

Studie

Abwärmenutzung - Potentiale, Hemmnisse und Umsetzungsvorschläge

Berichtszeitraum: November 2014 – Juli 2015



Bildquelle: Fraunhofer UMSICHT, Teilprojekt K des Forschungsverbundes Energieeffiziente Technologien und Anwendungen FORETA: „Mobile Wärmespeicherung zur Abwärmenutzung“

Auftraggeber:

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
Referat KI I 5 Klimaschutz und Energieeffizienz, Klimaschutztechnologien
Wolfgang Müller
Köthener Straße 2 - 3
10963 Berlin

Auftragnehmer:

IZES gGmbH (Institut für ZukunftsEnergieSysteme)
Patrick Hoffmann
Altenkesseler Str. 17, Gebäude A1
66115 Saarbrücken
Tel.: +49-(0)681-9762-839
Fax: +49-(0)681-9762-850
Email: hoffmann@izes.de

Autoren:

Lars Grote, Patrick Hoffmann, Guillem Tänzer
Fassung 1.1

Saarbrücken, den 01.10.2015

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	II
Abbildungsverzeichnis.....	IV
Tabellenverzeichnis.....	V
1 Einleitung	1
2 Grundlagen Abwärme	2
2.1 Definition und Begriffe	2
2.2 Energieumwandlung	2
2.3 Energieverbrauch in Deutschland.....	5
3 Technologien der Abwärmenutzung	8
3.1 Temperaturniveaus	9
3.2 Technologien	10
3.3 Wärmespeicher	20
3.4 Wärmeübertrager	22
4 Abwärmepotentiale.....	25
4.1 Vorstellung aktueller Veröffentlichungen	25
4.2 Deutschland	25
4.2.1 Die Nutzung industrieller Abwärme – technisch-wirtschaftliche Potenziale und energiepolitische Umsetzung (ifeu et al. 2010).....	25
4.2.2 Industrielle Abwärmenutzung. Kurzstudie (Fraunhofer ISI, 2013).....	27
4.2.3 Technologien der Abwärmenutzung (Sächsische Energieagentur GmbH)	30
4.3 International	32
4.3.1 US Department of Energy: Energy, Loss and Opportunities Analysis (US Manufacturing and Mining, 2004).....	32
4.3.2 Recycling Industrial Waste Energy (Center on Globalization, 2009).....	33
4.3.3 EU PAPER: ORC WASTE HEAT RECOVERY IN EUROPEAN ENERGY INTENSIVE INDUSTRIES (H-REII, 2013).....	34
4.3.4 The potential for recovering and using surplus heat from industry (ecofys et al., 2014).....	35

4.3.5	Analyse für das Vereinigte Königreich (McKenna et al. 2010)	36
4.3.6	Gegenüberstellung vom Möglichkeiten zur Verstromung von industrieller Abwärme und ihrer Einspeisung in Wärmenetze für den Bezirk Gävleborg in Schweden (Broberg Viklund et al. 2014)	38
4.3.7	Overview of waste heat in the industry in France (Berthou et al. 2012) ...	39
4.3.8	Einsatz von Wärmepumpen zur Abwärmenutzung in der französischen Industrie (Dupont et al. 2009).....	40
4.3.9	Abwärme in der Nahrungs- und Getränkeindustrie in Frankreich (Hita et al. 2011).....	41
4.3.10	Nutzung thermophotovoltaischer Systeme im türkischen Industriesektor (Utlu et al. 2013)	42
4.3.11	Einsatz von ORC-Prozessen in energieintensiven Industrien in Italien (Campana et al. 2013)	44
4.4	Zusammenfassung der Studien.....	45
5	Überschlägige Potentialabschätzung	48
6	Rahmenbedingungen	54
6.1	Einordnung energierechtlicher Vorschriften und Handlungsempfehlungen	54
6.2	Bezug zum KWKG - Abwärmeverstromung.....	57
6.3	Wirtschaftlichkeitsrechnung einer ORC-Anlage im Rahmen des KWKG ...	58
6.4	Ausbau der Abwärmenutzung: Hemmnisse und Handlungsempfehlungen	65
7	Ergebnisse aus der Abwärmefachtagung	68
7.1	Programm und Referenten der Fachtagung	68
8	Zusammenfassung und Gesamtfazit	75
9	Literaturverzeichnis	78
10	Glossar.....	80
11	Anhang.....	82
11.1	Handlungsleitfaden für Betriebe zur Abwärmenutzung	82
11.2	Anhang Tabellen	84

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Schaubild der Energieumwandlung (Grafik: IZES gGmbH).....	3
Abbildung 2-2: Energieflussbild 2013 für die Bundesrepublik Deutschland in Petajoule Quelle: (AG Energiebilanzen e.V., 2014).....	6
Abbildung 2-3: Links: Verteilung des Endenergieverbrauchs nach Energieträgern und Sektoren für das Jahr 2011; Rechts: Wärmeverbrauch nach Sektoren Quelle: (Deutsche Energie Agentur - dena, 2014, S. 13).....	6
Abbildung 2-4: Endenergieverbrauch nach Anwendungen und Sektoren für 2012 (Grafik: IZES gGmbH).....	7
Abbildung 3-1: Das Hybridkraftwerk - Kopplung von Netzen und Technologien (Grafik: IZES gGmbH)	8
Abbildung 3-2: Schema einer einfachen Dampfkraftanlage (Grafik: IZES gGmbH).....	11
Abbildung 3-3: Schema eines Stirling-Motors in Gamma-Konfiguration (Grafik: IZES gGmbH)	11
Abbildung 3-4: Schema einer ORC-Anlage(Grafik: IZES gGmbH).....	12
Abbildung 3-5: Schema einer Absorptionskälteanlage (Grafik: IZES gGmbH)	13
Abbildung 3-6: Schema des Konditherm Verfahrens	14
Abbildung 3-7: Schema einer Wärmepumpenanlage (Grafik: IZES gGmbH)	17
Abbildung 3-8: Schema für die Verwertung von Abwärme im Niedertemperaturbereich (Grafik: IZES gGmbH)	18
Abbildung 3-9: Schema für eine Rücklaufemperaturanhebung (der linke Zwischenkreis kann u.U. entfallen) (Grafik: IZES gGmbH).....	18
Abbildung 3-10: Schema einer Adsorptionskälteanlage in der 1. Prozessphase (Grafik: IZES gGmbH).....	20
Abbildung 3-11: Schema Wärmeübertrager im Gegenstromverfahren (Grafik: IZES gGmbH)	22
Abbildung 3-12: Beispiele von Abwärmenutzung für diffuse Abwärmeströme (Grafik: IZES gGmbH)	24
Abbildung 5-1: Top 11 Branchen des verarb. Gewerbes mit % Anteil an der Endenergie des Sektors.....	51
Abbildung 5-2: Top 11 Branchen des verarb. Gewerbes mit dem spez. Endenergieverbr. pro Betrieb.....	52
Abbildung 6-2: Vergleich von Erlösen bei unterschiedlichen Eigenstromnutzungsgraden, 7.500 Vollbetriebsstunden	61
Abbildung 6-3: Vergleich von Erlösen bei unterschiedlichen Eigenstromnutzungsgraden, 4.000 Vollbetriebsstunden	63

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Vordefinierte Temperaturbereiche für Abwärmepotentiale (Einteilung: IZES gGmbH)	9
Tabelle 4-1: Titel, Autor(en), Auftraggeber und Veröffentlichungsdatum der Studie (Die Nutzung industrieller Abwärme – technisch-wirtschaftliche Potenziale und energiepolitische Umsetzung)	25
Tabelle 4-2: Zusammenstellung der Literaturangaben der in (ifeu et al., 2010, S. 15ff) durchgeführten Untersuchungen	26
Tabelle 4-3: Zusammenstellung der Ergebnisse verschiedener Potentialstudien enthalten in (ifeu et al., 2010, S. 15ff)	27
Tabelle 4-4: Titel, Autor(en), Auftraggeber und Veröffentlichungsdatum der Kurzstudie (Industrielle Abwärmenutzung)	27
Tabelle 4-5: Zusammenstellung der Literaturangaben der in (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, 2013, S. 11f) gescreenten Untersuchungen	29
Tabelle 4-6: Zusammenstellung der Ergebnisse verschiedener Potentialstudien enthalten in (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, 2013, S. 11f)	30
Tabelle 4-7: Titel, Autor(en), Auftraggeber und Veröffentlichungsdatum der Broschüre (Technologien der Abwärmenutzung)	30
Tabelle 4-8: Titel, Autor(en), Auftraggeber und Veröffentlichungsdatum der Studie Energy, Loss and Opportunities Analysis	32
Tabelle 4-9: Titel, Autor(en), Auftraggeber und Veröffentlichungsdatum der Studie (Recycling Industrial Waste Energy)	33
Tabelle 4-10: Titel, Autor(en), Auftraggeber und Veröffentlichungsdatum der Studie (ORC Waste heat recovery in European energy intensive industries)	34
Tabelle 4-11: Titel, Autor(en), Auftraggeber und Veröffentlichungsdatum der Studie (The potential for recovering and using surplus heat from industry)	35
Tabelle 4-12: Potentialüberblick (Studie: The potential for recovering and using surplus heat from industry)	36
Tabelle 4-13: Titel, Autor(en), Auftraggeber und Veröffentlichungsdatum der Studie (Spatial modelling of industrial heat loads and recovery potentials in the UK)	36
Tabelle 4-14: Titel, Autor(en), Auftraggeber und Veröffentlichungsdatum der Studie (Industrial excess heat use: Systems analysis and CO ₂ emissions reduction)	38
Tabelle 4-15: Titel, Autor(en), Auftraggeber und Veröffentlichungsdatum der Studie (Overview of waste heat in the industry in France)	39
Tabelle 4-16: Titel, Autor(en), Auftraggeber und Veröffentlichungsdatum der Broschüre (Technologien der Abwärmenutzung)	40
Tabelle 4-17: Titel, Autor(en), Auftraggeber und Veröffentlichungsdatum der Studie (Assessment of the potential of heat recovery in food and drink industry by the use of TIMES model)	41

Tabelle 4-18: Titel, Autor(en), Auftraggeber und Veröffentlichungsdatum der Studie (Investigation of the potential of thermophotovoltaic heat recovery for the Turkish industrial sector)	42
Tabelle 4-19: Titel, Autor(en), Auftraggeber und Veröffentlichungsdatum der Studie (ORC waste heat recovery in European energy intensive industries: Energy and GHG savings) ...	44
Tabelle 5-1: Darstellung des verarb. Gewerbes (WZ 2008 ; 2-Stellen) sortiert nach Endenergieverbrauch und den möglichen theoretischen Potentialen für eine Abwärmennutzung	49
Tabelle 5-2: Top 11 Branchen des verarb. Gewerbes sortiert nach dem Endenergieverbrauch (2008).....	50
Tabelle 5-3: Top 11 Branchen des verarb. Gewerbes sortiert nach dem spez. Endenergieverbrauch pro Betrieb (2008).....	51
Tabelle 6-1: KWKG-Zuschlag für Anlagen von ~2 bis über 2 MWel.....	58
Tabelle 6-2: Erlöse pro Jahr für die ORC-Anlage (mit KWKG), 7.500 Vollbetriebsstunden ...	60
Tabelle 6-3: Erlöse pro Jahr für die ORC-Anlage (mit KWKG), 4.000 Vollbetriebsstunden ...	62
Tabelle 11-1: Erlöse der ORC-Anlage mit unterschiedlichen Eigenstromquoten (7.500 h) ...	84
Tabelle 11-2: Erlösstruktur der ORC-Anlage für 15 Jahre (7.500 h).....	85
Tabelle 11-3: Erlöse der ORC-Anlage mit unterschiedlichen Eigenstromquoten (4.500 h) ...	86
Tabelle 11-4: Erlösstruktur der ORC-Anlage für 15 Jahre (7.500 h).....	87
Tabelle 11-5: Berechnung von Abwärmepotentialen im verarb. Gewerbe	88
Tabelle 11-6: Fortsetzung Tabelle Berechnung von Abwärmepotentialen im verarb. Gewerbe	89
Tabelle 11-7: Zusammenfassung der Kernaussagen der analysierten Studien	97

1 Einleitung

„Wärme fällt bei den meisten Energieumwandlungsprozessen in nicht unerheblichem Maße an. Wenn überhaupt wird nur ein Teil dieser Wärme genutzt. Der Rest verpufft als „Abwärme“ in die Umwelt.

Diese Abwärme - soweit technisch und wirtschaftlich sinnvoll - energetisch (wieder) zu verwerten, spart Primärenergie und ist aktiver Klimaschutz“

Diese Studie möchte hierzu einen Beitrag leisten und geht daher auf die folgenden Themen in den einzelnen Kapiteln ein. In diesen gilt es

- Grundlagen zum Thema Wärme bzw. Abwärme zu vermitteln und kurz auf den aktuellen nationalen Energieverbrauch einzugehen,
- mit der Vorstellung von Technologien zur Nutzung von Abwärme (u.a. Verstromung) einen Überblick zum Stand der Technik zu schaffen,
- im Rahmen einer nationalen und internationalen Studienrecherche die nationalen und übernationalen Tätigkeiten der Forschungslandschaft vorzustellen und im Rahmen einer kurzen Branchenanalyse und Berechnung ein überschlägiges, theoretisches Abwärmepotential aufzuzeigen,
- eine kurze Einordnung energierechtlicher Vorschriften, gepaart mit Handlungsempfehlungen, aufzuzeigen,
- im Weiteren auf die aktuellen Vergütungssätze des Kraft-Wärme-Kopplungsgesetzes (KWKG) einzugehen, um dahingehend im Rahmen einer beispielhaften Wirtschaftlichkeitsrechnung mit einer ORC-Anlage ökonomische Aussagen zu treffen,
- Hemmnisse und Handlungsempfehlungen aufzuzeigen und
- zum Schluss die Erkenntnisse von Experten einer im Rahmen dieser Studie durchgeführten Abwärmefachtagung vorzustellen und
- ein kurzes Gesamtfazit zu formulieren.

2 Grundlagen Abwärme

2.1 Definition und Begriffe

„Als Wärme wird die Energie bezeichnet, die zwischen Systemen verschiedener Temperatur durch eine diatherme Wand übertragen wird.“¹

Systemgrenzen, die eine Wärmeübertragung zulassen, nennt man - im Gegensatz zu adiabaten Systemgrenzen - diatherm. Dies bedeutet, dass der Begriff Wärme nur die Übertragung an Systemgrenzen beschreibt und daher als Prozessgröße (d.h. u.a. nicht speicherbar) definiert ist. In der Literatur wird Wärme durch die Variable Q_{12} (Zustand 1 zum Zustand 2) beschrieben.

Neben Wärme werden innere Energie und Wärmestrom unterschieden:

- „Die innere Energie (J) ist derjenige Teil des Energiegehalts eines geschlossenen Systems, der als Arbeit oder Wärme über die Systemgrenze übertragen oder als Streuenergie zugeführt werden kann.“²
- Der Wärmestrom beschreibt die übertragene Wärmeleistung pro Zeiteinheit und ist daher eine Leistungseinheit in Watt (W).

2.2 Energieumwandlung

Die heutigen Energiewandlungstechnologien, welche Nutzenergie in Form von Wärme, Kälte, kinetische Energie und Strom bereitstellen, generieren diese überwiegend durch die Verwendung von Primärenergieträgern wie Kohle, Erdöl und Erdgas - alternativ wird direkt der Sekundärenergieträger Strom eingesetzt.

Alle Wärmekraftmaschinen haben einen begrenzten maximalen Wirkungsgrad, welcher im idealisierten Carnot Prozess³ oder in anderen idealisierten reibungsfreien Kreisprozessen begründet ist. Selbst diese idealisierten Zustandsänderungen beinhalten Schritte, in denen Wärme an die Umgebung abgegeben werden muss – was bei günstiger Kombination mit einer Wärmesenke (vgl. KWK-Anlagen) für höhere primärenergetische Nutzungsgrade genutzt werden kann.

Energie kann grundsätzlich in zwei Teilsysteme unterschieden werden - in **Exergie** und in **Anergie** - die Summe beider ergibt das Gesamtsystem **Energie**. Beide Größen sind dynamische Größen und hängen von äußeren physikalischen Zustandsgrößen (wie bspw. Druck, Temperatur, Konzentration) ab. Die Exergie beschreibt den Anteil der Energie, der in Arbeit umgewandelt werden kann, die Anergie den Teil, welcher nicht in Arbeit umgewandelt werden kann. Die Exergie kann daher als eine Art

¹ (Langeheinecke, Jany, Sapper, & Thieleke, 2004, S. 69)

² (Langeheinecke, Jany, Sapper, & Thieleke, 2004, S. 70)

³ Nicolas Léonard Sadi Carnot, französischer Physiker (1796 - 1832)

Potential zwischen zwei Zuständen verstanden werden, ein Zustand entspricht dabei generell dem Umgebungszustand. Verrichtet die Exergie Arbeit wird sie in Anergie umgewandelt.

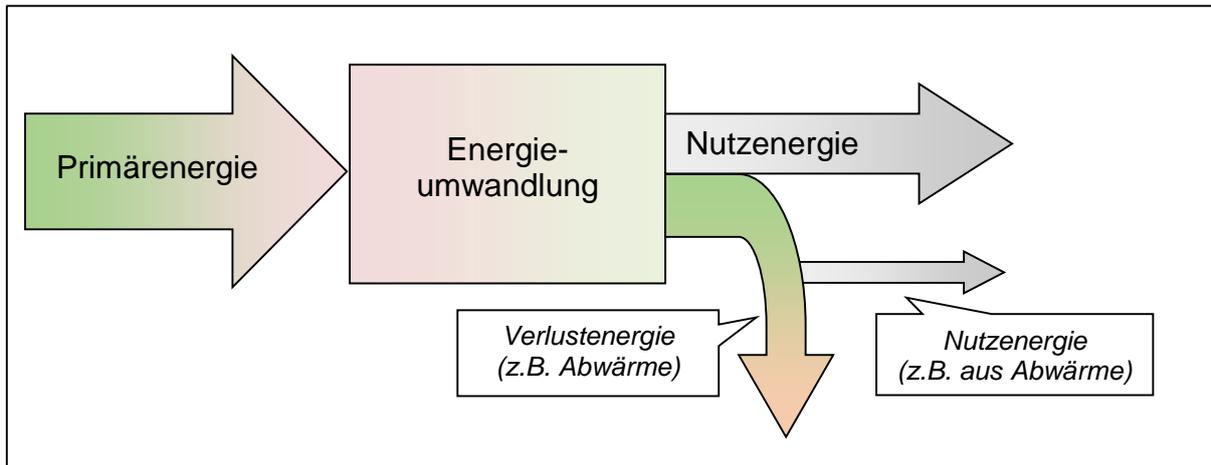


Abbildung 2-1: Schaubild der Energieumwandlung (Grafik: IZES gGmbH)

Daraus lassen sich die beiden Hauptsätze der Thermodynamik ableiten:

Erster Hauptsatz der Thermodynamik (Energieerhaltungssatz)

In einem abgeschlossenen System bleibt bei umkehrbaren und nicht umkehrbaren Prozessen die Gesamtenergie (Summe aus Exergie und Anergie) konstant.

Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik (Entropiesatz)

In einem abgeschlossenen System bleiben bei umkehrbaren Prozessen Exergie und Anergie jeweils konstant.

- Bei nicht umkehrbaren Prozessen wird Exergie in Anergie umgewandelt.
- Anergie kann nicht in Exergie umgewandelt werden.

Bei der Übertragung von Wärme spielen drei unterschiedliche Transportmechanismen eine wichtige Rolle:⁴

Wärmeleitung: Unter der Wärmeleitung wird die Übertragung von Wärme in einem Feststoff, einer Flüssigkeit oder einem Gas über eine Temperaturdifferenz verstanden. Dabei gilt, dass Temperaturdifferenzen stets Ausgleichsvorgängen unterliegen. Wärmeleitung erfolgt bei direktem Kontakt zweier Medien durch die Übertragung der Bewegungsenergie der Moleküle des einen (wärmeren) Mediums auf das andere Medium.

Wärmestrahlung: Bei dieser Übertragungsart wird Wärme durch elektromagnetische Strahlung übertragen. Die Strahlung eines heißen Mediums kann dabei von einem

⁴ Vgl. (Gieck, 2005, S. 010) & (Polifke & Kopitz, 2009, S. 28ff)

zweiten, kälteren Medium transmittiert (durchgelassen) oder reflektiert werden. Erst bei einer Absorption der Strahlung wird Wärme übertragen, indem die Bewegungsenergie der Moleküle erhöht wird.

Wärmekonvektion: Wärmekonvektion erfolgt anhand eines strömenden Zwischenmediums, sodass die Wärme durch eine bewegte Masse auf ein anderes Medium übertragen wird. Dabei werden die freie und die erzwungene Konvektion unterschieden. Freie Konvektion wird durch natürliche Strömungsmechanismen (bspw. Druck- und Dichteunterschiede, Gravitation) angeregt. Im Gegensatz dazu wird die erzwungene Konvektion durch äußere Kräfte (bspw. Pumpvorgänge, Ventilation) erzeugt.

Unter den oben genannten Wärmeübertragungsarten erfolgt die Übertragung im Bereich der Festkörper primär durch Wärmeleitung. In Flüssigkeiten und Gasen überwiegt hingegen die Wärmekonvektion und Wärmestrahlung.⁵

Letztendlich kann man zwischen zwei Kategorien der Abwärme(ströme) unterscheiden:

Gefasste Abwärmeströme sind an Medienströme gebunden. Hierzu gehören vor allem Abluft- und Abgasströme, Kühlflüssigkeiten sowie der Wärmeinhalt des aus einem Prozess austretenden Gutes. Dabei ist zwischen latenter Wärme (z.B. Kondensieren) und fühlbarer Wärme zu unterscheiden.

Diffuse Abwärme entsteht großflächig vorwiegend durch Strahlung und Konvektion (Oberflächenverluste von Anlagen, Transmissionsverluste von beheizten Gebäuden).

Vor dem Hintergrund des Klimaschutzes nimmt die Reduktion von Wärmeverlusten im Rahmen von Effizienzmaßnahmen eine zentrale Rolle ein. Um dieses Anliegen auf möglichst effektive und wirtschaftliche Art umzusetzen, sollte die folgende Rangfolge bei der energetischen Abwärmennutzung beachtet werden⁶:

- Zunächst sollte versucht werden mit Effizienzmaßnahmen das Auftreten von Abwärme zu vermindern. Dies kann bspw. durch Wärmedämmung und/oder die Optimierung von Prozessen und Verfahren erfolgen.
- Sind die Potentiale zur Verminderung der Abwärme ausgeschöpft, muss verbleibende Abwärme in den ‚Prozess‘ reintegriert werden. Dies kann bspw. durch die Vorwärmung von Verbrennungsluft und/oder die Trocknung von Ausgangsstoffen geschehen.
- Falls das Potential den Wärmebedarf entsprechender Senken mit Abwärme zu decken ausgeschöpft ist, kann die Transformation der Abwärme in andere

⁵ Vgl. (IZES gGmbH, 2010, S. 15)

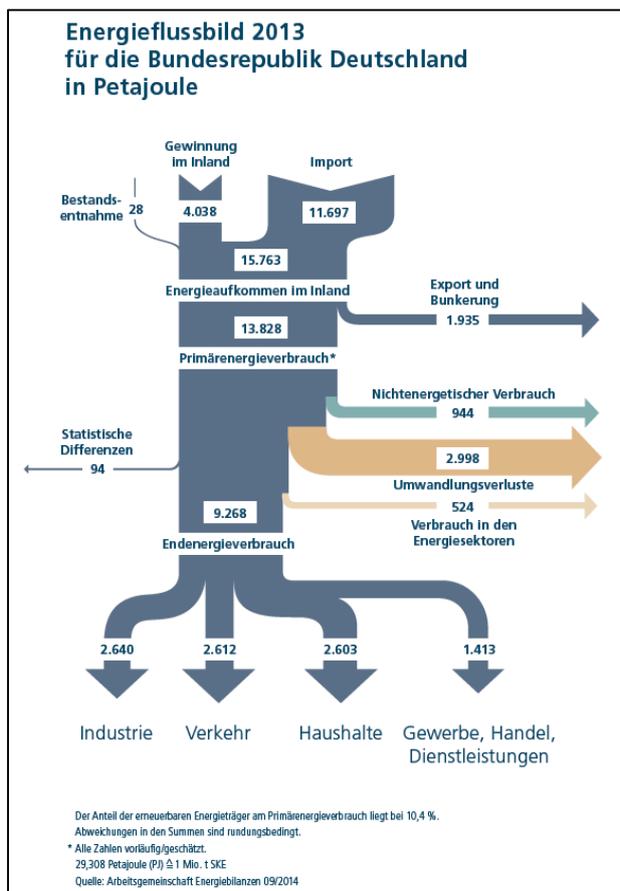
⁶ Vgl. (Sächsische Energieagentur - SANEA GmbH, 2012, S. 6)

Nutzenergieformen (z.B.) elektrische Energie eine sinnvolle Option darstellen. Eine zusätzliche Alternative wäre die Wärme bspw. mit der Hilfe mobiler (Latenz)wärmespeicher zu Wärmesenken zu transportieren⁷.

- Wenn Abwärme anfällt, die nicht intern genutzt werden kann, sollte versucht werden, die Abwärme an Dritte weiterzuleiten.

2.3 Energieverbrauch in Deutschland

Wärmeverluste treten in der Regel bei der Umwandlung von Energie (Primär- zu Endenergie & Endenergie- zu Nutzenergie) auf. Das Energieflussbild für die Bundesrepublik Deutschland der AG Energiebilanzen (AGEB) veranschaulicht die Dimension der Umwandlungsverluste zwischen Primär- und Endenergie (siehe Abbildung). Diese entstehen größtenteils aus Fackel- und Leitungsverlusten bei der Stromerzeugung.⁸ Aber auch in den verschiedenen Sektoren (Industrie, Verkehr, Haushalte, GHD) treten Wärmeverluste auf.



⁷ Vgl. Forschungsprojekt FH Umsicht: „Mobile Latenzwärmespeicher zur Verwertung von Abwärme aus Biomassekonversions-, Kraftwerks- und Industrieprozessen“

⁸ Vgl. (AG Energiebilanzen e.V., 2014)

Abbildung 2-2: Energieflussbild 2013 für die Bundesrepublik Deutschland in Petajoule Quelle: (AG Energiebilanzen e.V., 2014)

Die nachfolgende Abbildung zeigt eine Aufschlüsselung der Endenergie (Wärme, Strom, Kraftstoffe) sowie die Verteilung der Wärmenutzung nach den verschiedenen Sektoren. Demnach wird ungefähr die Hälfte (!) der Endenergie für Wärmezwecke eingesetzt. Dabei verbraucht der Industriesektor mit 42 % den größten Anteil. Ebenso wird im Haushaltssektor ein hoher Anteil (39 %) der Wärme verbraucht. Der GHD-Sektor weist mit 19 % den geringsten Anteil am Wärmeverbrauch auf.

