abwärmefaktor für das jeweilige Land: [Broberg u. a. 2012] hat -unabhängig von der Klassifizierung- 2012 einen Abwärmefaktoren für Schweden von 14% erhoben, [Chung u. a. 2013] für Korea 2013 von 11,7%. Beide Ergebnisse sind in der gleichen Größenordnung wie der hier berechnete Abwärmekoeffizient von 13%. Eine gewisse Abweichung in den Ergebnisse für die verschiedenen Ländern ist durch den unterschiedlichen Aufbau des industriellen Sektors gegeben. Ein deutlich höherer Wert wird von [Latour u. a. 1982] mit 23% für die USA angegeben, allerdings stammt dieser Wert aus einer Veröffentlichung von 1982 und bezieht sich auf Daten von 1977. Damit sind die Werte im Grunde nicht mehr vergleichbar, da sich die Prozesstechniken in diesem Zeitraum geändert haben. Ebenfalls schwierig zu vergleichen sind Werte, die nicht auf erhobenen Daten basieren sondern auf angenommenen Wirkungsgraden, wie z.B. bei [Utlu 2015] für die Türkei (Vgl. 2.1). Laut dieser Studie können 36 bis 40% der Eingangsenergie zurückgewonnen werden, allerdings werden auch die Wirkungsgrade für Prozesswärme in dieser Größenordnung angenommen und verwendet.

### 3.4.2 Einordnung der Ergebnisse in den Forschungsstand

Alternativ zu dem Vergleich mit anderen Ländern soll das Ergebnis der Auswertung mit früheren Studien für Deutschland verglichen werden. Auf Bundesebene gibt es drei frühere Studienergebnisse für Deutschland. Da bei den Studien andere Klassifizierungen und damit Grenzen der einzelnen Industriesektoren verwendet wurden bzw. keine Abwärmefaktoren für die Sektoren angegeben wurden, ist ein direkter Vergleich der Abwärmefaktoren der Sektoren nicht möglich. Was jedoch verglichen werden kann, sind die Ergebnisse der abgeschätzten Abwärme:

Wie in der Literaturübersicht genauer beschrieben, wurden in [Pehnt u. a. 2010] die Ergebnisse von Studien aus Norwegen, Österreich und den USA ausgewertet und auf Deutschland übertragen. Bei der norwegischen Studie (Sollesnes und Helgerud 2009) lag die Referenztemperatur bei 0°C. Daraus ergab sich ein Abwärmepotenzial von 317 PJ/a (88 TWh/a) über 140°C und 158 PJ/a (44 TWh/a) im Bereich 60-140°C. Das entspricht einem gesamten Abwärmeaufkommen von 476 PJ/a für Deutschland. Um die Ergebnisse zu vergleichen ist die Auswertung der Daten mit der Referenztemperatur 0°C durchgeführt.

Die andere Abschätzung für Deutschland stammt aus der zweiten Vorstudie der European Heatroadmap [Connolly u. a. 2013]: Für Deutschland wurde da ein Abwärmepotenzial aus der Industrie von 525 PJ/a abgeschätzt. Der Wert basiert auf früheren Studien. Leider werden keine genauen An-

gaben zur Methode gemacht. Die im gleichen Projekt veröffentlichte Studie von [Persson u. a. 2014] verwendet pauschale Wirkungsgrade für die einzelnen Sektoren von 25% bzw. 10% und schätzt das Abwärmeaufkommen auf 566 PJ/a. Darin sind auch Raffinerien mit einem angenommenen Wirkungsgrad von 50% enthalten. Da jedoch in beiden Fällen das Potenzial für Fernwärme untersucht wurde, werden auch hier zum Vergleich nur Wärmeströme mit über 90°C berücksichtigt und auf 70°C abgekühlt.

[Grote u. a. 2015] verwendet eine andere Definition des Industriesektors. Auf welche Referenztemperatur die verwendeten Wirkungsgrad-Abschätzungen basieren, ist nicht angegeben. Der Vollständigkeit halber wird aber auch dieser Wert hier aufgeführt. Das Ergebnis ist in Abbildung 3.10 zu sehen.

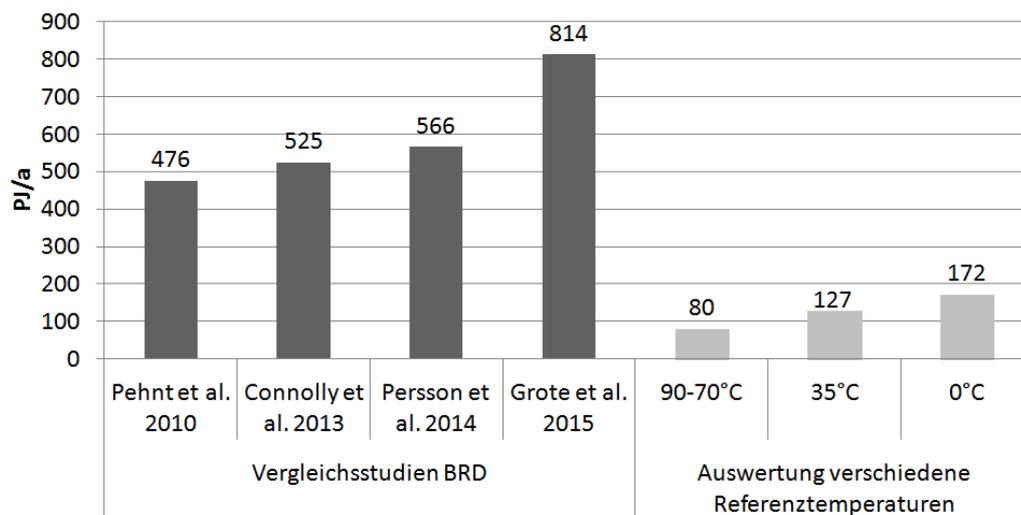


Abbildung 3.10: Vergleich mit früheren Studien zum Abwärmeaufkommen in Deutschland: Links sind in dunkel grau die früheren Studien für Deutschland dargestellt, rechts in hellgrau die Auswertung der Abwärmedaten bei verschiedenen Referenztemperaturen. Anders als die früheren Studien beziehen sie sich nicht auf die gesamte deutsche Industrie sondern nur auf die ausgewerteten Betriebe und sind erwartungsgemäß höher

Beim Vergleich der Ergebnisse ist zu beachten, dass es sich bei den Ergebnissen aus der vorliegenden Arbeit um eine sichere untere Grenze handelt. Aus diesem Grunde ist das Ergebnis auch nur auf die ausgewerteten Daten gestützt. Die Auswertung des Erfassungsgrades hat gezeigt, dass 57% des industriellen Brennstoffverbrauchs über die Auswertung erfasst werden. Die Werte der anderen Studien beziehen sich hingegen auf den gesamten Endenergieeinsatz und haben schon von daher um 40 bis 50% höhere Werte. In jedem Fall wird das Ziel der Auswertung einen unteren Grenzwert zu bestimmen erreicht.

### 3.5 Sensitivitätsanalyse

Das Ziel dieser Arbeit ist es eine erste Abschätzung und Berechnung des Abwärmepotenzials in Deutschland vorzunehmen. Dabei wurde vereinfachend von einer standardisierten Abgaszusammensetzung mit konstanter Dichte und Wärmekapazität ausgegangen. Weiterhin wurde die Referenztemperatur, auf die der Energiegehalt der Abgase berechnet wurde, auf 35°C gelegt. Um den Einfluss dieser Annahmen zu beleuchten sollen im Folgenden die Annahme der temperaturunabhängigen Dichte und der Einfluss der Referenztemperatur untersucht werden.

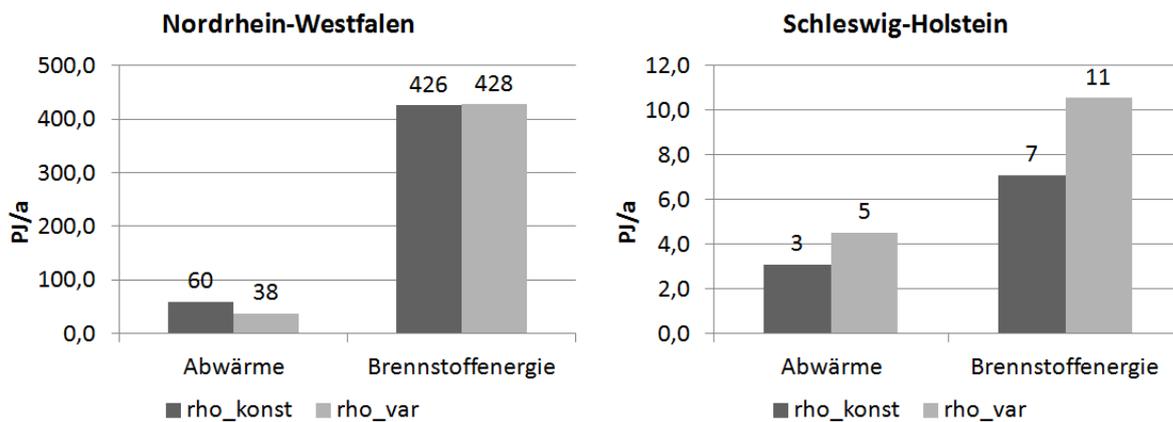


Abbildung 3.11: Vergleich konstante zu variabler Dichte für NRW und Schleswig-Holstein: Es ist kein eindeutiger Trend feststellbar.

### 3.5.1 Variable Dichte

Da laut den vorliegenden Daten der Bundesländer der Volumenstrom der Abgasströme als trockener Gasstrom bei 273K angegeben wird, wurde sowohl in der vorliegenden Arbeit als auch in dem früheren Projekt in Nordrhein-Westfalen -Herakles- die Dichte der Abgasströme als konstant angenommen. Die von Herakles [UTA 2000; Drath 2002; Kattenstein u. a. 2002; Gebhardt 1999] vorgeschlagene anzunehmende Dichte von  $1,293\text{kg/m}^3$  entspricht der Dichte von Luft bei  $0^\circ\text{C}$  (Vgl. Kapitel 3). Es ist jedoch nicht sicher, inwieweit die Volumenströme wirklich auf  $0^\circ\text{C}$  genormt angegeben wurden. Sollte der Volumenstrom bei der jeweiligen Abgastemperatur angegeben worden sein, kann die Auswirkung über eine Auswertung der Daten mit variabler Dichte abgebildet werden. Anstatt den konstanten Wert zu verwenden, wird die Dichte temperaturabhängig über

$$\rho_{gas}(T) = 1,293\text{kg/m}^3 * 273/(T + 273) \quad (3.13)$$

berechnet. Um die Auswirkungen auf das Abwärmeaufkommen zu bestimmen wurden zunächst Schleswig-Holstein und Nordrhein-Westfalen betrachtet. Schleswig-Holstein hat in der Analyse den höchsten Abwärmefaktor aufgewiesen und Nordrhein-Westfalen das größte Abwärmeaufkommen. Deshalb sollen zunächst nur diese beiden Länder betrachtet werden. Abbildung 3.11 zeigt das Ergebnis dieses Vergleichs.

Es zeigt sich, dass in NRW die ausgewertete Brennstoffmenge leicht ansteigt und gleichzeitig das Abwärmeaufkommen abfällt. Da der Volumenstrom angegeben ist, wird durch eine geringere Dichte der errechnete Massenstrom geringer und damit natürlich auch die Abwärme. Der Anstieg der ausgewerteten Brennstoffmenge kommt dadurch zustande, dass mit der geringeren Abwärmemenge einige zuvor aussortierte Betriebe den Plausibilitätstest, ob die Abwärmemenge geringer ist als die eingesetzte Brennstoffenergie, nun bestehen. Obwohl in NRW jetzt also mehr Betriebe betrachtet werden, sinkt das Abwärmeaufkommen auf Grund des geringeren Massenstroms. Anders in Schleswig-Holstein: Hier steigt die ausgewertete Brennstoffmenge um fast 48% an und führt zu einem fast ebenso großen Anstieg im Abwärmeaufkommen (45%). Das deutet darauf hin, dass es große Abwärmeproduzenten gab, die den Plausibilitätstest nur bei der Berechnung mit variablen Abgasdichten bestanden haben. Da in Schleswig-Holstein ein Anstieg des Abwärmeaufkommens zu verzeichnen ist, in NRW jedoch ein deutlicher Abfall von fast 37%, ist kein eindeutiger Trend aufzeigbar in welche Richtung sich das Abwärmeaufkommen unter der Annahme einer variablen Dichte verschiebt.

Deshalb wurde in einem weiteren Schritt das Abwärmeaufkommen mit variabler Dichte für die gesamte Bundesrepublik berechnet. Auf Bundesebene fällt dabei das Abwärmeaufkommen um fast 27% auf 93 PJ/a, während die ausgewertete Brennstoffenergie nur leicht (2%) auf 1002 PJ/a ansteigt.

Der resultierende Abwärmefaktor bezogen auf die insgesamt eingesetzte Brennstoffenergie fällt im Vergleich von konstanter zu variabler Dichte von 13% auf 9% ab.

Das zeigt, wie groß der Einfluss der Dichte auf die Auswertung ist. Leider besteht im Rahmen dieser Arbeit keine Möglichkeit die richtige Angabe des Volumenstroms im Nachhinein zu kontrollieren.

### 3.5.2 Referenztemperatur

Ein entscheidender Parameter bei der Auswertung der in den Abgasen enthaltenen Abwärme ist die Umgebungstemperatur, auf die die Abwärmemengen bezogen wird. Dabei können verschiedene Referenztemperaturen angenommen werden: In der vorliegenden Arbeit wurde die Referenztemperatur auf die Rückkühltemperatur von 35°C gelegt. In anderen Studien wird 0°C als Referenztemperatur angenommen (vgl. z.B. [McKenna 2009; McKenna und Norman 2010; Sollesnes und Helgerud 2009]). Abwärmeströme, die mit 20°C an die Umgebung abgegeben werden, werden in diesem Fall jedoch auch als arbeitsfähige Abwärme gewertet. In der Realität ist es jedoch in der Regel nur unter bestimmten Voraussetzungen nutzbar -z.B. wenn die Außentemperatur tatsächlich unter 20°C sinkt. Um die jahreszeitlichen Schwankungen der Außentemperaturen besser zu berücksichtigen kann alternativ auch mit der durchschnittlichen Jahresmitteltemperatur gerechnet werden. Diese ist jedoch lokal unterschiedlich. Für Deutschland wurde von [Mitteltemperatur 2015] 8°C als langjähriges Mittel angegeben. Errechnet wurde dieses Mittel auf Basis von Daten des Deutschen Wetterdienstes.

Je niedriger die Referenztemperatur ist, desto größer sollte physikalisch gesehen die berechnete zur Verfügung stehende Abwärmemenge sein: Wird die Referenztemperatur zum Beispiel auf 0°C gesetzt, kommt die Differenz zur 35°-Grenze als zusätzlicher Abwärmeanteil dazu und alle Abgasströme mit einer Temperatur unter 35°, die zuvor garnicht berücksichtigt wurden. So ergibt sich für die vorliegenden Daten ein Abwärmeaufkommen von gut 172 PJ/a, wenn die Referenztemperatur auf 0°C abgesenkt wird, im Vergleich zu knapp 127 PJ/a bei 35°C. Das entspricht einem Plus von gut 35%. Will man den Effekt der Referenztemperatur isolieren und die hinzugekommenen Abgasströme mit  $T < 35^\circ\text{C}$  ausschließen, kann die Abwärme, die oberhalb von 35°C im Bezug auf die unterschiedlichen Referenztemperaturen auftritt, betrachtet werden:

Bezogen auf 0°C Referenztemperatur liegt das Abwärmeaufkommen oberhalb von 35°C bei knapp 152 PJ/a. Das ist ein Plus von immerhin noch knapp 20%. Betrachtet man die Bundesländer im Einzelnen, wie in Tabelle 3.8 geschehen, ist der Effekt jedoch stark unterschiedlich:

In Sachsen-Anhalt nimmt das Abwärmeaufkommen um 61% zu, das Land ist damit Spitzenreiter, dafür nimmt das Abwärmeaufkommen in Bremen um 38% ab! Dieser Effekt erklärt sich dadurch, dass in den Bundesländern mit dem erhöhten Abwärmeaufkommen bei 0°C einige Betriebe die Plausibilitätsprüfung  $\text{Abwärme} < \text{Brennstoffenergie}$  nicht mehr bestanden haben. Auch diesen Effekt kann man ausschließen und alle Abgasströme berücksichtigen, die auch bei der Auswertung bzgl. 35°C ausgewertet wurden. In dem Fall steigt das Abwärmeaufkommen auf fast 186 PJ/a, allerdings sind dann auch Betriebe mit Abwärmefaktoren  $>1$  vorhanden.

Welche große Rolle die Referenztemperatur bei der Plausibilitätsprüfung spielt zeigt sich, wenn als Bezugsgröße die Jahresmitteltemperatur von 8°C gewählt wird, wie in Tabelle 3.9 geschehen:

Auch hier haben Sachsen-Anhalt und Bremen die größten Abweichungen und die Summe liegt 22% über dem Wert der Auswertung bei 35°C. Insgesamt ergibt sich für die Bundesrepublik jedoch ein 2% höheres Abwärmeaufkommen als bei 0°C. Dieser Effekt kommt über die Plausibilitätsprüfung zustande. Die Frage nach der „richtigen“ Referenztemperatur lässt sich nur im jeweiligen Anwendungsfall und nicht allgemeingültig beantworten.

Tabelle 3.8: Vergleich Abwärmeaufkommen bei unterschiedliche Referenztemperaturen (0° bzw. 35°C) für die einzelnen Bundesländer

	T_ref =35°C	T_ref=0°C	Prozentuale Veränderung
Baden-Württemberg	8,7	10,1	17%
Bayern	13,0	16,8	29%
Brandenburg	7,4	9,9	33%
Berlin	0,5	0,7	38%
Bremen	2,4	1,5	-38%
Hamburg	0,9	1,0	17%
Hessen	4,5	6,3	38%
MVP	0,9	0,8	-19%
Niedersachsen	1,3	1,8	35%
NRW	59,5	67,2	13%
RLP	10,2	14,5	42%
Sachsen-Anhalt	6,4	10,3	61%
Sachsen	7,5	6,0	-20%
Schleswig-Holstein	3,1	4,5	44%
Thüringen	0,3	0,4	28%
<b>Summe</b>	<b>126,6</b>	<b>151,5</b>	<b>20%</b>

Tabelle 3.9: Vergleich unterschiedliche Referenztemperaturen (8° bzw. 35°C) für die einzelnen Bundesländer

	T_ref =35°C	T_ref=8°C	Prozentuale Veränderung
Baden-Württemberg	8,7	11,0	26%
Bayern	13,0	16,0	23%
Brandenburg	7,4	9,2	23%
Berlin	0,5	0,6	29%
Bremen	2,4	1,4	-40%
Hamburg	0,9	1,0	9%
Hessen	4,5	5,9	31%
MVP	0,9	1,1	17%
Niedersachsen	1,3	1,7	27%
NRW	59,5	73,7	24%
RLP	10,2	13,5	33%
Sachsen-Anhalt	6,4	9,7	52%
Sachsen	7,5	5,6	-25%
Schleswig-Holstein	3,1	4,1	34%
Thüringen	0,3	0,3	21%
<b>Summe</b>	<b>126,6</b>	<b>154,8</b>	<b>22%</b>

## Kapitel 4

# Extrapolation Abwärmeaufkommen Deutschland (Top-Down-Ansatz)

Die bisher vorgestellten Ergebnisse beziehen sich nur auf das Abwärmeaufkommen, das aus den ausgewerteten Betrieben in Deutschland zur Verfügung steht. Aber auch die Betriebe, die nicht über die Emissionsverordnung erfasst sind oder die einen der Plausibilitätstests nicht bestanden haben, produzieren Abwärme. Aus dieser Auswertung werden Kennwerte über das Abwärmeaufkommen in Abhängigkeit zur eingesetzten Brennstoffenergie gewonnen, die im nächsten Schritt in einem Top-Down-Verfahren genutzt werden um den nicht über die Datenbasis erfassten Teil der Abwärme zu beziffern und so das gesamte Abwärmeaufkommen in Deutschland abzuschätzen.

### 4.1 Methode

Um den nicht über die ausgewerteten Betriebe erfassten Anteil der Industrie in Deutschland zu erfassen sollen die Ergebnisse aus der Bottom-Up-Analyse extrapoliert bzw. übertragen werden. Dazu werden Kennwerte auf Bundesebene genutzt. Da nicht mehr von der Betriebsebene zur Landes- bzw. Bundesebene geschlossen wird, sondern andersherum Faktoren auf Bundesebene genutzt werden, handelt es sich hierbei um einen Top-Down-Ansatz. Bei den Kennwerten kann man zwischen einem regionalen und einem sektoralen Ansatz unterscheiden. Bei einer regional basierten Abschätzung werden die Kennwerte auf durchschnittliche Werte aus dem gesamten Industriemix einer Region gebildet und davon ausgegangen, dass der nicht erfasste Anteil, in der Zusammensetzung der Industrie und der resultierenden Abwärme, dem ausgewerteten Anteil entspricht. Alternativ können für die einzelnen Industriesektoren Abwärmefaktoren gebildet werden. Das basiert auf der Annahme, dass die Verteilung von großen und kleinen, effizienten und weniger effizienten Betrieben im Sektor gleichmäßig auf den erfassten und nicht erfassten Anteil verteilt ist. Im Folgenden sollen beide Ansätze vorgestellt und die Ergebnisse diskutiert werden. In jedem Fall handelt es sich hierbei um Abschätzungen!

#### 4.1.1 Regionale Abschätzung

Um die Abwärmeproduktion des nicht über die vorhandenen und verwertbaren Daten abgebildeten Anteils der Industrie zu berechnen kann aus den ausgewerteten Daten der Bottom-Up-Methode ein Abwärmefaktor  $f_{AW,BU}$  nach Gleichung 3.7 auf Bundesebene definiert werden:

$$f_{AW,BU} = \frac{Q_{AW,BU}}{Q_{Br,BU}} \quad (4.1)$$

Die Energiemengen werden dabei nach Gleichung 3.10<sup>1</sup> und 3.11<sup>2</sup> definiert. Der Faktor beinhaltet die Annahme, dass die entstehende Abwärme proportional zum Energiegehalt des eingesetzten Brennstoffs ist. Die Abwärme der gesamten deutschen Industrie kann dann abgeschätzt werden über:

$$Q_{AW,EX,BU} = Q_{AW,BU} + f_{AW,BU} * (Q_{Br,Ind} - Q_{Br,BU}) \quad (4.2)$$

Dabei ist  $Q_{AW,BU}$  das Ergebnis der Bottom-Up-Analyse nach Gleichung 3.10,  $Q_{Br,BU}$  der Energiegehalt des in den ausgewerteten Betrieben eingesetzten Brennstoffes nach Gleichung 3.11 und  $Q_{Br,Ind}$  der in der gesamten deutschen Industrie eingesetzte Brennstoff (Endenergieeinsatz ohne Strom). Alternativ kann die Extrapolation auch über den Erfassungsgrad 3.12 erfolgen:

$$Q_{AW,EX,BU} = Q_{AW,BU} * 1/EG \quad (4.3)$$

Der Vorteil des zweiten Ansatzes ist, dass er es ermöglicht nicht nur die reinen Abwärmemengen zu extrapolieren, sondern die Temperaturverteilung der Ausgangsdaten aus der Bottom-Up-Analyse beizubehalten:

$$Q_{AW,EX,BU}(T) = Q_{AW,BU}(T) * 1/EG \quad (4.4)$$

Das beinhaltet naturgemäß die Annahme, dass der extrapolierte Anteil der Abwärme die gleiche Temperaturverteilung aufweist.

#### 4.1.2 Sektorale Abschätzung

Alternativ zur Extrapolation über einen regionalen Faktor kann der nicht erfasste Anteil über sektorspezifische Abwärmefaktoren berechnet werden. Dafür wird die in Kapitel 3 schon beschriebene Gleichung 3.7 für Sektoren definiert:

$$f_{AW,SE} = \frac{Q_{AW,BU}(SE)}{Q_{Br,BU}(SE)} \quad (4.5)$$

Dafür wird die Abwärme der in den einzelnen Ländern berechneten Abwärme je Sektor (SE) aufsummiert:

$$Q_{AW,BU}(SE) = \sum_L \sum_b Q_{AW,BE} \quad (4.6)$$

Dabei ist L die Anzahl der betrachteten Länder und b die Anzahl der Betriebe im jeweiligen Sektor.  $Q_{AW,BE}$  ist die nach Gleichung 3.5 definierte Abwärme der einzelnen Betriebe. Äquivalent wird die Brennstoffenergie des im Sektor eingesetzten Brennstoffs berechnet:

$$Q_{Br,BU}(SE) = \sum_L \sum_b Q_{Br,BE} \quad (4.7)$$

Daraus kann das Abwärmearaufkommen der Bundesrepublik abgeschätzt werden:

$$Q_{AW,EX,SE} = Q_{AW,BU} + \sum_s f_{AW,SE} * (Q_{Br,Ind}(SE) - Q_{Br,BU}(SE)) \quad (4.8)$$

Dabei ist  $Q_{AW,BU}$  das aus der Bottom-Up-Analyse berechnete Abwärmearaufkommen nach Gleichung 3.10. Dazu kommt aus jedem Sektor die abgeschätzte Abwärme des nicht berücksichtigten Anteils des Brennstoffeinsatzes. Auch hier werden natürlich nur die Sektoren 10 bis 33 ohne den Sektor 19 berücksichtigt (s: Sektoren 10 bis 33 ohne 19). Die in der gesamten deutschen Industrie eingesetzte Brennstoffenergie des jeweiligen Sektors  $Q_{Br,Ind}(SE)$  stammt dabei aus den Daten des Landesarbeitskreises der Arbeitsgemeinschaft für Energiebilanzen [LAK 2014]. Allerdings sind in den Daten einige WZ2008-Sektoren zusammengefasst. Die resultierenden sektoralen Abwärmefaktoren sind in der Tabelle 4.1 aufgeführt.

---

<sup>1</sup> $Q_{AW,BU} = \sum_L Q_{AW,LA}$   
<sup>2</sup> $Q_{Br,BU} = \sum_L Q_{Br,LA}$

Tabelle 4.1: Abwärmefaktoren für die Sektoren bei AGEB verwendete Definition der Industriesektoren sowie die korrespondierenden Sektoren nach WZ2008

Sektoren nach LAK-AGEB	WZ2008	$f_{AW,SE}$
Ernährung und Tabak	10-12	0,11
Textil- Bekleidungs- und Ledergewerbe	13-15	0,28
Metallerzeugung, NE-Metalle, -gießereien und Metallbearbeitung	24+25	0,19
Fahrzeugbau	29+30	0,18

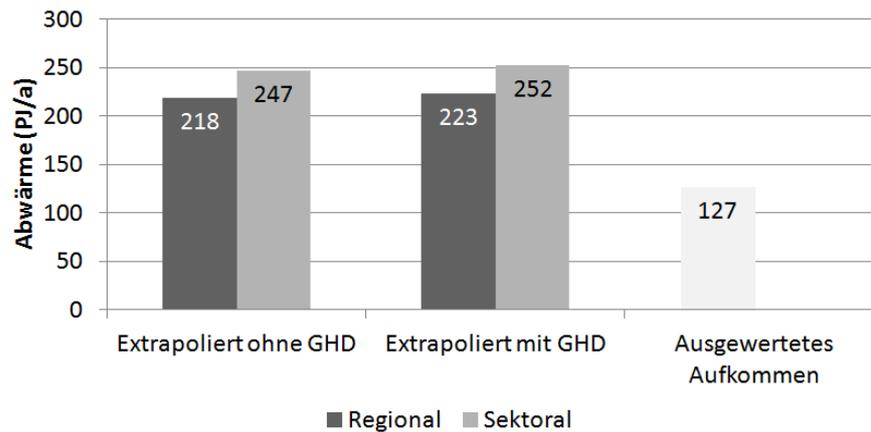


Abbildung 4.1: Vergleich verschiedener Ansätze zum Extrapolieren des Abwärmeaufkommen in Deutschland: Regional vs. Sektoral und mit und ohne Berücksichtigung des GHD Bereichs. Die Ergebnisse weichen nur sehr wenig von einander ab.

### 4.1.3 Berücksichtigung Gewerbe-, Handel-, Dienstleistungssektor (GHD)

Wie bereits bei der Definition des Erfassungsgrades diskutiert, gibt es in der Energieverbrauchsstatistik und in der Emissionserklärung eine unterschiedliche Abgrenzung des industriellen Sektors: Bei den Daten der AGEB (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen) [AGEB 2014] und des Landesarbeitskreises [LAK 2014] werden für den industriellen Bereich nur Betriebe mit mindestens 20 Mitarbeitern berücksichtigt und alle anderen in den GHD-Bereich einsortiert. Bei den BImSchV-Daten ist die Anzahl der Mitarbeiter egal, die Grenze wird über die Anlagengröße definiert, gemäß der eingangs beschriebenen Bagatellgrenze.

Ähnlich wie beim Erfassungsgrad stellt sich bei der Extrapolierung der Ergebnisse die Frage inwieweit der Anteil des GHD-Bereichs, der in der Energieverbrauchsstatistik den entsprechenden Wirtschaftszweigen entspricht, dazu gerechnet werden soll. Beim Skalieren kommt erschwerend hinzu, dass kleine Betriebe oft andere Wirkungsgrade haben und somit die Übertragbarkeit fraglicher ist. Insgesamt wird von den entsprechenden GHD-Gruppen (Metallgewerbe, KFZ-Gewerbe, Holzgewerbe, Papier- und Druckgewerbe, Nahrungsmittelgewerbe, Bekleidung, Leder, Textil und NE-Metalle, Kunststoffe, Gummi) 0,0608 PJ/a an Endenergie verbraucht, rechnet man den Stromverbrauch heraus, bleiben noch 0,0382 PJ/a [Schloman u. a. 2011]. Das entspricht gut 2% des Verbrauchs des Industriesektors. Trotzdem wird im Folgenden die Skalierung mit und ohne GHD-Bereich aufgeführt um die Spannbreite der Ergebnisse zu zeigen.

## 4.2 Ergebnisse

Abbildung 4.1 zeigt die Ergebnisse der beiden Skalierungsverfahren (regional und sektoral) mit und ohne die Berücksichtigung des GHD-Bereichs.

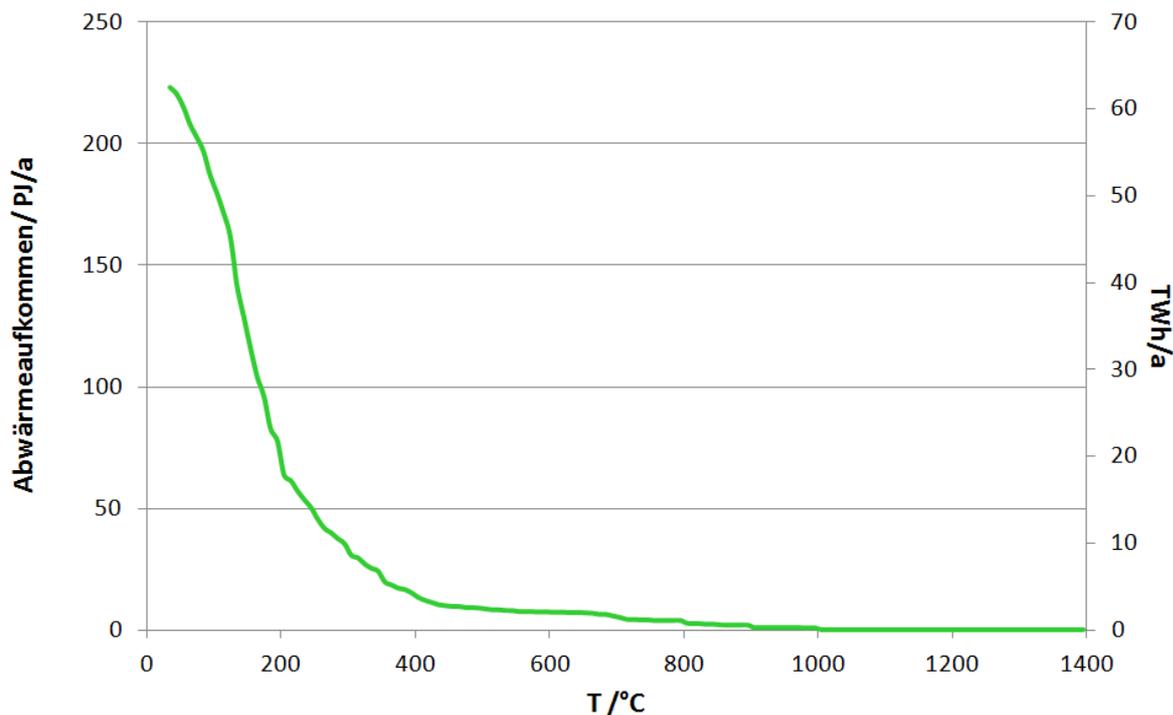


Abbildung 4.2: Ergebnis der Extrapolation des Abwärmeaufkommens über den Erfassungsgrad mit Übertragung des Temperaturprofils: Für die gesamte Industrie in Deutschland ergibt sich für 2008 ein Abwärmeaufkommen von 227 PJ/a oder 63 TWh/a.

Sowohl bei der regionalen als auch bei der sektoralen Skalierung beträgt der Unterschied, ob der GHD-Bereich berücksichtigt wird oder nicht, gerundet 2%. Einen größeren Unterschied zeigen die beiden Skalierungsverfahren untereinander: Wird der Anteil der nicht erfassten Industrie über sektorale Abwärmefaktoren abgeschätzt, liegt das Ergebnis etwa 13% über der Abschätzung mit einem regionalen Faktor. Die Abweichung von der niedrigsten Schätzung (regional, ohne GHD) zur höchsten (sektoral, mit GHD) liegt unter 16%. Angesichts der Tatsache, dass Top-Down-Abschätzungen immer fehlerbehaftet sind und nur eine grobe Abschätzung darstellen, ist ein solcher Fehler eher gering. Abbildung 4.2 zeigt das Ergebnis der Extrapolation über das regionale Verfahren nach Gleichung 4.4 mit der Übertragung des Temperaturprofils.

### 4.3 Diskussion der Ergebnisse

Es liegt in der Natur einer Abschätzung, dass das Ergebnis unsicherer ist als bei einer reinen Datenauswertung. Um so wichtiger ist es die Ergebnisse kritisch zu beleuchten. Dafür sollen in diesem Kapitel die Ergebnisse der Abschätzung mit Werten von früheren Abschätzungen verglichen werden, ähnlich wie in Kapitel 3. Außerdem wird diskutiert, inwieweit eine Übertragung der Faktoren sinnvoll ist.

#### 4.3.1 Einordnung der Ergebnisse in den Forschungsstand

In Kapitel 3 ist das Abwärmeaufkommen aus den ausgewerteten Betrieben mit den Abwärmeabschätzungen für die gesamte Industrie aus früheren Studien verglichen worden. Daraus ergab sich eine, in der erwarteten Größe, erhebliche Abweichung in den Ergebnissen. Deshalb sollen nun die extrapolierten Ergebnisse zum Abwärmeaufkommen verglichen werden. Neben den bundesweiten Studien gibt es dazu noch das schon beschriebene Projekt aus Nordrhein-Westfalen [IUTA 2000; Drath 2002; Kattenstein u. a. 2002; Gebhardt 1999]: Dieses Projekt hat sowohl im methodischen Vorgehen als

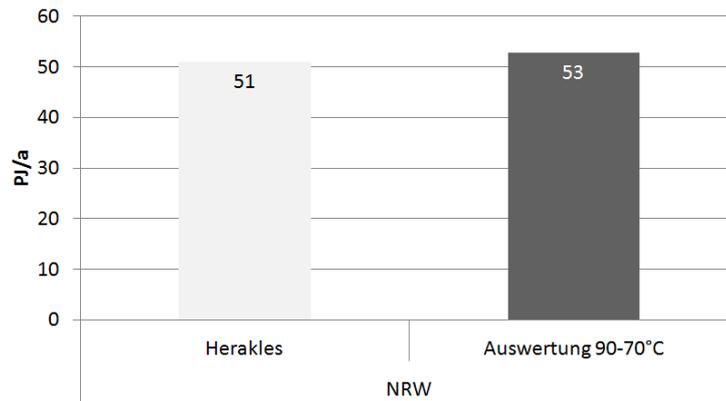


Abbildung 4.3: Vergleich der Ergebnisse (Auswertung 90-70°C) zu der früheren Studie Herakles für NRW: Die Studien zeigen eine gute Übereinstimmung auch wenn sie sich auf unterschiedliche Jahre beziehen.

auch in der verwendeten Datenquelle die größte Übereinstimmung mit der vorliegenden Arbeit. Deshalb wird hier auch die größte Übereinstimmung in den Ergebnissen erwartet. Allerdings wurden in NRW die Daten in einem wesentlich kleineren Maßstab, nur für die Stadt Duisburg (41 Betriebe, 1992, [IUTA 2000]), ausgewertet und danach für das Bundesland extrapoliert. Außerdem wurden damals noch alte Klassifizierungen der Wirtschaftszweige verwendet. Auf dem letzten Stand wurden die Kennwerte auf WZ93 angepasst [Drath 2002]. Deshalb können nur die Endergebnisse und nicht die Kennwerte verglichen werden. Aus der Studienarbeit [Drath 2002] stammen auch die Angaben zum Abwärmeaufkommen in NRW. Sie wurden mit den neu klassifizierten Kennzahlen von 1992 berechnet. Leider ist nicht explizit angegeben, aus welchem Jahr die verwendeten Endenergieverbräuche stammen, an anderer Stelle in der Arbeit wird aber ein Datensatz von 1998 verwendet. Bei den Abwärmemengen wurde die Abwärme berücksichtigt, die bei der Abkühlung von Wärmeströmen über 90°C auf 70°C entsteht.

Die vorliegende, in Kapitel 3.2 beschriebene Datenauswertung und Skalierung wurde dementsprechend angepasst. Bei der Skalierung der Daten wurde mit regionalen Faktoren gearbeitet. Wie in Abbildung 4.3 zu sehen ist weichen die Ergebnisse nur minimal ab. Der Fehler liegt unter 5%.

Die Abweichung kann zum einen durch die unterschiedliche Größe der Datenbasis zustandekommen, zum anderen durch das abweichende Jahr der Erhebung (2008 vs. 1998). [Utlü 2015] hat die Entwicklung des Abwärmeaufkommens über die Zeit von 1990 bis 2011 für die Türkische Industrie untersucht. Dort zeigt sich für den Zeitraum von 1998 bis 2008 ein Plus im Abwärmeaufkommen von ca. 13%.

Eine deutlich größere Abweichung in den Ergebnissen zeigt sich beim dem Vergleich zu den anderen Studien für das gesamte Bundesgebiet (Abbildung 4.4). Das Diagramm zeigt Skalierungen auf Basis einer regionalen Skalierung unter Berücksichtigung des GHD-Bereichs. Für die Auswertung wurden die gleichen Annahmen getroffen wie bei dem Vergleich mit dem nicht extrapolierten Wert in Kapitel 3.

Im Vergleich zu [Pehnt u. a. 2010] weicht die Abschätzung um fast 34% nach unten ab. Das ist ein Faktor von über 1,5. Geht man davon aus, dass bei einer sektoralen Extrapolierung ein um 13% höherer Wert erzielt werden würde, bleibt immer noch ein Faktor von knapp über 1,3 zwischen den Ergebnissen. Noch größer ist die Abweichung zu [Grote u. a. 2015]. Auch der Vergleich zu den Ergebnissen von [Persson u. a. 2014] und [Connolly u. a. 2013] zeigt deutliche Abweichungen im Ergebnis der Abschätzungen: Die Abwärmemengen liegen um einen Faktor von 3,7 bis 4 mal höher; um einen Faktor von 3,3 bis 3,5 geht man von einem 13% höheren sektoral extrapolierten Ergebnis aus. Allerdings arbeiten die Studien mit großzügigen Abwärmefaktoren um das maximal mögliche Abwärmeaufkommen zu simulieren. Die hier vorgestellte Auswertung will im Gegenteil einen unteren Grenzwert beschreiben, auch im Ergebnis der Skalierung. Insofern ist die Abweichung der Ergebnisse wiederum plausibel.

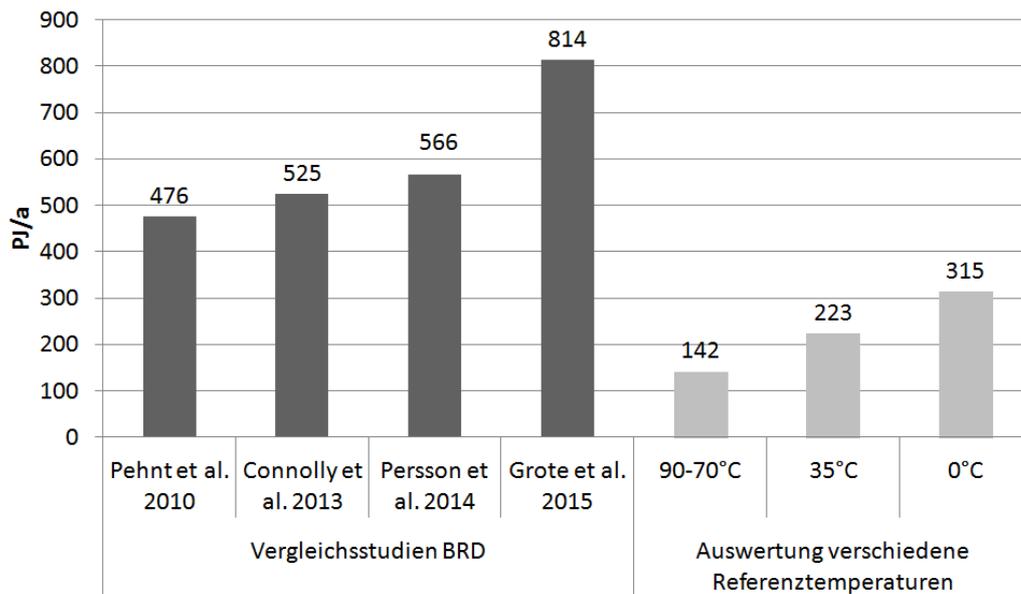


Abbildung 4.4: Vergleich mit der Auswertungen mit verschiedenen Referenztemperatur mit den Ergebnissen früheren Studien: Die früheren Ergebnisse sind höher was den Charakter der Auswertung als untere Grenze bestätigt.

### 4.3.2 Übertragbarkeit der Faktoren

Neben dem Abgleich mit früheren Abschätzungen soll der Ansatz, Abwärmefaktoren zu übertragen, überprüft werden, indem die Kennwerte für eine Abwärmemengenabschätzung für Schweden genutzt werden. Für Schweden existieren fünf frühere Studien, mit denen das Ergebnis auf Plausibilität verglichen werden kann:

In [Land u. a. 2002; Cronholm u. a. 2009] wurden Abwärmekennwerte (Abwärme pro Brennstoffverbrauch) berechnet um das Potenzial für die Nutzung von Abwärme in Fernwärmesystemen zu ergründen. Deshalb wurden nur große Betriebe in der Nähe von Siedlungen berücksichtigt. Die aus den Daten der Firmen entwickelten Kennwerte wurden dann auf den gesamten Brennstoffverbrauch der Industrie übertragen. So wurde in [Land u. a. 2002] ein Abwärmeaufkommen von 34 PJ/a für Schweden berechnet, in [Cronholm u. a. 2009] 22 bis 28 PJ/a ebenfalls für Schweden. In der zweiten Vorstudie zur European-Heatroadmap [Connolly u. a. 2013] wurde 2013 für Schweden ein Abwärmeaufkommen von 97 PJ/a angegeben. In der begleitenden wissenschaftlichen Publikation [Persson u. a. 2014] wurde mit 106 PJ/a ein etwas höherer Wert angegeben. Die Daten basieren auf Energieverbräuchen die aus dem „European Pollutant Release and Transfer Register“ (E-PRTR) Standortgenau zurückgerechnet wurden und mit pauschalen sektoralen Abwärmefaktoren belegt wurden. Auf Basis einer breit angelegten Befragung in zwei Regierungsbezirken hat [Broberg u. a. 2012] das theoretische Abwärmeaufkommen auf 76 PJ/a beziffert. Dabei wurden Abgas, Abluft und Abwasser berücksichtigt.

Um die Übertragbarkeit zu testen, wurden die sektoralen Abwärmekennwerte aus Tabelle 3.7 mit den Endenergieverbrauchswerten von Schweden [Eurostat 2015] kombiniert.

Wie Abbildung 4.5 zeigt, liegt das gewonnene Abwärmepotenzial in der Spannbreite der vorherigen Studien für Schweden. Auch hier beziehen sich die Studien auf unterschiedliche Jahre. Stärker ins Gewicht fällt vermutlich jedoch, dass die Studien aus 2002 und 2009 nur die Abwärme betrachten, die in Fernwärmesystemen verwendet werden kann. Das erklärt, warum diese Studien ein geringeres Abwärmeaufkommen errechnen. Bei Broberg et al. wurde neben Abgas und Abluft auch Abwasser berücksichtigt, die Studie kommt dadurch auf ein höheres Potenzial. Bei Connolly et al und Persson et al. wurden maximal hohe Abwärmefaktoren angenommen und somit ein höheres Potenzial errechnet. Insgesamt erscheint das Ergebnis aus der Übertragung der Kennwerte auf Schweden so-

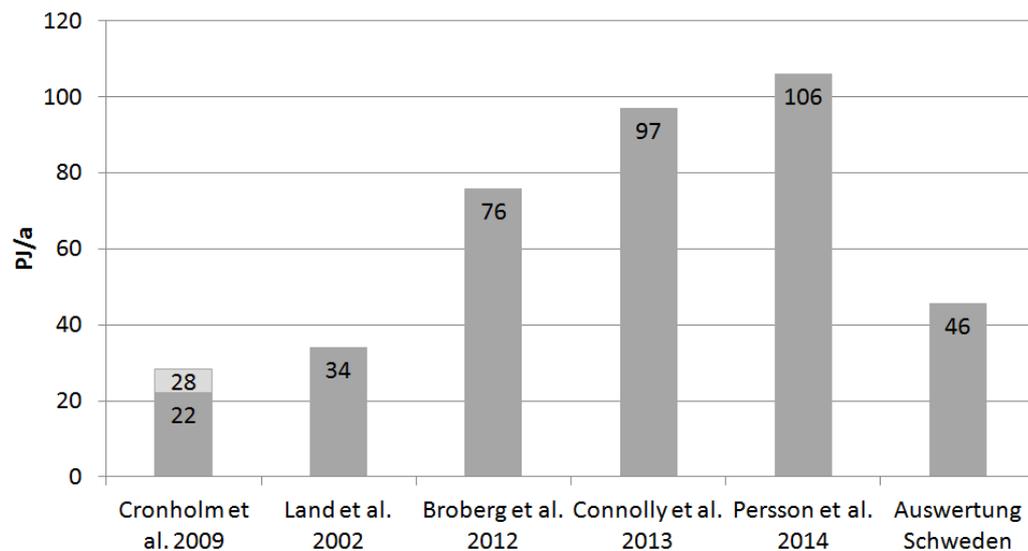


Abbildung 4.5: Vergleich der Ergebnisse von Studien für Schweden zu den übertragenen Ergebnissen dieser Auswertung auf Schweden: Die Werte der Studien von 2002 und 2009 sind tiefer, betrachten allerdings auch wirtschaftliche Potenzial für Fernwärme. Ansonsten liegt das übertragene Ergebnis innerhalb der Spannweite der Ergebnisse

mit jedoch sinnvoll zu sein. Daraus lässt sich keine allgemeine Übertragbarkeit von Kennwerten auf andere Länder oder die Nutzbarkeit von Skalierungen ableiten. Aber das Ergebnis deutet darauf hin, dass eine solche Übertragbarkeit, zumindestens in einigen Fällen, möglich ist.

Detaillierter wird die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Länder und Gebiete, wie sie in vielen Top-Down-Ansätzen angewendet wird, in [Miró u. a. 2016] vorgestellt und am Beispiel von Spanien, Katalonien und dem Baskenland diskutiert.



## Kapitel 5

# Spannweite Abwärmeaufkommen

Das Ziel des ersten Teils dieser Arbeit war es, eine sichere untere Grenze des industriellen Abwärmeaufkommens in Deutschland zu finden. Diese liegt, auf Basis der ausgewerteten Emissionsdaten aus 15 Bundesländern, für 2008 bei 127 PJ/a. Das größte Abwärmeaufkommen ist in Nordrhein-Westfalen zu finden, den höchsten Abwärmefaktor hat Schleswig-Holstein. Auf die Sektoren bezogen fallen fast 88% (111 PJ/a) der Abwärme in den sechs größten abwärmeproduzierenden Sektoren an. Davon hat den größten Anteil der Sektor „Metallerzeugung und -bearbeitung“ (Sektor 24), gefolgt von der „Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden“ (Sektor 23) und der „Chemieindustrie“ (Sektor 20). Insgesamt wird bundesweit durchschnittlich 13% der eingesetzten Brennstoffenergie als Abwärme freigesetzt. Über die ausgewerteten Daten wurde etwa 57-58% des Endenergieeinsatzes (ohne Strom) berücksichtigt. Überträgt man das Ergebnis der Auswertung auf den nicht erfassten Teil der Industrie, ergibt sich ein Abwärmeaufkommen für Deutschland zwischen 218 PJ/a und 252 PJ/a. Die Spanne ergibt sich durch unterschiedliche Extrapolierungsverfahren und dadurch ob der GHD-Bereich (Gewerbe, Handel und Dienstleistung) einbezogen wird.

Will man eine obere Grenze des Abwärmeaufkommens aus der deutschen Industrie benennen, kann dazu die Studie von [Persson u. a. 2014] herangezogen werden: Dort wird das Abwärmeaufkommen in Deutschland auf 566 PJ/a geschätzt. Allerdings werden hier auch Raffinerien und Mineralöl verarbeitende Betriebe berücksichtigt. Eine Alternative obere Grenze kann über einen pauschalen Abwärmefaktor von 40% der eingesetzten Energie (Endenergieverbrauch ohne Strom) gezogen werden. Das ist zum einen der höchste Abwärmefaktor, der in der aktuellen, wissenschaftlich fundierten Literatur zu finden ist (z.B. [Utlu 2015]), zum Anderen auch aus Sicht der Autorin der maximale sinnvoll anzunehmende obere Grenzwert. Für Deutschland würde sich daraus ein maximales industrielles Abwärmeaufkommen von 706 PJ/a ergeben. Die Arbeit von [Grote u. a. 2015] mit 814 PJ/a eignet sich im vorliegenden Kontext nicht als obere Grenze für das Abwärmeaufkommen, da hier die Abgrenzungen der Industrie anders gewählt wurde (es wurden auch die Industriesektoren WZ 2008 05-09 und 19 berücksichtigt). Zusammenfassend sind die Ergebnisse in Abbildung 5.1 dargestellt.