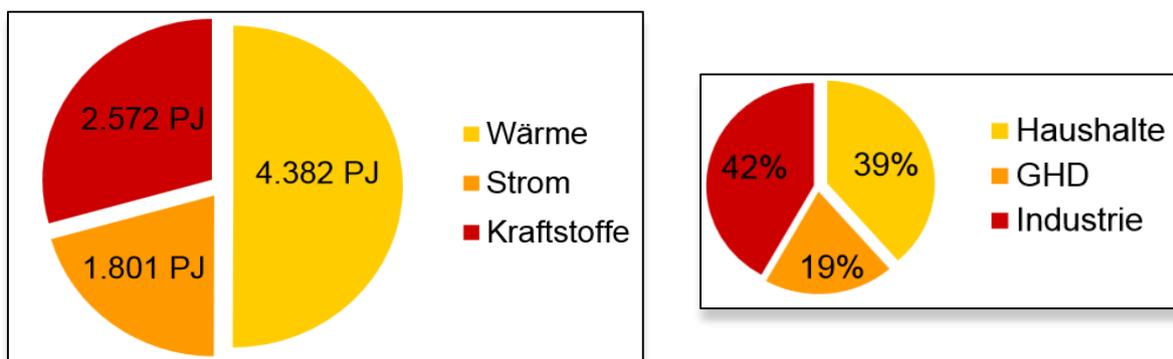


Abbildung 2-3: Links: Verteilung des Endenergieverbrauchs nach Energieträgern und Sektoren für das Jahr 2011; Rechts: Wärmeverbrauch nach Sektoren Quelle: (Deutsche Energie Agentur - dena, 2014, S. 13)

Mit den Darstellungen wird verdeutlicht, dass der Wärmebereich aufgrund seines hohen Anteils am Endenergiebedarf ein zentrales Handlungsfeld für Energiesparmaßnahmen sein sollte. Die energetische Nutzung von Abwärme nimmt demnach eine ebenso zentrale Rolle ein (siehe hierzu auch die nachfolgende Abbildung).

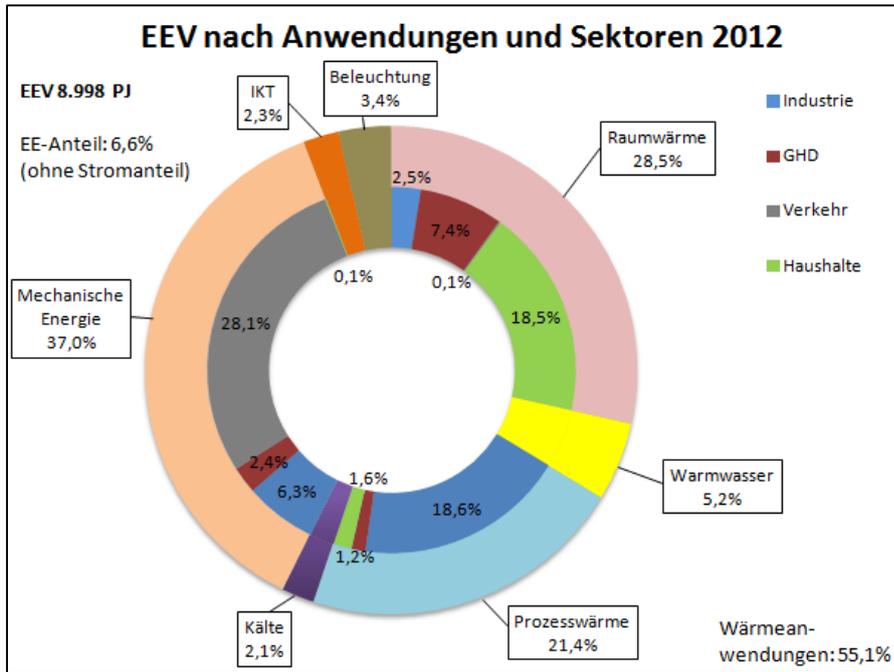


Abbildung 2-4: Endenergieverbrauch nach Anwendungen und Sektoren für 2012 (Grafik: IZES gGmbH)

3 Technologien der Abwärmenutzung

Wärme und mit ihr die Abwärme ist eine kostbare Energieform, welche bei fast allen Energieumwandlungsprozessen gewollt oder ungewollt anfällt. Dabei wird die meiste Wärme bei der Umwandlung von Primärenergieträgern erzeugt; genutzt wird diese dabei jedoch nicht in jedem Fall. Oftmals ist Wärme ein Neben- bzw. Abfallprodukt, dessen Nutzung nicht immer selbstverständlich war oder ist.

Aufgrund steigender Energiepreise, knapper werdender Primärenergieträger und der notwendigen Reduzierung von Treibhausgasen ist insbesondere im Bereich der Abwärme massiver Handlungsbedarf gegeben. Folgt man der Idee einer Regenerativwirtschaft, müssen diese Verluste - mit Hilfe von Effizienztechnologien - verstärkt minimiert werden.

Das nachfolgende Schaubild versucht eine zusammenhängende Regenerativwirtschaft in Form eines „Hybridkraftwerks“ mit den drei verbundenen Netzebenen Strom, Wärme und Methangas (Erdgasnetz) sowie den zugehörigen Erzeugern und Verbrauchern darzustellen.

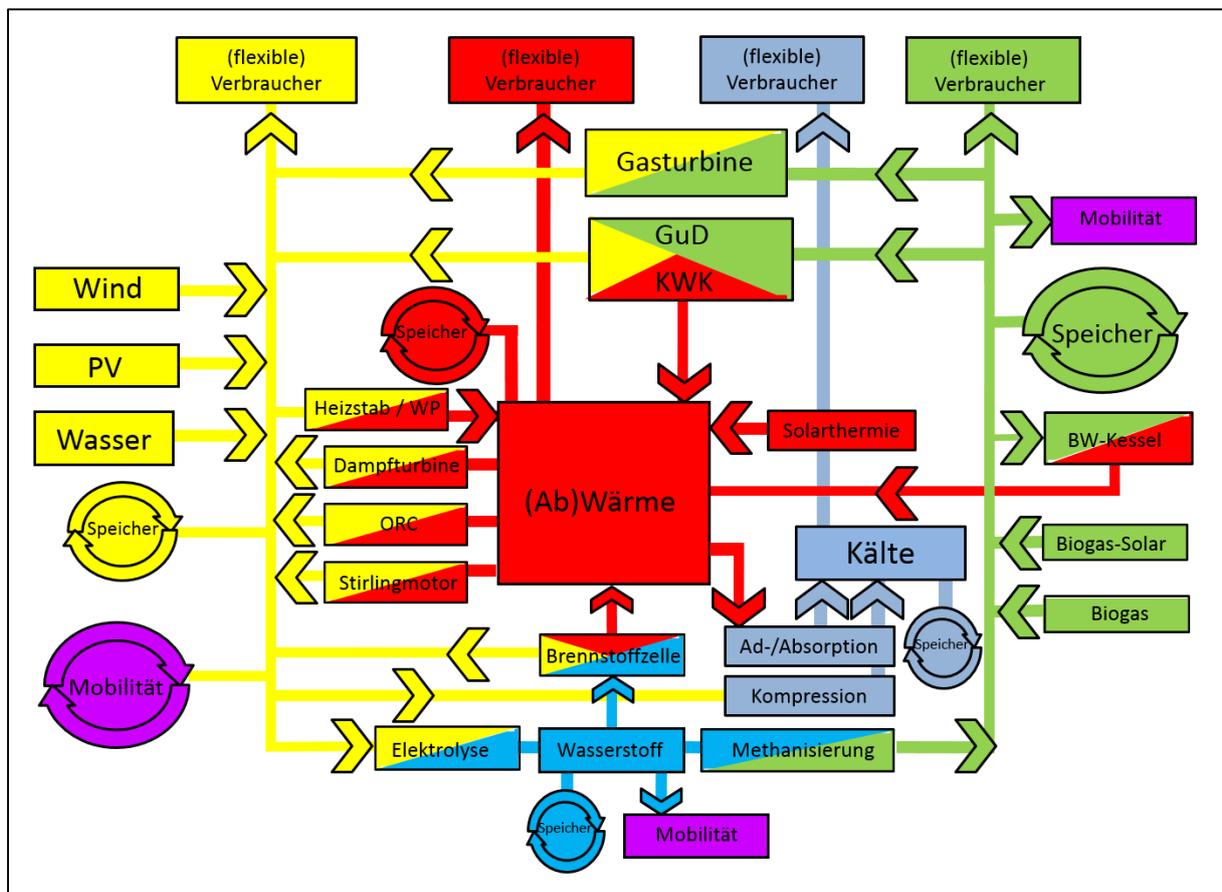


Abbildung 3-1: Das Hybridkraftwerk - Kopplung von Netzen und Technologien (Grafik: IZES g GmbH)

Technisch gesehen kann ungenutzte Abwärme heutzutage in vielen Fällen bereits sinnvoll genutzt werden. Die Herausforderungen liegen vor allem in der Bereitschaft zu einer Investition, welche (strengen) betriebswirtschaftlichen Kriterien gerecht wird. Insbesondere in Unternehmen, wo Abwärme anfällt, sind sehr kurze ROIs (1-2 Jahre) im Rahmen von Investitionen gefordert. Effizienztechnologien lohnen sich jedoch erst in einem Zeitrahmen von mindestens 5-10 Jahren.

3.1 Temperaturniveaus

Um Technologien zur Abwärmenutzung klassifizieren zu können, ist es hilfreich diese unterschiedlichen Temperaturniveaus zuzuordnen. Für die nachfolgenden Betrachtungen werden die in der nachfolgenden Tabelle dargestellten Temperaturniveaus festgelegt:

	Temperaturbereiche		
	Hochtemperaturbereich	Mitteltemperaturbereich	Niedertemperaturbereich
Temperatur	> 350°C	> 80°C <= 350°C	<= 80°C
Bsp. für Anwendungen	Dampfturbine	ORC (Organic Rankine Process)	Wärmepumpen zur Abwärmenutzung
	Stirlingmotoren	Absorptionskälteanlage	Adsorptionskälteanlage
		Fernwärme- und Nahwärmenetze	Heizungs- und Brauchwassernutzung
		Thermoelektrische Systeme	Vorwärmung, Rücklauf Temperaturerhöhung
		Wärmespeichersysteme	

Tabelle 3-1: Vordefinierte Temperaturbereiche für Abwärmepotentiale (Einteilung: IZES gGmbH)

Letztendlich ist insbesondere bei der Stromerzeugung aus (Ab)wärme das Temperaturniveau entscheidend, welche Wirkungsgrade erreicht werden können: Je niedriger der Temperaturunterschied (Energiegehalt = Exergie) zwischen den Zuständen (Abwärmetemperaturniveau gegenüber Umgebungstemperatur) desto geringer der Wirkungsgrad.

Unterscheidung:

- Kernziel im Hochtemperaturbereich ist primär die Erzeugung von Strom aus Abwärme - z.B. durch Dampfprozesse und Stirlingmotoren.
- Abwärme im Mitteltemperaturbereich zur Strombereitstellung ist in ORC-Prozessen gut realisierbar, Einspeisungen in Wärmenetze sind ebenfalls zu berücksichtigende Optionen. Zusätzlich kann die Abwärme für den Betrieb von

Kälteanlagen sinnvoll verwertet werden und so klassische Kompressionskältemaschinen ersetzen

- Abwärme im Niedertemperaturbereich kann nur im sehr eingeschränkten Maßstab zur Stromproduktion genutzt werden. Primär ist diese bspw. für Heiz- und Kühlzwecke in Wohn- und Nichtwohngebäuden nutzbar. Sofern das Temperaturniveau nicht zu gering ist (60 - 80°C) können auch Adsorptionskälteanlagen zum Einsatz kommen. Eine sinnvolle Nutzung ist hier insbesondere bei Wärmepumpen oder zur Rücklauf Temperaturerhöhung für Heizsysteme zu sehen.

Mit dem Einsatz der genannten Technologien können folgende Effizienzmaßnahmen erwartet werden:

- Verringerung der Anschlussleistungen für Wärme und ggf. Kälte
- Verringerung des Energieverbrauchs für Heizung und Kühlung
- Verkleinerung bzw. Entfall von Spitzenlastkesseln
- Senkung von CO₂ und ggf. weiteren Schadstoffemissionen
- Verminderung der Energiekosten

3.2 Technologien

Basierend auf der vorangegangenen Tabelle 1-1 werden im Nachfolgenden relevante Effizienztechnologien zur Nutzung von Abwärme kurz vorgestellt und nach den oben genannten Temperaturbereichen unterschieden – neben der Stromerzeugung aus Wärme werden auch direkte Wärmeanwendungen vorgestellt:

Hochtemperaturbereich (> 350 °C):

Dampfturbine⁹

Die Erfindung der Dampfturbine war die Basis für die Industrialisierung der Energieerzeugung. Sie ist, als Weiterentwicklung der Dampfmaschine, das meist angewandte Aggregat (in Verbindung mit einem Generator) zur effektiven Umwandlung von Wärme und Druck in mechanischer Energie bzw. Elektrizität. Jedes Kondensationskraftwerk (Wärmeleistungswerk) enthält eine solche Maschine. Der Primärenergieträger ist dabei in der Regel frei wählbar, wenn man einen entsprechenden Dampfkessel betreiben kann. Diese Technologie ebnete den Weg für eine zentralisierte Stromerzeugungswirtschaft und die Verbreitung der Elektrizität in Verbindung mit den Stromnetzen in den Industrienationen. Im Idealfall, wie bspw. bei Heizkraftwerken in unmittelbarer Umgebung von Ballungsgebieten, besteht zusätzlich eine Wärmeeinspeisung in Verbindung mit einem Fernwärmenetz.

⁹ (Hakenesch, V2.1, S. 138)

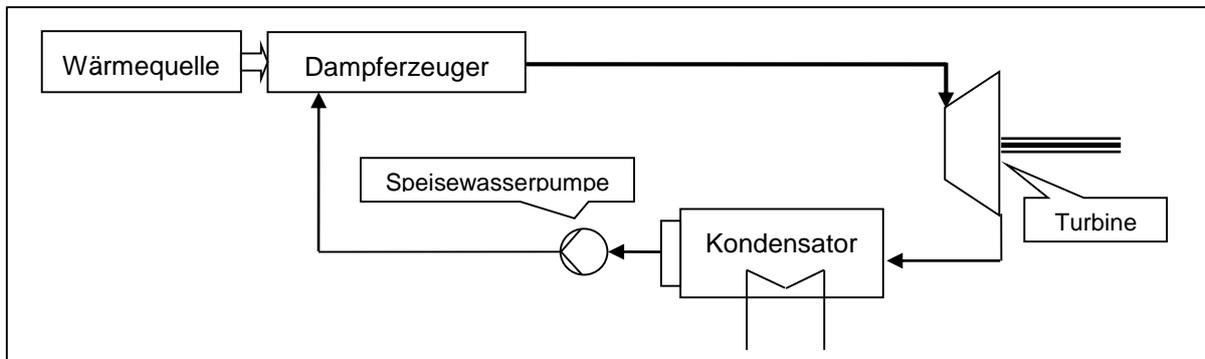


Abbildung 3-2: Schema einer einfachen Dampfkraftanlage¹⁰ (Grafik: IZES gGmbH)

Bei heutigen Dampfturbinen kann man von Wirkungsgraden bis etwa 45 % ausgehen. Diese sind abhängig vom Eintrittsdruck/Eintrittstemperatur und Austrittsdruck/Austrittstemperatur (typische Größen sind hier 560°C/200 bar und 0,03 bar/24°C). Bei Turbineneintrittstemperaturen von 330-560°C sind Wirkungsgrade von etwa 20-45 % zu erwarten.

Stirlingmaschine¹¹

Der Stirlingmotor, auch Heißluftmotor genannt, gehört zu den Wärmekraftmaschinen und wurde neben der Dampfmaschine, 1825 von Herrn Robert Stirling, erfunden. Eine Besonderheit des Stirlingmotors ist ein geschlossener Arbeitsraum, in dem ein Arbeitsmedium (z.B. Luft, Stickstoff oder Helium) in einem Kreisprozess abwechselnd erhitzt und abgekühlt wird. Für den Betrieb eines Stirlingmotors wird lediglich eine (quasi beliebige) externe Wärmequelle benötigt, welche den Prozess in Gang setzt. Im Gegensatz zu Verbrennungskraftmaschinen werden beim Stirlingmotor keine direkten Emissionen freigesetzt, diese sind ggf. auf die Wärmequelle und den damit verbundenen Primärenergieeinsatz zurückzuführen.

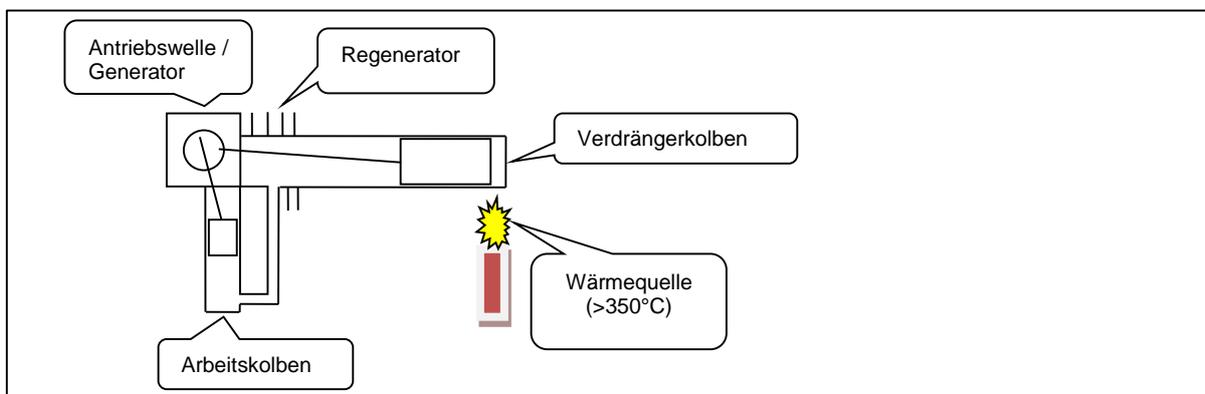


Abbildung 3-3: Schema eines Stirling-Motors in Gamma-Konfiguration (Grafik: IZES gGmbH)

¹⁰ (Langeheinecke, Jany, Sapper, & Thieleke, 2004, S. 188)

¹¹ (Hakenesch, V2.1, S. 128)

Stirlingmaschinen benötigen für einen sinnvollen Betrieb Temperaturen von mindestens 350°C am Erhitzerkopf, man kann von Wirkungsgraden bis etwa 20 % ausgehen.

Anmerkung: Die Anordnung der beiden Zylinder (Arbeitskolben und Verdrängerkolben stehen in einem rechten Winkel zueinander) wird als „Gamma-Konfiguration“ bezeichnet.

Mitteltemperaturbereich (> 80°C <= 350°C):

ORC-Prozess (Organic Rankine Cycle)¹²

Der ORC-Prozess (Erfinder und Namensgeber war William John Macquorn Rankine) basiert auf dem oben beschriebenen Dampfturbinenprozess mit dem Unterschied, dass kein Wasser/Wasserdampf sondern ein organisches Fluid als Arbeitsmedium dient. Der Vorteil hierbei ist bei den geringeren Verdampfungstemperaturen zu sehen, so dass eine Turbine auch mit geringeren Temperaturniveaus betrieben werden kann. Typische Arbeitsmedien sind bspw. Ammoniak und Ethanol. Es existieren auch synthetische Medien oder es kommen unterschiedliche Arbeitsmedien zum Einsatz (Vgl. Kalina-Prozess).

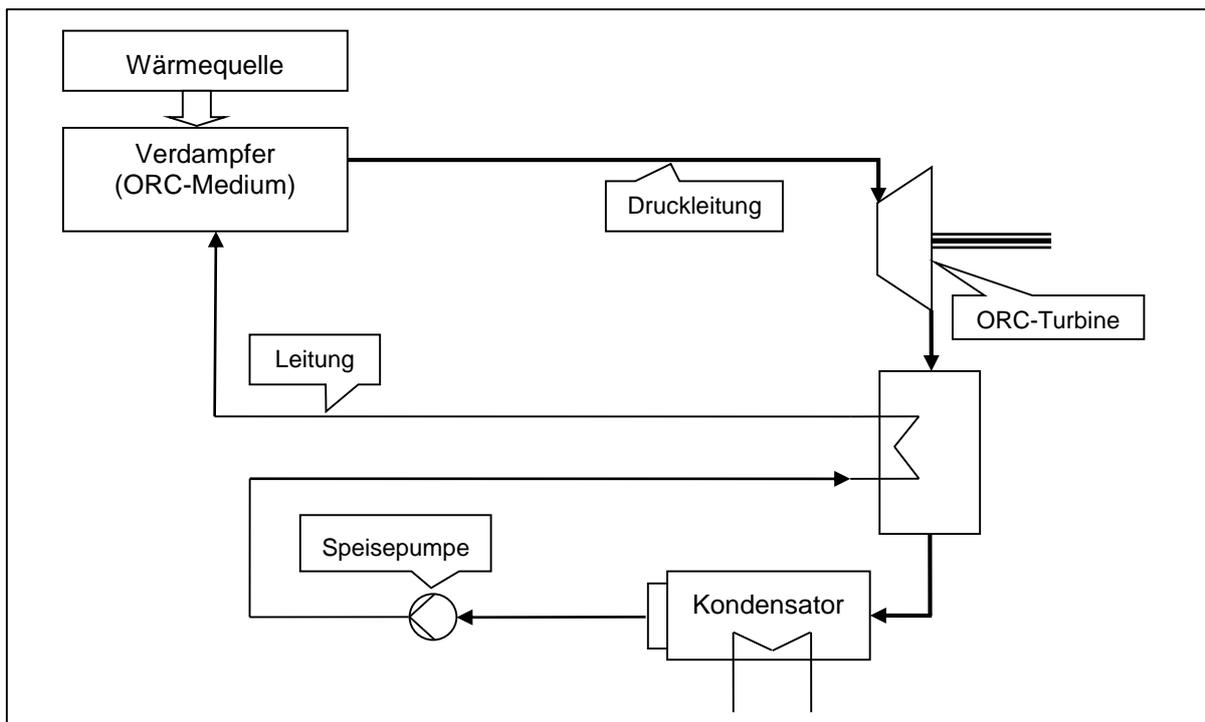


Abbildung 3-4: Schema einer ORC-Anlage (Grafik: IZES gGmbH)

¹² (Blesl, SS 2014)

Neben ORC-Anlagen auf Turbinenbasis gibt es auch Varianten, welche mit einem Kolbenmotor betrieben werden. Teillastbetriebe aufgrund bspw. inkonstanter Wärmeströme können sich so besser abdecken lassen.

Aufgrund der geringen Eingangstemperaturen sind ORC-Anlagen im Vergleich zu Dampfturbinen durch geringere Wirkungsgrade geprägt. Man kann von Wirkungsgraden zwischen 8 % bis max. 20 % (bei Eintrittstemperaturen von 200°C) ausgehen. Dennoch ist eine ORC-Anlage besonders gut geeignet die Restexergie eines Wärmeträgers in Arbeit (Strom) umzuwandeln.

Absorptionskälteanlagen¹³

Absorptionskältemaschinen sind Zweistoffsysteme, in denen eine Flüssigkeit eine andere absorbiert. Anschließend werden die Flüssigkeiten wieder voneinander getrennt. Der absorbierte Stoff hat die Funktion des Kältemittels, während der andere Stoff als Lösungsmittel bezeichnet wird. In vielen Fällen ist es das Kältemittel Lithiumbromid, das Wasser absorbiert. Eine häufige zweite Variante ist, dass Wasser zur Absorption von Wasser genutzt wird.

Die Absorptionskältemaschine benötigt für den Desorber ein Temperaturniveau zwischen 80°C und 170°C.

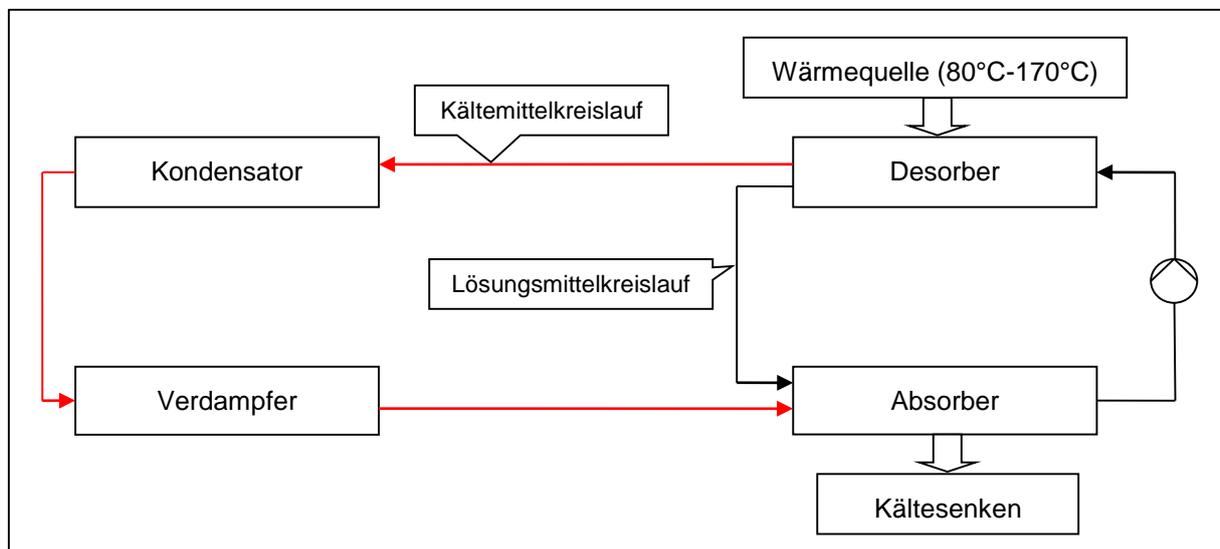


Abbildung 3-5: Schema einer Absorptionskälteanlage (Grafik: IZES gGmbH)

Für das Trennen der Flüssigkeiten müssen Temperaturen von mind. 80°C bis 170°C verfügbar sein, diese können bspw. aus überschüssiger Wärme gewonnen werden. Absorptionskältemaschinen sind sehr gut skalierbar und können für die unterschiedlichsten Einsatzzwecke bei Kälteleistungen bspw. zwischen 5 kW_{th} bis 5 MW_{th}

¹³ (Hakenesch, V2.1, S. 163)

eingesetzt werden. Diese Kältemaschinen werden (ähnlich wie bei Wärmepumpen) nicht anhand eines Wirkungsgrads gemessen, sondern mittels einer Arbeitszahl (EER = Energy Efficiency Ratio). Die Verbreitung dieser Anlagen ist aus ökonomischen Gründen bisher zurückhaltend, die meisten aktuell eingesetzten Kälteanlagen basieren auf Kompressionsmaschinen.

Anmerkung: Adsorptionsanlagen werden zu einem späteren Zeitpunkt im Niedertemperaturbereich (< 80 °C) separat behandelt.

Kondithermverfahren

Das Kondithermverfahren¹⁴ ist ein von Georg F. Schu patentiertes Verfahren, welches ermöglicht aus Brühdämpfen¹⁵ Wärme zurückzugewinnen. Dieses innovative Verfahren wurde bisher in der reifenverarbeitenden Industrie angewandt, ist aber für alle Industriezweige geeignet, welche zur Prozesswärmeversorgung auf Dampf oder Hochdruckheißwasser zurückgreifen. Die in Kesselwasser- und Kondensatkreisläufen durch Entspannung von Flüssigkeiten entstehenden Dämpfe werden häufig ungenutzt an die Umgebung abgeführt. Das Kondithermverfahren bietet eine Möglichkeit, diese Wärmequellen für Niedertemperaturanwendungen wie Warmwassererzeugung oder Kälteerzeugung (bspw. mit Ab- oder Adsorptionskältemaschinen) zu nutzen.

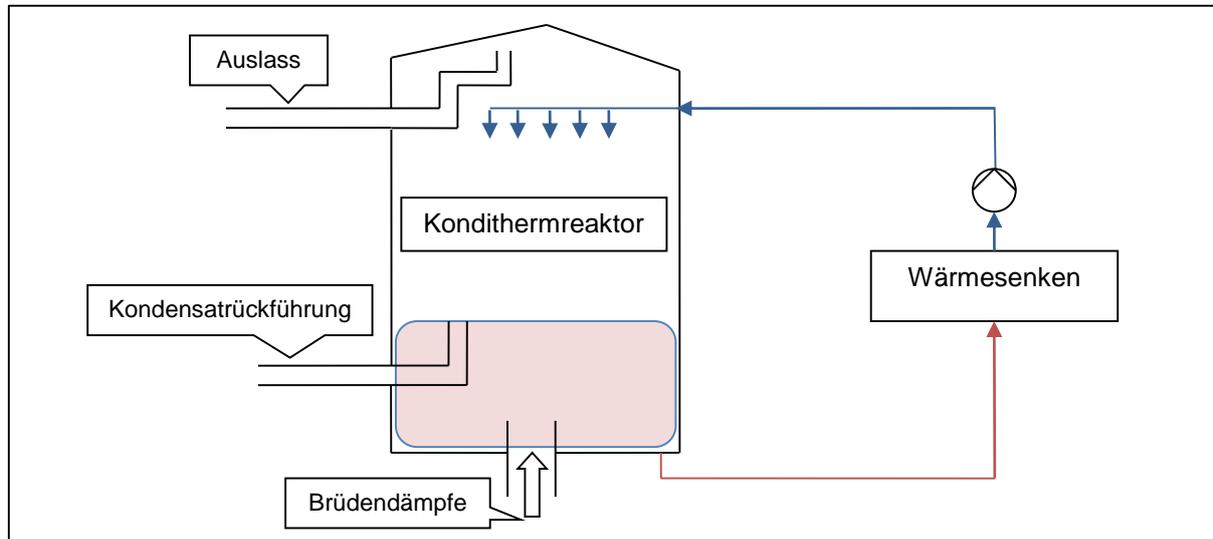


Abbildung 3-6: Schema des Konditherm Verfahrens¹⁶

Nutzbare Temperaturen liegen bei etwa 90 bis 100°C. Die Wärmesenken sind daher primär für Heizungszwecke und Brauchwasser gedacht. Die Systemleistung ist, je nach Verfügbarkeit von Brühdämpfen, gut skalierbar.

¹⁴ (Schu, 2009)

¹⁵ Brühdampf entsteht bei der Reifenherstellung, indem heißes Wasser und Dampf unter hohem Druck durch die sogenannte Vulkanisationsform getrieben wird. (Vgl. (Carrier GmbH, 2009)

¹⁶ (Schu, 2009, S. 10)

Wärmenetze

Fernwärmenetze können über größere Entfernungen Wärme zu Endverbraucher transportieren. Gibt es Möglichkeiten, Abwärme aus Industrie in ein Fernwärmenetz einzuspeisen, sollten diese auch genutzt werden. Als Beispiel können z.B. Hochöfen zur Stahlerzeugung genannt werden, welche große Abwärmemengen in eine Fernwärmeschiene einspeisen können. Typische Betriebstemperaturen liegen zwischen 80°C bis 140°C (Vorlauftemperatur) mit Drücken zwischen 4 bis 25 bar (je nach Dimension des Fernwärmenetzes). Als Arbeitsmedium wird Wasser verwendet. Fernwärmenetze verfügen in der Regel über einen großen, zentralen Fernwärmespeicher, welcher zum Ausgleich von Erzeugungsschwankungen dient.

Herausforderungen in Bezug auf Fernwärmenetze sind deren kostenintensive infrastrukturelle Etablierung und deren Betrieb. Fernwärmenetze wurden in der Regel in Verbindung mit lokaler energieintensiver Montanindustrie und klassisch geprägten großen Kondensationskraftwerken mit Wärmeauskopplung etabliert. Sie bieten jedoch die Chance weitere bzw. neue Abwärmequellen aus der Industrie zu nutzen sowie neue, hocheffiziente KWK-Kraftwerke für einen weiteren Beitrag zur Effizienz und zum Klimaschutz mit einbeziehen zu können. Eine andere zu prüfende Strategie könnte zudem sein, überschüssigen Strom aus Erneuerbaren Energien (bspw. Windstrom) zur Einspeisung in ein Wärmenetz in Wärme umzuwandeln (Power-to-Heat).¹⁷

Nahwärmenetze

Nahwärmenetze werden in der Regel in Kommunen in (Neubau-)Wohnvierteln mit dem Ziel eingesetzt, die jeweiligen einzelnen Zentralheizungen der Einzelgebäude (teilweise) zu substituieren. Oft wird zusätzlich eine hocheffiziente KWK-Anlage (die im Idealfall mit biogenen Kraftstoffen betrieben wird) konzipiert, welche die Nahwärmeversorgung übernimmt. Netzgröße, Vor- und Rücklauftemperatur sowie Drücke von Nahwärmenetzen sind im Vergleich zu den Fernwärmenetzen niedriger. Potentiale sind zu sehen mit dem Einbezug von lokalen Gewerbe- und Industrieunternehmen mit Abwärmequellen. Nahwärmenetze können zudem auch als nachgelagerte Netze von Fernwärmenetzen eingesetzt werden.

Exkurs Kältenetze

Neben den Wärmenetzen gibt es auch vereinzelt Nah- und Fernkältenetze, oft treten beide in Kombination mit Wärmenetzen auf. Anwendungsbeispiele sind in Krankenhäusern wiederzufinden sowie die Gebäudeklimatisierung von großen Gebäuden im Sommer. Man geht von Vorlauftemperaturen im Netz von etwa 5-7°C und Rücklauftemperaturen zwischen etwa 11-13°C aus. Für die Versorgung des Netzes kommen in

¹⁷ Vgl. bspw. Stadtwerke Flensburg mit einem installierten Elektroheizkessel von 30 MW

der Regel Absorptionskälteanlagen zum Einsatz um bspw. im Sommer aus überschüssiger Fern-/Abwärme Kälte zu erzeugen.

Kältenetze bieten das Potential gerade überschüssige Abwärme in den warmen Jahreszeiten (z.B. aus Wärmenetzen) in Kombination mit Absorptionskälteanlagen zur Kältebereitstellung zu nutzen. Dadurch kann die Verbreitung von Kompressionskälteanlagen verringert werden - für einen erhöhten Beitrag der Effizienz.

Ein konkretes Beispiel kann in Berlin Mitte¹⁸ angeführt werden – hier wurde ein Fernwärmenetz in Verbindung mit KWK- und Sorptionskälteanlagen mit einem Kältenetz kombiniert. Gerade im Sommer kann die Wärme der KWK-Anlagen aus dem Fernwärmenetz für die Kälteerzeugung genutzt werden, die KWK-Anlagen haben so einen sehr hohen Auslastungsgrad, Ökonomie und Ökologie sind deutlich vorteilhafter.

Niedertemperaturbereich (<= 80°C):

Wärmepumpe

Wärmepumpen – und hier speziell Kompressionswärmepumpen - sind prinzipiell auch Kältemaschinen, welche aber im Umkehrprinzip arbeiten. Die *Nutzkälte* im Kältemaschinenbetrieb entspricht beim Wärmepumpenbetrieb der aus der Umgebung zugeführten Wärme. Entsprechend ist die *Abwärme* einer normalen Kältemaschine beim Wärmepumpenbetrieb *Nutzwärme*. Eine Wärmepumpe überträgt also Umweltwärme aus der Umgebung auf ein Arbeitsmedium, das mittels eines Verdichtungsprozesses auf ein höheres Temperaturniveau gebracht wird und bei dieser erhöhten Temperatur Nutzwärme, z.B. an ein angeschlossenes Heizsystem, abgeben kann.

Die momentane Leistungsziffer (eine Art *Wirkungsgrad*) einer idealen Wärmepumpe berechnet sich nach Carnot aus:

$$\varepsilon_{WPC} = \frac{T_w}{T_w - T_k} , \text{ wobei } T_w \text{ der Temperatur des Arbeitsmittels bei der Wärmeabgabe und}$$

T_k dessen Temperatur bei der Wärmezufuhr entspricht (in Kelvin).¹⁹

Reale Wärmepumpen erreichen rund die Hälfte dieser ‚Carnot- Leistungsziffer‘. Qualitativ sagt die Gleichung aus, dass eine solche Maschine umso effizienter arbeitet, je kleiner die Differenz im Nenner ist, das heißt: je näher die Temperaturen von Wärmequelle und –senke beieinander liegen. Deshalb werden Wärmepumpen vorteilhaft für Niedertemperaturheizungen mit geringen Vorlauftemperaturen (z.B. mit 35°C in modernen Fußbodenheizungen) genutzt.

¹⁸ Vgl. Meldung Vattenfall ; Berlin Mitte, Potsdamer Platz/Leipziger Platz, Internet: <http://corporate.vattenfall.de/ubers/uns/geschaeftsfelder/erzeugung/warme/fernkalte/> ; 23.07.2015

¹⁹ (Böckh, 2008, S. 240 (9.7))

Die folgende Abbildung stellt das Prinzip einer Wärmepumpe als Schema dar.

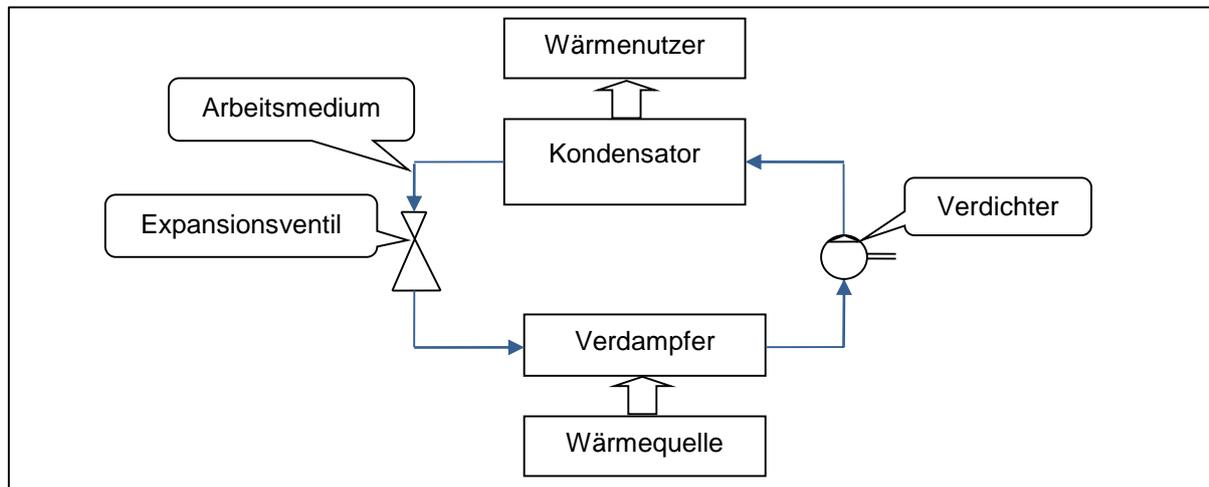


Abbildung 3-7: Schema einer Wärmepumpenanlage (Grafik: IZES gGmbH)

Für die energetische Bewertung einer Wärmepumpe verwendet man die sogenannte Arbeitszahl – das Verhältnis von erzeugter Wärme zu zugeführter elektrischer Arbeit. So besagt eine Arbeitszahl von 3, dass der Wärmeoutput der Anlage dreimal größer ist als die ihr zugeführte elektrische Energie.

Wird dieses Verhältnis für den Zeitraum eines Jahres ermittelt, spricht man von der Jahresarbeitszahl, kurz JAZ. Oft wird auch die Leistungszahl COP (engl.: coefficient of performance) angegeben, die das oben genannte Verhältnis unter Normbedingungen (sog. Betriebspunkten) beschreibt. Der COP fällt in der Regel größer aus als die Jahresarbeitszahl, weil letztere im realen Betrieb ermittelt wird und somit auch nichtoptimale Betriebsweisen mit erfasst. Zur Einschätzung der Effizienz einer Wärmepumpe im Realbetrieb ist somit die JAZ aussagekräftiger als ein COP.

Wärmepumpen nutzen in der Praxis zunehmend Luft als Wärmequelle, können aber z.B. mittels Erdkollektoren oder Erdsonden auch aus dem Erdreich oder dem Grundwasser Wärme entnehmen, was im Winter vorteilhaft ist, weil die Wärmequellentemperatur dann höher und gleichbleibender als im Fall der Umgebungsluft ist. Entsprechend fällt die JAZ bei erdgebundenen Wärmepumpen in der Regel höher aus als bei Luftwärmepumpen.

Auf die unter Fachleuten nach wie vor strittige Frage, ab welcher JAZ eine Wärmepumpe effizienter als eine vergleichbare Vor-Ort-Befehuerung zu bewerten ist, soll an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden.

Unstrittig ist hingegen, dass Wärmepumpen dafür prädestiniert sind, schon Niedertemperaturabwärme (z.B. im Bereich von 10 bis 30°C) energetisch effizient auf ein erforderliches Heizkreis-Temperaturniveau von 30 bis max. 60°C zu bringen.

Heizungszwecke/Warmwassernutzung

Die sinnvollste Abwärmenutzung im Niedertemperaturbereich ist in einer direkten Nutzung für Heizungs- und Warmwasser zu sehen, das Energieniveau ist zu gering für bspw. stromerzeugende Anwendungen. Mittels Wärmeübertragern und ggf. ergänzt durch einen Pufferspeicher kann die Abwärme in die entsprechenden Heiz- und Brauchwasserkreise übertragen werden.

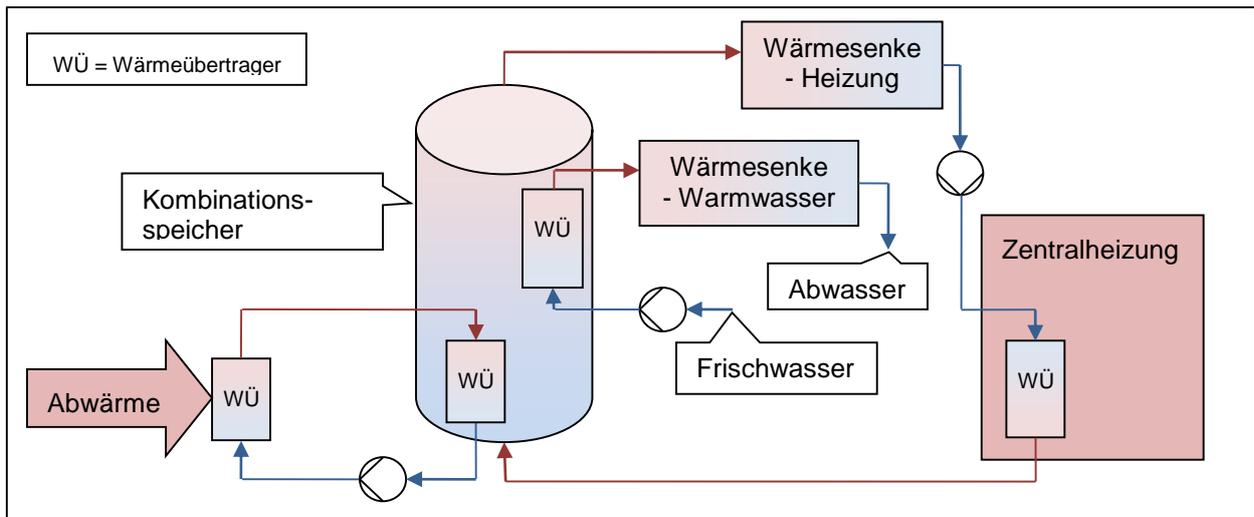


Abbildung 3-8: Schema für die Verwertung von Abwärme im Niedertemperaturbereich (Grafik: IZES gGmbH)

Rücklauftemperaturerhöhung

Die Rücklauftemperaturerhöhung durch Abwärme sollte in Betracht gezogen werden, wenn Temperaturniveaus zwischen 20°C und 45°C für direkte Heizungszwecke zu gering sind. Primärenergie kann eingespart werden wenn der Rücklauf unter dem nutzbaren Abwärmeniveau liegt und so aufgewärmt werden kann.

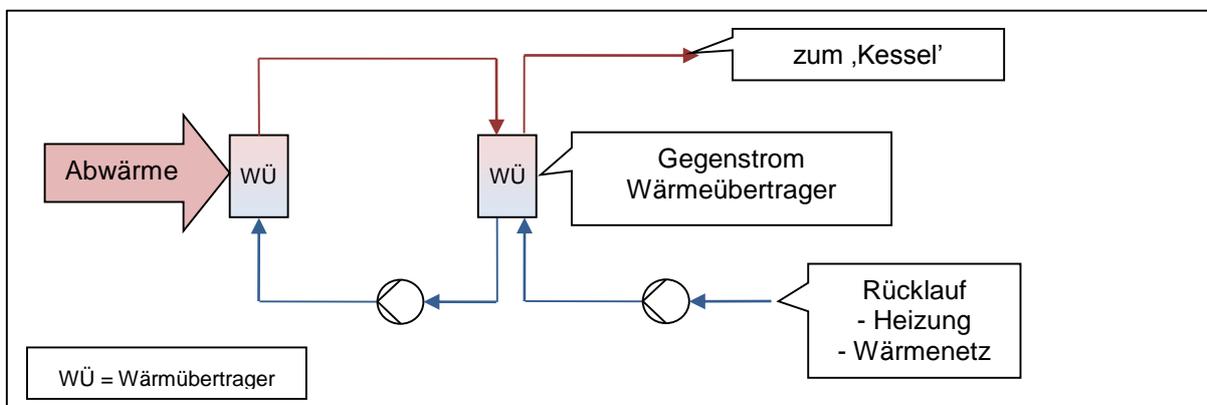


Abbildung 3-9: Schema für eine Rücklauftemperaturerhöhung (der linke Zwischenkreis kann u.U. entfallen) (Grafik: IZES gGmbH)

Sind höhere Temperaturniveaus (50°C bis 80 °C) und Abwärmemengen vorhanden, kann die Abwärme in Nahwärme- bzw. Fernwärmenetze auch im Rücklauf zur Temperaturanhebung genutzt werden. Gerade die Verwertung von Abwärme aus Industrie und Gewerbe für Siedlungen in der unmittelbaren Nachbarschaft mit Hilfe lokaler Wärmenetze hat bisher einen geringen Durchsetzungsgrad.

Adsorptionskälteanlagen

Eine Adsorptionskältemaschine besteht prinzipiell aus zwei mit Sorptionsmitteln (feinporöse Stoffe wie Zeolithe, Silikagel, Aktivkohle) gefüllten Arbeitskammern, einem Kondensator und einem Verdampfer. Als Sorptionsmittel wird in den meisten Fällen Silicagel und als Kältemittel Wasser eingesetzt. Der Prozess kann diskontinuierlich und kontinuierlich arbeiten, in den meisten Fällen findet ersteres statt. Eine Prozessphase hat hierbei folgende Arbeitstakte:

- Das an das Sorptionsmittel angelagerte Wasser wird im Wärmeübertrager unter Wärmezufuhr ausgetrieben.
- Das Wasser wird im Kondensator verflüssigt und dabei entstehende Kondensationswärme wird an das Kühlwasser (zur Wärmenutzung) abgeführt.
- Das Kondensat wird in den Verdampfer eingesprüht und bei Unterdruck verdampft. Dabei wird Wärme aus dem Kaltwasser (Wärmequelle) entnommen.
- Im Wärmeübertrager wird der Wasserdampf adsorbiert und die entstehende Wärme an das Kühlwasser zu Nutzzwecken abgeführt.

Durch einfaches Umkehren des Heiz- und Kühlwasserkreislaufs zwischen den Wärmeübertragern werden die Funktionen Austreiber und Adsorber am Ende eines Arbeitszeitraumes vertauscht und der Prozess beginnt von neuem, eine Prozessphase dauert etwa mehrere Minuten. Für den diskontinuierlichen Prozess ist ein Kältezwischenspeicher erforderlich.

Für die Wärmezufuhr benötigt man Temperaturen zwischen 55°C bis 80°C, eine Erzeugung von Kaltwasser bis etwa +5°C für Klimatisierung und Prozesskühlung sind dadurch möglich. Da Adsorption und Desorption nicht zwingend elektrische Energie benötigen können Adsorptionskältemaschinen auch in Gegenden ohne Stromnetz verwendet werden, wenn eine Wärmequelle - z.B. aus einer solarthermischen Anlage - zur Verfügung steht.

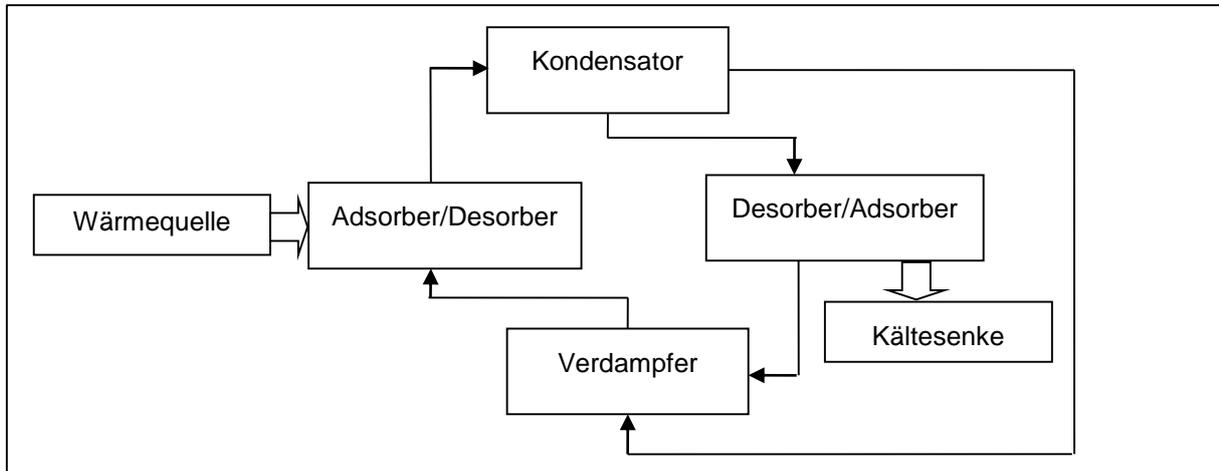


Abbildung 3-10: Schema einer Adsorptionskälteanlage in der 1. Prozessphase (Grafik: IZES gGmbH)

Noch geringe Stückzahlen, geringe Leistungszahlen und hohe Anschaffungskosten im Vergleich zu Absorptionskälteanlagen sind im Moment noch Hemmnisse für Adsorptionskältemaschinen, welches sich aber in naher Zukunft für kleine Leistungsklassen ändern wird.

3.3 Wärmespeicher

Wärmespeicher sind wichtige Bestandteile thermischer Energieversorgungsanlagen. Sie dienen in Heizungsanlagen kurzfristig z.B. dazu, den Wärmeerzeuger im optimalen Lastpunkt zu betreiben (Vermeidung von Teillastbetrieben und häufigen Taktungen, Reduzierung der Abgasemissionen), um dann die effizient produzierte Wärme, sofort abrufbereit, zwischen zu speichern. Große Wärmespeicher kommen in Fernwärmenetzen zum Einsatz, in denen Kraftwerkswärme und industrielle Abwärme zwischengespeichert werden kann.

Generell dienen Wärmespeicher dazu Wärmeproduktion und Wärmebedarf miteinander zu harmonisieren.

Wärmespeichersysteme können für unterschiedliche Temperaturbereiche verwendet werden, aufgrund der hohen Verluste sind Hochtemperaturspeicher nur für eine kurzfristige Speicherung sinnvoll.

Weiterhin unterscheidet man zwischen Kurz- und Langzeitspeichern: Langzeitspeicher (z.B. Erdspeicher wie Aquifere) arbeiten häufig mit geringen Temperaturdifferenzen leicht über oder unter der Umgebungstemperatur, können aber die Wärme über lange Zeiträume (über Jahreszeiten hinaus) speichern. Technologisch unterscheidet man grob zwischen folgenden Speichertypen:

- Warmwasserspeicher

Warmwasserspeicher sind letztlich nichts anderes als gut isolierte Wasserbehälter und können Temperaturen bis 100°C aufnehmen. Sie sind daher für den Nieder- bzw. bedingt für den Mitteltemperaturbereich geeignet und können schnell be- und entladen werden. Jede Zentralheizung verfügt in der Regel über einen Warmwasserspeicher oft gepaart mit der Brauchwasserbereitstellung.

- Latenzwärmespeicher

Ein Latenzwärmespeicher besteht aus einem Phasenwechselmaterial (z.B. Paraffine oder Natriumacetat), das im betrachteten Nutztemperatur-Bereich seinen Schmelzpunkt hat. Zum Aufladen des Speichers wird der Wärmeträger durch Wärmezufuhr geschmolzen und überhitzt, wobei sehr viel Schmelzwärme aufgenommen werden kann. Da der Vorgang reversibel ist, kann das Arbeitsmedium die eingespeiste Wärmemenge beim Rückerstarren wieder abgeben. Ein Vorteil ist, dass Wärme größtenteils verlustfrei in vielen Nutzungszyklen gespeichert und wieder entnommen werden kann. Idealerweise befindet sich der Phasenübergang genau im Temperaturbereich der verfügbaren, eingespeisten Wärme, eine Auswahl eines geeigneten Phasenwechselmaterials sollte dabei pro Anwendungsfall berücksichtigt werden; zu beachten ist hier, dass serienmäßige Produkte noch kaum am Markt sind.

- Thermochemischer Wärmespeicher

Thermochemische Speicher befinden sich noch im Prototypenstadium. Sie sind in der Lage, über große Zeiträume Wärme zu speichern. Als Materialien werden meist Silicagele, Metallhydride oder Zeolithe verwendet, die Temperaturbereiche pendeln, je nach Arbeitsmedium, zwischen 40°C und 500°C. Prinzipiell nehmen die thermochemischen Wärmespeicher über eine endotherme Reaktion (Wärmeinput) die thermische Energie auf und können diese in einer exothermen Reaktion wieder abgeben (Wärmeoutput). Vorteil ist, neben einer dauerhaften verlustfreien Speicherung, dass die Speicherdichte (einspeicherbare Energiemenge/Volumen) in Latenzwärmespeichern und thermochemischen Speichern um rund das drei- bis vierfache höher ist als bei konventionellen Warmwasserspeichern.