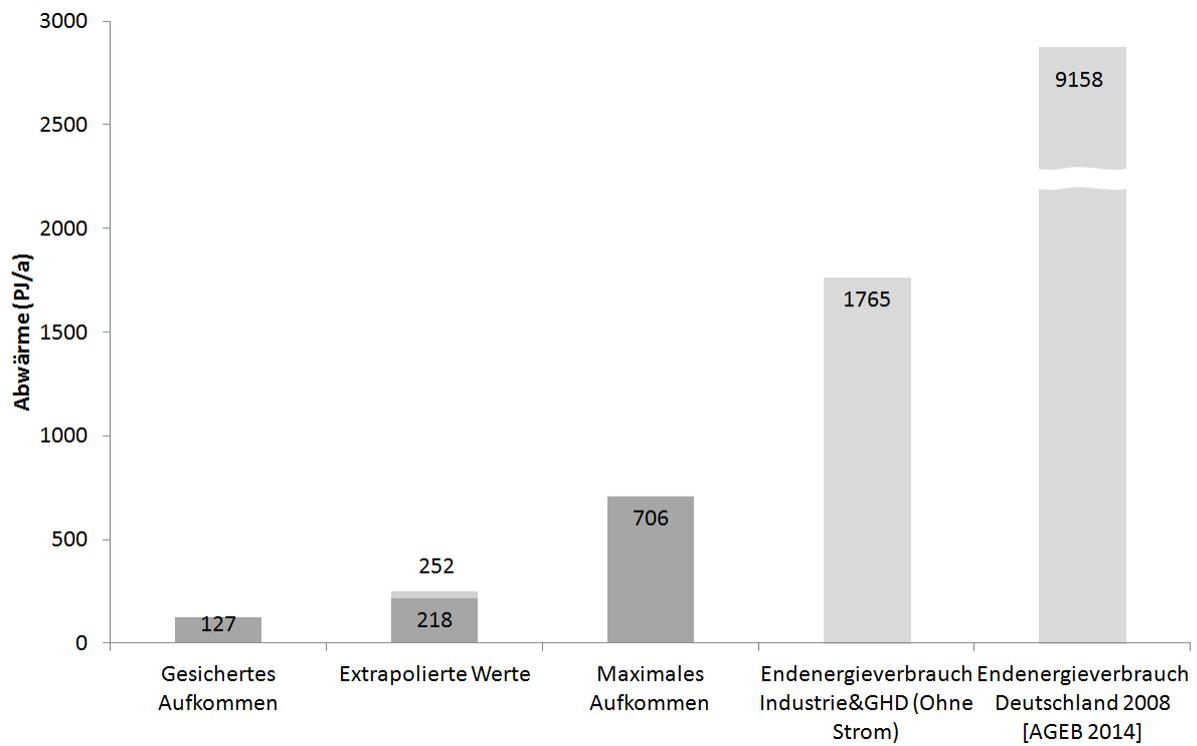


Abbildung 5.1: Obere und untere Grenze Abwärmeaufkommen der deutschen Industrie 2008: Die industrielle Abwärme liegt zwischen 127 PJ/a und 706 PJ/a.

## Teil II

# Nutzbarkeit des Abwärmepotenzials



## Kapitel 6

# Technische Beschränkungen

Wie in Kapitel 1 beschrieben gibt es neben dem in Teil 1 aufgestellten theoretischen Potenzial noch die durch weitere Randbedingungen begrenzten technischen und wirtschaftlichen Potenziale. Wenn man die Nutzung von Abwärme in Wärme- und Kälteanwendungen betrachtet, wird das technische Potenzial der Abwärmenutzung zum Einen durch die Technologien und deren technischen Rahmenbedingungen begrenzt, zum Anderen durch den theoretischen Wärme- bzw. Kältebedarf. Denn wie in Kapitel 1.1 erläutert, ist für diese Nutzungsarten ein Wärme- bzw. Kälteabnehmer notwendig. Um das technische Potenzial zu bestimmen wird deshalb im folgenden Kapitel der Wärme- und Kältebedarf berechnet. Anders als das theoretische Potenzial, ist das technische Potenzial für jede Abwärmenutzungstechnologie unterschiedlich. Im Folgenden soll deshalb ein Überblick über verschiedene Nutzungstechnologien gegeben werden sowie die technischen Rahmenbedingungen für Wärmepumpen, Absorptionskälteanlagen und Zeolith-Wärmespeicher vorgestellt werden.

Wesentliche Teile der hier vorgestellten Ergebnisse wurden zuvor schon in [Brueckner u. a. 2015] veröffentlicht.

### 6.1 Technologien und technische Rahmenbedingungen

Das technische Potenzial der Abwärme ist von der jeweils betrachteten Technologie abhängig, da jede Technologie andere technische Rahmenbedingungen wie zum Beispiel das notwendige Temperaturniveau der Abwärme aufweist. Eine Möglichkeit die verschiedenen Technologien zu kategorisieren besteht darin, sie nach dem Einsatz entlang der Verwendungskette der Abwärme zu gruppieren. Dabei wird berücksichtigt, dass nicht selten mehr als eine Technologie eingesetzt wird. Abbildung 6.1 zeigt eine solche Einsortierung der verschiedenen Technologien entlang des Abwärmenutzungspfads von der Abwärmequelle zum Endnutzer.

Da diese Einsortierung auf die verschiedenen Kombinationen der Technologien fokussiert, ist sie für die Betrachtung der technischen Rahmenbedingungen der einzelnen Technologien jedoch weniger geeignet. Hier bietet sich eher eine Kategorisierung der einzelnen Abwärmenutzungstechnologien nach der Nutzungsart an, wie sie in Abbildung 6.2 gezeigt wird. Dabei kann zunächst zwischen der aktiven und passiven Nutzung der Abwärme unterschieden werden (siehe auch [Brueckner u. a. 2015]). Unter der passiven Nutzung wird die direkte Nutzung auf dem gleichen oder niedrigeren Temperaturniveau verstanden: Entweder direkt nur über einen Wärmetauscher oder, wenn es räumliche oder zeitliche Diskrepanzen auszugleichen gilt, mit Hilfe eines thermischen Speichers. Unter den aktiven Technologien werden die Umwandlung in Wärme auf einem höheren Temperaturniveau, die Erzeugung von Kälte sowie die von Strom zusammengefasst.

Im Folgenden werden exemplarisch Wärmepumpen, Absorptionskälteanlagen und thermische Energiespeicher am Beispiel des Zeolithspeichers betrachtet. Stromerzeugende Technologien wie Kalina- oder ORC-Prozesse werden hier nicht betrachtet.

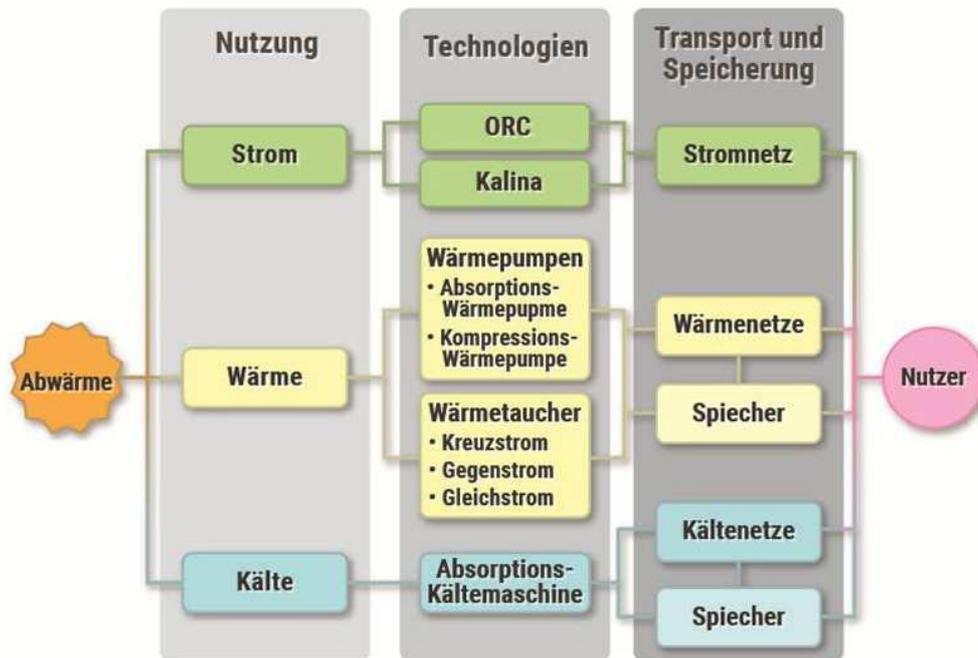


Abbildung 6.1: Nutzungsmöglichkeit Abwärme: Vom Anbieter zum Nutzer, veröffentlicht in [Brückner und Pehnt 2013]

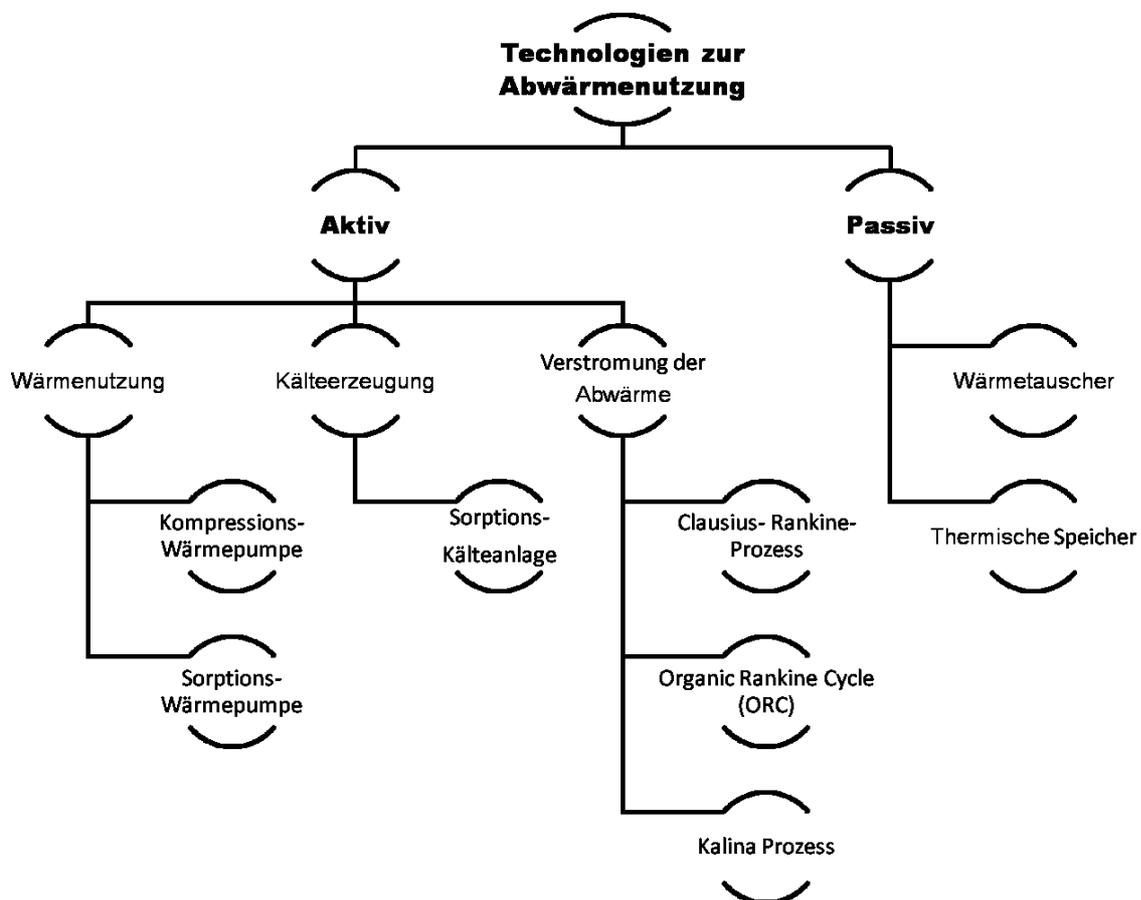


Abbildung 6.2: Übersicht Abwärmenutzungstechnologien aus [Brueckner u. a. 2015]

### 6.1.1 Wärmepumpen und Absorptionskältemaschinen

Bei Wärmepumpen -oder allgemeiner Wärmetransformationssystemen- unterscheidet man zwischen mechanisch und thermisch betriebenen Systemen. Zu den Wärmepumpen mit thermischer Antriebsenergie zählen die hier beschriebenen Absorptionswärmepumpen. Beide Systemarten haben aber das gleiche zu Grunde liegende Wirkprinzip: Wärme wird von einem niedrigen Temperaturniveau zu einer höheren Temperatur transformiert. Wird statt der Wärme auf dem hohen Temperaturniveau die aufgenommene Wärme auf dem niedrigen Temperaturniveau als Produkt angesehen, handelt es sich um eine Absorptionskältemaschine. Im folgenden sollen sowohl mechanische als auch thermische Wärmepumpen (bzw. Absorptionskältemaschinen) kurz vorgestellt werden.

#### 6.1.1.1 Mechanische Wärmepumpen

Eine mechanische Wärmepumpe kann man sich als Umkehrung einer Kraft-Wärme-Maschine vorstellen: Anstatt aus Hochtemperaturwärme mechanische Energie zu gewinnen, wird umgekehrt mechanische Energie eingesetzt um das Temperaturniveau der Wärme auf ein nutzbares Niveau anzuheben. Dafür wird in einem ersten Schritt die zur Verfügung stehende Wärme (Abwärme, Geo- oder Solarthermie) genutzt um das Arbeitsmedium zu verdampfen. Durch den Einsatz von mechanischer Energie in einem Verdichter (in der Regel elektrisch betrieben) wird das Arbeitsmedium anschließend auf ein höheres Druckniveau gebracht. Dadurch erhöht sich auch die Temperatur des Mediums. Im nächsten Schritt, im Kondensator, wird das Fluid verflüssigt und die gewünschte Wärmeleistung entzogen. Über ein Expansionsventil wird das Arbeitsmedium dann entspannt und abgekühlt, wodurch es Wärme aufnehmen kann (vgl. z.B. [Pehnt 2010], [Brueckner u. a. 2015]). Ein vereinfachtes Wirkschema von einer mechanisch angetriebenen Wärmepumpe ist in Abbildung 6.3 dargestellt.

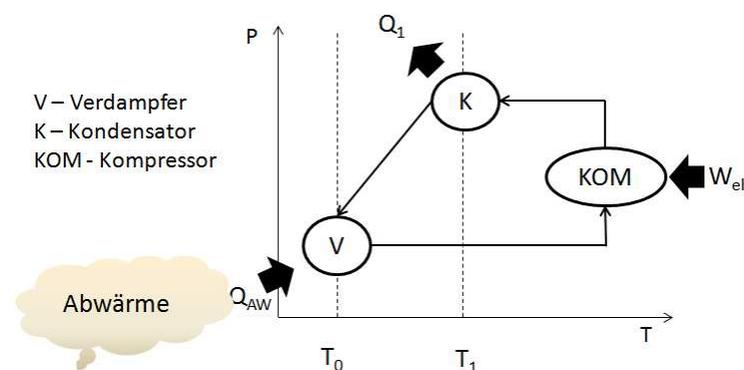


Abbildung 6.3: Wirkprinzip mechanische Wärmepumpe:  $Q_{AW}$  ist dabei die eingesetzte Abwärme bei  $T_0$ ,  $W_{el}$  die eingesetzte elektrische Energie und  $Q_1$  die gewonnene Nutzenergie bei  $T_1$ , aus [Brueckner u. a. 2015]

Dabei wird der Druck ( $p$ ) über die Sättigungstemperatur ( $T$ ) dargestellt,  $T_0$  ist die Temperatur der Quelle, die auf das Temperaturniveau  $T_1$  gehoben wird und dort, zusammen mit der eingesetzten mechanischen Energie ( $W_{el}$ ), als  $Q_1$  abgegeben wird. Technische Begrenzungen des Einsatzpotenzials sind eine maximale Abgabetemperatur von 120 bis 140°C, auf Grund von Materialeigenschaften. Normalerweise werden mechanische Wärmepumpen bis zu einer Nutz-Temperatur von 80°C eingesetzt. Die untere Temperatur kann je nach Wärmeträgermedium deutlich unter Null sein und hängt im Wesentlichen von der angestrebten Temperatur am Kondensator ab. Der maximale Temperaturhub ( $T_1$  zu  $T_0$ ) wird durch das Arbeitsmedium begrenzt, ist aber normalerweise kleiner als 60 K. Experimentell konnte ein maximaler Temperaturhub von 90 K erreicht werden ([Holland und Watson 1982] bzw. [Brueckner u. a. 2015]).

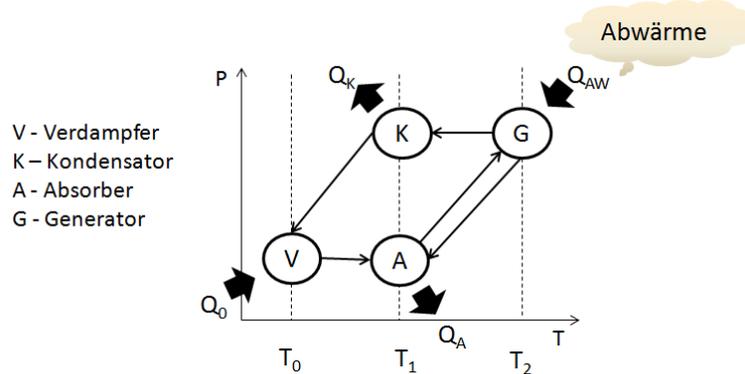


Abbildung 6.4: Funktionsschema Absorptionswärmepumpe: Wärme wird auf zwei Temperaturniveaus aufgenommen  $Q_0$  bei  $T_0$  und  $Q_{AW}$  bei  $T_2$ , abgegeben wird Wärme ( $Q_1 = Q_K + Q_A$ ) sowohl beim Kondensator  $Q_K$  und Absorber  $Q_A$  bei  $T_1$ , veröffentlicht in [Brueckner u. a. 2015]

### 6.1.1.2 Absorptionswärmepumpen

Bei Absorptionswärmepumpen ist die treibende Kraft eine Hochtemperaturwärmequelle an Stelle von mechanischer Energie. Ein Funktionsschema analog zu Abbildung 6.3 ist in Abbildung 6.4 dargestellt.

Die Wirkweise von Verdampfer und Kondensator entspricht der Wirkweise bei einer mechanisch angetriebenen Wärmepumpe. Der Unterschied besteht in der Verdichtung: Bei einer Absorptionswärmepumpe geschieht dies über einen Lösungsmittel-Kreislauf. Dabei wird das Arbeitsmedium im Absorber in einem Lösungsmittel gelöst, unter Freisetzung der Absorptionswärme  $Q_A$ . Dies geschieht normalerweise auf dem gleichen Temperaturniveau, auf dem auch der Kondensator ( $Q_K$ ) arbeitet. Unter Aufnahme von  $Q_{AW}$  wird das Arbeitsmedium anschließend wieder desorbiert (im Generator -G). Die abgegebene Wärme eines solchen Systems ist somit die Summe der am Absorber und Kondensator abgegebenen Wärme:

$$Q_1 = Q_A + Q_K \quad (6.1)$$

Der Temperaturhub wird analog wie bei mechanischen Wärmepumpen als  $T_0 - T_1$  definiert, zusätzlich zur treibenden Temperaturdifferenz  $T_2 - T_1$ . Diese beiden Differenzen sind über eine Daumenregel verknüpft: (vgl. [Brueckner u. a. 2015])

$$1,15 * (T_1 - T_0) = (T_2 - T_1) \quad (6.2)$$

Derzeit gibt es zwei geläufige Paare von Arbeitsmedien: Wasser/wässrige Lithium Bromid Lösung und Ammoniak/Wasser. Bei Absorptionskältemaschinen hat normalerweise das Stoffpaar Wasser/LiBr höhere Wirkungsgrade. Ohne Zusätze muss die Niedertemperaturquelle in diesem Fall allerdings mindestens  $6^\circ\text{C}$  betragen, um ein Einfrieren des Verdampfers zu verhindern. Abbildung 6.5 zeigt die Einsatzmöglichkeiten von Kühlern und Wärmepumpen. Die verschiedenen schattierten Bereiche stehen dabei für verschiedene Anlagentypen der gleichen Arbeitsmedien (vgl. [Brueckner u. a. 2015]).

Die blauen Bereiche symbolisieren Kühlanwendungen mit einer Rückkühltemperatur ( $T_1$ ) von  $35^\circ\text{C}$ . Zum Beispiel können für eine Kühlanwendung mit einem  $H_2O/LiBr$  Arbeitspaar  $10^\circ\text{C}$  erreicht werden ( $T_0$ ), wenn eine (Ab-)Wärmequelle mit ca.  $70^\circ\text{C}$  ( $T_2$ ) zur Verfügung steht, bei einer Rückkühltemperatur ( $T_1$ ) von  $35^\circ\text{C}$ . Die drei verschiedenen Bereiche des Arbeitspaars in der Abbildung zeigen unterschiedliche Absorptionskältetechnologien (DL: Double Lift, SE: Single Effect, DE: Double Effect). Für eine detailliertere Beschreibung der Technologien wird auf [Brueckner u. a. 2015] oder andere Fachliteratur verwiesen. Bei der Nutzung von Abwärme zur Kühlung besteht gegenüber der konventionellen mechanischen Kühlung der Vorteil, dass bei thermischer Kühlung klimaverträgliche Kühlmittel wie Ammoniak oder Wasser verwendet werden [Pehnt u. a. 2010]. Die roten Bereiche sind Wärmeanwendungen für eine Zieltemperatur von  $60^\circ\text{C}$ . Zum Beispiel benötigt

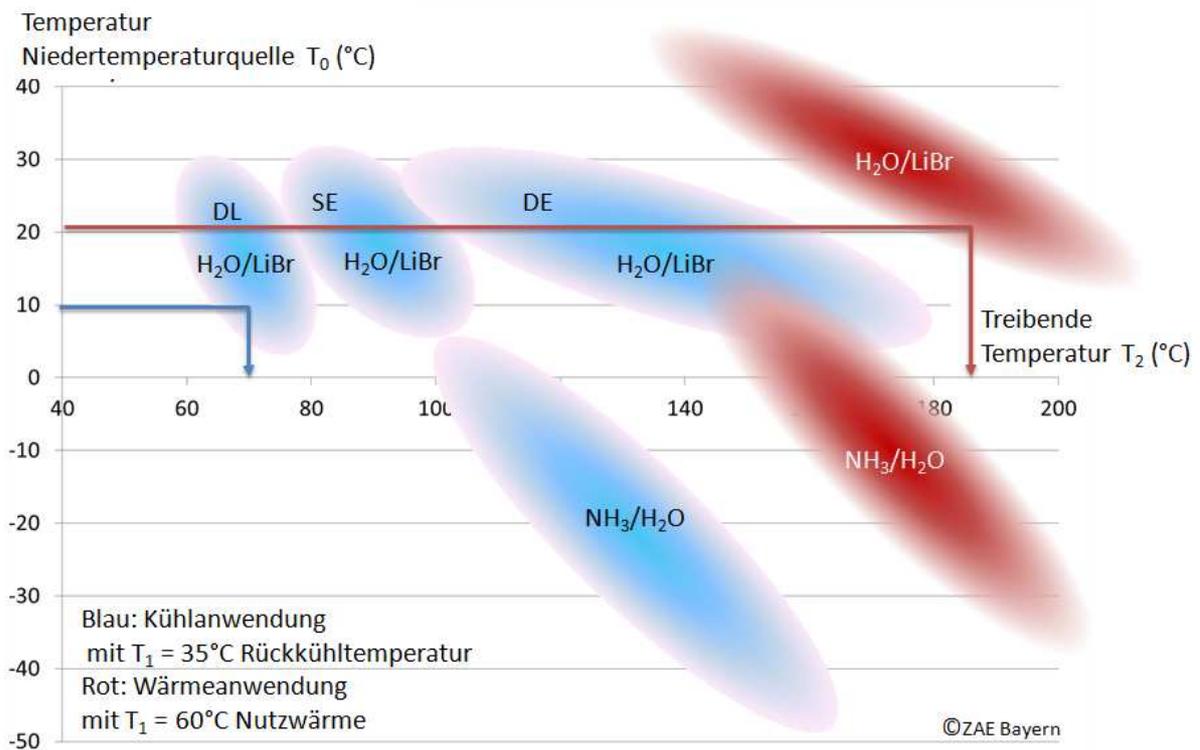


Abbildung 6.5: Erreichbare bzw. zulässige Temperatur der Niedertemperatur-Wärmequelle als Funktion der Antriebstemperatur für Kühlanwendungen (blau) und Heizanwendungen (rot/weiße Schrift) sowie für verschiedene Geräteschaltungen DL, SE, DE, und Arbeitsstoffpaare ( $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$  und  $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ ). Um mit einem  $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$  Arbeitspaar auf  $10^\circ\text{C}$  zu kühlen ( $T_0$ ) benötigt man eine (Ab-)Wärmequelle mit ca.  $70^\circ\text{C}$  ( $T_2$ ) bei einer Rückkühltemperatur ( $T_1$ ) von  $35^\circ\text{C}$  (blauer Pfeil). Im Heizfall braucht man eine (Ab-)Wärmequelle von ca.  $185^\circ\text{C}$  ( $T_2$ ) um eine Niedertemperaturquelle von  $20^\circ\text{C}$  ( $T_0$ ) auf  $60^\circ\text{C}$  ( $T_1$ ) bringen (roter Pfeil). Die drei verschiedenen Bereiche für  $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$  stehen dabei für unterschiedliche Absorptionskältetechnologien (DL: Double Lift, SE: Single Effect, DE: Double Effect). Vgl auch Bildquelle: [Brueckner u. a. 2015]

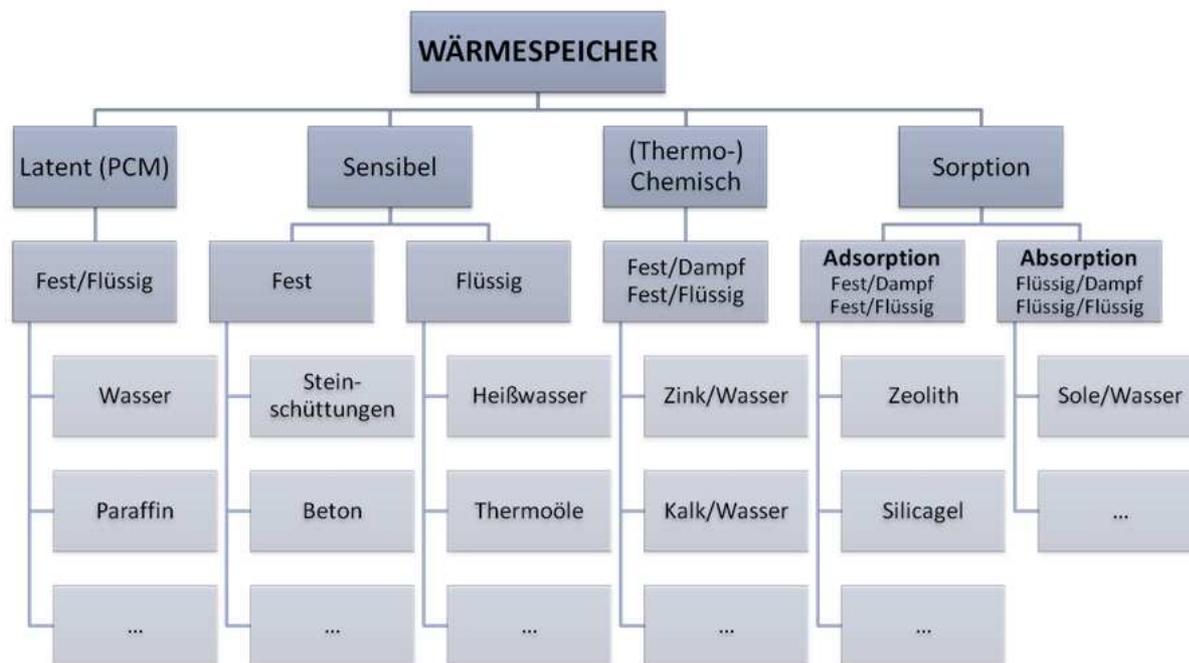


Abbildung 6.6: Typisierung der typischen angewendeten Wärmespeicher nach Speicherart: Latent, sensibel, (thermo-) chemisch und sorptiv

man eine (Ab-)Wärmequelle von ca.  $185^{\circ}\text{C}$  ( $T_2$ ), um eine Wärmepumpe anzutreiben die eine Niedertemperaturquelle (oder Umgebungsluft) von  $20^{\circ}\text{C}$  ( $T_0$ ) auf  $60^{\circ}\text{C}$  ( $T_1$ ) bringt. (Vgl. auch [Brueckner u. a. 2015])

### 6.1.2 Wärmespeicher

Als Alternative zur direkten Wärmenutzung, oder auch als Kombinationsmöglichkeit mit selbiger, soll im Folgenden das Augenmerk auf Speichermöglichkeiten für Wärme gelegt werden. Dabei werden ausschließlich Speicher berücksichtigt, die die Wärme mehr oder weniger direkt speichern. Die Speicherung von Wärme durch die Umwandlung in Strom (z.B. Batterien), mechanische Energie (z.B. Druckspeicher) oder die Erzeugung von Gasen (z.B. Regasification + Gasspeicher) wird hier nicht betrachtet. Wärmespeicher kann man in vier verschiedene Speicherarten unterteilen: latente, sensible, sorptive und thermochemische. Thermochemische und sorptive Speicher sind dabei uneindeutig, weil sie die Energie nur zum Teil als Wärme speichern. Ein Überblick über verschiedene Wärmespeicher ist in Abbildung 6.6 zu finden.