Vor dem Hintergrund der Nutzung von Abwärmepotentialen sind Wärmespeicher ideale Puffer, um z.B. große, diskontinuierliche Wärmemengen aus dem verarbeitenden Gewerbe zwischen zu speichern, z.B. für den konstanten Einsatz in einer ORC-Turbine, eines Stirlingmotors oder für die Wärmebedarfsregelung von (Fern-)wärmenetzen oder sonstigen Wärmesenken.

3.4 Wärmeübertrager

Eines der grundlegenden Bauteile für jeglichen Transport und Nutzung von Wärme ist der Wärmeübertrager, auch Wärmetauscher genannt. Generell dient der Wärmeübertrager dazu, thermische Energie von einem Medium verlustarm auf ein anderes zu übertragen, prinzipiell unterscheidet man drei Kategorien:

- Direkte Wärmeübertragung (Wärme- und Stoffübertragung, bspw. Nasskühlturm)
- Indirekte Wärmeübertragung: *Rekuperatoren* (Stoffströme sind räumlich durch eine wärmedurchlässige Wand getrennt, bspw. Kühler beim Kfz)
- Halbdirekte Wärmeübertragung: Regeneratoren (zeitversetzte Pufferung über einen Wärmespeicher, Übertragung thermischer Energie von einem heißem auf ein kühleres Medium, bspw. Wärmerad)

Die Menge der Übertragung der thermischen Energie hängt besonders von der Führung der beiden Stoffströme ab:

- Gegenstrom
- Gleichstrom
- Kreuzstrom
- Kombinationen aus den drei vorher genannten Stoffstromführungen

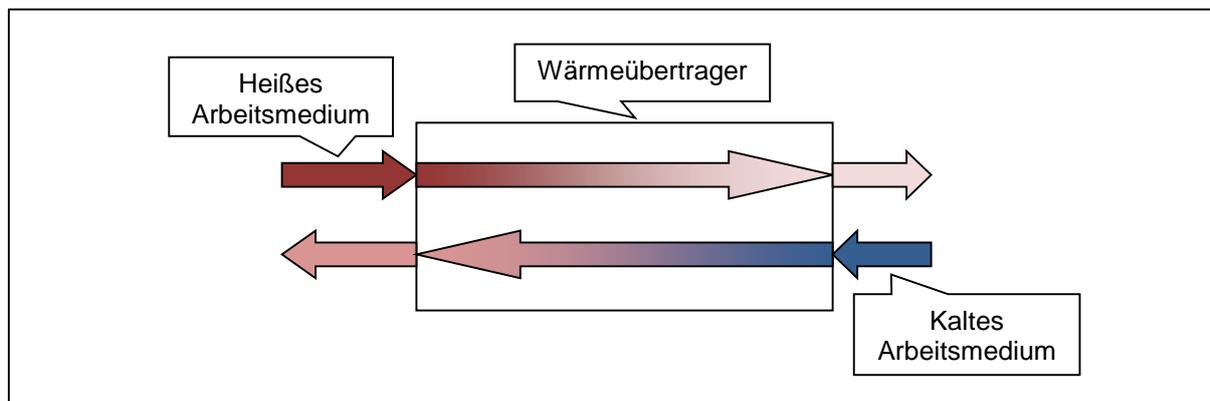


Abbildung 3-11: Schema Wärmeübertrager im Gegenstromverfahren (Grafik: IZES gGmbH)

In der Praxis können sich die Arbeitsmedien im flüssigen oder gasförmigen Zustand oder auch im Phasenübergang befinden. Hierfür gibt es verschiedene Wärmeübertrager, welche auf die jeweiligen Phasenzustände optimiert sind.

Interessante Beispiele für Abwärmequellen, die mit Wärmeübertragern ‚angezapft‘ werden können, sind:

- Heiße Abgase
- Warme Abluft

- Heiße Brühdämpfe
- Heißes Prozesswasser

Herausforderungen:

Bei der Nutzung von Abwärmequellen sind folgende Kriterien zu beachten:

- Räumliche Identifizierung
- Medium (fest, flüssig, gasförmig)
 - Analyse auf chemische Verunreinigungen
 - Ermittlung der spezifischen Wärmeleitkapazität [J/(kgK)]
- Temperaturniveau [K]
- Volumenstrom [Nm³/h]
- Zeitliche Verfügbarkeit im Jahr [h/a]

Zusammenfassend ist die Herausforderung in der „Nutzbarmachung“ von Abwärme zusehen, also in der Frage wie kann ungenutzte Wärme „eingesammelt“ und in geordneter Form energetisch verwertet werden!

Eine Schlüsseltechnologie ist somit konsequenterweise in der Wärmeübertragungstechnik zu sehen!

Wie bereits im Vorfeld vorgestellt wurde, gibt es verschiedene Effizienztechnologien, welche Abwärme energetisch nutzen können. Je nach Temperaturniveau können Strom, nutzbare Wärme und nutzbare Kälte erzeugt werden. Diese Technologien sind technologisch weit fortgeschritten und in den meisten Fällen serienreif.

Gleiches gilt im Prinzip auch für die Wärmeübertrager, jedoch nur für bestimmte Anwendungsbereiche. Gerade die Übertragung von Wärme von gefassten gasförmigen und/oder flüssigen Medien ist bestens praktikierbar. Diffuse Abwärme bspw. aus Abkühlungsprozessen ist dagegen bisher schwer zu nutzen, die Entwicklung entsprechender Wärmeübertrager ist in der Regel noch Forschungsgebiet.

Die Hersteller von Wärmeübertragern, oft mittelständische Unternehmen, sind in der Regel auf bestimmte Anwendungsfälle spezialisiert. Für die Entwicklung neuartiger, robuster Wärmeübertrager sind hohe Investitionen und Risiken verbunden, die von den Herstellern selten alleine getragen werden können.

Herausforderung bei dem auf der nachfolgenden Abbildung dargestellten Prozess ist die Erfassung der Abwärme und dessen Transport bzw. Übertragung auf ein wertbares Abwärmemedium.

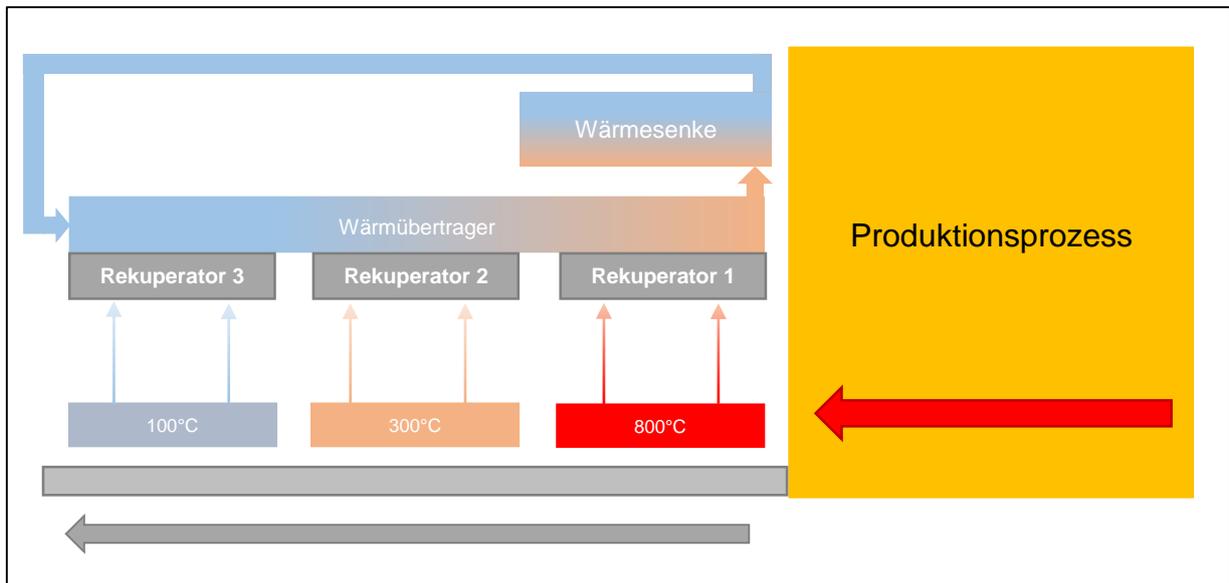


Abbildung 3-12: Beispiele von Abwärmenutzung für diffuse Abwärmeströme (Grafik: IZES gGmbH)

4 Abwärmepotentiale

4.1 Vorstellung aktueller Veröffentlichungen

Im Folgenden werden anhand einer nationalen und internationalen Recherche themenrelevante Veröffentlichungen aufgezeigt und die Ergebnisse zusammengefasst. Fast alle Veröffentlichungen befassen sich mit industrieller Abwärme mit Fokus auf die hohen Energiebedarfe und verfügbare Exergien.

4.2 Deutschland

4.2.1 Die Nutzung industrieller Abwärme – technisch-wirtschaftliche Potenziale und energiepolitische Umsetzung (ifeu et al. 2010)

Titel	Die Nutzung industrieller Abwärme – technisch-wirtschaftliche Potenziale und energiepolitische Umsetzung
Autor(en)	<ul style="list-style-type: none"> - Dr. Martin Pehnt (ifeu) - Jan Bödeker (ifeu) - Marlene Arens (Fraunhofer ISI) - Prof. Dr. Eberhard Jochem (IREES GmbH) - Farikha Idrissova (IREES GmbH)
Veröffentlichungsdatum	Juli 2010

Tabelle 4-1: Titel, Autor(en), Auftraggeber und Veröffentlichungsdatum der Studie (Die Nutzung industrieller Abwärme – technisch-wirtschaftliche Potenziale und energiepolitische Umsetzung)

Zentrale Fragestellung

Die Veröffentlichung entstand im Rahmen des Projektes ‚Wissenschaftliche Begleitforschung zu übergreifenden technischen, ökologischen, ökonomischen und strategischen Aspekten des nationalen Teils der Klimaschutzinitiative‘. Dabei wurden verschiedene Handlungsfelder der Energieeffizienz untersucht. Die Nutzung industrieller Abwärme zur Bereitstellung von Nutzwärme oder Strom wurde als interessantes und häufig vernachlässigtes Handlungsfeld der Energieeffizienz identifiziert. Aus diesem Grund lag der Veröffentlichung die Intention zugrunde, die Voraussetzungen für ein Instrumentenbündel zur Nutzung industrieller Abwärme zu erarbeiten. Zu diesem Zweck werden Prozesswärmebedarf und Abwärmepotentiale skizziert sowie technologische Nutzungsvarianten, Potentiale, Hemmnisse und fördernde Faktoren aufgezeigt.²⁰

²⁰ Vgl. (ifeu et al., 2010, S. 4)

Ergebnisse bezüglich Abwärmepotentiale auf Landesebene

In der Veröffentlichung wird dargestellt, dass nur sehr wenige aktuelle Studien verfügbar sind, die belastbare Ergebnisse hinsichtlich der Abwärmepotentiale in der Industrie veröffentlichen. Ergebnisse zu Abwärmepotentialen wurden den folgenden drei Studien entnommen.

Enova 2009	Enova, Potentialstudie Spillvarme, 2009.
DOE 2004	DOE (2004) US Department of Energy, Loss and Opportunities Analysis, US Manufacturing and Mining.
Brandstätter 2008	Brandstätter, R. (2008): Industrielle Abwärmenutzung. Beispiele und Technologien. Linz, Amt der Oberösterreichischen Landesregierung.

Tabelle 4-2: Zusammenstellung der Literaturangaben der in (ifeu et al., 2010, S. 15ff) durchgeführten Untersuchungen

Genannte Untersuchung	Wert	Einheit	Potentialbeschreibung
Enova 2009	40	%	Anteil des Abwärmepotentials > 140 °C am Endenergiebedarf der Branche Zement Industrie
	30	%	Anteil des Abwärmepotentials > 140 °C am Endenergiebedarf der Branche Eisenlegierung
	8	%	Anteil des Abwärmepotentials > 140 °C am Endenergiebedarf der Branche Chemie
DOE 2004	36	%	Anteil der Verlustenergie an der eingesetzten Endenergie in der chemischen Industrie in den USA.
	8	%	Anteil der möglichen Endenergieeinsparung durch Abwärmenutzung in der chemischen Industrie in den USA.
	2	%	Anteil der möglichen Endenergieeinsparung durch

			Abwärmenutzung in der Holzverarbeitenden Industrie in den USA.
	14	%	Anteil der möglichen Endenergieeinsparung durch Abwärmenutzung in Raffinerien in den USA.
Brandstätter 2008 (Studie unveröffentlicht; Werte beziehen sich auf Pressemitteilung)	10	%	Anteil ungenutzter Abwärme an Gesamtenergiebedarf des Landes Oberösterreich (Temperaturniveau $\geq 30^{\circ}\text{C}$)
	25	%	Anteil ungenutzter Abwärme an Energieeinsatz der Industrie des Landes Oberösterreich (Temperaturniveau $\geq 30^{\circ}\text{C}$)

Tabelle 4-3: Zusammenstellung der Ergebnisse verschiedener Potentialstudien enthalten in (ifeu et al., 2010, S. 15ff)

4.2.2 Industrielle Abwärmenutzung. Kurzstudie (Fraunhofer ISI, 2013)

Titel	Industrielle Abwärmenutzung - Kurzstudie
Autor(en)	Simon Hirzel, Benjamin Sontag, Dr.-Ing. Clemens Rohde
Veröffentlichungsdatum	November 2013

Tabelle 4-4: Titel, Autor(en), Auftraggeber und Veröffentlichungsdatum der Kurzstudie (Industrielle Abwärmenutzung)

Zentrale Fragestellung

Vor dem Hintergrund des starken Interesses an der Abwärmenutzung und geringer Ausschöpfung der vorhandenen Potentiale, ergibt sich für die hier vorgestellte Kurzstudie das Anliegen, Einblicke in die Grundlagen, Technologien und Potentiale der industriellen Abwärmenutzung zu gewähren.²¹

Ergebnisse bezüglich Abwärmepotentiale auf Landesebene

²¹ Vgl. (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, 2013, S. 5)

Hinweis: Der in der Kurzstudie genannten Quelle Schröter et.al. 2009 zufolge, geht nur etwa ein Zehntel (9 %) der deutschen Industrieunternehmen davon aus, dass sie ihre Potenziale zur Nutzung von Bewegungs- und Prozessenergie vollständig ausschöpfen.

In der Kurzstudie wird die Frage nach der Höhe der erschließbaren Energieeinsparpotentiale durch die industrielle Abwärmenutzung zentral thematisiert. Es wird dabei darauf hingewiesen, dass sich nur vergleichsweise wenige Untersuchungen mit dieser Thematik befassen. Ein Teil dieser Veröffentlichungen wird dargestellt und zitiert. Die folgenden Veröffentlichungen wurden berücksichtigt:

Schaefer 1995	Schaefer, H. (1995): Energiewirtschaftliche Bedeutung der Nutzung von Abfallenergie. In: Fratzscher, W.; Stephan, K. (Hrsg.): Abfallenergienutzung. Technische, wirtschaftliche und soziale Aspekte. Interdisziplinäre Arbeitsgruppe Optionen zukünftiger industrieller Produktionssysteme. Berlin: Akademie, S. 42–60.
IFEU et al. 2010 (in Anlehnung an Sollesnes et al. 2009)	Pehnt, M.; Bödeker, J.; Arens, M.; Jochem, E.; Idrissova, F. (2010): Die Nutzung industrieller Abwärme – technisch-wirtschaftliche Potenziale und energiepolitische Umsetzung. Bericht im Rahmen des Vorhabens „Wissenschaftliche Begleitforschung zu übergreifenden technischen, ökologischen, ökonomischen und strategischen Aspekten des nationalen Teils der Klimaschutzinitiative“. Heidelberg: Institut für Energie- und Umweltforschung (ifeu).
Sollesnes et al. 2009	Sollesnes, G.; Helgerud, H.-E. (2009): Utnyttelse av spillvarme fra norsk industrienpotensialstudie. Trondheim: ENOVA.
Bonilla et al. 1997	Bonilla, J. J.; Blanco, J. M.; López, L.; Sala, J. M. (1997): Technological Recovery Potential Of Waste Heat In The Industry Of The Basque Country. Applied Thermal Engineering, 17 (3), S. 283–288.
Lopéz et al. 1998	Lopéz, L.; Blanco, J. M.; Bonilla, J. J.; Baeza, S.; Sala, J. M. (1998): Determination Of Energy And Exergy Of Waste Heat In The Industry of The Basque Country. Applied Thermal Engineering, 18 (3-4), S. 187–197.
McKenna et al. 2010	McKenna, R. C.; Norman, J. B. (2010): Spatial modelling of industrial heat loads and recovery potentials in the UK. Energy Policy, 38, S. 5878–5891.
Broberg Viklund et al. 2014	Broberg Viklund, S.; Johansson, M. T. (2014): Technologies for utilization of industrial excess heat: Potentials for energy

	recovery and CO2 emission reduction. Energy Conversion and Management, 77, S. 369–379.
--	--

Tabelle 4-5: Zusammenstellung der Literaturangaben der in (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, 2013, S. 11f) gescreentten Untersuchungen

Die zitierten Ergebnisse der genannten Studien werden in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Genannte Untersuchung	Wert	Einheit	Potentialbeschreibung
Schaefer 1995	45	%	Anteil des Energieeinsatzes für industrielle Prozesswärme als technisch maximal verwertbares Potential an Abwärme der deutschen Industrie
IFEU et al. 2010 (in Anlehnung an Sollesnes et al. 2009)	18	%	Anteil des Endenergieeinsatzes der deutschen Industrie als technisch-wirtschaftliches Abwärmenutzungspotenzial (Temperaturniveau über 60 °C)
Sollesnes et al. 2009	36	%	Anteil des Energiebedarfs von 76 untersuchten norwegischen Industrieunternehmen als verfügbare Abwärme. Davon entfällt etwa die Hälfte der Abwärme auf einen Temperaturbereich von über 60 °C - Hauptsächlich fällt Abwärme in Form von Abgasen und Warmwasser an
Bonilla et al. 1997 Lopéz et al. 1998	40	%	Anteil des Gesamtenergiebedarfs der untersuchten Industrien in der spanischen Baskenregion als verfügbare Abwärmemenge. Die größten Anteile der Abwärme entfallen auf Verbrennungsgase (33 %) und auf verbleibende Restwärme (27 %) - Etwa die Hälfte (51 %) der Restwärme auf Temperaturniveau über 250 °C
McKenna et al. 2010	5-10	%	Anteil des Wärmebedarfs der dort betrachteten Branchen (Vereinigtes Königreich), welches technisch nutzbar wäre.

			Größte Potentiale in Eisen- und Stahlindustrie, der Chemie-, der Aluminium- und der Mineralstoffindustrie im Temperaturbereich zwischen 100 und 500 °C.
Broberg Viklund, Karlsson 2014	8	%	Anteil des Energiebedarfs der befragten Unternehmen in Gävleborg, der als Abwärmepotential vorhanden ist.

Tabelle 4-6: Zusammenstellung der Ergebnisse verschiedener Potentialstudien enthalten in (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, 2013, S. 11f)

In der Kurzstudie wird klargestellt, dass eine übergreifende Einschätzung zu den gesamtindustriellen Potentialen der Abwärmenutzung nur eingeschränkt möglich ist. Dies wird mit der geringen Anzahl der vorhandenen Untersuchungen und der unterschiedlichen Abgrenzungen (bspw. Begriffsdefinitionen, Regionen Industrien, Segmente) und Erhebungsmethoden (bspw. Datenermittlung, Berechnungsmethode, Referenztemperatur) begründet.²²

4.2.3 Technologien der Abwärmenutzung (Sächsische Energieagentur GmbH)

Titel	Technologien der Abwärmenutzung
Autor(en)	<ul style="list-style-type: none"> - Sächsische Energieagentur - SAENA GmbH - Therm-Process-Consulting - DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH
Veröffentlichungsdatum	Juni 2012

Tabelle 4-7: Titel, Autor(en), Auftraggeber und Veröffentlichungsdatum der Broschüre (Technologien der Abwärmenutzung)

Zentrale Fragestellung

Der Leitfaden „Technologien der ‚Abwärmenutzung‘“ wurde erstellt, um das Thema der Abwärmenutzung verstärkt in die Unternehmen zu tragen. Der Leitfaden gibt ein Überblick über die verfügbaren Technologien zur Gewinnung, Speicherung und Umwandlung von Abwärme. Zusätzlich werden sowohl ein Schema zur Bewertung von Abwärmenutzungstechnologien als auch Praxisbeispiele und Wirtschaftlichkeitsberechnungen dargestellt.

Ergebnisse bezüglich Abwärmepotentiale auf Landesebene

²² Vgl. (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, 2013, S. 12)

In der Veröffentlichung werden keine auf Landesebene kumulierten Abwärmepotentiale genannt. Vielmehr enthält die Broschüre Informationen darüber, wie Abwärmepotentiale auf Unternehmensebene bestimmt werden können. Demnach definiert sich das Potential der vorhandenen Abwärmequellen durch die folgenden Parameter:

- Das Temperaturniveau
- Die verfügbare Energiemenge (bei ersatzweiser Angabe der Leistung im Abwärmemedium)
- Das Medium der Abwärme
- Die zeitliche Verfügbarkeit
- Die Verschmutzung des Abwärmemediums

Der Broschüre ist zu entnehmen, dass die Art des Mediums, der Verschmutzungsgrad und das Temperaturniveau der Abwärme relativ einfach bestimmbar sind. Die Abschätzung der Abwärmeleistung wird mittels der folgenden Formel ermittelt:

$$P_{AW} = \overline{C_p} * \Delta T * \dot{V}$$

Mit

P_{AW}	Abwärmeleistung
$\overline{C_p}$	mittlere volumenspezifische Wärmekapazität
ΔT	Temperaturdifferenz zwischen Abwärmemedium und Umgebung
\dot{V}	Volumenstrom der Abwärmequelle

Während die mittlere volumenspezifische Wärmekapazität einschlägiger Literatur entnommen werden und die Temperatur schlicht gemessen werden kann, muss der Volumenstrom bspw. mit Hilfe von Massenbilanzen oder Geschwindigkeitsmessungen bestimmt werden.

Darüber hinaus wird im Leitfaden eine Vielzahl verschiedener Beispiele der Abwärmenutzung samt Anleitung zu deren Potentialabschätzung (Bäckerei, Wäscherei, metallverarbeitender Betrieb etc.) dargestellt.

4.3 International

4.3.1 US Department of Energy: Energy, Loss and Opportunities Analysis (US Manufacturing and Mining, 2004)

Titel	Energy, Loss and Opportunities Analysis
Autor(en)	Energetics Incorporated and E3M, Incorporated
Veröffentlichungsdatum	Dezember 2004

Tabelle 4-8: Titel, Autor(en), Auftraggeber und Veröffentlichungsdatum der Studie Energy, Loss and Opportunities Analysis

Zentrale Fragestellung

Vor dem Hintergrund limitierter fossiler Energieträger und steigender Nachfrage nach industriellen Produkten wird die Energieversorgung des industriellen Sektors, welcher ca. 1/3 des gesamten Energieverbrauchs der USA ausmache, als Herausforderung gesehen.

Angesichts der Komplexität und der Vielzahl verschiedener Herstellungsprozesse, bei denen Energie eingesetzt wird, wird in der Studie versucht, einerseits ein Verständnis für die Möglichkeiten der Effizienzsteigerung und andererseits Umsetzungsmöglichkeiten letzterer zu erarbeiten. Zu diesem Zweck liegt der Fokus im ersten Schritt auf der Erfassung des Status Quo des Energieverbrauchs in der US amerikanischen Industrie. Im zweiten Schritt wird versucht, die Menge der Verlustenergie zu bestimmen, die unter technischen und ökonomischen Gesichtspunkten für weitere Energieanwendungen zurück gewonnen werden kann.²³

Ergebnisse bezüglich Abwärmepotentiale auf Landesebene

Zur Analyse des Status Quo des Energieverbrauchs wurden industrielle Sektoren anhand des North American Industrial Classification System (NAICS) sortiert und mit Energieverbrauchsdaten einer Erhebung (1998 Manufacturing Energy Consumption Survey (MECS)) verknüpft, welche einen Bezug auf die Kategorisierung nach NAICS herstellt. Je nach Bedarf wurden diese Daten mit Informationen aus anderen Quellen angereichert.²⁴ Es wurden 16 verschiedene Industriesektoren analysiert (Bezüglich Detailergebnisse zum Sektor ‚Chemie‘ siehe die Zusammenfassung der Ergebnisse von ifeu et al., 2010).

In der Studie wird darauf hingewiesen, dass Verluste in vor- und nach dem Herstellungsprozess anfallend unterteilt werden können. Jedoch sei eine solche

²³ Vgl. (U.S. Department of Energy, 2004, S. 1f)

²⁴ Vgl. (U.S. Department of Energy, 2004, S. 1f)

Unterteilung oftmals nicht zielführend, da viele der Herstellungsprozesse komplex sind und es zu Überschneidungen der Kategorien kommen kann. Dennoch werden Energieeinsparpotentiale angegeben, die in die Kategorien „Vor dem Prozess“ und „Nach dem Prozess“ unterteilt sind.²⁵

Demnach beläuft sich das Potential der Nutzung von Abwärme, die vor dem Prozess anfällt, auf ca. 171 Billionen BTU (ca. 50 TWh).²⁶ Das Potential der Nutzung von Abwärme, die nach dem Prozess anfällt beläuft sich auf ca. 1.423 Billionen BTU (ca. 417 TWh).²⁷ Insgesamt ergibt sich eine Summe der Abwärmepotentiale in der US-amerikanischen Industrie von ca. 467 TWh.²⁸

4.3.2 Recycling Industrial Waste Energy (Center on Globalization, 2009)

Titel	Recycling Industrial Waste Energy
Autor(en)	Center on Globalization, Duke Universität (USA)
Veröffentlichungsdatum	Februar 2009

Tabelle 4-9: Titel, Autor(en), Auftraggeber und Veröffentlichungsdatum der Studie (Recycling Industrial Waste Energy)

Zentrale Fragestellung

In dieser Studie liegt der Fokus auf den technischen und ökonomischen Möglichkeiten der Verstromung industrieller Abwärme in den USA. Neben der Darstellung von Potentialen der Stromerzeugung und der Emissionsvermeidung wird auf generelle technische Lösungswege, inklusive benötigter Materialien und Komponenten zur Anlagenerrichtung eingegangen. Weiterhin werden mögliche Kontributoren wie Finanzierer, Berater, Industrieunternehmen und Projektentwickler sowie notwendige politische Rahmenbedingungen aufgezeigt.²⁹

Ergebnisse bezüglich Abwärmepotentiale auf Landesebene

Hinsichtlich des Abwärmepotentials auf Landesebene werden in der Studie Ergebnisse von Bailey & Worrell (2005)³⁰ zitiert, wonach das Potential zur Erzeugung einer elektrischen Leistung von ca. 100 GW und ein einhergehendes Potential zur Emissionsvermeidung von ca. 400 Mio. t CO₂ bisher ungenutzt sind.

²⁵ Vgl. Vgl. (U.S. Department of Energy, 2004, S. 5)

²⁶ Vgl. (U.S. Department of Energy, 2004, S. 72): Tabelle 11-2 Pre-Process Energy Savings Zeilen 1, 4, 10, 16, 18 & 19

²⁷ Vgl. (U.S. Department of Energy, 2004, S. 72): Tabelle 11-2 Post-Process Energy Savings Zeilen 1, 4, 10, 16, 18 & 19

²⁸ Eigene Umrechnungen von BTU in TWh

²⁹ Vgl. (Center on Globalization, 2009, S. 3ff)

³⁰ Bailey, Owen and Worrell, Ernst. (2005). Clean Energy Technologies: A Preliminary Inventory of the Potential for Electricity Generation (Report No. LBNL-57451). Berkeley, CA: Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory.

Auf technischer Ebene wird die simultane Erzeugung von Elektrizität und Wärme als wertvolle Option zur Abwärmenutzung dargestellt. Dabei sollen industrielle Abwärme und/oder entflammbare industrielle Abgase in Hochdruckdampf gewandelt werden und einer Dampfturbine zugeführt werden, um die Produkte Strom und Wärme zu erzeugen. Diese Produkte können sowohl intern als auch extern weiteren Verwendungen zugeführt werden.³¹

4.3.3 EU PAPER: ORC WASTE HEAT RECOVERY IN EUROPEAN ENERGY INTENSIVE INDUSTRIES (H-REII, 2013)

Titel	ORC Waste heat recovery in European energy intensive industries
Autor(en)	HREII DEMO Observatory
Veröffentlichungsdatum	September 2013

Tabelle 4-10: Titel, Autor(en), Auftraggeber und Veröffentlichungsdatum der Studie (ORC Waste heat recovery in European energy intensive industries)

Zentrale Fragestellung

Die Veröffentlichung wurde im Rahmen des durch die EU geförderten Projektes, 'Integrated fumes depuration and heat recovery system in energy intensive industries (EII)' erstellt. Das Ziel des Projektes war einerseits, einen Prototyp einer ORC-Wärmerückgewinnungsanlage zu entwickeln, welche vollständig in das Abgasreinigungssystem eines Lichtbogenofens integriert ist. Andererseits sollten politische Anreizsysteme für die Abwärmenutzung gefördert werden. Die in dieser vorliegenden Studie erfasste Veröffentlichung geht auf Abwärmepotentiale im EU27-Industriesektor ein.

Ergebnisse bezüglich Abwärmepotentiale auf Landesebene

Mithilfe des zuvor dargestellten Prozesses und bezogen auf alle vorhandenen Lichtbogenofen in der EU könnten ungefähr 13 TWh/a bei angenommenen 5.000 Betriebsstunden und ungefähr 20 TWh/a bei angenommenen 8.000 Betriebsstunden als elektrische Energie zurück gewonnen werden. Letzterer Wert entspreche rund 4,8% des Stromverbrauchs der europäischen Industrie in 2009. Die entsprechende Menge an eingesparten CO₂-Emissionen beträgt nach Studienangaben 7,5 Mio. Tonnen. Des Weiteren wird eine Aufteilung des berechneten Potentials auf die untersuchten Industriezweige vorgenommen. Demnach besteht das größte Potential im Bereich der Gas-Verdichter-Stationen ($\leq 10,4$ TWh/a). Das nächst-geringere Potential wurde im Bereich der Stahlwerke identifiziert (ca. 3,7 bis 6,0 TWh/a). An dritter Stelle befinden sich die Potentiale in der Zement-Industrie (ca. 2,9 bis 4,6

³¹ Vgl. (Center on Globalization, 2009, S. 3f)

TWh/a). Auch wurden die Potentiale der Flachglasindustrie analysiert. Das Ergebnis beschreibt ein Abwärmepotential von ca. 0,4 bis 0,6 TWh/a.

4.3.4 The potential for recovering and using surplus heat from industry (ecofys et al., 2014)

Titel	The potential for recovering and using surplus heat from industry
Autor(en)	Element Energy, Ecofys, Imperial College, Dr. Paul Stevenson & Dr. Robert Hyde
Veröffentlichungsdatum	März 2014

Tabelle 4-11: Titel, Autor(en), Auftraggeber und Veröffentlichungsdatum der Studie (The potential for recovering and using surplus heat from industry)

Zentrale Fragestellung

Die zentrale Fragestellung der Studie ergibt sich aus der Ausschreibung des beauftragenden Department for Energy and Climate Change (DECC). Demnach sollten sowohl das technische als auch das ökonomische Potential der Nutzung industrieller Abwärme in Großbritannien untersucht werden. In die Untersuchung sollten sowohl neue Industrieanlagen als auch Bestandsanlagen einbezogen werden. Der Zeithorizont der Untersuchung reicht bis zum Jahr 2050.

Ergebnisse bezüglich Abwärmepotentiale auf Landesebene

Der Studie zufolge hängt das Potential der Abwärmenutzung von multiplen Faktoren ab. Dazu gehören Charakteristika der Abwärmequellen und Wärmesenken wie die Kompatibilität (bspw. Temperaturniveau, zeitliche Verfügbarkeit, Ort, Kapazität), die Verfügbarkeit passender Technologien zur Abwärmenutzung sowie die Preise von Energie und CO₂.

Die Gesamtmenge der Abwärme wird auf rund 48 TWh/a beziffert. Das technische Potential zur Nutzung dieser Abwärme als Kombination von Maßnahmen mit der größtmöglichen CO₂-Emissionsvermeidung wird auf 11 TWh/a beziffert. Werden ökonomische Anforderungen an dieses technische Potential gestellt (z.B. möglichst hoher Kapitalwert), reduziert sich dessen Wert auf 8 TWh/a (bei einer Verzinsung von 3,5 %) bzw. 7 TWh/a (bei einer Verzinsung von 10 %). Darüber hinaus wurde das technische und ökonomische Potential, welches die Anforderungen einer zügigen Amortisation (innerhalb von zwei Jahren) erfüllt, berechnet. Dieses Potential wird auf ca. 5 TWh/a beziffert.³²

³² Vgl. (Element Energy et al., 2014, S. 1, 17 & 39)

Die folgende Tabelle zeigt einen Überblick der oben genannten Ergebnisse:

Art des Potentials	Absoluter Wert	Relativer Wert
Technisch	11 TWh/a	
Ökonomisch nutzbar	7 – 8 TWh/a	2,4 % ³³ des industriellen Gesamtenergieverbrauchs in UK; ca. 4 % des Energieverbrauchs der acht wärmeintensivsten Sektoren
Zügige Amortisation	5 TWh/a	

Tabelle 4-12: Potentialüberblick (Studie: The potential for recovering and using surplus heat from industry)

Der größte Anteil des ökonomischen und kommerziellen Potentials der Abwärmennutzung liegt laut Studie auf industriellen Anlagen. Sollen weitere Potentiale genutzt werden, entstände der Bedarf an Wärmenetzen, um verschiedene Industrieanlagen miteinander oder mit Wohngebieten zu verbinden.³⁴ In der Studie wurde auch eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, deren Ergebnis zeigt, dass ein starker Einfluss auf die Menge der unter ökonomischen Gesichtspunkten nutzbaren Abwärme einerseits von den Investitionskriterien (verwendeter interner Zinssatz)³⁵ und andererseits erwartungsgemäß von der Menge der anfallenden industriellen Abwärme ausgehe.³⁶

4.3.5 Analyse für das Vereinigte Königreich (McKenna et al. 2010)

Titel	Spatial modelling of industrial heat loads and recovery potentials in the UK
Autor(en)	McKenna & Norman
Veröffentlichungsdatum	Juni 2012

Tabelle 4-13: Titel, Autor(en), Auftraggeber und Veröffentlichungsdatum der Studie (Spatial modelling of industrial heat loads and recovery potentials in the UK)

³³ bezogen auf den Wert 7 TWh

³⁴ Vgl. (Element Energy et al., 2014, S. 39)

³⁵ zügige Amortisation bspw. 2 Jahre mit Zinssatz 10 % ggü. sozialerem Zinssatz von 3,5 %

³⁶ Vgl. (Element Energy et al., 2014, S. 39)

Zentrale Fragestellung

Die Studie versucht Wärmenutzer hinsichtlich breiter Temperaturbänder zu kategorisieren, Wärmenutzungen und Abwärmeströme differenziert nach Temperaturniveaus zu quantifizieren sowie das technische Potential zur Abwärmenutzung anhand der momentan verfügbaren Technologien abzuschätzen.³⁷ Bei der angewandten Methode wird ausgehend von den gemäß nationalem Allokationsplan (NAP) des europäischen Emissionshandelssystems anlagenspezifisch zugeteilten Emissionsberechtigungen mithilfe von Prozessinformationen (bspw. die Art der Prozesse, Lastfaktoren, Brennstoffaufteilungen, Temperaturprofilen und bei Kraft-Wärme-Kopplung das Verhältnis von Wärme und Strom) auf die Wärmelast zurück gerechnet. Mit Identifizierung der anfallenden Wärmelast erfolgt die Ermittlung des technisch nutzbaren Abwärmepotentials durch die Bestimmung der Abwärmeströme und durch Schätzung der zurückgewinnbaren Wärmeanteile.³⁸ Abweichende Methoden wurden für Sektoren (Stahl, Aluminium, Chemie, Kalk) gewählt, für die keine NAP-Daten verfügbar sind und/oder die heterogen sind.³⁹

Ergebnisse bezüglich Abwärmepotentiale auf Landesebene

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass mit ca. 80 % der größte Anteil des Potentials zur Abwärmenutzung in den Sektoren Eisen, Stahl, Chemie, Zement und Glas zu finden ist, wobei die Sektoren Stahl und Eisen zusammen ca. 50 % ausmachen. Hauptsächlich liegt dieses Potential im Temperaturbereich zwischen 100 und 500 °C. Betrachtet man das jährliche technische Potential, welches pro Anlage genutzt werden kann, ist das größte durchschnittliche Potential mit ca. 2,7 PJ/a (ca. 750 GWh/a) in den Sektoren Eisen und Stahl zu finden. An zweiter und dritter Stelle finden sich die Sektoren Aluminium mit ca. 0,6 PJ/a (ca. 167 GWh/a) und Zement mit ca. 0,3 PJ/a (ca. 83 GWh/a). Die anlagenspezifischen Potentiale der anderen Sektoren sind deutlich geringer.⁴⁰

Die quantitative Abschätzung für das Gesamtpotential zur Abwärmenutzung im industriellen Sektor in Großbritannien liegt bei 36 bis 71 PJ/a (ca. 10 bis 20 TWh/a).⁴¹

³⁷ Vgl. (McKenna & Norman, 2010, S. 5878)

³⁸ Vgl. (McKenna & Norman, 2010, S. 5879ff)

³⁹ Vgl. (McKenna & Norman, 2010, S. 5879)

⁴⁰ Vgl. (McKenna & Norman, 2010, S. 5889)

⁴¹ Vgl. (McKenna & Norman, 2010, S. 5889)

4.3.6 Gegenüberstellung vom Möglichkeiten zur Verstromung von industrieller Abwärme und ihrer Einspeisung in Wärmenetze für den Bezirk Gävleborg in Schweden (Broberg Viklund et al. 2014)

Titel	Industrial excess heat use: Systems analysis and CO ₂ emissions reduction
Autor(en)	Broberg Viklund, Karlsson
Veröffentlichungsdatum	2014

Tabelle 4-14: Titel, Autor(en), Auftraggeber und Veröffentlichungsdatum der Studie (Industrial excess heat use: Systems analysis and CO₂ emissions reduction)

Zentrale Fragestellung

Das übergeordnete Ziel dieser Studie besteht in der Analyse des Energiesystems, um die Implikationen einer zukünftigen Nutzung industrieller Abwärme - bspw. zur Fernwärmeversorgung oder auch zur Stromerzeugung - zu identifizieren. Konkret bedeutet das, dass in der Studie durch die Erstellung von sechs verschiedenen Marktszenarien vielfältige Faktoren analysiert werden. Das Optimierungstool ‚reMIND‘ wird dazu genutzt, die Systemkosten durch Variation dieser Faktoren zu minimieren. D.h. es wird ermittelt, in welcher Weise industrielle Abwärme genutzt werden kann, um minimale Systemkosten zu erreichen. In der Studie werden keine absoluten Systemkosten ermittelt. Vielmehr wird untersucht, in welchem Maße sich die unbekanntenen Kosten in einem System mit Abwärmennutzung im Vergleich zu einem System ohne Abwärmennutzung reduzieren. Des Weiteren werden über die Systemkosten hinaus die Effekte der Abwärmennutzung auf die CO₂-Emissionen analysiert.

Ergebnisse bezüglich Abwärmepotentiale auf Landesebene

Der Endenergieverbrauch in Gävleborg County lag im Jahr 2011 bei etwa 20 TWh/a. Damit einher gingen Emissionen von ca. 1,58 Mt CO₂/a. Der jährliche Endenergiebedarf der ansässigen energieintensiven Industrien beträgt ungefähr 11,3 TWh/a. Die in der Studie dargestellten Abwärmepotentiale wurden einer Umfrage unter den in Gävleborg County (Schweden) ansässigen Industrieunternehmen entnommen.⁴² Die Industrieunternehmen, die auf die Umfrage geantwortet haben, berichten ein bis zu dem Zeitpunkt ungenutztes Abwärmepotential von ca. 0,8 TWh/a (8,4 % der Endenergienutzung der antwortenden Unternehmen).

⁴² Vgl. (Broberg Viklund & Johansson, Technologies for utilization of industrial excess heat - potentials for energy recovery and CO₂ emission reduction, 2014) Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass diese Erhebung bereits genutzte Abwärmepotentiale ausschließt und dass die Antwortquote bei lediglich 33 % liegt, sodass vermutlich weitere Potentiale vorhanden sind.

Gemäß den Studienergebnissen zeigen die Analyse des Energiesystems und die Modellierung der bisher ungenutzten Abwärmepotentiale, dass es vorteilhaft ist, die Abwärme der Verwendung in Fernwärme- und Fernkältenetzen zuzuführen. Die Verstromung der Abwärme durch ORC-Prozesse habe unter den gegebenen Rahmenbedingungen ökonomische Nachteile, was vermutlich an der bisher zu niedrigen Effizienz der ORC-Anlagen (8,4 bis 20 %) liege.

In den Fällen, in denen die Fernwärmeversorgung auf Kraft-Wärme-Kopplung basiert, ergeben die Analyse der Szenarienergebnisse u.a. folgende Zusammenhänge:⁴³

- Ein niedriger Strompreis begünstigt die Nutzung von Abwärme zur Fernwärmeversorgung, da die Einsparungen durch substituierte Brennstoffe bei der Wärmebereitstellung u.a. höher sind als die Stromerlöse des alternativen Betriebs der KWK.
- Ein hoher Strompreis begünstigt die Nutzung von Abwärme in Fernkälteanwendungen.

Des Weiteren reduziere die Abwärmennutzung nicht nur die Systemkosten, sondern auch die CO₂-Emissionen werden in allen untersuchten Szenarien, im Vergleich zu einer Situation ohne Abwärmennutzung, reduziert. Die Ursache der Reduzierung der Emissionen resultiert aus einer Verringerung des Strombedarfs in Fernkältesystemen und Brennstoffen der Fernwärmeversorgung.

4.3.7 Overview of waste heat in the industry in France (Berthou et al. 2012)

Titel	Overview of waste heat in the industry in France
Autor(en)	Berthou, Bory
Veröffentlichungsdatum	2012

Tabelle 4-15: Titel, Autor(en), Auftraggeber und Veröffentlichungsdatum der Studie (Overview of waste heat in the industry in France)

Zentrale Fragestellung

Diese Studie verfolgt das Ziel, die Abwärmemenge des produzierenden Gewerbes in Frankreich zu evaluieren. Diese Evaluation erfolgt durch den Abgleich von Datengrundlagen zu den Energieverbräuchen der französischen Industrie mit einer Datenbank zur Charakterisierung von Technologien von Wärmeanwendungen. Diese Daten werden durch Expertise zu Industriesektoren und entsprechenden Prozessen vervollständigt.

⁴³ Vgl. (Broberg Viklund & Karlsson, Industrial excess heat use: Systems analysis and CO₂ emissions reduction., 2014, S. 8)

Ergebnisse bezüglich Abwärmepotentiale auf Landesebene

Die französische Industrie verbraucht ca. 423 TWh/a, was ca. 25 % des gesamten nationalen Endenergieverbrauchs darstellt. In der Studie werden ca. 70 % (ca. 300 TWh) des Energieverbrauchs durch Analysen abgedeckt. Die jährliche Abwärmemenge wird mit ca. 110 TWh beziffert.⁴⁴ Eine Abschätzung des technisch nutzbaren Abwärmepotentials wird nicht gegeben.⁴⁵ 80 % der gesamten Abwärme fällt in den fünf großen Industriesektoren – ‚Lebensmittel‘, ‚Papier- und Zellstoffindustrie‘, die ‚Industrien chemischer Grundstoffe‘ sowie ‚sonstiger Erzeugnisse aus nichtmetallischen Mineralien‘ und der Sektor der ‚Investitionsgüter‘.⁴⁶

4.3.8 Einsatz von Wärmepumpen zur Abwärmenutzung in der französischen Industrie (Dupont et al. 2009)

Titel	The heat recovery potential in the French industry: which opportunities for heat pump systems?
Autor(en)	Maxime Dupont, Eugenio Sapora
Veröffentlichungsdatum	2009

Tabelle 4-16: Titel, Autor(en), Auftraggeber und Veröffentlichungsdatum der Broschüre (Technologien der Abwärmenutzung)

Zentrale Fragestellung

Das Papier, das im Rahmen der ECEEE 2009 Summer Study erarbeitet wurde, versucht einen Überblick darüber zu geben, in welchem Umfang und in welchem Industriezweig in Frankreich nutzbare Wärme im Niedertemperaturbereich anfällt und rechnet Ergebnisse einzelner Sektoren auf die Landesebene hoch. In die Überlegungen fließen dabei Ergebnisse einer Literaturrecherche sowie unternehmensinternes Knowhow des französischen Versorgers Electricité de France (EDF) ein.

Ergebnisse bezüglich Abwärmepotentiale auf Landesebene

Der Studie liegen Befragungsergebnisse zum Energieverbrauch zugrunde, die EDF für jede Branche in Auftrag gegeben hat. Zur Vereinfachung der Darstellung werden in der Ausarbeitung sowohl Wärmebedarf als auch -Verbrauch zwei Temperaturniveaus zugeordnet: 0 bis 100°C und 100 bis 200°C. Diesem Spektrum können in Frankreich acht Industriesektoren zugeordnet werden, von denen die Herstellung von

⁴⁴ Vgl. (Berthou & Bory, 2012, S. 455)

⁴⁵ Jedoch enthält das Fazit der Studie die Angabe, dass ca. 109 TWh/a der Abwärme technisch genutzt werden können. Die Herleitung dieser Zahl ist jedoch nicht in der Studie enthalten. Zudem entspricht diese Zahl ungefähr dem insgesamt anfallenden Abwärmepotential, weshalb die Richtigkeit dieser Angabe bezweifelt werden muss.

⁴⁶ Vgl. (Berthou & Bory, 2012, S. 455)

Lebensmitteln, Molkerei- und Zuckerprodukten im Bereich unter 100°C und die Papier- und Zellstoffindustrie über 100°C die beiden dominantesten Zweige darstellen.

Die Studie postuliert, dass zum aktuellen Zeitpunkt gerade im unteren Niedertemperaturbereich zu wenig getan wird, obwohl gerade dort die Potentiale kostengünstig umgesetzt werden könnten, z.B. durch den Einsatz von Wärmepumpen. Diese könnten laut den Verfassern Nutzttemperaturen von bis zu 140°C zur Verfügung stellen und wären daher ideal zur Abwärmenutzung im Bereich bis 100°C geeignet.

Als die wichtigsten Abwärmequellen in der Industrie werden hierbei Luftkompressoren, Kühlgeräte und Waschmaschinen genannt, die Temperaturen zwischen 35 bis 70°C zur Verfügung stellen. Die Gesamtmengen an nutzbarer Abwärme für diese drei Wärmequellen werden mit 2,34 TWh/a (Kompressoren), 10,6 TWh/a (Kühlgeräte) und 1,9 TWh/a (Waschmaschinen) benannt, welche prinzipiell für Wärmepumpenanwendungen zur Verfügung stehen.

Die Studie vergleicht aber auch Wärmebedarf und Abwärmeangebot der genannten acht Branchen und kommt dabei auf einen Deckungsgrad von 43% - bei einer Bandbreite von 0,8% bis 131%. Es wird herausgestellt, dass nur in den folgenden vier Branchen ein ausreichender Deckungsgrad besteht, bei dem die Niedertemperaturnutzung mittels Wärmepumpe sinnvoll möglich erscheint, dort aber dafür jeweils über 100% liegt: Lebensmittel- und Getränkeproduktion (104%), Milcherzeugnisse (109%), Transportausrüstungen (127%) und Herstellung von Zement, Kalk und Gips (131%).

Da Wärmepumpensysteme in entsprechend großem Stil noch nicht verfügbar sind und die Frage nach der Wirtschaftlichkeit solcher Systeme somit noch nicht abschließend beantwortet werden kann, stellt das Papier heraus, dass der Einsatz von Wärmepumpen nur dann sowohl technisch als auch ökonomisch sinnvoll ist, wenn keine andere Wärmequelle verfügbar ist, deren Temperaturniveau über dem der Nachfrageseite liegt. Existiert eine solche höhere Wärmequelle, ist es laut den Verfassern immer sinnvoller diese zu nutzen.

4.3.9 Abwärme in der Nahrungs- und Getränkeindustrie in Frankreich (Hita et al. 2011)

Titel	Assessment of the potential of heat recovery in food and drink industry by the use of TIMES model
Autor(en)	Hita, Seck, Djemaa, Guerassimoff
Veröffentlichungsdatum	2011

Tabelle 4-17: Titel, Autor(en), Auftraggeber und Veröffentlichungsdatum der Studie (Assessment of the potential of heat recovery in food and drink industry by the use of TIMES model)

Zentrale Fragestellung

Diese Studie wurde angefertigt, um die Vorteile von Wärmepumpen in der französischen Lebensmittelindustrie hervorzuheben und die ökonomischen und technischen Konditionen des Markteintritts zu untersuchen. Insbesondere wurde untersucht, welche Sub-Sektoren der Lebensmittelindustrie sich für die Wärmerückgewinnung eignen und welcher Anteil der Rückgewinnung durch innovative Hoch-Temperatur-Wärmepumpen erreicht werden kann. Die Untersuchung erfolgt anhand einer Modellierung mit starker Untergliederung (4-Stellen NACE Klassifikation⁴⁷) mit elf verschiedenen Energienutzungsarten und acht Temperaturbereichen je Energienutzungsart.

Ergebnisse bezüglich Abwärmepotentiale auf Landesebene

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass der französischen Lebensmittelindustrie ein Anteil von ca. 12 % am Gesamtenergieverbrauch der französischen Industriesektoren zukommt. Bezüglich der Höhe des Energieverbrauchs liegt dieser Sektor an dritter Stelle nach den Sektoren ‚Stahl‘ und ‚Chemie‘. Viele der Wärmeanwendungen in der Lebensmittelindustrie erfolgen zwischen 60 und 140 °C.⁴⁸

Das technische Potential zur Substitution von Wärme im französischen Lebensmittelsektor liegt laut Studienergebnissen bei ca. 11 TWh/a oder 15 % des Endenergieverbrauchs im Sektor. Mit Bezug auf die Energiepreise in Frankreich von 2005 und die damalige Effizienz der Wärmepumpentechnologie, wird angegeben, dass ca. 30 % (ca. 3,6 TWh/a) des technischen Potentials unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten genutzt werden können. Es wird angenommen, dass der Anteil des wirtschaftlich nutzbaren Potentials auf 100 % gesteigert werden kann, wenn effizientere Wärmepumpen für den Temperaturbereich bis 140 °C verfügbar sind.⁴⁹

4.3.10 Nutzung thermophotovoltaischer Systeme im türkischen Industriesektor (Utlu et al. 2013)

Titel	Investigation of the potential of thermophotovoltaic heat recovery for the Turkish industrial sector
Autor(en)	Utlu, Parali
Veröffentlichungsdatum	2013

Tabelle 4-18: Titel, Autor(en), Auftraggeber und Veröffentlichungsdatum der Studie (Investigation of the potential of thermophotovoltaic heat recovery for the Turkish industrial sector)

⁴⁷ Statistische Systematik der Wirtschaftszweige in der Europäischen Gemeinschaft

⁴⁸ Vgl. (Hita, Seck, Djemaa, & Guerassimoff, 2011, S. 736)

⁴⁹ Vgl. (Hita, Seck, Djemaa, & Guerassimoff, 2011, S. 741 & 743)

Zentrale Fragestellung

Diese Studie untersucht das Potential der thermophotovoltaischen Abwärmenutzung zur Steigerung der Energieeffizienz in der türkischen Industrie und ihren Subsektoren.⁵⁰ Für die Analysen werden acht Industriezweige ausgewählt, die zusammen 95 % des Energieverbrauchs des gesamten Industriesektors ausmachen.⁵¹

Für die Analysen wird in der Studie zunächst die Technologie der thermophotovoltaischen Wärmerückgewinnung erläutert. Anschließend werden die Industriesektoren bezüglich Wärmerückgewinnung im Allgemeinen analysiert um darauf folgend explizit auf die Wärmerückgewinnung anhand von thermophotovoltaischen Lösungen einzugehen. Diesbezüglich werden drei prinzipielle Orte betrachtet: Rückgewinnung der Wärme in den Produkten, in den Abgasen und in den Wänden. Für jeden dieser prinzipiellen Orte wird ein Beispiel im Detail betrachtet.⁵²

Ergebnisse bezüglich Abwärmepotentiale auf Landesebene

Bei thermophotovoltaische Systemen handelt es sich um statische Energiewandler, die keine beweglichen Teile besitzen. Sie wandeln Schwarzkörperstrahlung (Wärmeenergie) in Elektrizität, ähnlich zur herkömmlichen Photovoltaik, bei der Licht im sichtbaren Spektrum gewandelt wird. Es wird auf eine Quelle⁵³ verwiesen, die besagt, dass diese Systeme aufgrund des geringeren Bandabstandes sowie des geringeren Abstands zwischen Emitter und der aktiven Region der Diode höhere Effizienzniveaus und höhere Output-Energiedichten erreichen können. In weiteren genannten Quellen wird auf eine hohe Flexibilität bezüglich des Energieinputs⁵⁴ und u.a. hohe Zuverlässigkeit mit wartungsfreiem und geräuschlosem Betrieb⁵⁵ hingewiesen.