Latentwärmespeicher bilden die Gruppe der PCM-Speicher, die die Wärme latent im Phasenübergang speichern. Dazu zählen zum Beispiel Eisspeicher.

Sensible Wärmespeicher speichern die Wärme entweder in Feststoffen (z.B. Betonspeicher oder Schüttungen als Festbettspeicher) oder Flüssigkeiten (Heißwasserspeicher oder Thermoöle).

Sorptionsspeicher wurden traditionell als thermochemische Speicher eingruppiert, da bei beiden ein Stoffaustausch stattfindet. Das ist aber eigentlich nicht richtig: Bei Sorptionsspeichern wird die Energie durch die Ad- bzw. Absorption freigesetzt. Hier wirken Adhäsionskräfte. Bei (thermo-) chemischen Speicher, findet wie der Name schon sagt, eine chemische Reaktion statt und ein neuer Stoff entsteht. Im Fall von Zink wird Wärme gespeichert indem Zinkoxid zu Zink reduziert wird. Durch Kontakt mit Wasser reagiert das Zinkoxid zu Zink und Wasserstoff in einer exothermen Reaktion und setzt Wärme frei. Bei Sorptionsspeichern wird die Wärme gespeichert indem z.B.

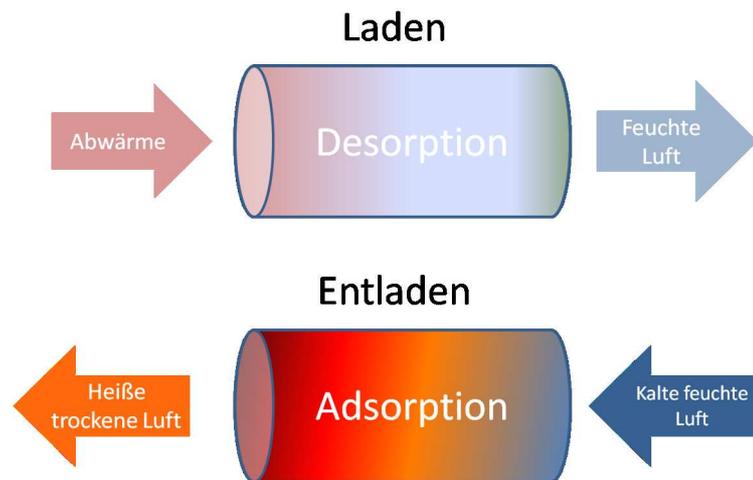


Abbildung 6.7: Adsorption und Desorption/Laden und Entladen des Zeolithspeicher

das Zeolith getrocknet wird. Das Zeolith bleibt aber in seiner ursprünglichen Form vorhanden, nur „nass“. Im Vergleich zu latenten und sensiblen Wärmespeichern haben sowohl chemische als auch Sorptionsspeicher jedoch eine gemeinsame Besonderheit: Die Entladetemperatur kann oberhalb der Ladetemperatur liegen. Bei latenten und sensiblen Speichern wird die gespeicherte Wärme maximal auf dem gleichen oder auf einem niedrigeren Temperaturniveau abgegeben als die Ladetemperatur. Auch bei Sorptionsspeichern wird ein Teil der Wärme sensibel durch die Aufwärmung des Materials gespeichert. Der wesentliche Teil der Wärme wird jedoch über den Adsorptionsprozess (bzw. Absorptionsprozess) gespeichert. Das hat zum Einen den Vorteil, dass dieser Anteil -solange ein Stoffaustausch ausgeschlossen ist- über lange Zeiten (Stunden, Tage, Monate) verlustfrei gespeichert werden kann. Zum Anderen ist die maximale Entladetemperatur nicht mit der Ladetemperatur gleichzusetzen: Der Speicher kann bei höheren Temperaturen entladen als geladen werden; Es können somit Wärmepumpeneffekte ausgelöst werden. Bei chemischen Speichern ist die Wärme in den Reaktionsprozessen gespeichert. Dadurch können ebenfalls Wärmepumpen-Effekte genutzt werden und die Energie lange verlustfrei gespeichert werden. Im folgenden sollen Zeolith-Wärmespeicher als Unterart der (Ad-)Sorptionsspeicher näher betrachtet werden:

**Zeolithspeicher** Sorptionsspeicher speichern Wärme dadurch, einem hoch-porösen Speichermedium, wie Silikagel oder Zeolith, Wasser zu entziehen. Wenn das Speichermedium wieder mit Wasser in Kontakt kommt (z.B. durch feuchte Luft), wird Adsorptionsenergie in Form von Wärme wieder freigesetzt. Abbildung 6.7 zeigt schematisch die Be- und Entladung eines Zeolith-Speichers: Zum Entladen wird kalte feuchte Luft in den Speicher geleitet. Das in der Luft enthaltene Wasser setzt sich an das trockene Zeolith und gibt dabei Adsorptionswärme frei. Um den Speicher zu laden wird das Zeolith mit (trockener) heißer Luft getrocknet und das Wasser desorbiert.

Da die Entladung trockene heiße Luft liefert, sind Zeolith-Speicher optimal zum Einsatz in Trocknungsprozessen geeignet. Die Entladetemperatur hängt dabei vom Ladezustand des Zeolith ab und vom Wassergehalt der Entladungsluft. Abbildung 6.8 zeigt Simulationsergebnisse für das Entladen eines Zeolith-Speichers der mit verschiedenen Ladetemperaturen geladen wurde. Dabei handelt es sich um eine Adsorption für ein ideales Festbett für das Zeolith 13X. Der Luftmassenstrom war 10000 kg/h, die Lufttemperatur am Eintritt 55°C und der Taupunkt am Eintritt 35°C. Das Diagramm zeigt neben der Entladetemperatur die mittlere Entladeleistungen (370 kW, 300 kW, 240 kW) und die freigesetzte Energie als Funktion der Ladetemperatur. Die 135°C-Kurve zeigt anschaulich das beschriebene Phänomen, dass die Entladetemperatur mit fast 150°C über der Ladetemperatur von 135°C liegt. Das erste Plateau bei 135°C kommt dabei durch den sensibel gespeicherten Anteil der Wärme zustande. Die Abbildung (6.8) zeigt jedoch auch deutlich, dass der Energiegehalt des Speichers und die Entladeleistung von der Ladetemperatur abhängig ist.

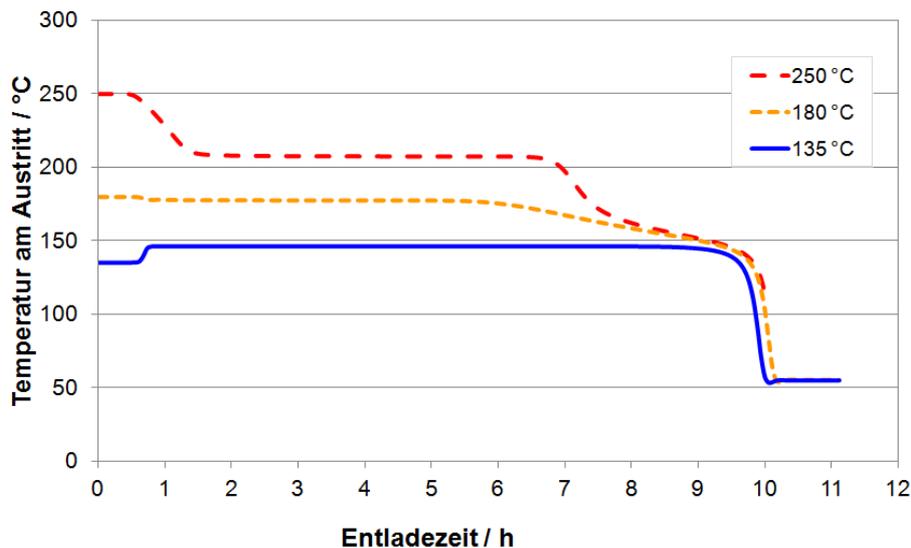


Abbildung 6.8: Entladetemperatur Zeolithspeicher nach unterschiedlichen Trocknungstemperaturen (135°, 180° und 250°C) und damit Ladezuständen, aus [Lävemann u. a. 2015]

Zum Laden kann dabei theoretisch das (gereinigte) Abgas direkt durch den Speicher geleitet werden. Um das Wasser im Speicher zu verdampfen und zu desorbieren sind Ladetemperaturen von 135° bis 250°C möglich. Berechnungen zufolge wird bei der Desorption die Abwärme bis etwa 75° abgekühlt bzw. genutzt; in der Praxis konnte eine Abkühlung bis ca. 40°C beobachtet werden. Diese Ergebnisse sind wichtig um später das für die Technologie zur Verfügung stehende Abwärmepotenzial zu berechnen.

### 6.1.3 Abwärmepotenzial unter technischen Rahmenbedingungen

Wie oben beschrieben haben die unterschiedlichen Technologien unterschiedliche Randbedingungen bezüglich ihrer Einsetzbarkeit. Vor allem können die Techniken die Abwärme auf unterschiedlichen Temperaturniveaus nutzen und bis zu unterschiedlichen Temperaturen abkühlen. Das gilt auch für die hier nicht beschriebenen Techniken zur Stromerzeugung oder für die Nutzung in Fernwärmesystemen. Will man zum Beispiel die Abwärmemenge berechnen, die in Abgasen über 90°C auftritt, die auf 50°C abgekühlt werden, kann dieser Wert nicht direkt aus Diagramm 3.3 in Kapitel 3.3 ausgelesen werden, da diese mit einer Abkühlung auf 35°C berechnet wurden. Man braucht weitere Kurven. Deshalb wird das beim theoretischen Potenzial vorgestellte Abwärme-Temperatur-Diagramm um Auswertungen mit einer Abkühltemperatur von 70° und 100° erweitert (siehe Abbildung 6.9). Dazwischen liegende Werte können anhand des Diagramms abgeschätzt oder zwischen den Kurven interpoliert werden, um so das technische Potenzial abwärmeseitig zu ermitteln. In Kapitel 6.3 wird eine solche Auswertung, auch unter Berücksichtigung des Wärmebedarfs, beispielhaft für Zeolithspeicher vorgestellt.

Neben der Temperatur ist für die technische Verwertbarkeit auch die Leistung der Abwärmequellen entscheidend. Abbildung 6.10 zeigt die Abwärmeenergie bei Abkühlung auf 35°C über der Leistung der Abwärmequellen. Aus der Darstellung ist zu entnehmen, dass der Großteil der Abwärmeleistung aus Quellen mit einer Leistung von über 1MW stammt und nicht aus vielen kleinen Quellen zusammengesetzt ist. Bei einer detaillierteren Analyse wurden die Anzahl der Betriebe untersucht in denen die meiste Abwärme anfällt. Das in Abbildung 6.11 dargestellte Ergebnis zeigt, dass 95% des erhobenen gesicherten Abwärmeeinkommen aus nur 784 Betrieben stammt. Das erhöht die Chance, die Abwärme wirtschaftlich zu nutzen, erheblich.

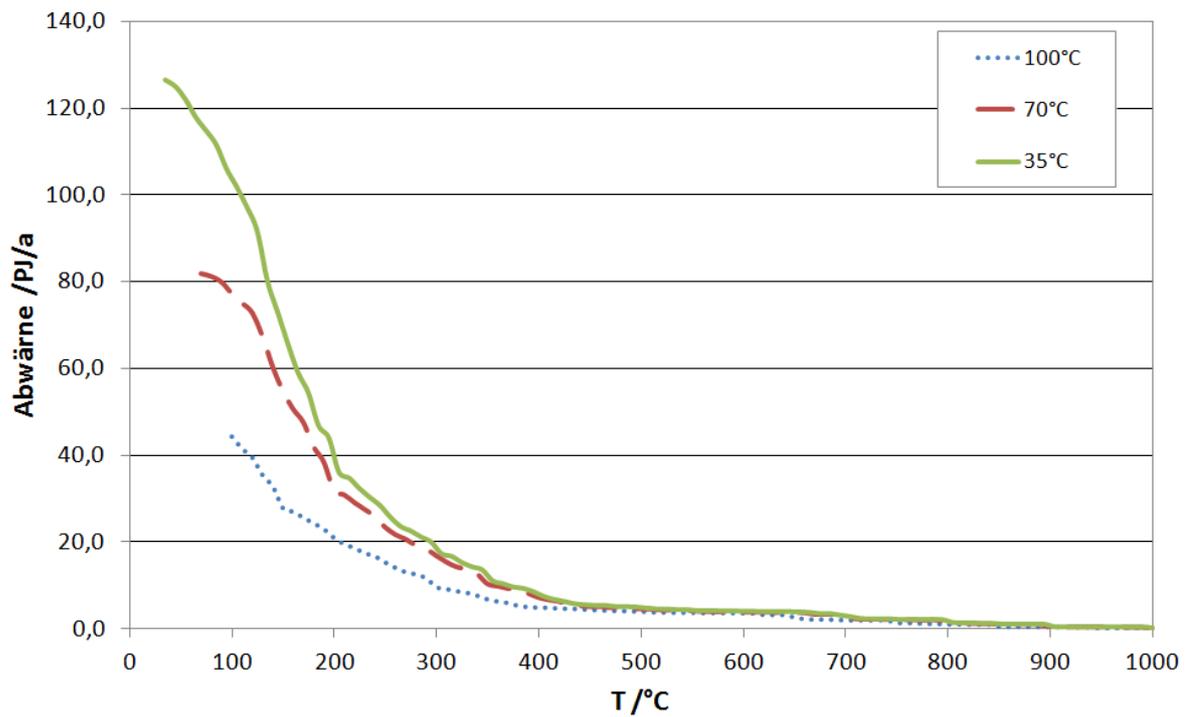


Abbildung 6.9: Abwärme-Temperatur-Diagramm aus den ausgewerteten Industriebetrieben in Deutschland für 35, 70 und 100°C Referenztemperatur bzw. Nutztemperatur: 127 PJ/a bei 35°C, 82 PJ/a bei 70°C und 56 PJ/a bei 100°C. Andere Temperaturen können aus dem Diagramm interpoliert werden.

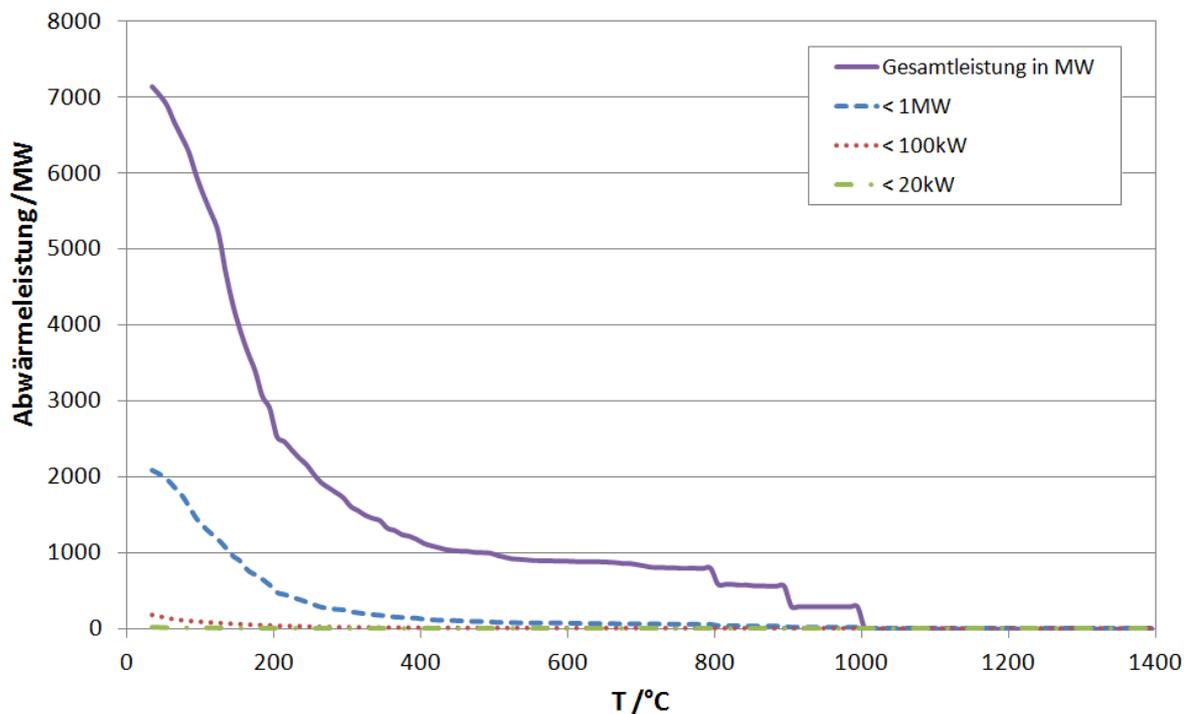


Abbildung 6.10: Abwärmeleistung über Temperatur nach Leistung der Abwärmequelle gestaffelt: Der Großteil der Abwärmeleistung ( $\sim 5000$  MW) wird von Quellen erzeugt mit über 1 MW Leistung. Somit wird der Großteil der Abwärmeleistung von weniger als 5050 Betrieben erzeugt.

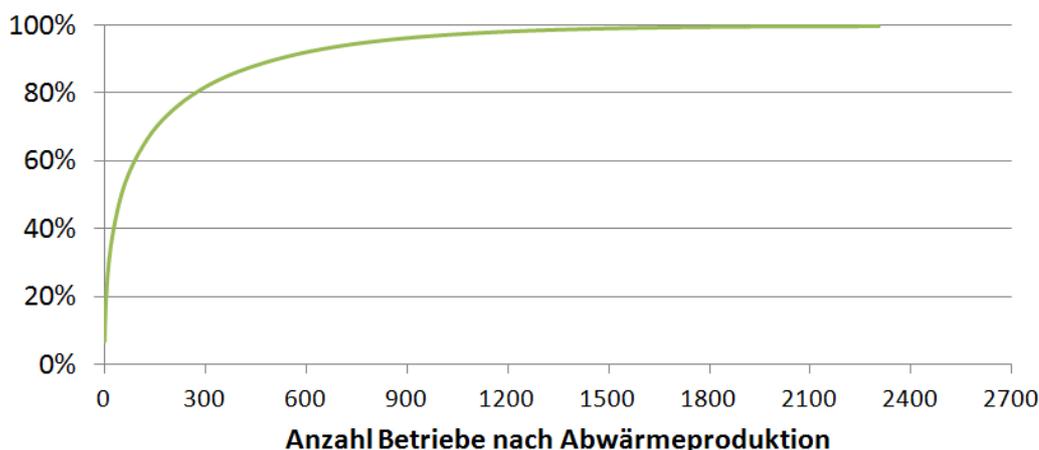


Abbildung 6.11: Anteil am Abwärmeaufkommen über die Anzahl der Betriebe, geordnet nach Abwärmeaufkommen: 95% des gesicherten Abwärmeaufkommens stammt aus nur 784 Betrieben.

## 6.2 Bedarfsanalyse

Um die zuvor beschriebenen Techniken einsetzen zu können muss ein Bedarf an Kälte oder Wärme vorhanden sein. Da hier keine wirtschaftlichen Aspekte berücksichtigt werden, auch nicht indirekt z.B. über Transportmöglichkeiten, handelt es sich dabei jedoch um einen eher theoretischen Bedarf. Teile der hier vorgestellten Ergebnisse wurden zuvor schon in [Brueckner u. a. 2015] veröffentlicht.

### 6.2.1 Kältebedarf

Es ist deutlich schwieriger den Kältebedarf zu bestimmen und zu prognostizieren als zum Beispiel den Wärmebedarf, da bei Kühlanwendungen oft strombetriebene Geräte eingesetzt werden, deren Stromverbrauch in der allgemeinen Stromabrechnung bzw. der Stromverbrauchsstatistik untergeht.

Für Deutschland gibt es eine Studie aus dem Jahr 2007 vom Deutschen Kälte- und Klimatechnischen Verein (DKV) [DKV 2007], der für 1999 einen Kältebedarf von 277 PJ/a benennt. Der Großteil davon, etwa 86%, wurde elektrisch erzeugt. Der größte Abnehmer ist mit 67% der Bereich Nahrungsmittel. Ein weiterer großer Anteil (22%) wird zur Klimatisierung von Gebäuden eingesetzt. Nur 9% wird von der übrigen Industrie verbraucht, 2,2% von sonstigen Verbrauchern. Im Verhältnis zu dem gesamten Stromverbrauch in Deutschland haben Kühlprozesse einen Anteil von 14% - das entspricht einem Anteil am Primärenergieeinsatz von 5,8% [DKV 2007]. Eine neuere Studie aus dem Jahr 2011 vom VDMA (Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau) [Preuß 2011] hat für 2009 einen gesamten Endenergiebedarf von knapp 310 PJ/a zur Kälteerzeugung in Deutschland ermittelt, wovon 84% mit Strom betrieben wurden. Laut dieser Untersuchung fiel der größte Kältebedarf (28%) im Haushaltsbereich an. Darunter werden aber keine Anlagen zur Raumklimatisierung verstanden, sondern Kühl- und Gefriergeräte. Diese sind in der Studie des DKV im Bereich „Nahrungsmittel“ enthalten. Durch die Vielzahl an Anlagen sind neue technische Lösungen, zum Beispiel zur Nutzung von Abwärme, in diesem Bereich schwer umzusetzen. Interessanter für Abwärmenutzungen aus der Industrie sind Bereiche, in denen Kältebelastungen kontinuierlich und räumlich gebündelt anfallen. Solche gewerblichen Abnehmer sind in Tabelle 6.1 aufgeführt.

Ein weiteres interessantes Feld ist die Industriekälte für Prozesse. Diese beträgt laut [Preuß 2011] 36 PJ/a und hat den Vorteil, dass meist eine zentrale Kälteversorgung erfolgt. Der größte Einzelbedarf entsteht bei der Luft- und Gasverflüssigung (~19 PJ/a) und der übrigen chemischen Industrie (~7 PJ/a). Dieser gesamte Bedarf von gerundet 26 PJ/a wird von nur 1561 Betrieben erzeugt [Preuß 2011]. Auch Rechenzentren und Server sind ein interessantes Feld, dort entfällt fast 60% des Energieverbrauchs auf Kühlung. Das waren allerdings 2009 „nur“ knapp 4 PJ/a. Der europäische

Tabelle 6.1: Kältebedarf von ausgewählten Anwendungsfällen basierend auf [Preuß 2011]

Gewerbliche Kälteabnehmer	Kältebedarf (PJ/a)
Supermarktkälte	31
Nahrungsmittelherstellung	25
Kühlhäuser	6
Medizin	6
Summe	68

Tabelle 6.2: Wärmebedarf der verschiedenen Industriesektoren nach [Lutsch und Witterhold 2005]

Industriesektor	MT: 100-400°C	NT: <100°C	Summe
	PJ/a	PJ/a	PJ/a
Gewinnung von Steinen und Erden, sonstiger Bergbau	12	15	27
Ernährung und Tabak	70	87	156
Papiergewerbe	78	36	114
Grundstoffchemie	81	67	148
sonstige chemische Industrie	26	20	46
Gummi- und Kunststoffwaren	14	23	37
Glas und Keramik	7	4	11
Verarbeitung von Steinen und Erden	6	10	16
Metallerzeugung	24	9	33
Nicht-Eisenmetalle, Gießereien	6	9	15
Metallbearbeitung	21	28	49
Maschinenbau	16	44	60
Fahrzeugbau	20	43	63
sonstige Wirtschaftszweige	43	59	102
<b>Summe</b>	<b>424</b>	<b>452</b>	<b>876</b>

Kältebedarf wurde 2014 von [Oro u. a. 2014] mit ungefähr 2207 PJ/a angegeben. Davon wurden 78% durch industrielle Kühlprozesse (~1721 PJ/a) gebraucht.

### 6.2.2 Wärmebedarf

Industrielle Abwärme hat im Allgemeinen keine saisonale Abhängigkeit und fällt sowohl im Sommer als auch im Winter an. Deshalb bieten sich zur Nutzung von industrieller Abwärme vor allem Business-to-Business (B2B) Lösungen an. Darum wird im Folgenden ein Fokus auf den Bedarf an Prozesswärme gelegt.