⁵⁰ Vgl. (Utlü & Parali, 2013, S. 308)

⁵¹ Vgl. (Utlü & Parali, 2013, S. 317)

⁵² Vgl. (Utlü & Parali, 2013, S. 309)

⁵³ Vgl. Zhai X, Lai J, Liang H, Chen S. Performance analysis of thermophotovoltaic system with an equivalent cut-off blackbody emitter. J Appl Phys 2010;108:074507.

⁵⁴ Vgl. Bosi M, Ferrari C, Melino F, Pinelli M, Spina PR, Venturini M. Thermophotovoltaic generation: a state of the art review. In: Proceedings of the 25th int conf on efficiency, cost, optimization, simulation and environmental impact of energy systems 2012, Perugia, Italy. / Andreev VM, Khvostikova VP, Khvostikova OA, Romyantsev VD, Gazarjan PY, Vlasov AS. Solar thermophotovoltaic converters: efficiency potentialities. In: Conf on thermophotovoltaic generation of electricity; 2004. / Qiu K, Hayden ACS. Thermophotovoltaic generation of electricity in a gas fired heater: influence of radiant burner configurations and combustion processes. Energy Convers Manage 2003;44:2779–89./ Colangelo A, de Risi A, Laforgia A. Experimental study of a burner with high temperature heat recovery system for TPV applications. Energy Convers Manage 2006;47:1192–206. / Lindler KW, Harper MJ. Combustor/Emitter design tool for a thermophotovoltaic energy converter. Energy Convers Manage 1998;39:391–8. / Bauer T. Thermophotovoltaics: basic principles and critical aspects of system design. Berlin: Springer; 2011. ISBN:1865-3529.

⁵⁵ Vgl. Bosi M, Ferrari C, Melino F, Pinelli M, Spina PR, Venturini M. Thermophotovoltaic generation: a state of the art review. In: Proceedings of the 25th int conf on efficiency, cost, optimization, simulation and environmental impact of energy systems 2012, Perugia, Italy. / www.thermalfuidscentral.org.

Die Studienergebnisse beziffern das Abwärmepotential der betrachteten Industriezweige und für die in Betracht gezogenen ‚Orte‘ (Produkte, Abgase, Wände) mit ca. 448 PJ. Das anhand der Effizienz der thermophotovoltaischen Technologie nutzbare Potential liege hingegen zwischen ca. 22 und 67 PJ (6,1 und 18,6 TWh) ($\eta = 5\%$ bis 15%). Das größte technische Potential bestehe in den Industriezweigen Eisen und Stahl, da hier eine Übereinkunft von Hochtemperaturanwendungen und hochqualitativen Brennstoffen vorliege.⁵⁶

Mit dieser Art der Abwärmenutzung können große Mengen an Emissionen eingespart werden, eine genaue Bezifferung der möglichen Einsparungen wird jedoch nicht durchgeführt.⁵⁷

4.3.11 Einsatz von ORC-Prozessen in energieintensiven Industrien in Italien (Campana et al. 2013)

Titel	ORC waste heat recovery in European energy intensive industries: Energy and GHG savings
Autor(en)	Campana, Bianchi, Branchini, De Pascale, Peretto, Baresi, Fermi, Rosetti, Vescovo
Veröffentlichungsdatum	2013

Tabelle 4-19: Titel, Autor(en), Auftraggeber und Veröffentlichungsdatum der Studie (ORC waste heat recovery in European energy intensive industries: Energy and GHG savings)

Zentrale Fragestellung

Diese Studie enthält eine Abschätzung des Potentials zur Verstromung der Abwärme anhand des ‚Organic Rankine Cycle‘ (ORC) in den energieintensiven Industriesektoren in Europa (EU27). Diese Abschätzung basiert auf einer zahlenmäßig reduzierten Gruppe an Inputparametern und einer hohen Anzahl an Installationen. Zu diesem Zweck wird zunächst untersucht, wieviel Leistung anhand von ORC-Anlagen in ausgewählten Anwendungen⁵⁸ in den energieintensiven Sektoren Zement, Stahl und Glas sowie in Gaskompressorstationen und Gasspeicherfeldern installiert werden kann. Des Weiteren wird das zurückgewinnbare Abwärmepotential als Funktion der Anlageneinsatzstunden sowie die korrespondierenden Energie-, Kosten- und Emissionseinsparungen bestimmt.

⁵⁶ Vgl. (Utlu & Parali, 2013, S. 321)

⁵⁷ Vgl. (Utlu & Parali, 2013, S. 321)

⁵⁸ Diese Anwendungen sind: Elektrolichtbogenofen, Metallwalzwerk, Ziegelsteinproduktion, Floatglasherstellung
Vgl. (Campana, et al., 2013, S. 245)

Ergebnisse bezüglich Abwärmepotentiale auf Landesebene

Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass die Abwärmenutzung und darunter insbesondere die Installation von ORC-Anlagen realisierbare Optionen zur Anwendung in verschiedenen Industrien darstellen. In der Studie wird berechnet, dass in ausgewählten Anwendungen (siehe Fußnote 58) in den Sektoren Zement, Stahl und Glas sowie in Gaskompressorstationen und Gasspeicherfeldern anhand von ORC-Anlagen eine Bruttostromerzeugungsleistung von ca. 2.705 MW installiert werden kann. Unter den ermittelten Rahmenbedingungen würden auf diese Weise ca. 21,6 TWh/a an Strom erzeugt werden können, was zu jährlichen Kosteneinsparungen von bis zu 1,95 Milliarden führt. Die Menge der vermiedenen CO₂-Emissionen kann bis zu 8,1 Mio. Tonnen betragen.⁵⁹

Diese Studienergebnisse beziehen sich ausdrücklich auf die oben erläuterte Auswahl realer Industrieanlagen, die zum Zeitpunkt der Studiendurchführung in Betrieb waren oder errichtet wurden. Diese Studie versteht sich als Startpunkt, von dem aus das Potential von ORC-Anlagen mit der in dieser Studie vorgestellten Methode in anderen Sektoren oder Weltregionen untersucht werden kann.⁶⁰

4.4 Zusammenfassung der Studien

Die Studienanalyse zeigt, dass in den unterschiedlichen Ländern ähnliche Herausforderungen bestehen: Aufgrund fehlender Datengrundlagen sind Abwärmepotentiale häufig nur theoretisch über die Endenergieverbräuche abzuschätzen. Es werden dabei unterschiedliche Produktionsbranchen näher betrachtet und prozentuale Anteile zur Verfügung stehender Abwärme am jeweiligen Endenergieverbrauch ermittelt. Für branchenübergreifende Potentialabschätzungen werden teilweise Bezugsgrößen wie der Endenergieverbrauch des jeweiligen Landes oder ganzer Industriesektoren der Länder herangezogen. In anderen Studien werden die Ergebnisse nicht in Relation zu einer Bezugsgröße gesetzt sondern mit Energie- oder Leistungsangaben quantifiziert. Teilweise werden - über Abwärmepotentiale hinaus - auch technische und ökonomische Potentiale sowie Potentiale zur Emissionsvermeidung abgeschätzt. Eine Übersicht der identifizierten Kernaussagen findet sich im Anhang in Tabelle 11-7.

Grundsätzlich zeigen die Potentialabschätzungen, dass die Industriesektoren z.T. erhebliche ungenutzte Abwärmepotentiale aufweisen. Insbesondere scheinen große Potentiale in den energieintensiven Sektoren Eisen und Stahl vorhanden zu sein, die z.B. laut McKenna & Norman (2012) allein ca. 50 % des Abwärmepotentials der Britischen Industrie in sich vereinen. In derselben Studie wird auch berechnet, dass

⁵⁹ Vgl. (Campana, et al., 2013, S. 251)

⁶⁰ Vgl. (Campana, et al., 2013, S. 251)

das technische Potential einer einzigen Anlage im Bereich Eisen und Stahl ca. 750 TWh/a beträgt.⁶¹

Aber auch in den Sektoren Chemie, Zement und Glas sind bedeutende Abwärmepotentiale vorhanden. Laut U.S. Department of Energy (2004) müssen bspw. rund 36 % der in der Chemiebranche eingesetzten Endenergie als Verlustenergie verzeichnet werden.

In verschiedenen Studien wird die Möglichkeit der Verstromung von Abwärmepotentialen mittels ORC-Anlagen thematisiert. HREII DEMO Observatory (2013) bspw. beziffert das europaweite Potential von zur Wärmerückgewinnung und Verstromung vollständig in die Abgasreinigungssysteme von Lichtbogenöfen integrierte ORC-Anlagen mit 13 bis 20 TWh/a, wobei letzterer Wert rund 4,8 % des Stromverbrauchs der europäischen Industrie in 2009 entspräche. Broberg Viklund & Karlsson (2014) hingegen zeigen, dass es unter den in der Studie dargestellten Rahmenbedingung vorteilhafter ist, die Abwärme der Verwendung in Fernwärme- und Fernkältenetzen zuzuführen, als sie durch ORC-Prozesse zu verstromen.

Ein Teil der untersuchten Studien befasst sich mit der Abwärmenutzung im Lebensmittel-Sektor, der im Gegensatz zu den energieintensiven Industrien durch niedrigere Prozesstemperaturen geprägt ist. Nach Hita et al. (2011) liegen viele der Wärmeanwendungen in der Lebensmittelindustrie im Temperaturbereich zwischen 60 und 140 °C. Dabei nehme der Lebensmittelsektor einen Anteil von rund 12 % am Energieverbrauch der französischen Industrie ein. Das technische Potential zur Substitution von Wärme im französischen Lebensmittelsektor wird mit einem 15 %-Anteil am Endenergieverbrauch der französischen Lebensmittelindustrie beziffert. Auch (Dupont et al. 2009) stellen klar, dass zum aktuellen Zeitpunkt gerade im unteren Niedertemperaturbereich zu wenig getan wird, obwohl gerade dort die Potentiale kostengünstig umgesetzt werden könnten, z.B. durch den Einsatz von Wärmepumpen. Diese könnten laut den Verfassern Nutzttemperaturen von bis zu 140°C zur Verfügung stellen und wären daher ideal zur Abwärmenutzung im Bereich bis 100°C geeignet. Als die wichtigsten Abwärmequellen in der Industrie werden hierbei Luftkompressoren, Kühlgeräte und Waschmaschinen genannt, die Temperaturen zwischen 35 bis 70°C zur Verfügung stellen.

Ein Großteil der diskutierten Technologien zur Nutzung der Abwärmeströme bezieht sich auf flüssige oder gasförmige Medien. Eine interessante und anscheinend wenig beachtete Entwicklung dürfte die Technologie der thermophotovoltaischen Wärme-

⁶¹ Vgl. (McKenna & Norman, 2010)

rückgewinnung darstellen, bei der Wärmeenergie in Form von Schwarzkörperstrahlung in Elektrizität gewandelt wird. Auf diese Weise können neben Abgasen auch Produkte oder Anlagen und Gebäudebauteile wie Wände zur Verstromung von Abwärme genutzt werden.

Eine Übertragbarkeit der Erkenntnisse der untersuchten Arbeiten auf Deutschland ist nur bedingt möglich. Anhaltspunkte - vor allem im technologischen Sinne - bieten jedoch die branchenspezifischen Potentialabschätzungen. Im Fokus sollten aufgrund der großen Abwärmepotentiale zunächst die energieintensiven Branchen sein:

- die Metallerzeugung und -bearbeitung,
- die Herstellung von chemischen Erzeugnissen,
- die Herstellung von Glaswaren, Keramik,
- die Verarbeitung von Steinen und Erde,
- die Herstellung von Papier, Pappe und Waren,
- der Kohlenbergbau,
- die Herstellung von Nahrungs- und Futtermittel sowie
- die Kokerei und Mineralölverarbeitung.

Gemeinschaftliche branchenspezifische Forschungs- und Demonstrationsprojekte auf EU-Ebene könnten hier Abhilfe schaffen. Darin sollten auch die Ergebnisse der BMUB-Projekte zur Entwicklung von Benchmarks mit einbezogen werden.

5 Überschlägige Potentialabschätzung

Abwärme ist ein Abfallprodukt. Sie fällt in der Regel bei allen energetischen Umwandlungsprozessen an. Insbesondere beim Einsatz von Primärenergieträgern erhält man neben Exergie einen erheblichen Anteil Anergie (insbesondere Abwärme). Besonders der Sektor ‚verarbeitendes Gewerbe‘ steht hier im Vordergrund.

Der Haushaltssektor und der Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistung sind geprägt von niedrigen Wärmetemperaturen aufgrund des mehrheitlichen Einsatzes von Heizungs- und Brauchwasser mit geringer Exergie. Der Verkehrsbereich birgt mit großer Wahrscheinlichkeit ausgeprägte Potentiale zur Nutzung von Abwärme (Abgase), dieser soll hier aber nicht weiter berücksichtigt werden. Die meisten Potentiale sind in der Industrie bzw. im verarbeitenden Gewerbe zu erwarten und hier sind definitiv Herausforderungen für eine Bestimmung zu sehen. Die Gründe liegen sind vielfältig:

Das verarbeitende Gewerbe besteht aus grundverschiedenen Branchen, welche in den Unternehmensgrößen sehr heterogen geprägt sind. Dies bedeutet, dass unterschiedliche Technologien, Energieträger und Produktionsprozessen zum Einsatz kommen, welche aus alten Anlagen aber natürlich auch aus hocheffizienten modernen Maschinen bestehen können. Auch ist nicht klar, inwieweit Abwärme bereits genutzt wird.

Ziel im Rahmen dieser Studie ist daher lediglich die Bestimmung einer Größenordnung für ein Abwärmepotential, welches jedoch weder technisch- noch ökonomisch belastbar ist.

Für die Bestimmung wurden Primärenergiedaten von Seiten des statistischen Bundesamtes aus dem Jahr 2008 für das gesamte nationale verarbeitende Gewerbe herangezogen. In diesen Daten werden übergeordnete Branchen nach der Klassifikation der Wirtschaftszweige von 2008 (2-Stellen) dargestellt. Eine Erkenntnis ist, dass die Datengrundlage bzgl. ungenutzter Wärme letztlich unzureichend ist und hier Verbesserungsbedarf wünschenswert wäre.

Für die Berechnung der Potentiale wurden folgende Annahmen getätigt.

- Basierend auf dem von der AG Energiebilanzen verwendeten Primärenergie/Endenergieverhältnis wurden die Endenergieverbräuche für die unterschiedlichen Energieträger pro Branche ermittelt.⁶²

⁶² Quelle AG Energiebilanzen

- Der gemittelte Anteil an Prozesswärme am Endenergieanteil wurde auf 66,8 % festgelegt⁶³
- Der theoretisch nutzbare Anteil an Abwärme von der Prozesswärme beträgt 60 %⁶⁴
- Bei einer reinen Wärmenutzung können 90 %⁶⁵ der Abwärme genutzt werden
- Bei einer Verwertung der Abwärme zur max. Stromherstellung (Dampfturbine, Stirlingmotor, ORC-Prozess) werden 15 %⁶⁶ Wirkungsgrad angenommen

Die nachfolgende Tabelle in verkürzter Form stellt das gesamte Abwärmepotential dar. Dabei wird zwischen der reinen Abwärmenutzung und dessen Verstromung unterschieden. Die vollständige Tabelle mit den Berechnungen kann dem Anhang entnommen werden.

WZ Schlüssel	Bezeichnung (Verarbeitendes Gewerbe)	Betriebe	(End-) Energieverbrauch insgesamt (Kohle, Heizöl, Erdgas, Strom)	Anteil in %	(End-) Energieverbrauch pro Betrieb	Mögliche th. Wärmenutzung W _{th}	Mögliche th. Stromnutzung W _{el}
		Anzahl	GJ	%	GJ/Betrieb	GWh	GWh
WZ08-24	Metallerzeugung und -bearbeitung	1.096	640.415.633	28,45%	584.321	64.170	10.695
WZ08-20	Herstellung von chemischen Erzeugnissen	1.559	505.618.167	22,46%	324.322	50.663	8.444
WZ08-23	H.v.Glas-,waren,Keramik,Verarb. v.Steinen u.Erden	3.236	198.700.598	8,83%	61.403	19.910	3.318
WZ08-17	Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus	974	162.223.465	7,21%	166.554	16.255	2.709
WZ08-05	Kohlenbergbau	42	143.702.389	6,38%	3.421.485	14.399	2.400
WZ08-10	Herstellung von Nahrungs- und Futtermitteln	5.175	136.350.314	6,06%	26.348	13.662	2.277
WZ08-19	Kokerei und Mineralölverarbeitung	66	64.628.778	2,87%	979.224	6.476	1.079
WZ08-29	Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen	1.369	62.190.444	2,76%	45.428	6.231	1.039
WZ08-25	Herstellung von Metallerzeugnissen	7.109	58.639.877	2,60%	8.249	5.876	979
WZ08-28	Maschinenbau	6.027	51.900.238	2,31%	8.611	5.200	867
WZ08-22	Herstellung von Gummi- und Kunststoffwaren	3.144	46.621.008	2,07%	14.829	4.671	779
WZ08-11	Getränkeherstellung	621	21.051.605	0,94%	33.900	2.109	352
WZ08-27	Herstellung von elektrischen Ausrüstungen	2.210	19.561.097	0,87%	8.851	1.960	327
WZ08-26	H.v. DV-Geräten, elektron. u. opt. Erzeugnissen	1.780	18.876.910	0,84%	10.605	1.891	315
WZ08-08	Gewinnung von Steinen und Erden, sonstiger Bergbau	1.053	18.577.628	0,83%	17.643	1.861	310
WZ08-16	H.v. Holz-, Flecht-, Korb-u.Korkwaren (ohne Möbel)	1.270	16.053.613	0,71%	12.641	1.609	268
WZ08-13	Herstellung von Textilien	794	15.523.495	0,69%	19.551	1.555	259
WZ08-18	H.v. Druckerz., Vervielf.v.Ton-,Bild-,Datenträgern	1.643	13.442.415	0,60%	8.182	1.347	224
WZ08-21	Herstellung von pharmazeutischen Erzeugnissen	305	11.767.102	0,52%	38.581	1.179	197
WZ08-32	Herstellung von sonstigen Waren	1.577	11.041.675	0,49%	7.002	1.106	184
WZ08-31	Herstellung von Möbeln	1.056	10.812.192	0,48%	10.239	1.083	181
WZ08-06	Gewinnung von Erdöl und Erdgas	29	9.099.438	0,40%	313.774	912	152
WZ08-30	Sonstiger Fahrzeugbau	290	6.423.739	0,29%	22.151	644	107
WZ08-33	Reparatur u.Installation von Masch.u.Ausrüstungen	2.178	4.139.334	0,18%	1.901	415	69
WZ08-12	Tabakverarbeitung	27	1.558.065	0,07%	57.706	156	26
WZ08-14	Herstellung von Bekleidung	381	1.424.174	0,06%	3.738	143	24
WZ08-15	Herstellung von Leder, Lederwaren und Schuhen	168	906.286	0,04%	5.395	91	15
WZ08-09	Dienstleistungen f.d.Bergbau u.Gewinnung v.Steinen	13	64.953	0,00%	4.996	7	1
Summe		45.192	2.251.314.631	1 €	49.817	225.582	37.597

(Durchschnitt)

Tabelle 5-1: Darstellung des verarb. Gewerbes (WZ 2008 ; 2-Stellen) sortiert nach Endenergieverbrauch und den möglichen theoretischen Potentialen für eine Abwärmenutzung

Anmerkung: 1 GJ entspricht 1/3.600 GWh

Als erstes Ergebnis kann man festhalten, dass insgesamt und überschlägig

⁶³ Dieser Wert entspricht dem angewandten Wert der AG der Energiebilanzen

⁶⁴ Die 60 % nutzbaren Abwärmeanteile an der Prozesswärme wurden als überschlägige Annahme getroffen.

⁶⁵ Die 10 % Wärmeverlustanteile bei reiner Wärmenutzung wurden als überschlägige Annahme getroffen.

⁶⁶ Der Wirkungsgrad von Dampfturbinen, Stirlingmotoren und ORC-Anlagen pendelt zwischen 10-30 %, der mittlere Wirkungsgrad wurde daher auf 15 % festgelegt.

- **226 TWh/a theoretisch nutzbare Wärme zur Verfügung stehen (36 % des gesamten Endenergieanteil des Sektors) und**
- **38 TWh/a theoretisch nutzbarer Strom.**

Geht man bei den CO₂ Treibhausgasemissionen von durchschnittlich 270 g/kWh CO₂ für den Wärmemix⁶⁷ und durchschnittlich 601 g/kWh für den Strommix⁶⁸ aus, kommt man zu folgenden Einsparungen:

- ~ 60 Mio. tCO₂/a
- ~ 22 Mio. tCO₂/a

Bei dem berechneten Abwärmepotential gepaart mit den Emissionseinsparungen handelt es sich um ein idealisiertes und theoretisches Potentiale. In der Berechnung nicht berücksichtigt sind: technische Machbarkeit, Temperaturniveau bzw. Exergie und Verfügbarkeit.

In einem weiteren Schritt wurden die energieintensivsten Branchen, sortiert nach zwei Kriterien, aufgezeigt

WZ Schlüssel	Bezeichnung (Verarbeitendes Gewerbe)	Betriebe	(End-) Energieverbrauch insgesamt (Kohle, Heizöl, Erdgas, Strom)	Anteil in %	(End-) Energieverbrauch pro Betrieb	Mögliche th. Wärmenutzung W _{th}	Mögliche th. Stromnutzung W _{el}
		Anzahl	GJ	%	GJ/Betrieb	GWh	GWh
WZ08-24	Metallerzeugung und -bearbeitung	1.096	640.415.633	28,45%	584.321	64.170	10.695
WZ08-20	Herstellung von chemischen Erzeugnissen	1.559	505.618.167	22,46%	324.322	50.663	8.444
WZ08-23	H.v.Glas -waren, Keramik, Verarb. v.Steinen u.Erden	3.236	198.700.598	8,83%	61.403	19.910	3.318
WZ08-17	Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus	974	162.223.465	7,21%	166.554	16.255	2.709
WZ08-05	Kohlenbergbau	42	143.702.389	6,38%	3.421.485	14.399	2.400
WZ08-10	Herstellung von Nahrungs- und Futtermitteln	5.175	136.350.314	6,06%	26.348	13.662	2.277
WZ08-19	Kokerei und Mineralölverarbeitung	66	64.628.778	2,87%	979.224	6.476	1.079
WZ08-29	Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen	1.369	62.190.444	2,76%	45.428	6.231	1.039
WZ08-25	Herstellung von Metallerzeugnissen	7.109	58.639.877	2,60%	8.249	5.876	979
WZ08-28	Maschinenbau	6.027	51.900.238	2,31%	8.611	5.200	867
WZ08-22	Herstellung von Gummi- und Kunststoffwaren	3.144	46.621.008	2,07%	14.829	4.671	779
Summe		29.797	2.070.990.910	92%	69.503	207.513	34.586
Gesamt		45.192	2.251.314.631	100%	49.817	225.582	37.597
Prozentualer Anteil		65,9%	92,0%		(Durchschnitt)		

Tabelle 5-2: Top 11 Branchen des verarb. Gewerbes sortiert nach dem Endenergieverbrauch (2008)

⁶⁷ Prof. Dr. Georg Erdmann, Dipl.-Wirtsch.-Ing. Lars Dittmar ; „Technologische und energiepolitische Bewertung der Perspektiven von Kraft-Wärme-Kopplung in Deutschland“ ; März 2010 ; S.51

⁶⁸ UBA ; Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2012

WZ Schlüssel	Bezeichnung (Verarbeitendes Gewerbe)	Betriebe	(End-) Energieverbrauch insgesamt (Kohle, Heizöl, Erdgas, Strom)	Anteil in %	(End-) Energieverbrauch pro Betrieb	Mögliche th. Wärmenutzung W_{th}	Mögliche th. Stromnutzung W_{el}
		Anzahl	GJ	%	GJ/Betrieb	GWh	GWh
WZ08-05	Kohlenbergbau	42	143.702.389	6,38%	3.421.485	14.399	2.400
WZ08-19	Kokerei und Mineralölverarbeitung	66	64.628.778	2,87%	979.224	6.476	1.079
WZ08-24	Metallerzeugung und -bearbeitung	1.096	640.415.633	28,45%	584.321	64.170	10.695
WZ08-20	Herstellung von chemischen Erzeugnissen	1.559	505.618.167	22,46%	324.322	50.663	8.444
WZ08-06	Gewinnung von Erdöl und Erdgas	29	9.099.438	0,40%	313.774	912	152
WZ08-17	Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus	974	162.223.465	7,21%	166.554	16.255	2.709
WZ08-23	H.v.Glas,-waren,Keramik,Verarb. v.Steinen u.Erden	3.236	198.700.598	8,83%	61.403	19.910	3.318
WZ08-12	Tabakverarbeitung	27	1.558.065	0,07%	57.706	156	26
WZ08-29	Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen	1.369	62.190.444	2,76%	45.428	6.231	1.039
WZ08-21	Herstellung von pharmazeutischen Erzeugnissen	305	11.767.102	0,52%	38.581	1.179	197
WZ08-11	Getränkherstellung	621	21.051.605	0,94%	33.900	2.109	352
Summe		9.324	1.820.955.683	81%	195.298	182.460	30.410
Gesamt		45.192	2.251.314.631	100%	49.817	225.582	37.597
Prozentualer Anteil		20,6%	80,9%	(Durchschnitt)			

Tabelle 5-3: Top 11 Branchen des verarb. Gewerbes sortiert nach dem spez. Endenergieverbrauch pro Betrieb (2008)

Folgende Ergebnisse können den beiden Tabellen entnommen werden:

- Tabelle 1: Die elf energieintensivsten Branchen (dies entspricht 66 % aller Betriebe des verarbeitenden Gewerbes) decken 92 % des Endenergiebedarfs ab.
- Tabelle 2: Die elf Branchen mit 20 Prozent aller Betriebe des verarbeitenden Gewerbes decken 80 % des Endenergiebedarfs ab!