Für Deutschland wurde 2005 von der AGFW eine Studie zum Wärmebedarf [Lutsch und Witterhold 2005] veröffentlicht. Für den Industriebereich wurde der Wärmebedarf in drei Temperaturbereiche (HT: >400°C, MT: 100-400°C, NT: <100°C) aufgeschlüsselt erhoben. Die Daten beziehen sich auf 2001. Eine Deckung des Wärmebedarfs durch industrielle Abwärme ist vor allem im niedrigen und mittleren Temperaturbereich möglich. In Tabelle 6.2 wird dieser für die unterschiedlichen Industriesektoren dargestellt.

Ein Großteil dieses Potenzials liegt im Bereich der Grundstoffchemie, in der Lebensmittel- und Tabak-Industrie und im Papiergewerbe. Insgesamt liegt der Wärmebedarf der Industrie unter 400°C demnach bei ca. 876 PJ/a (Vgl. Tabelle 6.2).

In einer 1999 veröffentlichten Studie zum „Energieverbrauch und Einsparung in Gewerbe, Handel und Dienstleistung“ [Geiger u. a. 1999] wurde der Wärmebedarf und Energiekennzahlen ermittelt. Dies geschah auf Basis einer Breitenerhebung zum Energieverbrauch und -verwendung, der amtlichen Statistiken, Verbands- und Expertengesprächen, Betriebsinterviews und -begehungen. Dabei wurden der Gewerbe-, Handels- und Dienstleistungssektor (GHD) in, aus technischer Sicht, mög-

lichst homogene Verbrauchergruppen unterteilt. Als Bezugsgröße der Kennzahlen wurde die Anzahl der Beschäftigten gewählt. Das hat jedoch den Nachteil, dass bei unbekannter Arbeitsproduktivität bzw. deren Steigerung die Daten schnell veralten. Auch 2001, 2004 und 2006 wurden vom Fraunhofer ISS solche Befragungen durchgeführt. In einer der nachfolgenden Arbeiten „Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistung in Deutschland für die Jahre 2007 bis 2010“ im Auftrag des BMWI wurden diese Daten für neuere Jahre veröffentlicht [Schlomann u. a. 2011]. Es ergibt sich ein Prozesswärmebedarf an Endenergie von gut 125,6 PJ/a für den GHD-Bereich in 2010. Leider sind diese Daten nicht nach verschiedenen Temperaturbereichen aufgeschlüsselt.

Für Europa wurde von [Werner 2006] für 2003 ein Wärmebedarf von 6530 PJ/a veröffentlicht. Um den Wärmebedarf in den verschiedenen Temperaturbereichen und Industriesektoren zu bestimmen berufen sich die Autoren von [Werner 2006] auf die Studie der AGFW [Lutsch und Witterhold 2005]. Es werden die dort gewonnenen Wärmeverbrauchs-faktoren pro Mitarbeiter für verschiedene Sektoren verwendet. Für die EU (EU-15-Staaten<sup>1</sup>) ergibt sich daraus ein industrieller Wärmebedarf von 6530 PJ/a, der vor allem im Hochtemperaturbereich über 400°C (43%) anfällt und zu deutlich geringeren Anteilen im mittleren (27%) -100-400°C- oder niedrigen Temperaturbereich unter 100°C (30%). Neben den landesweiten und europäischen Studien gibt es auch Untersuchungen zum Wärmebedarf in einzelnen Bundesländern, wie z.B. in NRW [Drath 2002; Kattenstein u. a. 2002] oder Baden-Württemberg [Blesl u. a. 2008].

Neben dem mengenmäßigen Wärmebedarf ist ebenso interessant, wo der Bedarf anfällt. Deshalb zeigt Tabelle 6.3 eine Übersicht über verschiedene Prozesse aus dem Niedertemperaturbereich in unterschiedlichen Sektoren, bei denen theoretisch Abwärme zur Versorgung eingesetzt werden könnte.

### 6.3 Ermittlung des technischen Potenzials am Beispiel eines Zeolith-Speichers

Um das technische Potenzial einer Technologie zu ermitteln müssen die in Kapitel 6.1 und 6.2 vorgestellten Ergebnisse kombiniert werden. Das soll im Folgenden am Beispiel eines Zeolith-Speichers geschehen. Die hier vorgestellten Ergebnisse sind im Rahmen des Forschungsprojekts „Mobile Sorptionspeicher zur industriellen Abwärmenutzung“ entstanden und wurden bereits im Abschlussbericht des Projektes (BMW Förderkennzeichen 0327383B) veröffentlicht [Lävemann u. a. 2015].

Im Kapitel 6.2 wurde der allgemeine Wärmebedarf in der Industrie unter 400°C betrachtet. Der mittlere Temperaturbereich (100-400°C) eignet sich nur teilweise um über Zeolith-Speicher versorgt zu werden, geht man von einer maximalen Einsatztemperatur von 250°C aus. Deshalb soll hier der Fokus auf den Niedertemperaturbereich unter 100°C gelegt werden. Laut [Lutsch und Witterhold 2005] gibt es hier einen Wärmebedarf von 452 PJ/a oder  $126 \cdot 10^6$  MWh/a. Leider wurde der Wärmebedarf im GHD-Bereich in [Schlomann u. a. 2011] nicht nach Temperaturniveaus aufgeschlüsselt und kann darum hier nicht berücksichtigt werden.

Geht man von einem Energiegehalt pro Speicherladung von 2,8 MWh aus, entspricht der vorhandene Niedertemperatur-Wärmebedarf der Industrie einem Potenzial von fast  $45 \cdot 10^6$  Ladungen. Ein Speicher kann etwa 300 Ladezyklen pro Jahr leisten. Daraus ergibt sich für den Niedertemperatur-Wärmebedarf in der Industrie ein Einsatzpotenzial von etwa 149.000 Speichern. Allerdings ist bei dem betrachteten Wärmebedarf nicht bekannt, um welche Art von Wärmenutzung es sich handelt. Insofern kann keine konkrete Aussage getroffen werden, ob der Einsatz eines Zeolith-Speichers nicht nur theoretisch sondern auch praktisch möglich und sinnvoll ist. Auf Grund der zuvor erläuterten technischen Besonderheiten sind Zeolith-Speicher jedoch besonders für den Einsatz in Trocknungsprozessen geeignet. Deshalb sollen diese genauer betrachtet werden: In einer Studie des Fraunhofer ISI und der Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE) [Schmid u. a. 2003] aus dem Jahr 2003 wird der Strom- und Brennstoffeinsatz zur Trocknung von verschiedenen Produkten abgeschätzt. Wo

<sup>1</sup>EU-15: Belgien, Dänemark, Deutschland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Italien, Luxemburg, Niederlande, Österreich, Portugal, Schweden, Spanien, Vereinigtes Königreich

Tabelle 6.3: Prozesstemperaturen von Niedertemperaturprozessen aus der Literatur, veröffentlicht in [Brueckner u. a. 2015]

Industrie	Prozess	Prozess-temperatur (°C)	Quelle
Lebensmittel	Reinigen	60	[European Comission 2014]
	Garen	110 – 115	[European Comission 2014]
	Pasteurisieren	65	[European Comission 2014]
		80 - 110	[Schmitz und Linckh 2012] , [AEE INTEC 2013]
	Bleichen	85	[European Comission 2014]
	Trocknen	30 – 90	[AEE INTEC 2013]
		30 - 120	[Schmitz und Linckh 2012]
		50 – 90	[IEA Heat pump programme 2000]
	Waschen	40 – 85	[AEE INTEC 2013]
		40 – 80	[Schmitz und Linckh 2012]
	Sterilisieren	140 – 150	[AEE INTEC 2013]
		80 – 90	[IEA Heat pump programme 2000]
Kochen	95 – 105	[Schmitz und Linckh 2012], [AEE INTEC 2013]	
Wärmebehandlung	40 – 60	[Schmitz und Linckh 2012], [AEE INTEC 2013]	
Entwässerung	38 - 104	[Schmitz und Linckh 2012]	
Textilien	trocken Heizen	88	[European Comission 2014]
	Bügeln	100	[European Comission 2014]
	Waschen	40 – 80	[Schmitz und Linckh 2012], [AEE INTEC 2013]
	Bleichen	60 – 100	[Schmitz und Linckh 2012], [AEE INTEC 2013]
	Färben	100 – 160	[AEE INTEC 2013]
	Trocknen	75 - 250	[Schmitz und Linckh 2012]
	Dämpfen	100 – 130	[IEA Heat pump programme 2000]
Chemie	Sieden	95 – 105	[AEE INTEC 2013]
	Destillieren	110 – 300	[AEE INTEC 2013]
		90 - 130	[IEA Heat pump programme 2000]
verschiedene chemische Prozesse	120 – 180	[AEE INTEC 2013]	
Paper	Zellstofftrocknung	95 - 120	[Schmitz und Linckh 2012]
	Papiertrocknung	95 - 120	[Schmitz und Linckh 2012]
		50 – 120	[IEA Heat pump programme 2000]
Gewinnung von Steinen und Erden	Trocknen von Steinen, Ziegeln, Sand und anderen Materialien	35 - 150	[Schmitz und Linckh 2012]
Holz	Trocknung	70 – 90	[IEA Heat pump programme 2000]
Sonstige	Reinigung von Metallen	60 – 90	[European Comission 2014]
	Farbtrocknung	80 – 120	[European Comission 2014]

Tabelle 6.4: Endenergieverbrauch für Trocknungsprozesse basierend auf [Schmid u. a. 2003]: Insgesamt besteht im Temperaturbereich unter 250°C ein Bedarf von 173 PJ/a

Produkt	Brennstoffeinsatz für Trocknungsprozesse in PJ/a	Temperaturbereich
PVC	1,4	60-80°C
Milch	3,7	40-220°C
Soda-Kalzinierung	5,2	160-180°C
Kohle	7,6	170-190°C
Ziegel (Mauer bzw. Dachziegel)	13,8	90-150°C (85%) bzw. 35-70°C
Textil	14	75-250°C
Lacke, Farbüberzüge	14,9	135-190°C
Zucker	24,8	80-130°C
Papier	87,6	95-200°C
<b>Summe</b>	<b>173</b>	

die Trocknungsprozesse mit Brennstoffen betrieben werden, kann mit geringerem Aufwand Abwärme als Wärmelieferant eingesetzt werden als bei strombetriebenen Prozessen. Letztere werden hier deshalb nicht betrachtet. In Tabelle 6.4 ist der Brennstoffeinsatz für verschiedene Trocknungsprozesse aufgeführt. Auf Grund der maximalen Einsatztemperatur wurden dabei nur Prozesse berücksichtigt, die im Temperaturbereich unter 250°C liegen.

Daraus ergibt sich ein Wärmebedarf von 173 PJ/a, der über Speicher gedeckt werden könnte. Unter den zuvor getroffenen Annahmen von 2,8 MWh/Ladung und 300 Ladung/Speicher und Jahr ergibt sich daraus ein Einsatzpotenzial von 57.000 Speichern auf der Wärmebedarfsseite. Allerdings könnte der Bedarf inzwischen gesunken sein und/oder es andere Gründe geben, die gegen den Einsatz von Abwärme aus Zeolith-Speichern sprechen. Reduziert man deshalb das Potenzial um 50%, bleibt immer noch ein Wärmebedarf von 86 PJ/a oder 28.600 Speicher. Das größte Potenzial liegt dabei in der Papierindustrie, die über 50% des Wärmebedarfs ausmacht, gefolgt von der Zuckerherstellung mit 14%. Zur Einsortierung: Insgesamt stellen die hier betrachteten Trocknungsprozesse unter 250°C fast 20% des Nieder- und Mitteltemperaturbedarfs in der Deutschen Industrie nach [Lutsch und Witterhold 2005] dar und haben somit einen signifikanten Anteil am Wärmebedarf.

Neben dem Wärmebedarf begrenzen technische Rahmenbedingungen das Abwärmepotenzial für Zeolith-Speicher. Wie in Kapitel 6.1.2 beschrieben, kann zur Beladung des Speichers Abwärme zwischen 135 und 250°C genutzt werden. Wenn Abwärmequellen mit höheren Temperaturen vorliegen, können diese durch Beimischung von Frischluft abgekühlt werden. Insofern ist für die Beurteilung der theoretischen Einsatzmöglichkeit vor allem die Grenze von 135°C relevant. Berechnungen zufolge wird bei der Desorption die Abwärme bis etwa 75°C abgekühlt bzw. genutzt; in der Praxis konnte eine Abkühlung bis ca. 40°C beobachtet werden (Vgl. Kapitel 6.1). Um die zur Verfügung stehende Abwärmemenge zu berechnen kann Abbildung 6.9 verwendet werden. Wie in Abbildung 6.12 zu sehen, ergibt sich daraus für eine Abkühlung auf 70°C ein Abwärmeeinkommen über 135°C von etwa 64 PJ/a. Bei einer Abkühlung auf 35°C wären es hingegen etwa 80 PJ/a.

Bei dem eben abgeleiteten Trocknungswärmebedarf von 86 PJ/a unter 250°C bedeutet das, dass 74% bis 90% dieses Bedarfs (64 bis 80 PJ/a) aus Abwärmequellen versorgt werden könnten. Allerdings sind dabei auf Seite der Abwärmequellen noch nicht die möglichen Hindernisse wie eine zu große Distanz zwischen Quelle und Abnehmer, Wärmetauscher- und Transportverluste oder eine zu

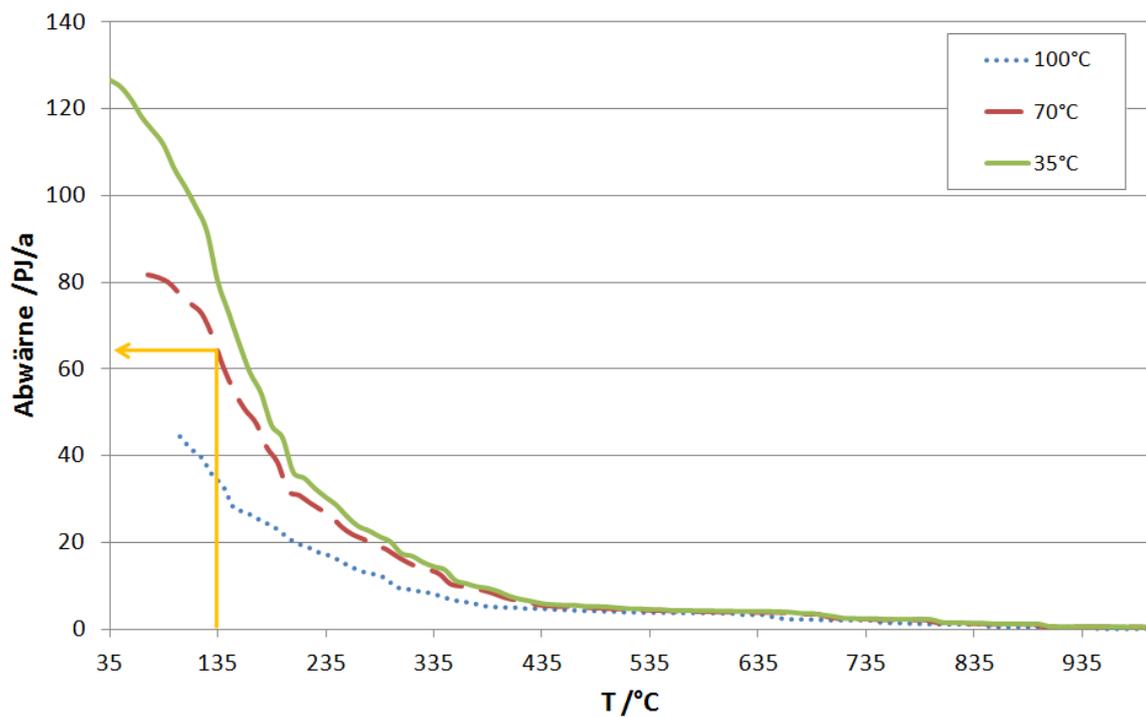


Abbildung 6.12: Abwärmenutzung für mobilen Zeolith-Speicher: Bei der Nutzung von Abwärme über 135°C und einer Abkühlung auf 70°C können etwa 64 PJ/a genutzt werden. Bei einer Abkühlung bis 35°C können sogar 80 PJ/a genutzt werden.

hohe Partikelbelastung des Abgases berücksichtigt. Andererseits handelt es sich hierbei auch nur um die in der Auswertung enthaltenen Betriebe und damit um die untere Grenze des industriellen Abwärmepotenzials. Somit können auch für eine konservative Schätzung 80 PJ/a an realisierbarem technischen Abwärmepotenzial für Zeolith-Speicher angenommen werden. Das ist ein Einsatzpotenzial von mehreren 1000 Speichern.



# Kapitel 7

## Wirtschaftliche Begrenzungen

### 7.1 Methode Wirtschaftlichkeitsanalyse

Für die drei beim technischen Potenzial betrachteten Technologien (mechanische und thermische Wärmepumpen und Absorptionskälteanlagen) sollen im Folgenden Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit gemacht werden. Dabei wird auf ein am ZAE Bayern für Speicher entwickeltes Verfahren zurückgegriffen [Rathgeber u. a. 2015]. Für mobile Zeolithspeicher wurde die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von [Krönauer u. a. 2015] veröffentlicht. In [Brueckner u. a. 2015] wurde die Methode für Wärmepumpen und Absorptionskälteanlagen adaptiert. Hier soll zunächst die ursprüngliche Methode für Zeolith-Speicher vorgestellt werden. Im Anschluss werden die Adaptionen und die daraus resultierenden Ergebnisse vorgestellt: Die maximal zulässigen Investitionskosten in Abhängigkeit der (Volllast-) Betriebsstunden für verschiedene zuvor definierte Zielgruppen.

#### 7.1.1 Verfahren für Speicher

Traditionell werden bei Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen die Renditeerwartung, der Annuitätsfaktor und die Amortisationszeit als Parameter zur Beurteilung der Investitionskosten und der Wirtschaftlichkeit genutzt. Der Nachteil daran ist, dass die Ergebnisse schnell veralten, wenn sich die Investitionskosten ändern. Auch fließen in die Berechnungen die Auslastung und Betriebskosten als Parameter mit ein. Diese sind jedoch vom jeweiligen Anwendungsfall abhängig und deshalb sehr unterschiedlich. Deshalb wurde im Rahmen der IEA Task 42/24 [IEA 2013] von Experten des ZAE Bayern e.V. ein vereinfachter Ansatz zur Prüfung der Wirtschaftlichkeit von Speichern entwickelt und in [Rathgeber u. a. 2015] veröffentlicht.

Die vom ZAE Bayern e.V. entwickelte Methode ([IEA 2013], [Rathgeber u. a. 2015]) gibt eine einfach zu erfassende notwendige Bedingung für die Wirtschaftlichkeit an. Sie kann und will nicht eine detaillierte Wirtschaftlichkeitsanalyse (z.B. nach VDI 2067) ersetzen. Vielmehr dient sie der Prüfung, ob eine detailliert Analyse überhaupt sinnvoll ist. Dem Ansatz liegt die Erwartung zugrunde, dass die aus dem Speicher bezogene Energie nicht teurer sein darf, als die aus dem Netz bezogene Energie. Dafür dürfen die Investitionskosten für den Speicher in Kombination mit der Renditeerwartung der Investoren bestimmte Grenzen nicht überschreiten. Diese Grenzen werden im folgenden bestimmt. Statt den stark variierenden Parameter der Speicherzyklen in die Berechnung einer Amortisationszeit einfließen zu lassen, wird das Verfahren invertiert:

Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit werden zunächst drei Klassen von Investoren definiert (Industrie, Gebäudesektor und Enthusiasten) und für jeden der drei Fälle eine Renditeerwartung und ein Rückzahlungszeitraum bestimmt. Das hat den Vorteil, dass innerhalb der drei Gruppen die Erwartungen an die Rendite und der Rückzahlungszeitraum recht konstant sind. Aus den Parametern resultiert der Annuitätsfaktor, mit dessen Hilfe die maximal zulässigen spezifischen (€/kW) Speicherinvestitionskosten in Abhängigkeit der jährlichen Zyklenzahl bestimmt werden. Die drei Anwendungsfälle sind wie folgt definiert:

1. Industrie

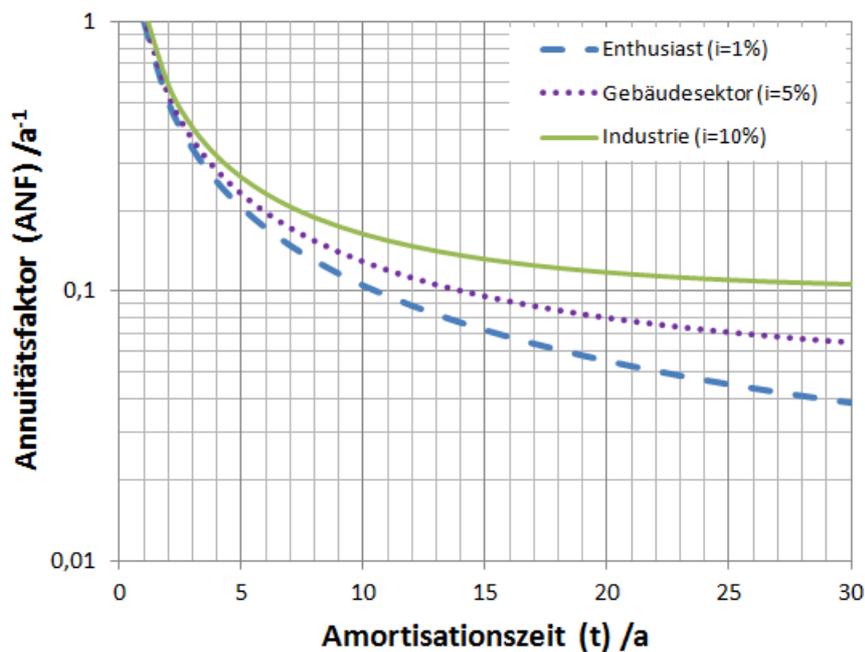


Abbildung 7.1: Annuitätsfaktor über Amortisationszeit für die drei Zielgruppen Enthusiast, Gebäudesektor und Industrie mit ihren unterschiedlichen Renditeerwartungen ( $i$ ), veröffentlicht in [Brueckner u. a. 2015]

Um in der Industrie Anwendung zu finden, muss eine Technologie hohe Ansprüche an Verzinsung und Rückzahlungszeitraum erfüllen. Für die Berechnungen wird darum eine Renditeerwartung von 10% angenommen und eine Amortisationszeit von 5 Jahren.

### 2. Gebäudesektor

Im Gebäudesektor kann die Amortisationszeit gewöhnlich länger sein, da in diesem Bereich auch mit längeren Lebensdauern gerechnet wird. Auch die Ansprüche an die Verzinsung sind normalerweise geringer. Deshalb wird für diese Gruppe eine Verzinsung von 5% und eine Amortisationszeit von 15 Jahren angenommen. Das entspricht auch der durchschnittlichen Lebensdauer von anderer Gebäudeausrüstung, wie konventionellen Heizkesseln.

### 3. Enthusiast

Neben den wirtschaftlich motivierten Nutzergruppen wird eine Zielgruppe definiert, die vor allem an der Technologie interessiert ist und für die die Wirtschaftlichkeit nicht im Vordergrund steht. Für diesen optimistischen Fall wurde eine Verzinsung von 1% betrachtet und die Amortisationszeit mit der Lebensdauer der Anlagen von 25 Jahren gleichgesetzt.

Diese Parameter sind wichtig um die zukünftigen Kosten und Einsparungen auf heutige Werte zu transferieren. Das geschieht über den Annuitätsfaktor:

$$ANF = \frac{q - 1}{1 - q^{-t}} \quad (7.1)$$

mit

$$q = 1 + i \quad (7.2)$$

Dabei ist  $q$  der Verzinsungsfaktor,  $i$  die Renditeerwartung in % und  $t$  die Amortisationszeit in Jahren. In Abbildung 7.1 ist der Annuitätsfaktor für die drei Fälle über die Amortisationszeit dargestellt.

Neben den definierten Amortisationszeiten können aus dieser Abbildung sofort Annuitätsfaktoren für andere Amortisationszeiten abgelesen werden. In Tabelle 7.1 sind die oben beschriebenen Fälle mit den entsprechenden Annuitätsfaktoren zusammengefasst. Wird die Abwärme als kostenfrei betrachtet und die Betriebskosten vernachlässigt, können die spezifischen Wärmeerzeugungskosten (SWK in €/kWh) aus dem Speicher über die spezifischen Speicherkosten (SSK in €/kWh), die

Tabelle 7.1: Zusammenfassung der Eingangsparameter für die Wirtschaftlichkeitsanalyse für die drei zuvor definierten Zielgruppen: Industrie, Gebäudesektor und Enthusiast.

	Renditeerwartung, $i$ (%)	Amortisationszeit, $t$ (a)	Annuitätsfaktor ( $1/a$ )
Industrie	10	5	26
Gebäudesektor	5	15	9
Enthusiast	1	25	4,5

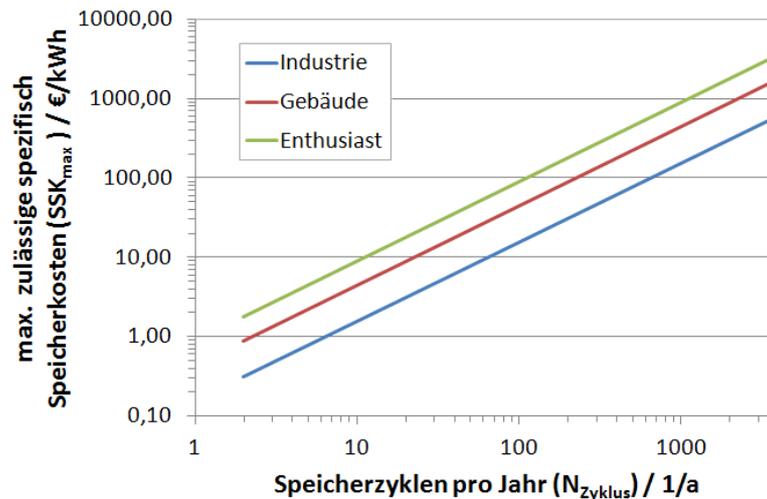


Abbildung 7.2: Max. zulässige spezifische Speicherkosten über die Anzahl der Speicherzyklen pro Jahr für die drei Zielgruppen Industrie, Gebäudesektor und Enthusiasten mit einem Wärmepreis von 0,04€/kWh, Vgl. [Rathgeber u. a. (2015)]

Anzahl der Zyklen pro Jahr ( $N_{Zyklus}$  in  $1/a$ ) und den Annuitätsfaktor (ANF in  $1/a$ ) berechnet werden:

$$SWK = SSK * ANF / N_{Zyklus} \quad (7.3)$$

Damit sich ein Speicher rentiert, dürfen die spezifischen Wärmeerzeugungskosten nicht höher sein als der Wärmepreis (WP in €/kWh):

$$SWK \leq WP \quad (7.4)$$

Für diese werden ein Wärmepreis von 4 c/kWh angenommen. Die maximal zulässigen spezifischen Speicherkosten ( $SSK_{max}$ ) für den Speicher können dann wie folgt bestimmt werden:

$$SSK_{max} = WP * N_{Zyklus} / ANF \quad (7.5)$$

Diese Korrelation wird in Abbildung 7.2 dargestellt (nach [IEA 2013]). Aus dem Diagramm können für die verschiedenen Gruppen für beliebige Zykluszeiten die maximalen Speicherkosten abgelesen werden. Dieser Ansatz wurde in [Brueckner u. a. 2015] für Wärmepumpen und Absorptionskälteanlagen erweitert.