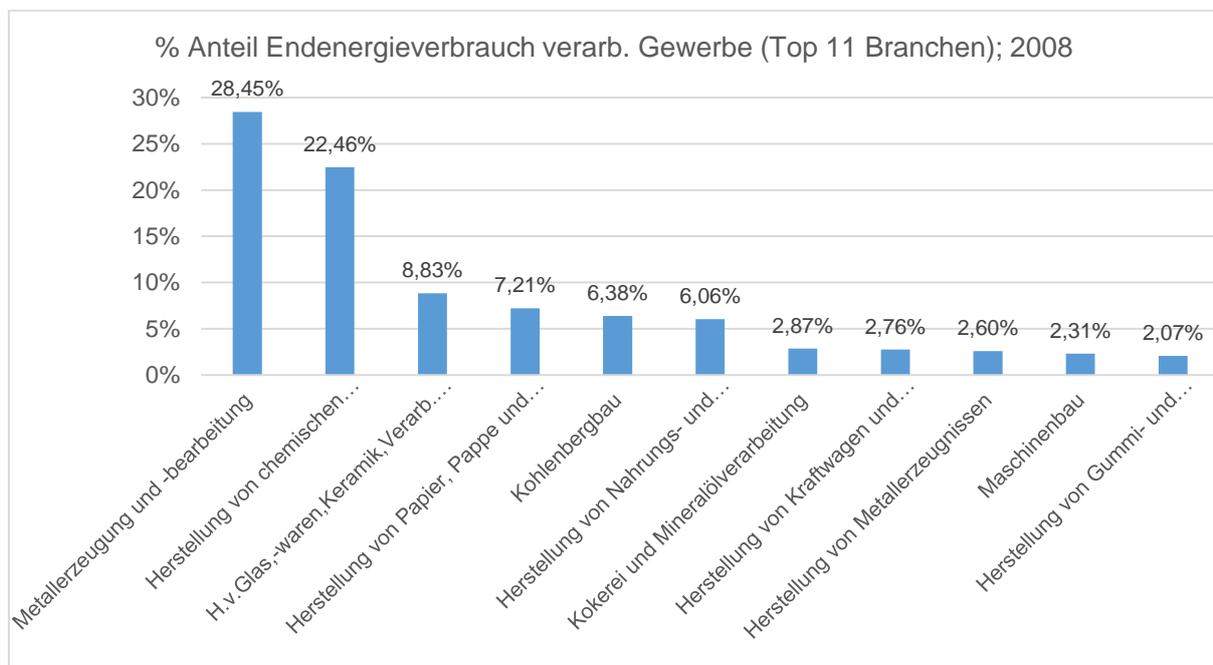


Abbildung 5-1: Top 11 Branchen des verarb. Gewerbes mit % Anteil an der Endenergie des Sektors

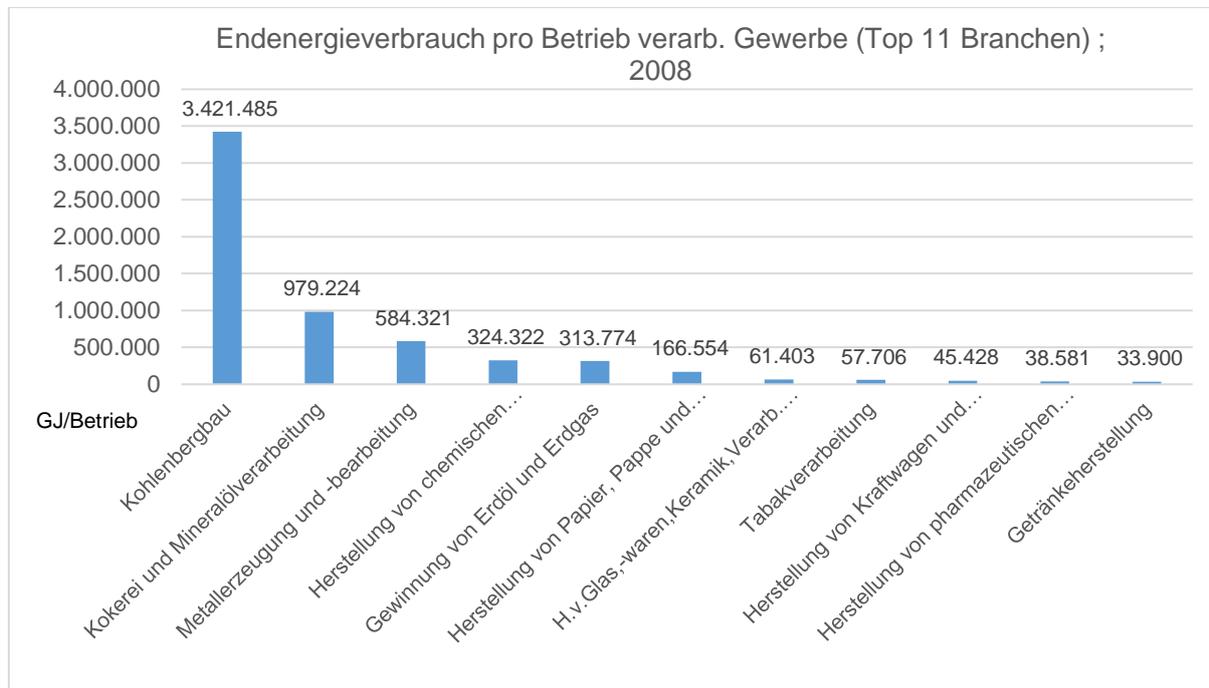


Abbildung 5-2: Top 11 Branchen des verarb. Gewerbes mit dem spez. Endenergieverbr. pro Betrieb

Für eine strategische Untersuchung und Nutzung von Abwärmequellen sollten daher die energieintensivsten Branchen mit den größten und energieintensivsten Betrieben gekreuzt und untersucht werden.

Zu diesem Thema ist aktuell im Februar 2015 ein dreijähriges Forschungsprojekt⁶⁹ mit dem Titel ‚Abwärmeatlas: Erhebung, Abschätzung und Evaluierung von industrieller Abwärme in Deutschland - Potentiale und Forschungsbedarf‘ angelaufen, welches versucht, auf diese Fragestellungen im Detail einzugehen.

Als Ergebnis kann man festhalten, dass im verarbeitenden Gewerbe aus dem Jahr 2008 ein überschlägiges und theoretisches Abwärmepotential von **225 TWh/a** (36 % des gesamten Endenergieanteil des Sektors, dies entspricht einer CO₂-Einsparung von ~ 60 Mio. tCO₂/a) und **37 TWh/a** nutzbarem Strom (dies entspricht einer CO₂-Einsparung von ~ 22 Mio. tCO₂/a) zur Verfügung stehen.

Die überschlägige Potentialabschätzung zeigt, dass für eine wesentliche Potentialerhebung für ein valides theoretisches- und im Idealfall technisches Potential, die nötigen Datengrundlagen nicht vorhanden sind.

⁶⁹ Das Forschungsprojekt ‚Abwärmeatlas‘ wird unter der FKZ 03ET1208 von Seiten des Fraunhofer Institut für Physikalische Messtechnik (Koordinator), dem Institut für Demoskopie Allensbach (Ifd Allensbach) und der IZES gGmbH (Institut für Zukunfts-EnergieSysteme) gemeinsam mit den beiden strategischen Partnern, dem Statistischen Bundesamt (DESTATIS) und Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung e.V. (DIW Berlin), umgesetzt. Das Projekt wird von Seiten des BMWI gefördert.

Hier besteht Handlungsbedarf: Dieser kann in neue statistischer Erhebungen münden, sollte dann vor allem auf die verschiedenen Sektoren und heterogenen energieintensiven Branchen des verarbeitenden Gewerbes unter Berücksichtigung der Regionen eingehen. Definitiv ist auch Untersuchungs- und Forschungsbedarf vorhanden. Im Idealfall sollte jede einzelne energieintensive Branche im Detail untersucht werden aufgrund der technologisch unterschiedlichen Produktionsprozesse.

Anmerkung: Im Rahmen einer Kurzstudie⁷⁰ aus dem Jahr 2010 ist die IZES gGmbH mit den Daten des verarbeitenden Gewerbes aus dem Jahr 2008 auf ähnliche theoretische Abwärmepotential gekommen:

Variante 1: Gemittelte Abwärmepotentiale

- Abwärmepotential reine Wärmenutzung: ~ 269 TWh/a
- Abwärmepotential Stromproduktion: ~ 44 TWh/a

Variante 2: Temperaturabhängige gemittelte Abwärmepotentiale

- Abwärmepotential reine Wärmenutzung: ~ 231 TWh/a
- Abwärmepotential Stromproduktion: ~ 36 TWh/a

⁷⁰ „Industrielle Abwärme - Eine Potentialstudie für Deutschland“ ; IZES gGmbH ; 2010 ; FKZ: 03FPZL0033 ; PtJ

6 Rahmenbedingungen

6.1 Einordnung energierechtlicher Vorschriften und Handlungsempfehlungen

Im Bereich der Effizienzmaßnahmen konnte die EnEV im privaten Sektor im Wohngebäudebereich wichtige Impulse setzen. Die Potenziale werden aber bei weitem nicht ausgeschöpft. So wird z.B. der Primärenergiefaktor für Strom zum 01.01.2016 von 2,4 auf 1,8 um 1/3 abgesenkt. Damit werden die Anforderungen an die Gebäudehülle um 1/3 reduziert. Das wird auch durch eine (vermeintliche) Verschärfung der EnEV um 25 % nicht kompensiert.

Im Industriesektor, wo große Energieverbräuche vorhanden sind, sind generell neue konzeptionelle Ansätze erforderlich, um die erheblichen Abwärmepotenziale zu erschließen.⁷¹ Dazu könnte z.B. auch die Einbeziehung in kommunale Wärme- und Kälteversorgungskonzepte gehören. Der Sektor Industrie ist insofern sensibel, da dieser einer globalisierten und konkurrierenden Weltwirtschaft mit sehr kurzfristigen „Return On Investment“ Erwartungen von 1-2 Jahren gegenüber steht. „Reine“ Effizienzmaßnahmen amortisieren sich jedoch mitunter erst nach 5-10 Jahren. Notwendig ist daher

- die Wirtschaftlichkeit auch an der zu erwartenden Einsatzzeit/Lebensdauer der Investitionsgüter zu orientieren,
- die erforderlichen Rahmenbedingungen für die Entwicklung, Markteinführung und Marktfähigkeit innovativer Technologien zu schaffen,
- Energieeffizienz zu einem integralen Bestandteil der Produktentwicklung zu machen und damit sowohl technisch anspruchsvolle als auch wirtschaftliche Lösungen auf den Markt zu bringen,
- Energieeffizienz zu einem Markenzeichen zu entwickeln, das die Absatzchancen verbessert und
- nicht nur das Produkt sondern auch dessen Einsatz/Anwendung zu verkaufen und damit Energiedienstleistungen zu stärken. Denn die Einsatzbedingungen sind mit bestimmend für energetisch optimale Lösungen.

⁷¹ Vgl. hierzu Nationaler Aktionsplan Energieeffizienz (NAPE) der Bundesregierung. Teil B: Neue Impulse setzen – Energieeffizienzstrategie für die 18. Legislaturperiode. Kapitel 2: Energiesparen als Rendite- und Geschäftsmodell: neue Impulse für Energiedienstleistungen, Effizienztechnologien und Wettbewerbsfähigkeit setzen. Sofortmaßnahmen. Offensive Abwärmenutzung (S.31)

Es bedarf eines integrierten Ansatzes, um die Investitionsbarrieren zu überwinden. Dazu gehören neben Information, Beratung und Motivation auch gezielte wirtschaftliche Anreize mit hohem Hebeleffekt. Dabei ist nicht nur die Einsparung von Arbeit (kWh) sondern auch von Leistung (kW) von Bedeutung. Letztere reduziert nicht nur den Kapazitätsbedarf sondern auch die Kosten.

Das Energierecht im Wärme- bzw. Gebäudebereich umfasst mehrere Gesetze und Verordnungen. Die drei wichtigsten sind:

- Gesetz zur Einsparung von Energie in Gebäuden (Energieeinsparungsgesetz - EnEG)⁷²

„Wer ein Gebäude errichtet, das seiner Zweckbestimmung nach beheizt oder gekühlt werden muss, hat, um Energie zu sparen, den Wärmeschutz nach Maßgabe der nach Absatz 2 zu erlassenden Rechtsverordnung so zu entwerfen und auszuführen, dass beim Heizen und Kühlen vermeidbare Energieverluste unterbleiben.“

Dieses Gesetz enthält auch die Ermächtigung für die

- Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung - EnEV)⁷³

„Zweck dieser Verordnung ist die Einsparung von Energie in Gebäuden. In diesem Rahmen und unter Beachtung des gesetzlichen Grundsatzes der wirtschaftlichen Vertretbarkeit soll die Verordnung dazu beitragen, dass die energiepolitischen Ziele der Bundesregierung, insbesondere ein nahezu klimaneutraler Gebäudebestand bis zum Jahr 2050, erreicht werden. Neben den Festlegungen in der Verordnung soll dieses Ziel auch mit anderen Instrumenten, insbesondere mit einer Modernisierungsoffensive für Gebäude, Anreizen durch die Förderpolitik und einem Sanierungsfahrplan, verfolgt werden. Im Rahmen der dafür noch festzulegenden Anforderungen an die Gesamtenergieeffizienz von Niedrigstenergiegebäuden wird die Bundesregierung in diesem Zusammenhang auch eine grundlegende Vereinfachung und Zusammenführung der Instrumente, die die Energieeinsparung und die Nutzung erneuerbarer Energien in Gebäuden regeln, anstreben, um dadurch die energetische und ökonomische Optimierung von Gebäuden zu erleichtern.“

- Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich (Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz - EEWärmeG)⁷⁴

„Zweck dieses Gesetzes ist es, insbesondere im Interesse des Klimaschutzes, der Schonung fossiler Ressourcen und der Minderung der Abhängigkeit von Energieimporten, eine nachhaltige Entwicklung der Energieversorgung zu

⁷² Vgl. juris GmbH, Das Rechtsportal ; <http://www.gesetze-im-internet.de/eneq/BJNR018730976.html> ; 29.07.2015

⁷³ Vgl. juris GmbH, Das Rechtsportal ; http://www.gesetze-im-internet.de/enev_2007/BJNR151900007.html ; 29.07.2015

⁷⁴ Vgl. juris GmbH, Das Rechtsportal ; http://www.gesetze-im-internet.de/eew_rmeg/BJNR165800008.html ; 29.07.2015

ermöglichen und die Weiterentwicklung von Technologien zur Erzeugung von Wärme und Kälte aus Erneuerbaren Energien zu fördern.“

Handlungsempfehlung im Kontext:

Es bietet sich an, das Energierecht im Gebäudebereich besser auf das Erreichen der Ziele der Energiewende und des Klimaschutzes anzupassen.

Dazu könnten im Einzelnen

1. EnEG, EnEV und EEWärmeG bspw. zu einem **Gebäude-Energie-Gesetz (GEG)** oder zu einem **Gebäude-Klimaschutz-Gesetz (GKG)** zusammengefasst werden. Dabei werden die Regelungen insbesondere durch eine Optimierung der technischen Anforderungen und Vereinfachung der Nachweisführung anwenderfreundlicher gestaltet,
2. materiell bedeutsame Vorschriften aus den einschlägigen DIN-Vorschriften in das zusammengefasste Gesetz (GEG/GKG) übernommen werden,
3. in Anpassung der Energieversorgung der Gebäude an den Ausbau der fluktuierenden erneuerbaren Energien bei Wahrung des primärenergetischen Ansatzes **exergetische Aspekte**⁷⁵ einbezogen werden. Dies soll die Stellung der anlagentechnischen und bauphysikalischen Eigenschaften (einschließlich Nutzung des Speichervermögens) des Gebäudes im Energiesystem, insbesondere bei Strom, berücksichtigen (systemischer Ansatz).

Anmerkung: In diesem Zusammenhang (zu Punkt Nr. 3.) ist die Berücksichtigung **exergetischer Aspekte** eine charmante Neuerung, welche bspw. mit zusätzlichen festzulegenden Gewichtungsfaktoren zum Primärenergiefaktor⁷⁶ Anreize schaffen würde, vermehrt Effizienztechnologien einzusetzen mit dem Ziel, bei der Gesamtbilanzierung bessere Primär- bzw. Endenergieergebnisse zu erzielen.

Beispiel: Für die flexible Stromerzeugung bei Abwärmenutzung könnte ein Gewichtungsfaktor in Höhe von $n = 0,8$ (frei gewählte Größenordnung, wissenschaftlich zu validieren) eingeführt werden, welcher mit dem Primärenergiefaktor von Strom verrechnet wird und somit zu dessen Absenkung führt.

Auch ist vorstellbar, dass ein solcher Faktor für das Wärmespeichervermögen von

⁷⁵ u.a. Berücksichtigung von Effizienztechnologien zur Abwärmenutzung

⁷⁶ Der Primärenergiefaktor (f_p) gibt an, wieviel Energie in vorgelagerten Ketten und Prozessen für die jeweiligen Energieträger aufkommt. Durch Multiplikation des Primärenergiefaktors mit dem Endenergieverbrauch kann der Primärenergieverbrauch berechnet werden.

$$f_p = \frac{\text{Primärenergie}}{\text{Endenergie}} \Leftrightarrow \text{Primärenergie} = f_p \times \text{Endenergie}$$

Gebäuden, elektrische Widerstandsheizungen, Wärmepumpen etc. eingeführt werden könnte.

Zusätzlich oder alternativ könnte man mit einem emissionsbezogenen Primärenergiefaktor (CO₂-Äquivalenzen) arbeiten.

6.2 Bezug zum KWKG - Abwärmeverstromung

Das Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz (KWKG), im Jahr 2002 zum Zwecke der Energieeinsparung, des Umweltschutzes und der Erreichung der Klimaschutzziele durch den verstärkten Einsatz der KWK in Kraft getreten, berücksichtigt in seiner aktuellen Fassung von 2012 auch die Nutzung von Abwärme. In § 2 „Anwendungsbereich“ wird explizit auf die Nutzung von Abwärme in Verbindung mit einer KWK-Anlage eingegangen; in § 3 „Begriffsbestimmungen“ werden Abwärmeeffizienztechnologien wie Dampfturbine, Stirlingmotor, ORC-Anlage sowie Brennstoffzelle berücksichtigt.

Die nachfolgende Tabelle stellt die KWKG-Zuschlagssätze⁷⁷ dar:

Größenklasse	Vergütung	Alternativvergütung
*Vbh = Vollbenutzungsstunden		
<u>bis 2 kWel.</u>		
fabrikneue Anlagen	5,41 Cent/kWh für 10 Jahre	Pauschalbetrag für 30.000 Vbh*
<u>zwischen 2-50 kWel</u>		
fabrikneue Anlagen	5,41 Cent/kWh für 10 Jahre	30.000 Vbh ab Erstaufnahme Dauerbetrieb
modernisierte Anlagen mit 25 % Neukosten	5,41 Cent/kWh für 5 Jahre	15.000 Vbh ab Wiederaufnahme Dauerbetrieb
modernisierte Anlagen mit 50 % Neukosten	5,41 Cent/kWh für 10 Jahre	30.000 Vbh ab Wiederaufnahme Dauerbetrieb
<u>über 50 - 2 MWel</u>		
fabrikneue Anlagen od. modernisierte Anlagen mit 50 % Neukosten	5,41 Cent/kWh bis 50 kW ; 4 Cent/kWh über 50 bis 250 kW ; 2,4 Cent/kWh über 250 kW bis 2 MW für 30.000 Vbh ab Erstaufnahme/Wiederaufnahme Dauerbetrieb	
modernisierte Anlagen mit 25 % Neukosten	5,41 Cent/kWh bis 50 kW ; 4 Cent/kWh über 50 bis 250 kW ; 2,4 Cent/kWh über 250 kW bis 2 MW für 15.000 Vbh ab Erstaufnahme/Wiederaufnahme Dauerbetrieb	
<u>über 2 MWel</u>		
fabrikneue Anlagen od. modernisierte Anlagen mit 50 % Neukosten	5,41 Cent/kWh bis 50 kW ; 4 Cent/kWh über 50 bis 250 kW ; 2,4 Cent/kWh über 250 kW bis 2 MW ; 1,8 Cent/kWh über 2 MW für 30.000 Vbh ab Erstaufnahme/Wiederaufnahme Dauerbetrieb	
modernisierte Anlagen mit 25 % Neukosten	5,41 Cent/kWh bis 50 kW ; 4 Cent/kWh über 50 bis 250 kW ; 2,4 Cent/kWh über 250 kW bis 2 MW ; 1,8 Cent/kWh über 2 MW für 15.000 Vbh ab Erstaufnahme/Wiederaufnahme Dauerbetrieb	

⁷⁷ Vgl. Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle : Internet:

http://www.bafa.de/bafa/de/energie/kraft_waerme_kopplung/stromverguetung/index.html ; 03.02.2015

modernisierte Anlagen mit 10 % Neukosten	5,41 Cent/kWh bis 50 kW ; 4 Cent/kWh über 50 bis 250 kW ; 2,4 Cent/kWh über 250 kW bis 2 MW ; 1,8 Cent/kWh über 2 MW für 10.000 Vbh ab Erstaufnahme/Wiederaufnahme Dauerbetrieb
--	---

Tabelle 6-1: KWKG-Zuschlag für Anlagen von ~2 bis über 2 MWel

Die Zuschläge können auf die Einspeisung sowie auf die Eigenstromerzeugung angesetzt werden.

Das Gesetz ist technologieneutral formuliert, so dass die KWK-Technologien in gleicher Konkurrenz zueinander stehen - mit der Konsequenz, dass die technisch etablierten und ökonomisch(st)en Anlagen aufgrund ihrer Investitionskosten stärker von der Förderung profitieren. Dies ist aus reiner KWK-Sichtweise nachvollziehbar, für reine Abwärmenutzungstechnologien (Effizienztechnologien) jedoch hemmend. Im Nachfolgenden wird daher eine beispielhafte Wirtschaftlichkeitsrechnung erstellt, welche diese Problematik erfasst. Die Wirtschaftlichkeitsrechnung betrachtet eine ORC-Anlage, welche von relativ hohen Investitionskosten geprägt ist.

6.3 Wirtschaftlichkeitsrechnung einer ORC-Anlage im Rahmen des KWKG

Für eine exemplarische Wirtschaftlichkeitsrechnung wurde eine 345 kW_{el.} ORC-Anlage betrachtet. Die Wirtschaftlichkeitsrechnung wird gemäß VDI 2067 mittels eines dynamischen Verfahrens durchgeführt, folgende Annahmen werden getroffen:

- Die spezifischen Kosten für eine ORC-Anlage wurden auf 3.000 €/kW_{el.} festgelegt. Je nach Hersteller und Größe der Anlage variieren diese Kosten.
- Für die Berechnung wird für den Betrieb der ORC-Anlage eine Jahresvolllaststundenzahl von **7.500 h** bzw. **4.000 h** festgelegt.
- Für die ORC-Anlage ist eine zum Betrieb notwendige Wärmequelle bereits vorhanden. Es werden keine Brennstoffkosten angesetzt.
- Die Betriebsdauer der Anlage wurde auf 15 Jahre festgelegt.
- Der Strompreis für die Netzeinspeisung basiert auf dem Preis der EEX für das 1. Quartal 2015 (3,21 Cent/kWh).
- Der (eingesparte) Netto-Strompreis (inkl. Umlagen und Stromsteuer) für Industriekunden betrug in 2014 laut BDEW 15,56 Cent/kWh.
- Für die Berechnung der Einnahmen (Einspeisung und/oder Eigenstrom) wurden die folgenden aktuellen Gesetze berücksichtigt:
 - KWKG (Vergütungssätze siehe vorherige Seite)
 - StromStG (Stromsteuergesetz): Die Stromsteuer beträgt 2,05 Cent/kWh.

- StromNEV (Stromnetzentgeltverordnung)
- EEG (ErneuerbarenEnergieGesetz): Die EEG-Umlage (6,17 Cent/kWh) für die Eigenstromerzeugung wurde mitberücksichtigt⁷⁸: Dabei wurden für 2015 Anteile von 30 %, für 2016 Anteile von 35 % und 2017 und den nachfolgenden Jahren Anteile von 40 % angesetzt⁷⁹.
- An Netznutzungsentgelten für das Niederspannungsnetz werden 2 Cent/kWh bei einer Jahresbenutzungsdauer über 2.500 h/a und 2,4 Cent/kWh bei einer Jahresbenutzungsdauer von ≤ 2.500 h/a angesetzt.
- Vermiedene Netznutzungsentgelte gelten nur für den eingespeisten Strom. Für die Ermittlung der vermiedenen Netznutzungsentgelte wird hier vereinfacht nur der Arbeitspreis berücksichtigt, da die Anteile des Leistungspreises von netz-typischen Auslastungen abhängen und nicht pauschal abschätzbar sind. Diese Leistungskomponente kann das Ergebnis zur Wirtschaftlichkeit kleiner Anlagen jedoch durchaus verbessern.
- Für die Wirtschaftlichkeitsrechnungen wurden die Vorgaben der VDI 2067 angewendet (Kalkulatorischer Zins: 3 %; Annuität: 0,0838 ; Laufzeit: 15 Jahre) .

⁷⁸ EEG §61 EEG-Umlage für Letztverbraucher und Eigenversorger

⁷⁹ Unklar ist, inwieweit die die Höhe der prozentualen Anteile für die Jahre nach 2017 aussehen

Kapitalkosten	Erläuterung	Kosten	Zeit
ORC-Kosten pro kWel. [€/kWel]	3000		
Invest ORC-Modul, el. Leistung [kW]	345	1.035.000,00 €	einmalig
Planungskosten [% vom Invest]	10%	103.500,00 €	einmalig
Installationskosten [% vom Invest]	20%	207.000,00 €	einmalig
Gesamtkosten ORC Anlage [kWel.]	345	1.345.500,00 €	einmalig
Kalkulatorischer Zinssatz [%]	3%		
Kalkulatorische Nutzungsdauer [Jahre]	15		
Annuitätsfaktor, gemäß VDI	0,0838		
Annuität [€]		112.752,90 €	pro Jahr
Verbrauchsgebundene Kosten			
Spezifische verbrauchsgebundene Kosten bezogen auf die bereitgestellte elektr. Energie [€/kWh] -> Nutzung Abwärme		- €	pro Jahr
Betriebsgebundene Kosten			
Aufwand Instandsetzung [% vom Invest], gemäß VDI	6%	62.100,00 €	pro Jahr
Aufwand Wartung [% vom Invest], gemäß VDI	2%	20.700,00 €	pro Jahr
Bedienung [Stundensatz in €/Std.]	40		
Bedienung Personal [Std.], gemäß VDI	100	4.000,00 €	pro Jahr
Sonstige Kosten			
Versicherung [% vom Invest]	1%	10.350,00 €	pro Jahr
Weitere Kosten [% vom Invest]	1%	10.350,00 €	pro Jahr
Gesamtkosten		220.252,90 €	pro Jahr
Erlöse KWKG bei Strom-Einspeisung			
Vollastbetriebsstunden [h/a]	7500		pro Jahr
El. Leistung [kW]	345		
Eingespeister Strom [kWh]	2587500		pro Jahr
Stromvergütung 1.Q. 2015 (EEX*) [€/kWh]	0,0321	83.058,75 €	pro Jahr
Zuschlag KWKG 2012 für 30.000 Vbh [€/kWh] bis 50 kW	0,0511	19.162,50 €	pro Jahr
Zuschlag KWKG 2012 für 30.000 Vbh [€/kWh] 50-250 kW	0,04	60.000,00 €	pro Jahr
Zuschlag KWKG 2012 für 30.000 Vbh [€/kWh] > 250 kW	0,024	17.100,00 €	pro Jahr
Vermiedene Netznutzungsentgelte [€/kWh] > 2.500 Vbh	0,02	51.750,00 €	pro Jahr
Gesamterlös		231.071,25 €	pro Jahr
Differenz		10.818,35 €	pro Jahr

Tabelle 6-2: Erlöse pro Jahr für die ORC-Anlage (mit KWKG), 7.500 Vollbetriebsstunden

Die beiden entscheidenden Stellgrößen in der Wirtschaftlichkeitsrechnung sind die spezifischen Investitionskosten und die Vollbenutzungsstunden. Die Investitionskosten sind herstellerabhängig und pendeln, je nach Anlagengröße und Hersteller, zwischen 1.500 und 5.000 €/kW_{el}. Gerade bei Abwärmequellen in Industrieprozessen kann man davon ausgehen, dass diese nicht kontinuierlich nutzbar sind. Entsprechende Wärmespeicher können hier Abhilfe leisten; dennoch sind 7.500 Vollbenutzungsstunden im Jahr als optimistisch zu betrachten, da Produktionsprozesse

vielerorts diskontinuierlich laufen und eine durchgängige Abwärmenutzung somit nicht möglich ist. Im Folgenden werden daher zwei Fälle betrachtet. Der Betrieb mit einer Jahresvolllaststundenzahl von **7.500 h** sowie mit **4.000 h**.