### 7.1.2 Adaption für Absorptionskälteanlagen

Im Folgenden soll der beschriebene Ansatz für Absorptionskälteanlagen adaptiert werden. Anders als bei Wärmespeichern gibt es für Kälte in der Regel keinen Marktpreis. Deshalb wurden in [Brueckner u. a. 2015] der Ansatz von [IEA 2013] bzw. [Rathgeber u. a. 2015] variiert: Statt dem Wärmepreis

Tabelle 7.2: Eingangsparameter der Wirtschaftlichkeitsanalyse für Absorptionskälteanlage

$EER_{konv}$	4
$EER_{AKA}$	12
Strompreis (SP)	0,117 €/kWh
$SIK_{konv}$	300 €/kW bzw. 450 €/kW (25 Jahre)

werden zum Vergleich der Wirtschaftlichkeit die Investitionskosten einer konventionellen Technologie zur Kälteerzeugung und die Einsparungen während des Betriebs der Absorptionskälteanlage herangezogen. Diese dürfen in Summe über die Amortisationszeit gerechnet die spezifischen Investitionskosten für die Absorptionskälteanlage nicht übersteigen. Die maximalen zulässigen spezifischen Investitionskosten ( $SIK_{max}$  in €/kW) setzen sich somit zusammen aus den Investitionskosten für eine konventionelle Technologie ( $SIK_{konv}$  in €/kW) und den spezifischen Einsparungen (SEP in €/kWh) durch den Einsatz der Absorptionskälteanlagen im Betrieb die von der Einsatzzeit ( $n_{VL}$  in h/a) abhängig ist:

$$SIK_{max} = SIK_{konv} + SEP * n_{VL} * \frac{1}{ANF} \quad (7.6)$$

Als Investitionskosten der konventionellen Referenztechnologie ( $SIK_{konv}$ ) wird hier eine Kompressionskälteanlage mit 300€/kW angenommen [Netzwerkkaelte 2013]. Für die Zielgruppe der Enthusiasten wird für den Kompressor 150% der ursprünglichen Investitionskosten angenommen, da die durchschnittliche Lebensdauer dieser Anlagen nur bei 15 Jahren liegt und die Anlage anders als die Absorptionskälteanlage somit einmal innerhalb von 25 Jahren ausgetauscht werden muss. Wird die Abwärme wiederum als kostenfrei angenommen, hängen die spezifischen Einsparungen (SEP) nur von der eingesetzten elektrischen Energie ab. Die Kostendifferenz kann als Funktion von den elektrischen Wirkungsgraden (EER) der beiden Technologien (Absorptionskälteanlage und konventionelle Technologie) und Strompreis (SP in €/kWh) ausgedrückt werden:

$$SEP = \left( \frac{1}{EER_{AKA}} - \frac{1}{EER_{konv}} \right) * SP \quad (7.7)$$

Der elektrische Wirkungsgrad (EER -Energy Efficiency Ratio) von Absorptions- und konventionellen Kälteanlagen wird definiert über

$$EER = \frac{\dot{Q}_0}{P_{el}} \quad (7.8)$$

Dabei entspricht  $P_{el}$  der Kompressionsleistung und  $\dot{Q}_0$  der gewonnenen Kälteleistung. Diese korrespondieren zur Kompressionsarbeit  $W_{el}$  und Kälteenergie  $Q_0$  in Abbildung 6.4. Bei Wärmepumpen wird diese Leistungszahl als „coefficient of performance“ (COP) bezeichnet. Für konventionelle Kompressionsanlagen liegt der EER-Wert typischerweise bei etwa 3, für Absorptionskälteanlagen bei 12, in optimierten Systemen auch bei 20 oder höher. Hier wird für den Kompressor ein EER von 4 angenommen, für den Absorber 12. Als Strompreis wurden 0,117€/kWh nach [Eurostat 2013] angenommen. Die verwendeten Eingangsparameter sind in Tabelle 7.2 zusammengefasst.

### 7.1.3 Adaption für Wärmepumpen

Auch für Wärmepumpen soll das von ([IEA 2013], [Rathgeber u. a. 2015]) entwickelte Verfahren adaptiert werden. Wie bei den Absorptionskälteanlagen werden bei dem adaptierten Verfahren die maximal zulässigen spezifischen Investitionskosten ( $SIK_{max}$ ) berechnet. Für Wärmepumpen kann die maximale wirtschaftliche Investitionssumme, ähnlich wie beim Wärmespeicher, über den Wärmepreis (WP in €/kWh) berechnet werden; allerdings müssen sowohl bei der Absorptionswärmepumpe wie auch bei der mechanischen Wärmepumpe, der eingesetzte Strom und dessen Kosten berücksichtigt werden. Das geschieht über die spezifischen Einsatzkosten (SEK in €/kWh). Deshalb ergibt sich:

Tabelle 7.3: Zusammenfassung der Eingangsparameter der Wirtschaftlichkeitsanalyse für mechanische und Absorptions-Wärmepumpen

	mechanische Wärmepumpen	Absorptionswärmepumpe
$COP_{el}$	4	30
Strompreis (SP)	0,117 €/kWh	0,117 €/kWh
Wärmepreis (WP)	0,04 €/kWh	0,04 €/kWh

$$SIK_{max} = (WP - SEK) * n_{VL} * \frac{1}{ANF} \quad (7.9)$$

Dabei berechnen sich die spezifischen Einsatzkosten (SEK) über die Leistungszahl der Wärmepumpe (COP -Coefficient of Performance) und den Strompreis (SP in €/kWh):

$$SEK = \frac{1}{COP_{el}} * SP \quad (7.10)$$

Die Leistungszahl von Wärmepumpen wird definiert als:

$$COP_{el} = \frac{\dot{Q}_1}{P_{el}} = \frac{\dot{Q}_{12}}{P_{el}} \quad (7.11)$$

Dabei ist  $P_{el}$  die zugeführte elektrische Leistung und  $\dot{Q}_1$  bzw.  $\dot{Q}_{12}$  die gewonnene Wärme (Vgl. Abbildung 6.3 bzw. 6.4). Bei mechanischen Wärmepumpen liegt dieser typischerweise bei 4, Absorptionswärmepumpen können einen  $COP_{el}$  von 40 oder 60 erreichen. Hier wurde mit 4 bzw. 30 gerechnet. Der Wärmepreis und der Strompreis werden wie zuvor mit 0,04€/kWh und 0,117€/kWh angenommen. Die verwendeten Eingangsparameter sind in Tabelle 7.3 zusammengefasst.

## 7.2 Ergebnisse

Mit der vorgestellten Methode werden die maximalen wirtschaftlich möglichen Investitionskosten in Abhängigkeit der Betriebsstunden für die verschiedenen Zielgruppen dargestellt. Um einen ersten Eindruck von der Wettbewerbsfähigkeit der betrachteten Technologien zu erhalten und zu veranschaulichen sind in den Ergebnisgraphen 7.37.47.5 in grau die derzeitigen Investitionskosten eingezeichnet: 800-2000€/kW für Absorptionskälteanlagen, 150-500€/kW für elektrische Wärmepumpen und 330-830€/kW für Absorptionswärmepumpen ([Netzwerkkaelte 2013; Soroka 2011], [EPA 2014], [IEA Heat pump programme 2000]).

### 7.2.1 Absorptionskälteanlagen

In Abbildung 7.3 ist das Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsanalyse für Absorptionskälteanlagen dargestellt. Für einen Anwendungsfall mit 1000 Betriebsstunden zeigen sich für die Absorptionskälteanlagen maximale wirtschaftlich mögliche Investitionskosten von 370€/kW für die Zielgruppe Industrie, 510€/kW für den Gebäudesektor und 880€/kW für Enthusiasten. Die momentanen Kosten für Absorptionskälteanlagen liegen zwischen 800 und 2000€/kW (graue Fläche). Damit ist die Technologie in diesem Anwendungsfall bestenfalls für Enthusiasten interessant, für die anderen Zielgruppen gibt es noch eine große Lücke bis zur Marktreife. Für den Gebäudesektor sind momentan schon Anwendungen mit mehr als 2500 Betriebsstunden interessant, für Industrie-Anwendungen müssen die Investitionskosten noch deutlich sinken.

### 7.2.2 Mechanische Wärmepumpen

Ganz anders sieht das Ergebnis für mechanische Wärmepumpen aus, dass in Abbildung 7.4 gezeigt wird: Auf Grund der relativ geringen derzeitigen Kosten der Technologie von 150-500€/kW sind für

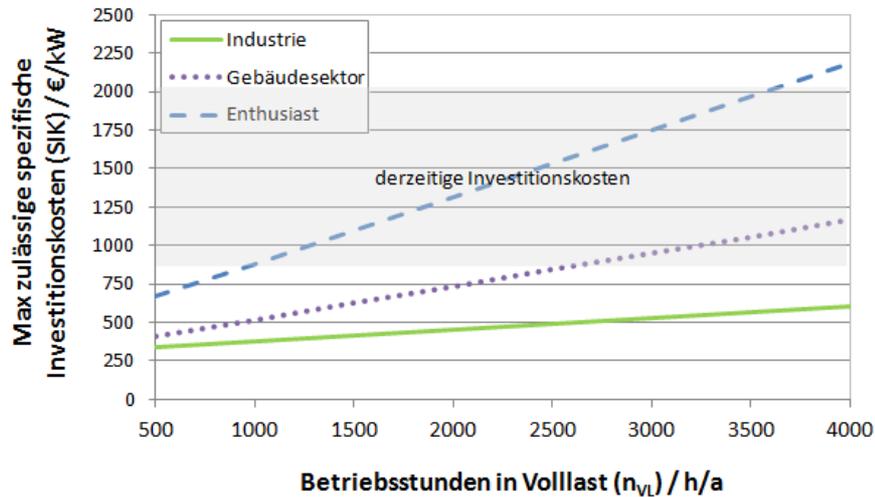


Abbildung 7.3: Investitionskosten Absorptionskälteanlagen: Für die drei Zielgruppen sind die jeweils zulässigen maximalen Investitionskosten über den Volllaststunden aufgetragen. Die grau hinterlegte Fläche zeigt dabei die derzeitigen Investitionskosten von Absorptionskälteanlagen. Werte für die zulässigen Investitionskosten die innerhalb oder oberhalb der grauen Fläche liegen sind derzeit schon wirtschaftlich. Grafik basierend auf [Brueckner u. a. 2015]

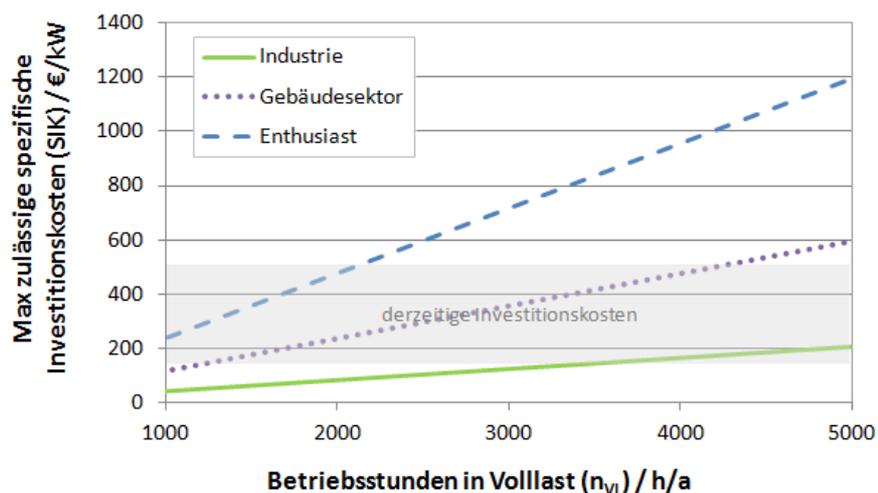


Abbildung 7.4: Maximal zulässige Investitionskosten für mechanische Wärmepumpen in Abhängigkeit von der Volllaststundenzahl für die drei Zielgruppen. Die grau hinterlegte Fläche zeigt dabei die derzeitigen Investitionskosten an. Alle Werte innerhalb oder oberhalb sind derzeit wirtschaftlich. Darstellung nach [Brueckner u. a. 2015]

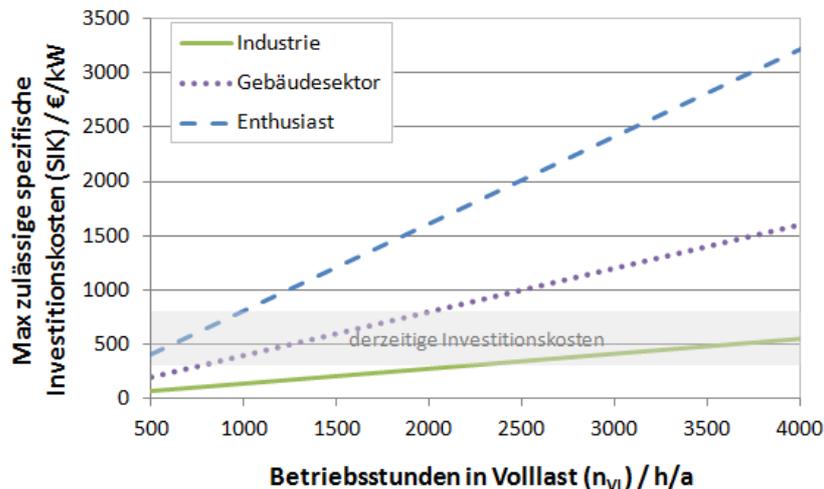


Abbildung 7.5: Maximal zulässige Investitionskosten für Absorptionswärmepumpen in Abhängigkeit von der Volllaststundenzahl für die drei Zielgruppen. Die grau hinterlegte Fläche zeigt dabei die derzeitigen Investitionskosten an. Alle Werte innerhalb oder oberhalb sind derzeit wirtschaftlich. Darstellung nach [Brueckner u. a. 2015]

Enthusiasten und den Gebäudesektor Anwendungen mit über 2000 Volllaststunden unter Umständen schon wirtschaftlich. Typische Heizanwendungen haben in Deutschland ca. 1600-2000 Volllaststunden und sind damit schon interessant. Selbst für die Industrie sind Anwendungen ab 4000 Betriebsstunden pro Jahr in Volllast lohnend. Das zeigt wie entscheidend die passende Auslegung der Anlagen für die Wirtschaftlichkeit ist, bei einer Überdimensionierung können die notwendigen Volllaststunden nicht mehr erreicht werden.

### 7.2.3 Absorptionswärmepumpen

In Abbildung 7.5 ist das Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsanalyse für Absorptionswärmepumpen dargestellt: Absorptionswärmepumpen sind bei Anwendungen mit mehr als 2500 Betriebsstunden pro Jahr für alle Zielgruppen wirtschaftlich interessant. Im Gebäudebereich oder für Enthusiasten reichen 1000 Stunden. Die Anlagenkosten liegen zwischen 330 und 830 €/kW. Auch hier zeigt sich wie bei den mechanischen Wärmepumpen die hohe Signifikanz einer guten Auslastung der Anlagen mit möglichst vielen Volllaststunden.

### 7.2.4 Diskussion der Ergebnisse und Sensitivitätsanalyse

Aus den zuvor vorgestellten Ergebnissen lassen sich zwei grundlegende Fragen beantworten: Zum Einen, wie viel eine Technologie kosten darf um die Marktreife zu erreichen. Zum Anderen zeigt der Abstand zwischen derzeitigen Kosten und maximal wirtschaftlich zulässigen Investitionskosten den Abstand, den eine Technologie noch bis zur Marktreife hat. Alles innerhalb oder oberhalb der grau unterlegten Zone kann dabei heute schon wirtschaftlich sein. Aber auch die Kosten für zusätzliche Komponenten können berücksichtigt werden: Wenn man zum Beispiel überlegt eine Absorptionswärmepumpe einzusetzen für einen Anwendungsfall im Gebäude mit 4000 Volllaststunden, kann man aus der Wirtschaftlichkeitsanalyse, Abbildung 7.5, ablesen, dass die maximalen wirtschaftlichen Investitionskosten bei ca. 1700 €/kW liegen. Da der Anlagenpreis bei 330 bis 830 €/kW liegt, bleiben noch ca. 1000 €/kW Investitionsspielraum für sonstige Komponenten und Anlagenteile.

Die Belastbarkeit der vorgestellten Ergebnisse soll im Folgenden näher betrachtet werden: Im Falle der Kälteerzeugung sind die zulässigen Investitionskosten direkt proportional zum Strom-

preis vergl. 7.6 und 7.7. Deshalb wird auf eine Sensitivitätsanalyse verzichtet. Bei der Analyse des Wärmemarktes ist der Einfluss der Wärme- und Stromkosten weniger direkt ersichtlich. Da er jedoch über Ort und Zeit stark variieren kann, wurde in [Brueckner u. a. 2015] eine Sensitivitätsanalyse vorgestellt. Die Ergebnisse zeigt Abbildung 7.6.

Um die Auswirkungen auf das Ergebnis zu untersuchen wurden der Strom- und Wärmepreis um +/- 50% variiert. Als Referenzfall wurde der Gebäudesektor mit einer Absorptionswärmepumpe gewählt. Es zeigt sich, dass der Strompreis nur einen geringen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit hat, der Wärmepreis jedoch eine große Rolle spielt. Ein Anstieg oder Abfall des Wärmepreises würde die Wirtschaftlichkeit aller Technologien wesentlich beeinflussen.

Weitere wichtige Parameter in der Wirtschaftlichkeitsanalyse sind der elektrische Wirkungsgrad (COP<sub>el</sub>), die Betriebsstunden (operating hours) und der Annuitätsfaktor. Deren Einfluss wurde durch eine Variation zwischen 25 und 200% getestet. Als Referenzfall wurde wieder eine Absorptionswärmepumpe mit 2000 Betriebsstunden gewählt und der Gebäudesektor als Zielgruppe. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7.7 dargestellt.

Wie erwartet haben die Betriebsstunden pro Jahr einen linearen Effekt auf das Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsanalyse. Die elektrische Leistungszahl hat dafür fast keinen Einfluss, wenn sie hinreichend hoch ist. Es kann also angenommen werden, dass die heutigen Leistungszahlen (COPs) bereits so gut sind, dass eine weitere Verbesserung keinen nennenswerten Einfluss mehr auf die Wirtschaftlichkeit hat. Deshalb hat der Strompreis in der vorherigen Analyse keinen nennenswerten Einfluss gezeigt. Den größten Einfluss hat der Annuitätsfaktor, was den ursprünglichen Ansatz, verschiedene Zielgruppen mit verschiedenen Annuitätsfaktoren zu definieren, stützt.

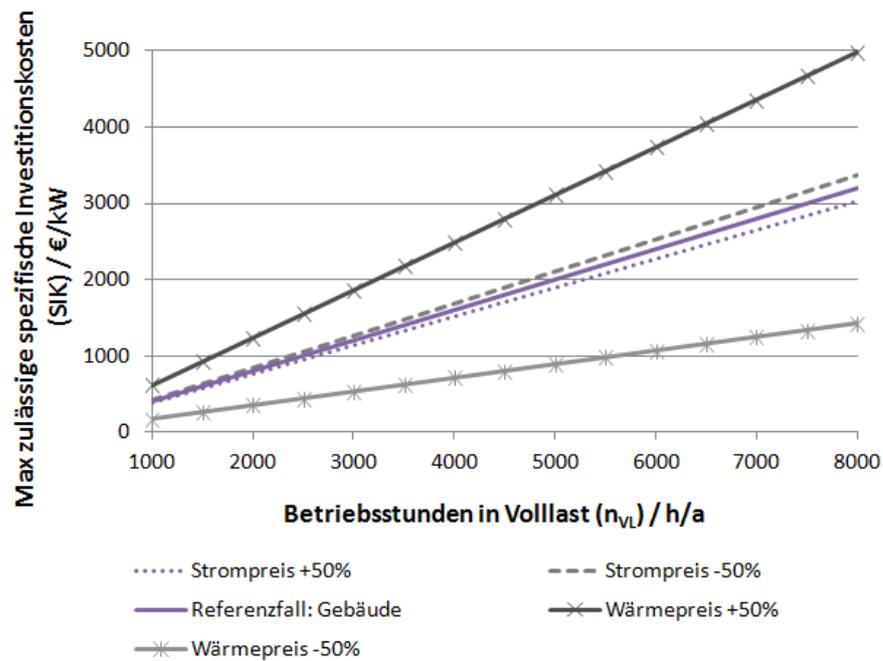


Abbildung 7.6: Ergebnis Sensitivitätsanalyse über den Einfluss des Wärme- und Strompreises bei Absorptionswärmepumpen, aus [Brueckner u. a. 2015]: Der Strompreis hat im Vergleich zum Wärmepreis nur einen geringen Einfluß.

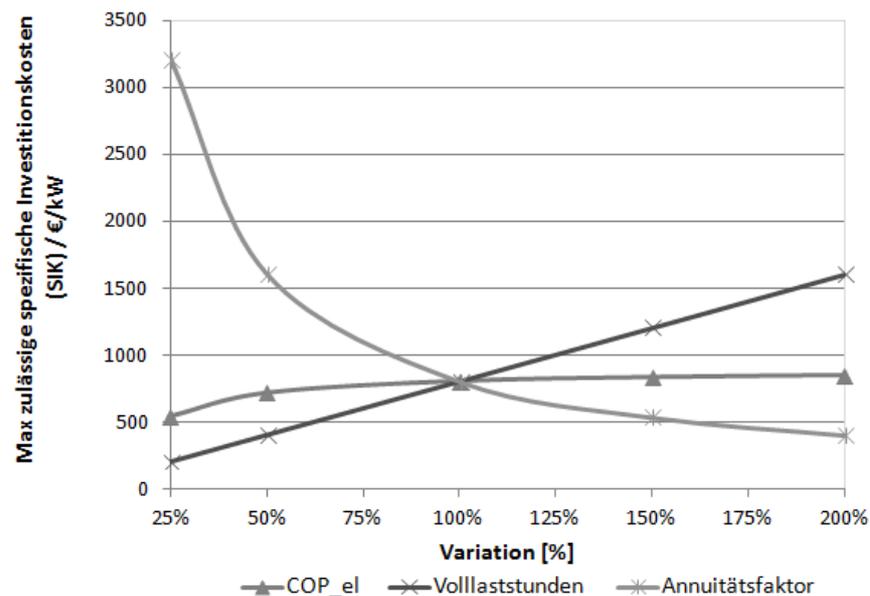


Abbildung 7.7: Ergebnis Sensitivitätsanalyse vom elektrischen COP, den Volllaststunden und dem Annuitätsfaktor für Absorptionswärmepumpen, aus [Brueckner u. a. 2015]: Den größten Einfluß hat der Annuitätenfaktor.



## Kapitel 8

# Ergebnis Nutzbarkeitsanalyse

Bei der Analyse der Nutzbarkeit des erhobenen Abwärmeaufkommens wurden die technischen und wirtschaftlichen Begrenzungen des Potenzials untersucht. Dabei spielt für die technischen Begrenzungen die Temperatur der Abwärme eine wichtige Rolle und die Frage bis auf welches Temperaturniveau diese abgekühlt bzw. genutzt wird. Für Anwendungen, die die Abwärme bis 100°C ausnutzen können ergab sich ein Potenzial von rund 56 PJ/a. Bei einer Nutzung bis 70°C stehen 82 PJ/a zur Verfügung und bei der Nutzung bis 35°C 127 PJ/a. Ein weitere Einschränkung der Nutzbarkeit ergibt sich aus dem Grad der Bündelung der Abwärme: Die Analyse der Anzahl der Betriebe bei denen die Abwärme anfällt hat gezeigt, dass 95% des erhobenen gesicherten Abwärmeaufkommen aus nur 784 Betrieben stammt.

Weitere technische Beschränkungen ergeben sich aus dem Kälte- und Wärmebedarf: Der Kältebedarf von gewerblichen Abnehmern beträgt 68 PJ/a, der Bedarf an Industriekälte 36 PJ/a. Daraus ergibt sich insgesamt ein Bedarf von 104 PJ/a. Aus der Analyse der zur Verfügung stehenden Techniken der Absorptionskälteanlagen hat sich gezeigt, dass dieser Bedarf mit Abwärme mit mindestens 70°C versorgt werden kann, wenn diese bis 35°C genutzt wird. Das Angebot an Abwärme dieses Temperaturbereichs liegt bei 115 PJ/a. Unter Berücksichtigung der thermischen Leistungszahl (Annahme 0,7) ist die Deckung eines großen Teils des Kältebedarfs (ca. 77%) von 104 PJ/a ist somit möglich.

Der Wärmebedarf der Industrie im Niedertemperaturbereich (<100°C) liegt bei 452 PJ/a. Davon können 102 PJ/a mit Abwärme über 100°C gedeckt werden wenn diese bis 35°C ausgenutzt werden kann. Als Sonderfall wurde der Bedarf an Trocknungswärme unter 250°C untersucht: Der theoretische Bedarf liegt bei 173 PJ/a, das Angebot an Abwärme im notwendigen Temperaturbereich von über 135°C bei einer Ausnutzung bis 35°C liegt bei etwa 80 PJ/a. Somit zeigt die Analyse des Wärmebedarfs keine Einschränkung des Potenzials auf Basis der ausgewerteten Betriebe. Auch beim extrapolierten Abwärmeaufkommen ergeben sich keine Einschränkungen aus dem Bedarf. Die Abwärme könnte noch vollständig genutzt werden. Räumliches und zeitliches Zusammentreffen wurden dabei allerdings nicht berücksichtigt.

Bei der Wirtschaftlichkeitsanalyse hat sich für Industrieenanwendungen gezeigt, dass Absorptionswärmepumpen derzeit Anwendungen mit über 2500 h/a Volllaststunden benötigen, um in den wirtschaftlichen Bereich nach den hier getroffenen Annahmen vordringen zu können. Bei mechanischen Wärmepumpen liegt die Grenze bei über 4000 h/a. Allerdings wurden bei der Analyse keine Kosten für die Abwärme angenommen. Im Fall der Absorptionskälteanlagen zeigt sich deutlich die Divergenz zwischen technischem und wirtschaftlichem Potenzial. Während aus technischer Sicht der gesamte Kältebedarf von 104 PJ/a rechnerisch gedeckt werden könnte, zeigt die Wirtschaftlichkeitsuntersuchung, dass sich Absorptionskälteanlagen unter den hier getroffenen Annahmen bzw. Voraussetzungen erst ab einer Volllaststundenzahl von 7000 h/a oder mehr rentieren. Das heißt für den wirtschaftlichen Betrieb von Anlagen im Industriebereich kommen vor allem gut ausgelegte Anlagen im Dauerbetrieb in Frage. Mögliche Anwendungsfelder dafür wären Kühllhäuser, Supermarktkälte oder Industrieprozesse.



# Kapitel 9

## Schlussfolgerungen und Ausblick

### 9.1 Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen

Das Ziel der vorgestellten Arbeit war es das theoretische Abwärmeaufkommen der deutschen Industrie zu quantifizieren und die technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen für verschiedene Technologien zur Abwärmenutzung (Zeolith-Wärmespeicher, thermische und mechanische Wärmepumpen und Absorptionskältemaschinen) aufzuzeigen.

Dazu wurde im ersten Teil der Arbeit ein Verfahren zur Auswertung von Emissionsdaten der einzelnen Betriebe der deutschen Industrie entwickelt. Damit konnte ein unterer Grenzwert des theoretischen Abwärmepotenzials für 2008 von 127 PJ/a bestimmt werden. In der Auswertung wurden mindestens 57% des Endenergieeinsatzes der Industrie erfasst. Dabei wurde nicht der Stromverbrauch berücksichtigt, dafür aber der Verbrauch des GHD Sektors. Wird der GHD Verbrauch nicht berücksichtigt steigt der Erfassungsgrad auf 58%. Extrapoliert man das Ergebnis auf den nicht erfassten Anteil, kommt man je nach Verfahren auf 218 bis 252 PJ/a Abwärme. Aus den ausgewerteten Daten ergibt sich ein durchschnittliches Abwärmeaufkommen von 13% der eingesetzten Brennstoffenergie. Zur Abschätzung eines maximalen Abwärmeaufkommens kann ein in der Literatur (z.B. [Utlu 2015]) verwendeter Abwärmefaktor von 40% angenommen werden (706 PJ/a). Letzterer Wert wird jedoch schon als unrealistisch hoch eingeschätzt. Es konnte somit aber eine sichere untere Grenze gefunden werden und ein oberes Limit. Um zu beurteilen ob und wenn mit welchen Technologien die Abwärme genutzt werden kann, wurden das kumulierte Abwärmeaufkommen und die Leistung über die Temperatur aufgetragen. Es zeigt sich, dass es eher wenige große Quellen sind als viele Kleine (95% der Abwärme stammt aus nur 784 Betrieben), und dass erwartungsgemäß ein Großteil der Energie bei niedrigen Temperaturen auftritt. Der größte Anteil der Abwärme tritt in den Sektoren „Metallerzeugung und -bearbeitung“, „Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik Verarbeitung von Steinen und Erden“ und der Chemieindustrie auf. Prozentual gesehen sind die größten Abwärmeanteile bezogen auf den Brennstoffenergieeinsatz in den Sektoren „Sonstiger Fahrzeugbau“ (Sektor 30) mit 38%, „Herstellung von elektrischer Ausrüstung“ (Sektor 27) mit 31% und „Herstellung von Textilien“ (Sektor 13) mit 29% zu finden.

Bei der Untersuchung der technischen Nutzbarkeit der Abwärme zeigte sich am Beispiel eines Zeolith-Wärmespeichers, dass gesichert 80 PJ/a Abwärme im notwendigen Temperaturbereich zur Verfügung stehen.

Allgemein wurde der Wärmebedarf betrachtet, er stellte in Bezug auf die Abwärmenutzung aber keine Beschränkung dar: Der Bedarf ist deutlich größer als das Angebot. Diese Aussage stammt allerdings aus einer Deutschlandweiten Analyse. Lokal kann es durchaus zu Einschränkungen in der Nutzbarkeit durch das Fehlen eines Wärmebedarfs kommen. Deshalb ist es wichtig, in der weitergehenden Forschung das Abwärmeangebot und den Wärmebedarf räumlich aufzuschlüsseln. Dabei ist auch die maximal mögliche Transportdistanz zu berücksichtigen.

Der Kältebedarf von gewerblichen und industriellen Abnehmern beträgt 104 PJ/a. Aus der Analyse der zur Verfügung stehenden Techniken der Absorptionskälteanlagen hat sich gezeigt, dass das gesicherte Angebot an Abwärme, die diese Nachfrage decken kann, bei 115 PJ/a liegt. Unter Be-

rücksichtigung der thermischen Leistungszahl (Annahme 0,7) wäre die Deckung eines großen Teils des Kältebedarfs (ca. 77%) von 104 PJ/a somit möglich. Dafür muss allerdings eine detailliertere Analyse von Angebot und Nachfrage bezüglich der Temperatur sowie der räumlichen und zeitlichen Übereinstimmung erfolgen.

Die Wirtschaftlichkeitsanalyse der vorgestellten Technologien hat gezeigt, dass Absorptionskälteanlagen für Anwendungen im Gebäudebereich mit mehr als 2500 Volllaststunden im Jahr interessant sind. Absorptionskälteanlagen im Bereich der Industrie müssten unter den angenommenen Voraussetzungen mindestens 7000 Volllaststunden pro Jahr erreichen, um in den Bereich der Wirtschaftlichkeit zu gelangen. Für eine Anwendung in der Industrie oder im Gebäudebereich bei einer exemplarischen Volllaststundenzahl von 1000 h/a, müssten die Investitionskosten auf 370 bzw. 510 €/kW sinken.

Elektrische Wärmepumpen können sich bei aktuellen Strompreisen und Investitionskosten in der Industrie schon ab 4000 Volllaststunden pro Jahr lohnen. Die beiden anderen Zielgruppen erreichen den potenziell wirtschaftlichen Bereich schon bei Anwendungen ab 1000 Volllaststunden. Auch Absorptionswärmepumpen sind bei Anwendungen mit mehr als 2500 Volllaststunden pro Jahr für alle drei Zielgruppen wirtschaftlich interessant, ab 1000 Stunden pro Jahr im Gebäudebereich oder für Enthusiasten. Entscheidend für die Einsatzmöglichkeit der Wärmepumpen sind somit das Lastprofil der Anwendung und die Dimensionierung der Anlagen, um hinreichend viele Volllaststunden zu erreichen.

In der Sensitivitätsanalyse konnte gezeigt werden, dass der Strombedarf der Absorptionskälteanlagen schon hinreichend gering ist und keinen entscheidenden Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Anlagen mehr hat. Den größten Einfluss hat der Annuitätsfaktor, der ein Maß für die Zinserwartung der Investoren ist. Weiterführende Forschungsarbeiten zu den Abwärmenutzungstechnologien sollten sich also vor allem auf das Absenken der Investitionskosten fokussieren.

Insgesamt konnte gezeigt werden, dass in der deutschen Industrie Abwärme in einer relevanten Größenordnung mit Nutzungspotenzialen vorhanden ist. Auch die Wirtschaftlichkeit verschiedener Abwärmenutzungstechnologien ist in einem interessanten Bereich. Das zeigt, dass eine detailliertere Betrachtung des Themas wichtig ist und weiter verfolgt werden sollte. Deshalb sollen im nächsten Kapitel ein Ausblick vorgestellt werden und weiterführende Fragen aufgezeigt werden.

## 9.2 Ausblick und weiterführende Fragen

Der Ausblick und die weiterführenden Fragen, die die hier vorgestellte Arbeit offen lässt, werden auf zwei verschiedenen Ebenen betrachtet: Zum Einen regional auf Deutschland bezogen, zum Anderen auf europäischer Ebene. Noch weitergehend könnte natürlich eine weltweite Perspektive eingenommen werden. Auf Grund der immer stärker zunehmenden Diversität wird hier darauf jedoch verzichtet.

### 9.2.1 Deutschland

Bei der vorliegenden Arbeit handelt es sich um die Abschätzung einer unteren Grenze des industriellen Abwärmeaufkommens in Deutschland. Es ist eine erste Abschätzung mit standardisierten Werten für die Abgaszusammensetzung, Dichte, Wärmekapazität und Luftfeuchtigkeit. Für die im Abgasstrom enthaltene Feuchtigkeit lagen zum Zeitpunkt der Auswertung für 2008 nicht genügend valide Werte vor, um eine sinnvoll Auswertung zu ermöglichen. Dies ist nach Einschätzung der Experten in den zuständigen Ämtern und Ministerien für die inzwischen erhobenen Daten von 2012 anders. Diese Daten sollten ab dem Frühjahr/Sommer 2014 verfügbar sein, konnten für diese Arbeit aber leider nicht mehr berücksichtigt werden.

In weitergehenden Arbeiten wäre eine Analyse auf Basis dieser neuen Daten sehr interessant. Dabei könnte neben der Luftfeuchte auch die genaue Abgaszusammensetzung berücksichtigt werden. Die aus der Literatur übernommene konstante Abgaszusammensetzung, ist nach Einschätzung der Autorin die größte Schwachstelle der Arbeit. Ein weiterer Schritt, um das Potenzial der Abwärmenutzung genauer zu untersuchen, wäre außerdem die Einbeziehung der örtlichen Komponente.

Dazu müssten sowohl Quellen als auch mögliche Abnehmer verortet und in Relation zu einander gesetzt werden. Um die Qualität der Daten besser beurteilen zu können, wäre ein wichtiger Punkt für weitere Forschungsvorhaben, der Abgleich der bei den Emissionsdaten angegebenen Werte mit den realen Werten. Dafür ist jedoch eine relativ breit angelegte Studie mit verschiedenen Fallstudien in jedem Sektor notwendig. Dabei müssen in jedem Sektor gemessene, berechnete und geschätzte Werte für verschiedene Unternehmensgrößen untersucht werden. Bei einer hinreichend großen Stichprobe könnte dann eine Bewertung der Datenqualität erfolgen und gegebenenfalls ein Korrekturfaktor abgeleitet werden. Auch sollte in weiteren Untersuchungen die Entwicklung der Abwärmemenge über die Zeit betrachtet werden. Bei [Utlu 2015] wurde das für die türkische Industrie untersucht, allerdings mit festen Abwärmefaktoren. Folglich folgte die Abwärmemenge dem Energieverbrauch der Industrie in den jeweiligen Jahren. Von 1992 bis 2008 steigt das Abwärmeaufkommen demnach um 58%. Allerdings zeigen die Daten für 2008 und 2009 ein geringeres Abwärmeaufkommen als in den vorherigen und folgenden Jahren. Dies ist vermutlich auf einen eingebrochenen Energiebedarf in Folge der Wirtschaftskrise 2008/2009 zurückzuführen. Diese Daten legen nahe, dass das Abwärmeaufkommen heute größer ist als es auf Basis der Daten von 2008 erscheint. Eine Auswertung der Emissionsdaten für mehrere Zeitpunkte würde eine Abwärme-Zeitreihe liefern, die unabhängig von der eingesetzten Energie ist. Zusätzlich könnte eine solche Auswertung Informationen dazu liefern, wie sich das Temperaturniveau der Abwärme über die Zeit verändert.

Ein weiterer wichtiger Punkt, der in weiterführenden Arbeiten zu berücksichtigen wäre, ist die Dauer der Emissionen. Viele Technologien brauchen, um wirtschaftlich angewendet werden zu können, eine minimale Betriebsstundenzahl (siehe Kapitel 7 Wirtschaftlichkeitsanalyse). Insofern wäre eine Unterteilung der Quellen in <1000 h, <2000 h, <4000 h und <8000 h Betriebsdauer pro Jahr sinnvoll. Diese oben genannten Informationen können dann genutzt werden um eine detaillierte Wirtschaftlichkeitsanalyse für Einzeltechnologien durchzuführen.

In [Pehnt u. a. 2010] wurden die größten Hemmnisse zur Abwärmenutzung in einem Expertenworkshop betrachtet. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass die größten Hemmnisse mangelnde Koexistenz von Abwärmequellen und Senken am gleichen Ort sind bzw. fehlende Informationen dazu, die Fokussierung der Firmen auf ihr Kerngeschäft, die Gewährleistung der Produktionssicherheit und zu hohe Renditeerwartungen. Mit der vorliegenden Arbeit und den vorgeschlagenen weiteren Untersuchungen könnten die ersten beiden Hemmnisse aus dem Weg geräumt werden. Die Produktion wird bei den hier betrachteten Abwärmequellen nicht gefährdet, da bewusst auf eine Identifizierung von prozessinternen Abwärmequellen verzichtet wurde und nur Abgasströme betrachtet wurden. Um das resultierende Abwärmepotenzial zu heben bedarf es dann noch der Erarbeitung und Umsetzung von Förderkonzepten, aber das liegt in der Hand von Ökonomen, Volkswirten und Politikern.

### 9.2.2 Europa

Neben den weiterführenden Fragen, die sich für Deutschland ergeben, sollte man das Thema Abwärme auch auf einer größeren Ebene, in Europa, betrachten. Auch hier gibt es kaum Informationen und Studien zum Abwärmeaufkommen in den einzelnen Ländern oder Regionen. Die Besonderheit der Daten aus der deutschen Immissionsschutzverordnung stellt dabei eine große Chance dar, wenn es gelingt die Ergebnisse auf andere Länder zu übertragen. Dafür ist es aber wichtig zunächst zu untersuchen, welche Faktoren die Übertragbarkeit von Abwärmefaktoren bestimmen: Ist es wichtig, dass die Länder sich im Energieverbrauch ähneln, in der Zusammensetzung der Industrie, im Anteil des Endenergieverbrauchs? Müssen die Länder auf einem möglichst gleichen Entwicklungsstand sein? Und wenn ja, wie definiert man diesen?

Außerdem muss untersucht werden, ob es sinnvoller ist die Abwärmemenge im Bezug auf die eingesetzte Brennstoffmenge zu übertragen oder ob es evtl. möglich ist eine direkte Relation der Abwärmemengen zum  $CO_2$ -Ausstoß zu finden. Das hätte den Vorteil, dass die Daten zu den  $CO_2$ -Emissionen europaweit für alle Standorte vorliegen. Wenn es gelingt, anhand von der Datenlage in Deutschland, wo sowohl  $CO_2$ -Emissionen als auch Temperatur, Volumenstrom und Betriebsstunden vorliegen, eine Korrelation zu entwickeln, könnte man die Abwärmemengen quantifizieren ohne den von [Persson u. a. 2014] und [McKenna 2009] genommenen Umweg zu gehen, aus den  $CO_2$ -Werten

auf die eingesetzte Energie zurück zu rechnen und dann die Abwärme abzuschätzen. In jedem Fall sollte ein Vergleich der Ergebnisse von der Übertragung von  $CO_2$ - und energiebasierten Kennwerten erfolgen und untersucht werden, ob qualitativ andere Ergebnisse zustande kommen und sich somit eine Präferenz zwischen den beiden Ansätzen ableiten lässt. Schwierig wird es statt eines Faktors für die Abwärmemenge eine Funktion über die Temperatur für die statistische Abwärmemenge in einem Sektor zu definieren und dies übertragbar auf andere Länder und Regionen zu machen. Der Gedanke wäre jedoch sehr verlockend, da dadurch erst eine wirkliche Abschätzung des technisch und/oder wirtschaftlich nutzbaren Abwärmeaufkommens möglich wird.

Längerfristig wäre es aber wünschenswert, wenn für alle Länder in Europa eigene Studien zum Abwärmeaufkommen in der Industrie erstellt würden, da, wie eingangs schon erwähnt, eine Übertragung von Kennwerten aus anderen Ländern in einem Top-Down-Verfahren eine sehr ungenaue Methode ist, solange die Kriterien und Voraussetzungen zur Übertragbarkeit nicht erforscht wurden. Die Ergebnisse, die mit einem solchen Top-Down-Ansatz erzielt werden, können somit immer nur erste Abschätzungen sein. Als vorbereitende Arbeit zu einer breit angelegten Erhebung des Abwärmeaufkommens in der Industrie in Europa ist es jedoch sinnvoll, zunächst die entscheidenden Faktoren und Daten für eine realistische Abschätzung zu erforschen: Welche Daten sind zwingend notwendig und welche haben nur noch einen geringen Einfluss auf die Genauigkeit des Ergebnisses? Die vorliegende Arbeit hat gezeigt, dass der Großteil der Abwärme in wenigen Sektoren auftritt (29% Metallerzeugung, 24% Glasindustrie, 19% Chemieindustrie, 10% Papierindustrie). Falls man zeigen könnte, dass sich dieses Ergebnis verallgemeinern lässt, wäre eine Fokussierung der Erhebung auf wenige Sektoren möglich. Auch sollte untersucht werden zu welchem Fehler der von [Broberg u. a. 2012] gewählte Ansatz führt, die Untersuchung auf ausgewählte Regionen zu beschränken und die Ergebnisse dann zu verallgemeinern, statt sich auf Sektoren zu fokussieren. Hierbei stellt sich aber wieder die Frage, nach welchen Faktoren die Untersuchungsgebiete ausgewählt werden müssen um für das gesamte Land repräsentativ zu sein. Die genauesten Ergebnisse erhält man, wenn man in den jeweiligen Ländern eine Erhebung durchführt. Doch auch hier besteht noch Forschungsbedarf um einen einheitlichen europäischen Standard zu definieren.

Insgesamt lässt sich sagen, dass das Feld des industriellen Abwärmepotenzials in Ländern und Regionen noch so neu und offen ist, dass die hier aufgeführten Fragen und Anregungen für weitere Forschungsfragen nur als Auswahl aus einem weiten Feld verstanden werden können.

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Kategorisierungsmöglichkeiten von Abwärmequellen . . . . .	3
1.2	Potenzialtheorie . . . . .	8
2.1	Kategorisierung Methoden Abwärmebestimmung . . . . .	12
3.1	Anteil des größten Sektors am Landesverbrauch . . . . .	32
3.2	Verfahrensschema Datenprüfung . . . . .	33
3.3	Abwärmeaufkommen ausgewertete Industrie (ohne Saarland) . . . . .	36
3.4	Abwärmeaufkommen je Bundesland . . . . .	37
3.5	Abwärme und Endenergie je Bundesland . . . . .	38
3.6	Abwärmefaktoren der Bundesländer . . . . .	39
3.7	Abwärmeaufkommen Hauptsektoren . . . . .	40
3.8	Abwärmeaufkommen in sonstigen Sektoren . . . . .	40
3.9	Verteilung Abwärme Sektoren . . . . .	41
3.10	Vergleich mit früheren Studien . . . . .	43
3.11	Vergleich Dichte konstant vs. variabel NRW und SH . . . . .	44
4.1	Vergleich extrapoliertes Abwärmeaufkommen in Deutschland . . . . .	49
4.2	Extrapolation Abwärmeaufkommens über Erfassungsgrad für Deutschland . . . . .	50
4.3	Vergleich Ergebnisse NRW . . . . .	51
4.4	Vergleich mit früheren Studien . . . . .	52
4.5	Vergleich Ergebnisse Studien Schweden . . . . .	53
5.1	Obere und untere Grenze Abwärmeaufkommen der deutschen Industrie 2008 . . . . .	56
6.1	Nutzungsmöglichkeit Abwärme . . . . .	60
6.2	Übersicht Abwärmenutzungstechnologien . . . . .	60
6.3	Funktionsschema mechanische Wärmepumpe . . . . .	61
6.4	Funktionsschema Absorptionswärmepumpe . . . . .	62
6.5	Einsatzmöglichkeiten Absorptionswärmepumpen . . . . .	63
6.6	Arten von Wärmespeichern . . . . .	64
6.7	Funktionsschema Zeolithspeicher . . . . .	65
6.8	Entladetemperatur Zeolithspeicher . . . . .	66
6.9	Abwärme-Temperatur-Diagramm für 35, 70 und 100°C . . . . .	67
6.10	Abwärmeenergie über Temperatur nach Leistung der Abwärmequelle . . . . .	67
6.11	Anzahl Betriebe Abwärmeaufkommen . . . . .	68
6.12	Abwärmenutzung für mobilen Zeolith-Speicher . . . . .	73
7.1	Annuitätsfaktor über Amortisationszeit für Zielgruppen . . . . .	76
7.2	Max. zulässige spezifische Speicherkosten . . . . .	77
7.3	Investitionskosten Absorptionskälteanlagen . . . . .	80
7.4	Investitionskosten mechanische Wärmepumpe . . . . .	80
7.5	Investitionskosten Absorptionswärmepumpen . . . . .	81

7.6	Sensitivitätsanalyse Kosten . . . . .	83
7.7	Sensitivitätsanalyse COP, h, ANF . . . . .	83

# Tabellenverzeichnis

1.1	Typische Abwärmemetemperaturen in verschiedenen Industriesparten . . . . .	4
1.2	WZ 2008 Klassifizierung . . . . .	7
3.1	Beispiele genehmigungsbedürftiger Anlagen nach 4. BImSchV . . . . .	25
3.2	Daten aus Emissionserklärungen . . . . .	27
3.3	Quellennachweis Emissionsdaten 2008 . . . . .	28
3.4	Anzahl der ausgewerteten Emissionsvorgänge je Bundesland . . . . .	29
3.5	Typische Heizwerte von Brennstoffen . . . . .	30
3.6	Übersicht Quellen und Bilanzgrenzen der verwendeten Daten . . . . .	35
3.7	Abwärmefaktoren Sektoren nach WZ 2008 Klassifizierung . . . . .	39
3.8	Vergleich Abwärmeaufkommen Referenztemperatur 0° bzw. 35°C . . . . .	46
3.9	Vergleich Abwärmeaufkommen Referenztemperatur 8° bzw. 35°C . . . . .	46
4.1	Abwärmefaktoren für die Sektorendefinition des LAK-AGEB . . . . .	49
6.1	Kältebedarf ausgewählte Anwendungsfälle . . . . .	69
6.2	Wärmebedarf Industriesektoren . . . . .	69
6.3	Prozesstemperaturen Niedertemperaturprozesse Literatur . . . . .	71
6.4	Endenergieverbrauch Trocknungsprozesse . . . . .	72
7.1	Zusammenfassung Parameter Zielgruppen . . . . .	77
7.2	Eingangsparameter Wirtschaftlichkeitsanalyse Absorptionskälteanlage . . . . .	78
7.3	Eingangsparameter Wirtschaftlichkeitsanalyse Wärmepumpen . . . . .	79



# Danksagungen

Die Emissionsdaten nach der 11. BImSchV werden in den jeweiligen Bundesländern erhoben. Deshalb möchte ich den nachfolgenden Stelle und Ministerien für die Unterstützung dieser Arbeit und die zur Verfügungstellung der Datenbasis danken:

Baden-Württemberg	Landesamt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
Bayern	Bayerisches Landesamt für Umwelt
Brandenburg	Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz
Berlin	Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt
Bremen	Senator für Umwelt, Bau und Verkehr
Hamburg	Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt
Hessen	Hessisches Emissionskataster Industrie 2008 - Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie
Mecklenburg-Vorpommern	Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern
Niedersachsen	Niedersächsisches Ministerium für Energie, Umwelt und Klimaschutz
Nordrhein-Westfalen	Landesamt für Umwelt
Rheinland-Pfalz	Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht
Sachsen	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
Sachsen-Anhalt	Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt
Schleswig-Holstein	Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume
Thüringen	Thüringer Landesamt für Umwelt und Geologie

Diese Arbeit ist durch finanzielle und/oder ideelle Förderung durch folgenden Institutionen entstanden: ZAE Bayern e.V., ifeu Heidelberg gGmbH und die Stiftung der Deutschen Wirtschaft. Für die erfahrene Unterstützung möchte ich mich herzlich bedanken. Die Arbeit am ZAE Bayern e.V. erfolgte im Rahmen des Forschungsprojektes Mobile Sorptionsspeicher, gefördert durch das BMWi (FKZ 0327383B).

Außerdem möchte ich mich bedanken bei:

- Professor Spliethoff, für die Übernahme der Betreuung dieser Arbeit und dafür, dass Sie mich überzeugt haben, doch einen zusammenhängenden Text zu schreiben.
- Professor Wagner, für die Übernahme der Zweitbetreuung.
- Professor Irene Peters und Hans Schäfer, die mich auf das Thema Abwärme gebracht haben. Danke für die Einblicke in die Welt der Stadtplanung.
- Eberhard Lävemann, für die Förderung, das stets konstruktive und punktgenaue Feedback, die gewinnbringenden Diskussionen und die Betreuung dieser Arbeit.

- Martin Pehnt und meine ehemaligen Kollegen am ifeu, für die spannenden Diskussionen und Input.
- Meinen Kollegen am ZAE, für die tolle gemeinsame Zeit. Danke an Fabian Fischer (dieses Jahr werden wir fertig! wirklich!), Markus Gaaß (die Simulation läuft!), Michael Radspieler, Peter Zachmeier, Richard Gurtner und Andi Krönauer für die gute Zusammenarbeit. Außerdem einen Gruß und Dank an die weiteren Doktoranden: geteiltes Leid ist manchmal doch leichter.
- Selina Liu, thanks for your great work and contribution to the economic analysis during your internship at ZAE.
- Laia Miro, thanks for all the joined work and papers. But thank you also for your enthusiasm, your friendship and hospitality.
- Luisa Cabeza, thank you for my research stay in Lleida and for making me publish my work in papers.
- Peter Junglas, für die Unterstützung bei allen mathematischen und solver-technischen Matlab-Fragen und deine Begeisterung für Simulationen, von der ich immer gerne ein Stück mitnehme.
- Stephan Richter, für spannende Anregungen und Projektideen.
- Meinen Eltern, für die Unterstützung und die helfenden Hände, wenn bei uns mal wieder Not am Mann war: Ohne Euch und ohne Leo in guten Händen zu wissen, hätte ich diese Arbeit nicht fertig stellen können.
- Außerdem möchte ich mich bei meiner Familie und meinen Freunden bedanken, dass sie mich bei dieser Arbeit unterstützt haben und meine Abwesenheit, zig unbeantwortete Emails, Briefe Telefonanrufe und vergessene Geburtstage ertragen haben...
- Last but not least: Rene, für das Retten der Welt. Immer wieder.

# Literaturverzeichnis

- [AEE INTEC 2013] AEE INTEC: *Solar Heat for Industrial Applications: Potential, Framework Conditions and Build Examples*. 2013. – <http://www.aee-intec.at/>, Zugriff August 2013
- [AGEB 2014] AGEB: *Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen*. 2014. – [www.AGEB.de](http://www.AGEB.de), Zugriff 25.11.2014
- [AGFW 2013] AGFW : *Der Energieeffizienzverband für Waerme, Kaelte und KWK e. V.: Euroheat and power*. 2013. – <http://www.agfw.de/europa-und-internationales/euroheat-power/>, Zugriff 20.8.2013
- [Ammar u. a. 2012] AMMAR, Yasmine ; JOYCE, Sharon ; NORMAN, Rosemary ; WANG, Yaodong ; ROSKILLY, Anthony P.: Low grade thermal energy sources and uses from the process industry in the UK. In: *Applied Energy* 89 (2012), Nr. 1, S. 3 – 20. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261911003734>. – Special issue on Thermal Energy Management in the Process Industries. – ISSN 0306-2619
- [Bergmeier 2003] BERGMEIER, Monika: The history of waste energy recovery in Germany since 1920. In: *Energy* 28 (2003), Nr. 13, S. 1359 – 1374. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544203001142>. – Strategies of Waste Energy Usage: Belin-Brandenburg Academy of Sciences Conference Dec 1999. – ISSN 0360-5442
- [BERR 2008] BERR: Heat call for evidence / Department for Business, Enterprise and Regulatory Reform. 2008. – Forschungsbericht
- [Berthou und Bory 2012] BERTHOU, M ; BORY, D.: ECEEE 2012 Summer Study on Energy Efficiency in Industry. In: *Overview of waste heat in the industry in France, 2012*
- [Beyene und Moman 2006] BEYENE, Asfaw ; MOMAN, Annika: Process oriented industrial classification based on energy intensity. In: *Applied Thermal Engineering* 26 (2006), Nr. 17-18, S. 2079–2086. – <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135943110600144X>. – ISSN 1359-4311
- [Blesl u. a. 2008] BLESLE, M. ; KEMPE, S. ; OHL, M. ; FAHL, U. ; KOENIG, A. ; JENSSEN, T. ; ELTROP, L: Waermeatlas Baden-Wuerttemberg: Erstellung eines Leitfadens und Umsetzung für Modellregionen, Forschungsbericht, FZKA-BWPLUS. 2008 (FZKA-BWPLUS, Foerderkennzeichen BWK 25007). – Forschungsbericht
- [Blesl u. a. 2011] BLESLE, M. ; OHL, M. ; FAHL, U.: Ganzheitliche Bewertung innovativer mobiler thermischer Energiespeicherkonzepte für Baden-Wuerttemberg auf Basis branchen- und betriebsspezifischer Waermebedarfsstrukturen / Programm Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung (BWPLUS), durchgeführt vom Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) Universitaet Stuttgart. 2011. – Forschungsbericht
- [Boddy 1994] BODDY, J.H.: *Profiting from low-grade heat Thermodynamic cycles for low-temperature heat sources*. Kap. Sources of heat, S. 127–149, The Institution of Electrical Engineers, 1994 (The Watt committee on Energy Report 26)

- [Bonilla u. a. 1997] BONILLA, J.J. ; BLANCO, J.M. ; LOPEZ, L. ; SALA, J.M.: Technological recovery potential of waste heat in the industry of the basque country. In: *Applied Thermal engineering* 17 (1997), Nr. 3, S. 283–288
- [Broberg u. a. 2012] BROBERG, Sarah ; BACKLUND, Sandra ; KARLSSON, Magnus ; THOLLANDER, Patrik: Industrial excess heat deliveries to swedish district heating networks: Drop it like it's hot. In: *Energy Policy* 51 (2012), S. 332–339
- [Brueckner u. a. 2015] BRUECKNER, S. ; LIU, S. ; MIRO, L. ; RADSPIELER, M. ; CABEZA, L. F. ; LAEVE-MANN, E.: industrial waste heat recovery technologies: an economic analysis of heat transformation technologies. In: *Applied Energy* 151 (2015), S. 157–167
- [Brueckner u. a. 2014] BRUECKNER, S. ; MIRO, L. ; CABEZA, L.F. ; PEHNT, M. ; LAEVE-MANN, E.: Methods to estimate the industrial waste heat potential of regions - a categorization and literature review. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 38 (2014), S. 164–171
- [Brückner u. a. 2015] BRÜCKNER, Sarah ; ARBTER, Rene ; PEHNT, Martin ; LÄVEMANN, Eberhard: Industrial waste heat potential in Germany - A bottom-up analysis-. In: *submitted to Energy Efficiency* (2015)
- [Brückner und Pehnt 2013] BRÜCKNER, Sarah ; PEHNT, Martin: The heat is on - Technologies to tap the industrial waste heat potential. In: *energy efficiency -business&industry* (2013), S. 14–15
- [Chung u. a. 2013] CHUNG, Mo ; IM, Yong-Hoom ; PARK, Byung-Sik: Distribution of industrial waste heat and characteristics of heat trading among district heating companies in Korea. In: *International Conference on Applied Energy ICAE 2013, Pretoria, South Africa, 2013*
- [Connolly u. a. 2013] CONNOLLY, D. ; MATHIESEN, B. ; OSTERGAARD, P. ; MÖLLER, B. ; NIELSEN, S. ; LUND, H. ; PERSSON, U. ; WERNER, S. ; GRÖZINGER, J. ; BOERMANS, T. ; BOSQUET, M. ; D., Trier: Heat Roadmap Europe 2050 - Second Pre-Study for the EU27 / Euroheat&Power. 2013. – Forschungsbericht
- [Cronholm u. a. 2009] CRONHOLM, L. ; GROENKVIST, S. ; SAXE, M.: Spillvaerme fran industrier - och vaermeatervinning fran lokaler / Svensk Fyaerrvaerme. 2009. – Forschungsbericht
- [DKV 2007] DKV: *Deutscher Kaelte- und Klimatechnischer Verein e.V.: Statusbericht Nr 22: ILK, FKW Uni Essen: Energiebedarf für die technische Erzeugung von Kaelte.* 2007. – <[http://www.dkv.org/index.php?id=9&no\\_cache=1&tx\\_fsdatasets\\_pi1\[page\]=3&tx\\_fsdatasets\\_pi1\[item\]=104](http://www.dkv.org/index.php?id=9&no_cache=1&tx_fsdatasets_pi1[page]=3&tx_fsdatasets_pi1[item]=104)>, Zugriff 04.05.2012
- [DOE 2008] DOE: Waste heat recovery: technology and opportunities in U.S. Industry / U.S. Department of Energy: Industrial Technologies Program. 2008. – Forschungsbericht
- [Drath 2002] DRATH, Tilman: *Grundlagen und Programmierung der Aktualisierung des wissensbasierten Systems HERAKLES*, Ruhr Univeristaet Bochum, Lehrstuhl fuer Energiesysteme und Energiewirtschaft, Studienarbeit, 2002
- [Dupont und Sapora 2009] DUPONT, M. ; SAPORA, E.: The heat recovery potential in the French Industry: Which opportunities for heat pump systems? In: *ECEEE 2009 Summer study: ACT! INNOVATE! DELIVER! REDUCING ENERGY DEMAND SUSTAINABLY*, 2009
- [element energy u. a. 2014] ELEMENT ENERGY ; IMPERIAL COLLEGE LONDON ; ECOFYS ; STEVENSON, P. ; HYDE, R.: The potential for recovering and using surplus heat from industry -Final Report / DECC. 2014. – Forschungsbericht
- [ENOVA 2013] ENOVA: *Enova Unternehmensseite.* 2013. – <http://www.enova.no/about-enova/about-enova/our-history-and-our-mission/259/378/>, Zugriff 20.8.2013

- [EPA 2014] EPA: *US Environmental Protection Agency*. 2014. – [http://www.epa.gov/chp/documents/waste\\_heat\\_power.pdf](http://www.epa.gov/chp/documents/waste_heat_power.pdf), Zugriff Januar 2014
- [EU-Consult und bifa Umweltinstitut 2008] EU-CONSULT, GmbH ; UMWELTINSTITUT bifa: Leitfaden zur Abwaermenutzung in Kommunen / Bayerisches Landesamt für Umwelt. URL [http://www.lfu.bayern.de/energie/co2\\_minderung/doc/leitfaden\\_abwaermenutzung.pdf](http://www.lfu.bayern.de/energie/co2_minderung/doc/leitfaden_abwaermenutzung.pdf), 2008. – Forschungsbericht
- [Euroheat and power 2013] EUROHEAT AND POWER: *The international Association for District Heating, District Cooling and Combined Heat and Power, Ecoheatcool*. 10 2013. – <http://www.euroheat.org/ecoheatcool>, Zugriff: 23.10.2013
- [European Commission 2014] EUROPEAN COMMISSION: 2014. – <http://ec.europa.eu>, Zugriff Juli 2014
- [Eurostat 2013] EUROSTAT: *European statistics*. 2013. – [http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics\\_explained/index.php/Electricity\\_and\\_natural\\_gas\\_price\\_statistics](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Electricity_and_natural_gas_price_statistics), Zugriff Juli 2013
- [Eurostat 2015] EUROSTAT: *Europa Statistiken*. 2015. – <http://ec.europa.eu/eurostat/>, letzter Zugriff: 17/02/2015
- [Forman u. a. 2016] FORMAN, Clemens ; MURITALA, Ibrahim K. ; PARDEMANN, Robert ; MEYER, Bernd: Estimating the global waste heat potential. In: *Renewable Sustainable Energy Reviews* 57 (2016), S. 1568–1579
- [Gebhardt 1999] GEBHARDT, M.: *Potenzial der industriellen Abwaermenutzung im Waerremarkt der Stadt Duisburg*, Diplomarbeit, 1999
- [Geiger u. a. 1999] GEIGER, B. ; GRUBER, E. ; MEGELE, W. ; ISI, Frauenhofer (Hrsg.): *Energieverbrauch und Energieeinsparung in Gewerbe, Handel und Dienstleistung -Energie effizient nutzen - ein Gewinn für den Betrieb*. ISBN: 3-7908-1216-1 : Heidelberg: Physica-Verlag, 1999
- [Geoportal Bayern 2013] GEOPORTAL BAYERN: *Energie-Atlas Bayern 2.0*. 2013. – <http://geoportal.bayern.de/energieatlas-karten>, Zugriff 24.10.2013
- [Glatzel 2001] GLATZEL, W.-D.: *Energie im Wandel: Politik, Technik und Szenarien einer nachhaltigen Energiewirtschaft*. Kap. Abwaerme - die vergessene Eigenenergie: Ein Blick zurück und in die Zukunft, S. 151–164. Wolf-Dieter Glatzel, Umweltbundesamt, Bismarkstraße 1, 14193 Berlin : Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2001
- [Grote u. a. 2015] GROTE, Lars ; HOFFMANN, Patrick ; TAENZER, Guillem: Studie Abwaermenutzung -Potentiale, Hemmnisse und Umsetzungsvorschlaege- Studie zur Fachkonferenz vom 4.3.2015 / IZES Institut für ZukunftsEnergieSysteme gGmbH. 2015. – Forschungsbericht
- [Hammond und Norman 2012] HAMMOND, G.P. ; NORMAN, J.B.: Heat recovery opportunities in UK manufacturing. In: *International Conference on Applied Energy, ICAE 2012*, 2012, S. ICAE2012–A10069
- [Hammond und Norman 2014] HAMMOND, G.P. ; NORMAN, J.B.: Heat recovery opportunities in UK industry. In: *Applied Energy* 116 (2014), S. 387–397
- [Hirzel u. a. 2013] HIRZEL, Simon ; SONTAG, Benjamin ; ROHDE, Clemens: Industrielle Abwaermenutzung -Kurzstudie / Frauenhofer ISI, Effizienzfabrik Innovationsplattform Ressourceneffizienz in der Produktion. 2013. – Forschungsbericht
- [Holland und Watson 1982] HOLLAND, F.A. ; WATSON, F.A.: Economic and thermodynamic aspects of vapour compression heat pump systems. In: *Journal of Heat Recovery Systems* 2 (1982), S. 13–21

- [IEA 2013] IEA: *IEA Annex 24 Task 42 Final report. Compact thermal energy storage: Material development for system integration.* 2013
- [IEA Heat pump programme 2000] IEA HEAT PUMP PROGRAMME: Final report from Annex 24: Absorption machines for heating and cooling in future energy systems / IEA. 2000. – Forschungsbericht
- [International Energy Agency 2007] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, Paris: *Tracking Industrial Energy Efficiency and CO2 Emissions.* 2007
- [IUTA 2000] IUTA: Abschlussbericht - Einbindung des Energieträgers Abwärme in das Expertensystem HERAKLES. / Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V. (IUTA). Duisburg-Rheinhausen, Dezember 2000. – Forschungsbericht
- [IZES 2010] IZES: Industrielle Abwärme - Eine Potentialstudie fuer Deutschland / FKZ 03FPEL0033 PtJ. 2010. – Forschungsbericht
- [Kaffeeverband 2014] KAFFEEVERBAND: *Kaffeeverbrauch Deutschland.* 2014. – [www.kaffeeverband.de/presse/pressemitteilungen/310-deutscher-kaffeemarkt-2012-kaffeetrinker-kaufen-verstaerkt-ganze-bohnen-und-kapseln](http://www.kaffeeverband.de/presse/pressemitteilungen/310-deutscher-kaffeemarkt-2012-kaffeetrinker-kaufen-verstaerkt-ganze-bohnen-und-kapseln), Zugriff 5.5.2014
- [Kattenstein u. a. 2002] KATTENSTEIN, T. ; DRATH, T. ; ZIOLEK, A. ; UNGER, H. ; WAGNER, H.-J.: Validierung und kommunale Disaggregation des Expertensystems HERAKLES / Ruhr Universitaet Bochum - Lehrstuhl für Energiesysteme und Energiewirtschaft. 2002. – Forschungsbericht
- [Konstantin 2009] KONSTANTIN, Panos: *Praxisbuch Energiewirtschaft: Energieumwandlung, -transport und -beschaffung im liberalisierten Markt.* Springer Science & Business Media, 2009
- [Krönauer u. a. 2015] KRÖNAUER, Andreas ; LÄVEMANN, Eberhard ; BRÜCKNER, Sarah ; HAUER, Andreas: Mobil Sorption Heat Storage in Industrial Waste Heat Recovery. In: *Energy Procedia* 9th International Renewable Energy Storage Conference, IRES 2015 (2015)
- [LAK 2014] LAK: *Landesarbeitskreis Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen.* 2014. – [www.lak-energiebilanzen.de](http://www.lak-energiebilanzen.de), letzter Zugriff 25.11.2014
- [Land u. a. 2002] LAND, A. L. ; FELDHUSEN, H. ; TVÄRNE, A. ; CRONHOLM, L. ; SUNDLÖF, C.: INDUSTRIELL SPILLVÄRME -Processor och potentialer / Svenska Fjärrvärmeföreningens Service AB. 2002. – Forschungsbericht
- [Latour u. a. 1982] LATOUR, S.R. ; MENNINGMANN, J.G. ; BLANEY, B.L.: EPA Project Summary: Waste heat recovery potential in selected Industries / United States Environmental Protection Agency. 1982. – Forschungsbericht
- [Lopez u. a. 1998] LOPEZ, L. ; BLANCO, J.M. ; BONILLA, J.J. ; BACZA, S. ; SALA, J.M.: Determination of energy and exergy of waste heat in the industry of the Basque country. In: *Applied Thermal Engineering* 18 (1998), Nr. 3-4, S. 187–197. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431197000288>. – ISSN 1359-4311
- [Lucas 2004] LUCAS: *Thermodynamik- Die Grundgesetze der Energie- und Stoffumwandlung.* Springer-Verlag, 2004 (4)
- [Lutsch und Witterhold 2005] LUTSCH, W. ; WITTERHOLD, F.-G.: Perspektiven der Fernwärme und der Kraft-Wärme-Kopplung -Ergebnisse und Schlussfolgerungen aus der AGFW-Studie "Pluralistische Wärmeversorgung" / AGFW. 2005. – Forschungsbericht

- [Lävemann u. a. 2015] LÄVEMANN, Eberhard ; BAYER, Andreas ; BRÜCKNER, Sarah ; FISCHER, Fabian ; GAASS, Markus ; HAUER, Andreas ; KINZEL, Burghard ; KRÖNAUER, Andreas ; MATHUNI, Michael ; TREDER, Martin: Mobile Sorptionsspeicher zur industriellen Abwärmenutzung, Grundlagen und Demonstrationsanlage - MobS II- Schlussbericht, gefördert durch BMWi Förderkennzeichen 0327383B und 0327383C / ZAE Bayern e.V. and Hoffmeier Industrieanlagen GmbH. 2015. – Forschungsbericht
- [McKenna 2009] MCKENNA, R.: *Industrial energy efficiency, Interdisciplinary perspectives on the thermodynamic, technical and economic constraints*, University of Bath, Department of Mechanical Engineering, Dissertation, March 2009
- [McKenna und Norman 2010] MCKENNA, R.C. ; NORMAN, J.B.: Spatial modelling of industrial heat loads and recovery potentials in the UK. In: *Energy Policy* 38 (2010), Nr. 10, S. 5878 – 5891. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421510004131>. – The socio-economic transition towards a hydrogen economy - findings from European research, with regular papers. – ISSN 0301-4215
- [Metz u. a. 2007] METZ, B. ; DAVIDSON, OR. ; BOSCH, PR. ; DAVE, R. ; MEYER, LA.: IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. Working Group III: Mitigation of Climate Change / Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007. – Forschungsbericht
- [Meyer 2000] MEYER, Franz ; INFORMATIONSDIENST, BINE (Hrsg.): *Energieeffiziente Industrieöfen* / Bine Informationsdienst. 3 2000 (03/00). – Forschungsbericht
- [Miro u. a. 2015] MIRO, Laia ; BRUECKNER, Sarah ; CABEZA, Luisa F.: Mapping and discussing industrial waste heat (IWH) potentials for different countries. In: *Renewable and Sustainable Energy Review* 51 (2015), 11, S. 847–855
- [Miró u. a. 2016] MIRÓ, Laia ; BRUECKNER, Sarah ; MCKENNA, Russell ; CABEZA, Luisa F.: Methodologies to estimate industrial waste heat potential by transferring key figures: A case study for Spain. In: *Applied Energy* 169 (2016), S. 866–873
- [Mitteltemperatur 2015] MITTELTEMPERATUR: *Zeitreihe Lufttemperatur Deutschland*. 2015. – [de.wikipedia.org/wiki/Zeitreihe\\_der\\_Lufttemperatur\\_in\\_Deutschland](http://de.wikipedia.org/wiki/Zeitreihe_der_Lufttemperatur_in_Deutschland), letzter Zugriff 1.6.2015
- [Mlirtensson 1992] MLIRTENSSON, A.: Energy efficiency improvement by measurement and control, A case study of reheating furnaces in the steel industry. In: *Proceedings 14th National Industrial Energy Technology Conference, Houston, TX, April 22-23, 1992*
- [Netzwerkkaelte 2013] NETZWERKKAELTE: *Unternehmen für Ressourcenschutz. Netzwerk Kälteeffizienz: Hamburg*. 2013. – <http://www.hamburg.de/contentblob/262946/data/vortrag-probst.pdf>, Zugriff Juli 2013
- [Niederlande 2013] NIEDERLANDE, Waermeatlas: *Agentschap NL*. 2013. – <http://agentschapnl.kaartenbalie.nl/gisviewer/viewer.do?code=311bc9828c8015a87e9d3dd8fd179ed8>, Zugriff: 24.10.2013
- [Oro u. a. 2014] ORO, E. ; MIRO, L. ; FARID, MM. ; MARTIN, V. ; CABEZA, LF.: Energy management and CO2 mitigation using PCM as thermal energy storage (TES) in cold storage and transport. In: *Int J Refrigeration* 42 (2014), S. 26–35
- [Pehnt 2010] PEHNT, M. ; PEHNT, M. (Hrsg.): *Energieeffizienz*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010

- [Pehnt u. a. 2010] PEHNT, M. ; BOEDEKERY, J. ; ARENS, M. ; JOCHEM, E. ; IDRISORA, F.: Die Nutzung industrieller Abwaerme - technisch-wirtschaftliche Potenziale und energiepolitische Umsetzung / Wissenschaftliche Begleitforschung zu uebergreifenden technischen, oekologischen, oekonomischen und strategischen Aspekten des nationalen Teils der Klimaschutzinitiative FKZ 03KSW016A und B. 2010. – Forschungsbericht
- [Pelligrino u. a. 2004] PELLIGRINO, J.L. ; MARGOLIS, N. ; JUSTINIANO, M. ; MILLER, M. ; THEDKI, A.: Energy Use, Loss and Opportunities Analysis / U.S. Manufacturing and Mining. 2004. – Forschungsbericht
- [Persson u. a. 2014] PERSSON, U. ; MOELLER, B. ; WERNER, S.: Heat Roadmap Europe: Identifying strategic heat synergy regions. In: *Energy Policy* 74 (2014), S. 663–681
- [Preuß 2011] PREUSS, G.: Energiebedarf für Kaeltetechnik in Deutschland - Eine Abschaetzung des Energiebedarfs von Kaeltetechnik in Deutschland nach Einsatzgebieten / VDMA Allgemeine Lufttechnik, Forschungsrat Kaeltetechnik e.V. 2011. – Forschungsbericht
- [Rathgeber u. a. 2015] RATHGEBER, Christoph ; LÄVEMANN, Eberhard ; HAUER, Andreas: Economic top-down evaluation of the costs of energy sstorage - A simple economic truth in two equations. In: *Journal of Energy Storage* 2 (2015), S. 43–46
- [Roth u. a. 1996] ROTH, H. ; LUCAS, K. ; SOLFRIAN, W. ; REBSTOCK, F.: Die Nutzung industrieller Abwaerme zur Fernwaermeversorgung -Analyse der Hemmnisse fuer die Nutzung industrieller Abwaerme zur Fernwaermeversorgung / Umweltbundesamt. 1996 (40). – Forschungsbericht 10407312
- [Sachsen 2013] SACHSEN, Waermeatlas: *Waermeatlas Sachsen*. 2013. – <<http://www.saena.de/projekte/waermeatlas.html>>, Zugriff: 24.10.2013
- [Schlomann u. a. 2011] SCHLOMANN, Barbara ; DUETSCHKE, Elisabeth ; GIGLI, Michaela ; STEINBACH, Jan ; KLEEBERGER, Heinrich ; GEIGER, Bernd ; LINHARDT, Antje ; GRUBER, Edelgard ; MAI, Michael ; GERSPACHER, Andreas ; SCHILLER, Werner: *Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistung (GHD) in Deutschland für die Jahre 2007 bis 2010*. Bundesministerium fuer Wirtschaft und Technologie (BMWi). 2011
- [Schmid u. a. 2003] SCHMID, Ch. ; BRAKHAGE, A. ; RADGEN, P ; LAYER, G. ; ARNDT, U. ; CARTER, J. ; DUSCHL, A. ; LILLEIKE, J. ; NEBELUNG, O.: Moeglichkeiten, Potenziale, Hemmnisse und Instrumente zur Senkung des Energieverbrauchs branchenuebergreifender Techniken in den Bereichen Industrie und Kleinverbrauch / Fraunhofer ISI and Forschungsstelle für Energiewirtschaft. 2003. – Forschungsbericht
- [Schmitz und Linckh 2012] SCHMITZ, W. ; LINCKH, V.: Abwaermenutzung im Betrieb - Klima schützen - Kosten senken / Landesamt für Umwelt (LfU). Januar 2012. – Forschungsbericht
- [Sollesnes und Helgerud 2009] SOLLESNES, Geir ; HELGERUD, Hans E.: *Potensialstudie for ptnyttelse av spillvarme fra norske industri*. 2009
- [Soroka 2011] SOROKA, B.: Industrial heat pumps / European Copper Institute & Leonardo Energy. 2011. – Forschungsbericht
- [Svensson 2011] SVENSSON, Inger-Lise: *Evaluating System Consequences of energy cooperation between industries and utilities*, Linköping University - Institute of Technology, Dissertation, 2011
- [Thueringen 2013] THUERINGEN, Abwaermeatlas: *Thueringer Energie- und GreenTech-Agentur*. 2013. – <http://www.thega.de>, Zugriff: 24.10.2013
- [UGRD L 2014] UGRDL: *Arbeitskreis Umweltökonomische Gesamtrechnungen der Länder (AK UGRdL)*. 2014. – [www.UGRD.L.de](http://www.UGRD.L.de), letzter Zugriff: 25.11.2014

- [Utlu 2015] UTLU, Zafer: Investigation of the potential for heat recovery at low, medium and high stages in the turkish industrial sector (TIS): An application. In: *Energy* 81 (2015), S. 394–405
- [Werner und Constantinescu 2006] WERNER, S. ; CONSTANTINESCU, N.: Ecoheatcool - Possibilities with more district heating in Europe WP4 / Euroheat & Power. 2006. – Forschungsbericht
- [Werner 2006] WERNER, Sven: Ecoheatcool -The European Heat Market WP 1 / Euroheat & Power. 2006. – Forschungsbericht
- [Werschy 2010] WERSCHY, M.: Technologierecherche Abwärmenutzung / DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH für die Sächsische Energieagentur - SAENA GmbH. 12 2010. – Sachbericht
- [Wien 2008] WIEN, Stadt: *Nutzung von Abwärmepotentialen in Wien*, 2008
- [Zhang 2012] ZHANG, L.: Waste heat recovery from metal Industries. In: *JOM* 64 (2012), S. 8