Die folgende Grafik zeigt die gesamte Wirtschaftlichkeit der Anlage nach 15 Jahren bei 7.500 h Vollbetriebsstunden mit unterschiedlichen Eigenstromnutzungsgraden:

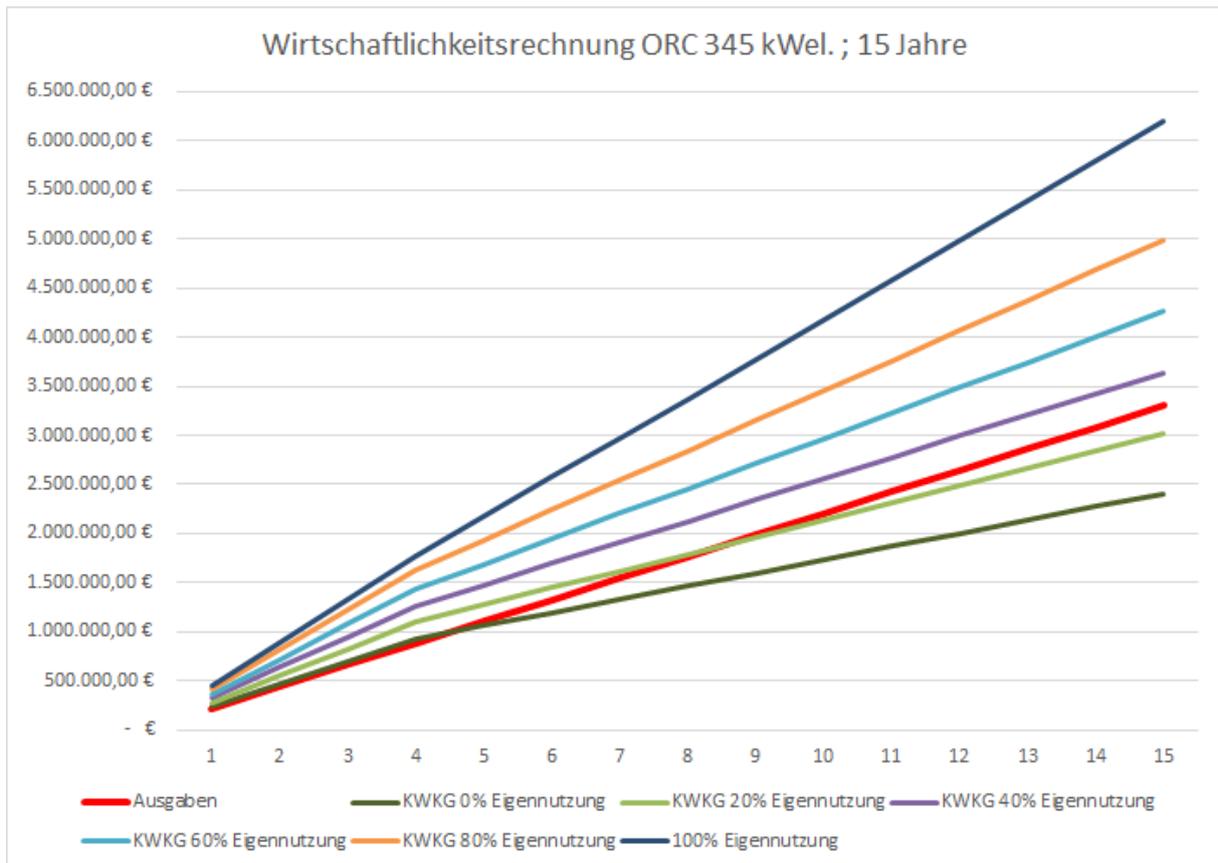


Abbildung 6-1: Vergleich von Erlösen bei unterschiedlichen Eigenstromnutzungsgraden, 7.500 Vollbetriebsstunden

Aus der obigen Abbildung⁸⁰ wird deutlich, dass die ORC-Anlage ohne Eigenstromnutzung über das KWKG nicht wirtschaftlich betrieben werden kann – trotz der 7.500 Vollbenutzungsstunden und nicht vorhandener Brennstoffkosten. Erst mit einer Eigenstromnutzung von über 20 %, im Idealfall mit 100 %, ist die Anlage deutlich im wirtschaftlichen Bereich (insbesondere zurückzuführen auf die eingesparten Strombezugskosten).

⁸⁰ Die zugehörigen Tabellen können dem Anhang entnommen werden

Anders sieht die Situation für 4.000 Vollbetriebsstunden aus:

Kapitalkosten	Erläuterung	Kosten	Zeit
ORC-Kosten pro kWel. [€/kWel]	3000		
Invest ORC-Modul, el. Leistung [kW]	345	1.035.000,00 €	einmalig
Planungskosten [% vom Invest]	10%	103.500,00 €	einmalig
Installationskosten [% vom Invest]	20%	207.000,00 €	einmalig
Gesamtkosten ORC Anlage [kWel.]	345	1.345.500,00 €	einmalig
Kalkulatorischer Zinssatz [%]	3%		
Kalkulatorische Nutzungsdauer [Jahre]	15		
Annuitätsfaktor, gemäß VDI	0,0838		
Annuität [€]		112.752,90 €	pro Jahr
Verbrauchsgebundene Kosten			
Spezifische verbrauchsgebundene Kosten bezogen auf die bereitgestellte elektr. Energie [€/kWh] -> Nutzung Abwärme		- €	pro Jahr
Betriebsgebundene Kosten			
Aufwand Instandsetzung [% vom Invest], gemäß VDI	6%	62.100,00 €	pro Jahr
Aufwand Wartung [% vom Invest], gemäß VDI	2%	20.700,00 €	pro Jahr
Bedienung [Stundensatz in €/Std.]	40		
Bedienung Personal [Std.], gemäß VDI	100	4.000,00 €	pro Jahr
Sonstige Kosten			
Versicherung [% vom Invest]	1%	10.350,00 €	pro Jahr
Weitere Kosten [% vom Invest]	1%	10.350,00 €	pro Jahr
Gesamtkosten		220.252,90 €	pro Jahr
Erlöse KWKG bei Strom-Einspeisung			
Vollastbetriebsstunden [h/a]	4000		pro Jahr
El. Leistung [kW]	345		
Eingespeister Strom [kWh]	1380000		pro Jahr
Stromvergütung 1.Q. 2015 (EEX*) [€/kWh]	0,0321	44.298,00 €	pro Jahr
Zuschlag KWKG 2012 für 30.000 Vbh [€/kWh] bis 50 kW	0,0511	10.220,00 €	pro Jahr
Zuschlag KWKG 2012 für 30.000 Vbh [€/kWh] 50-250 kW	0,04	32.000,00 €	pro Jahr
Zuschlag KWKG 2012 für 30.000 Vbh [€/kWh] > 250 kW	0,024	9.120,00 €	pro Jahr
Vermiedene Netznutzungsentgelte [€/kWh] > 2.500 Vbh	0,02	27.600,00 €	pro Jahr
Gesamterlös		123.238,00 €	pro Jahr
Differenz		- 97.014,90 €	pro Jahr

Tabelle 6-3: Erlöse pro Jahr für die ORC-Anlage (mit KWKG), 4.000 Vollbetriebsstunden

Aufgrund einer beispielweise diskontinuierlicheren verfügbaren Abwärmequelle, in der Regel zurückzuführen auf die Industrieprozesse, ist die Stromerzeugung deutlich geringer.

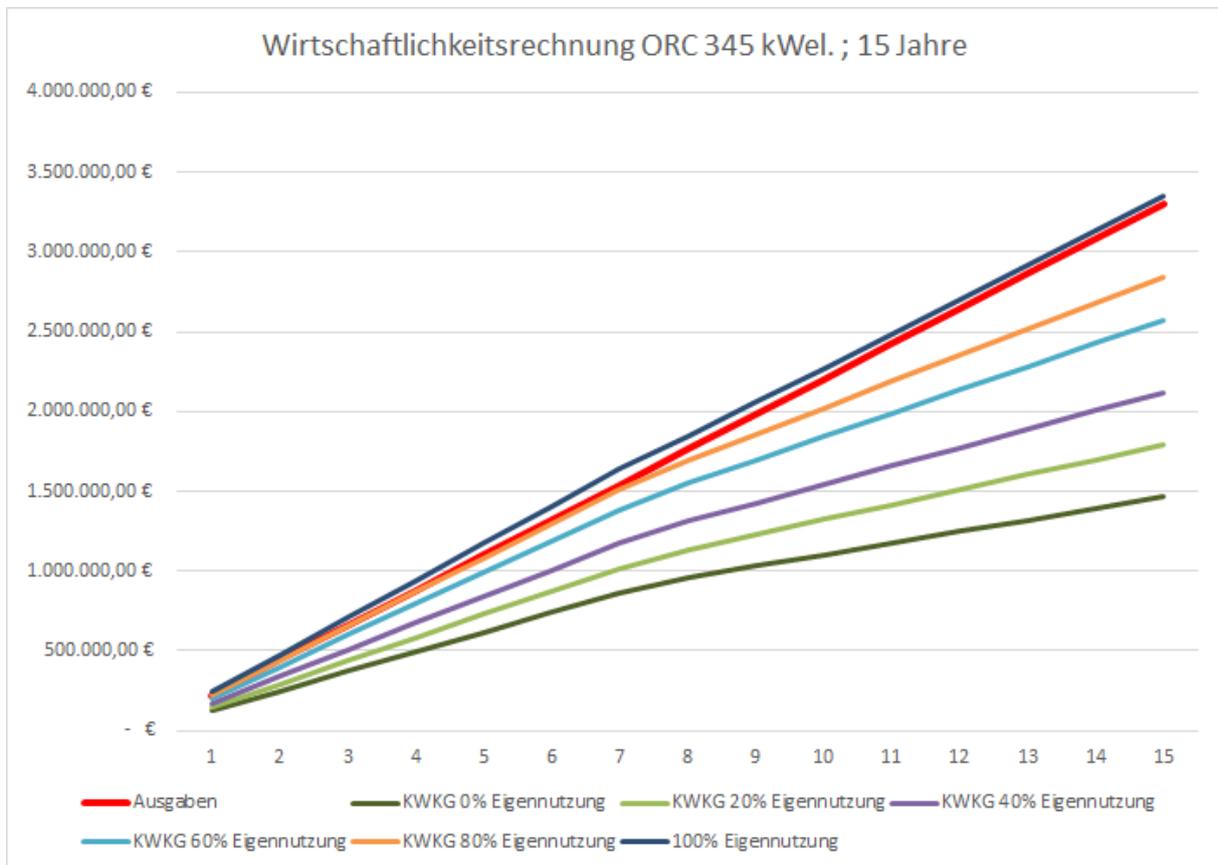


Abbildung 6-2: Vergleich von Erlösen bei unterschiedlichen Eigenstromnutzungsgraden, 4.000 Vollbetriebsstunden

Wie die obige Grafik zeigt, ist eine Wirtschaftlichkeit einer ORC-Anlage der Größenklasse 345 kW_{el.} bei 4.000 h Vollbenutzungsstunden, trotz des KWKG-Zuschlags und bei einer hundertprozentigen Eigenstromnutzung, fast nicht sichtbar. Aufgrund geringer Stückzahlen sind ORC- Aggregate zudem teuer und deren Anschaffung in vielen Fällen nur bedingt ökonomisch vertretbar. Dies trägt dazu bei, dass große Abwärmepotenziale bei einer Vielzahl von industriellen Prozessen ungenutzt bleiben. Hilfreich wären hier gezielte Marktvorbereitungs- und Markteinführungsprogramme.

Aber auch durch den Einsatz von Wärmespeichern kann der geringen Wirtschaftlichkeit entgegengesteuert werden. So kann – bei entsprechender Speicherdimensionierung – eine kleinere, kostengünstigere Anlage zum Einsatz kommen, mit der eine deutlich längere Fahrweise realisiert werden kann.

Werden die Eingangsparameter im oben gezeigten Beispiel wie folgt variiert...

- kleinere ORC-Anlage (200 kW_{el}) mit 780.000 € Gesamtinvestitionskosten⁸¹ anstelle von 1.345.500 € für einen Betrieb von 7.500 h in Verbindung mit einem Wärmespeicher
- Investitionskosten eines Wärmespeichers: 47.715 €⁸²

...kann die Anlage wieder (mit über 60 % Stromeigennutzung) im wirtschaftlichen Bereich betrieben werden. Zu beachten ist hierbei eine genaue Kalkulation der Investitionskosten für ORC-Modul und Wärmespeicher.

Dies ist jedoch nur mit ORC-Anlagen realisierbar, die in einem Temperaturbereich unter 250°C arbeiten, da das Angebot von Speichern für höhere Temperaturbereiche auf dem Markt deutlich kleiner ausfällt als im Niedertemperaturbereich (vgl. z.B. (Saena, 2012)). Zudem sind Hochtemperaturspeicher in der Regel deutlich teurer und wirken sich negativer auf die Wirtschaftlichkeit aus.

Alternativ könnte durch den gezielten Einsatz von Speichern auch eine flexible, stromnetzabhängige Fahrweise, also z.B. die Stromproduktion zu Zeiten geringer EE-Einspeisung, durch ORC-Anlagen angeboten werden. Hierzu wäre eine entsprechende Förderung notwendig und sinnvoll.

Das KWKG ist ein wirkungsvolles Gesetz, welches die Verbreitung der Kraft-Wärme-Kopplung unterstützt. Für Aspekte der Abwärmenutzung bspw. in Industriebetrieben ist dieses jedoch ungeeignet, da die finanziellen Anreize bei geringen Vollbetriebsstunden, trotz KWK-Zuschlag, ungenügend sind. Dadurch bleiben wertvolle Wärmepotentiale ungenutzt.

Hier sind unterschiedliche Pfade möglich:

- Erhöhung des KWK-Zuschlags explizit für die reine Abwärmeverstromung z.B. bei geringen Jahresvollbetriebsstunden

- Einführung von unterschiedlichen Technologie-Boni oder Förderkulissen (Investitionsbeihilfen) für Effizienztechnologien zur Nutzung von (industrieller) Abwärme

- Befreiung von der EEG-Umlage für die Eigenstromerzeugung bei Effizienztechnologien zur Nutzung von (industrieller) Abwärme

Im Idealfall führt man ein neues Abwärme- bzw. Energieeffizienzgesetz ein oder ergänzt aktuelle Gesetze entsprechend, um (finanzielle) Anreize für eine reine Abwärmenutzung (mit und ohne KWK-Technologien) zu setzen – die Potentiale

⁸¹ Im Rahmen dieses Beispiels wurden die (gleichen) spezifischen Kosten von 3.000 € pro kW_{el} für die kleinere ORC-Anlage angesetzt, vorbehaltlich ansteigender Kosten bei Verkleinerung der Anlage.

⁸² Spezifische Kosten eines Wärmespeichers: 1.500 € pro 100 kWh

sind nicht zu unterschätzen.

6.4 Ausbau der Abwärmenutzung: Hemmnisse und Handlungsempfehlungen

Auf Bundesebene wurde das Thema Wärme in Verbindung mit Effizienzmaßnahmen, im Vergleich zum Thema Strom, meist zurückhaltend betrachtet. Aktuelle Förderkulissen konzentrierten und konzentrieren sich⁸³ auf die Stromwirtschaft.

Dennoch machen Wärmeanwendungen in den unterschiedlichsten Sektoren und Branchen den wichtigsten und größten Anteil in der Endenergienutzung aus. Die meiste ungenutzte Abwärme fällt im verarbeitenden Gewerbe an. Die Hebung der Potentiale sollte zunächst auf diesen Sektor konzentriert werden.

Aktuelle Hemmnisse sind von informeller, technischer- und ökonomischer Natur:

- Vielen Betrieben ist unklar, wieviel Abwärme aus ihrer Produktion an die Umgebung abgegeben wird und dass diese in bestimmten Fällen genutzt werden kann.
- Technisch müssen sich Abwärmotechnologien weiterentwickeln (Wärmeübertrager, Erzeugungsanlagen), um die aktuellen Potentiale und neue Potentiale besser heben zu können.
- Die ökonomischen Rahmenbedingungen für Investitionen in Betrieben unterliegen strengen wirtschaftlichen Kriterien (ROI). In vielen Fällen können Abwärmotechnologien diese nicht ohne entsprechende Anreize erfüllen!

Für die Beseitigung dieser Hemmnisse sollte folgendes Maßnahmenbündel eingerichtet werden - zum einen

- durch das Auflegen demonstrativer Forschungsförderprogramm mit dem Fokus auf Abwärmeumwandlungs- und Erzeugungstechnologien (Wärmeübertrager, Wärmetransport, Stromerzeugung) in den unterschiedlichen Branchen und Sparten,
- durch die Anpassung von Rahmenbedingungen (Anpassung KWKG, EnEG, EWärmeGG, EEG und/oder Einführung eines neuen (Ab-)Wärme/Effizienzgesetzes einschließlich der Berücksichtigung exergetischer Aspekte für das verarbeitende Gewerbe) für die Schaffung von Anreizen und Wirtschaftlichkeit,
- durch die Bereitstellung entsprechender Informationsunterlagen für Unternehmen (Bsp.: siehe Anhang Handlungsleitfaden)⁸⁴

⁸³ Anmerkung: Ein großer Anteil der Primärenergie aus fossilen Quellen gepaart mit dem CO₂-Ausstoß ist auf die Stromerzeugung zurückzuführen

⁸⁴ U.a. Vgl. Abwärmerechner des Bayerischen Landesamtes für Umwelt ; 2014 ;
Internet: <http://www.izu.bayern.de/abwaermerechner/index.php>

- durch die (Teil-)Förderung von für die jeweiligen Branchen und Unternehmen zugeschnittenen Abwärmenutzungskonzepten mit verschiedenen Optimierungsszenarien (geringinvestiv bis hochinvestiv) für Informationsgenerierung, Bewusstseins-schaffung und Umsetzung⁸⁵,
- durch die kontinuierliche nationale Erhebung von (Ab)Wärmedaten des verarbeitenden Gewerbes für eine bessere Potentialabschätzung und
- durch ein regelmäßiges Monitoring der erreichten technologischen- und umsetzungsorientierten Effizienzfortschritte.

Besonders hervorzuheben ist die Anpassung der Gesetze KWKG, EnEG, EWärmeGG und des EEG und/oder die Einführung eines Abwärme- oder Effizienzgesetzes: In diesem sollte die Verstromung von Abwärme (als Effizienztechnologie) unabhängig zu den klassischen KWK-Anlagen betrachtet werden. Neben bilanzieller Vorteile⁸⁶ könnte eine über eine bestimmte Laufzeit feste (ggf. technologiebezogene) degressive Einspeisevergütung für die Verstromung von Abwärme geben, welche zur Gewährleistung der Wirtschaftlichkeit über dem KWK-Zuschlag liegt.

Eine Befreiung von der EEG-Umlage für die Eigenstromerzeugung von Abwärmetechnologien kann zusätzliche Hemmnisse bzgl. der Wirtschaftlichkeit beseitigen.

Die Pläne der Bundesregierung in diesem Zusammenhang den KWK-Zuschlag für die Eigenstromerzeugung aufzuheben ist im Kontext von Stromerzeugungstechnologien (Effizienztechnologien) aus Abwärme als kontraproduktiv zu sehen.

Generell sollte eine Gleichbehandlung von Erneuerbaren Energien und Effizienzmaßnahmen (wie die Nutzung von Abwärme) erfolgen. Alleiniger Maßstab sind die mit der Energieerzeugung verbundenen CO₂-Emissionen.

Anmerkung: Von Seiten des verarbeitenden Gewerbes gibt es, von den steigenden Energiepreisen abgesehen, kaum aktuelle Anreize für die Durchführung von Effizienzmaßnahmen. Auch sind aktuell mit dem Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI) keine freiwilligen Selbstverpflichtungen zur Energieeinsparungen getroffen worden, auch wenn der Nationale Aktionsplan Energieeffizienz (NAPE) hier Ansatzpunkte bietet. Aufgrund der volkswirtschaftlich großen Bedeutung sollten entsprechende Gespräche geführt werden mit dem Ziel neuer Selbstverpflichtungen des verarbeitenden Gewerbes einen bestimmten Prozentsatz an Energie bis bspw. 2025 (Basisjahr 2015) einzusparen.

Exkurs: Eine neue und aktuelle Forschungstechnologie könnte dennoch gefasste Abwärmeströme gerade für den Gebäude- und Verkehrsbereich (Nutzung gefasster

⁸⁵ Bspw. Kombination der Förderung mit Umsetzungspflicht

⁸⁶ Berechnung von Primärenergiewerten (siehe Unterkapitel 6.2)

Abgasströme in Heizungen und Pkw-Abgasanlagen) von Interesse sein: Thermoelektrische Elemente basierend auf dem „Seebeck-Effekt“. Mit diesen Elementen, welche leicht in einen Abgasstrang integriert werden können, kann aus Abgaswärme Strom erzeugt werden, hier sollte intensive Forschungsförderung relativ zügig Erfolge generieren können.

7 Ergebnisse aus der Abwärmefachtagung

Am 04. März 2015 veranstaltete das Bundesumweltministerium als Ergänzung zur vorliegenden Studie eine Fachtagung unter dem Titel „Klimaschutz durch Abwärmennutzung - Potenziale, Hemmnisse, Strategien“ in der Neuen Mälzerei in Berlin. Ziel der Veranstaltung war es, neben der Vorstellung der Studienergebnisse, v.a. einen erneuten Anlauf zu starten, das Thema Abwärme wieder stärker ins Bewusstsein von Entscheidern und Akteuren zu rücken sowie mit den Teilnehmern aktuelle Probleme, Hemmnisse und Handlungsfelder zu identifizieren und zu diskutieren. Als Ergebnis sollen möglichst zusätzliche Maßnahmen zum Erreichen der klima- und energiepolitischen Ziele der Bundesregierung angestoßen werden.

Referenten aus verschiedenen Disziplinen des Themenkomplexes Abwärme wurden eingeladen, um unterschiedliche Nutzungsoptionen vorzustellen und um die anschließenden Diskussionen aus Ihrem Blickwinkel heraus zu bereichern.

Neben Beiträgen aus Wissenschaft und Forschung wurden verschiedenen Abwärmennutzungstechnologien vorgestellt sowie der rechtliche Rahmen beleuchtet.

Das Interesse an der Tagung war höher als erwartet. Ursprünglich war die Veranstaltung als reine Fachtagung für einen Zuhörerkreis von rund 50 Teilnehmern ausgelegt. Da sich jedoch bereits innerhalb von zwei Tagen über 120 Teilnehmerinnen und Teilnehmer angemeldet hatten, wurde der Umfang der Tagung entsprechend erhöht. Letztendlich kamen 104 Besucher in die Neue Mälzerei. Im Folgenden wird der Verlauf der Tagung zusammenfassend beschrieben. Die zugehörigen Präsentationen stehen auf der Homepage der IZES gGmbH zum Download zur Verfügung.

7.1 Programm und Referenten der Fachtagung

Eröffnet wurde die Fachtagung von **Berthold Goeke**, Leiter Unterabteilung Klimaschutzpolitik im Bundesumweltministerium, der in seiner Rede die Bedeutung der Abwärmennutzung vorstellte und darauf hinwies, dass Abwärme ein Abfallprodukt ist, regelmäßig bei energetischen Umwandlungsprozessen anfällt und per se CO₂-frei und kostenlos ist. Herr Goeke wies darauf hin, dass der Abwärmennutzung in der Vergangenheit vergleichsweise wenig Aufmerksamkeit geschenkt wurde. Entsprechende Instrumente wie bspw. das Marktanreizprogramm (MAP) oder EEWärmeG würden im Bereich Energieeffizienz bisher fehlen. Vor dem Hintergrund der Klimaschutzziele der Bundesregierung soll daher das Thema Abwärmennutzung einen weitaus höheren Stellenwert erhalten.

Berthold Goeke stellte in seiner Rede weitere wichtige Instrumente vor und verwies auf das Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 sowie den Nationalen Aktionsplan Energieeffizienz (NAPE). Darin werden bereits zusätzliche Maßnahmen benannt, um

das 40 %-Ziel in 2020 zur Reduktion der Treibhausgasemissionen zu erreichen. Sie müssen nun ausgestaltet und umgesetzt werden. Auch die Reformierung des Emissionshandels stellt eine wichtige Maßnahme dar, ebenso wie die verstärkte Nutzung der Kraft-Wärme-Kopplung in der Energiewirtschaft.

Mit Nachdruck thematisierte der Unterabteilungsleiter die notwendige Steigerung der Energieeffizienz im Gebäudebereich, das Energiesparen als Rendite- und Geschäftsmodell sowie die Eigenverantwortlichkeit für Energieeffizienz. Um z.B. das anvisierte Ziel, den Gebäudebestand bis 2050 nahezu klimaneutral mit Energie zu versorgen, erreichen zu können, muss gerade auch die Abwärmenutzung stärker ins Blickfeld genommen werden.

Berthold Goeke betonte zum Schluss seiner Rede, dass Bundesumweltministerin Barbara Hendricks 2016 einen Klimaschutzplan vorlegen wird. Er soll konkrete Zwischenziele und Maßnahmen beinhalten, um das Langfristziel zu erreichen: Deutschland wird bis 2050 seine Treibhausgasemissionen um 80-95 Prozent gegenüber 1990 reduzieren.

Guillem Tänzer von der IZES gGmbH, führte die Zuhörer in die Abwärmethematik ein, nannte Hemmnisse und Handlungsbedarf bei der Abwärmenutzung aber auch die Potentiale in der deutschen Industrie. Er benannte die fünf Branchen mit den größten Potenzialen in Deutschland und erläuterte, dass diese Potentiale unterschiedlichen Temperaturniveaus zugeordnet werden können, und dass dort jeweils unterschiedliche Technologien zum Einsatz kommen.

Als Hemmnisse bei der Abwärmenutzung nannte der Wirtschaftsingenieur Entwicklungsbedarf in technologischen Teilbereichen (Stichwort: Wärmeübertrager) sowie fehlende ökonomische Anreize insbesondere bei diskontinuierlichen Abwärmquellen.

Auch **Martin Pehnt** vom Heidelberger Institut für Energie- und Umweltforschung ifeu griff das Thema Potentiale auf. Pehnt veranschaulichte in seiner Präsentation mehrere interessante Beispiele zum Thema Abwärme und erläuterte, dass insbesondere energieintensive Branchen wie das metallverarbeitende Gewerbe, die Herstellung mineralischer Produkte, die chemische Industrie oder die Papierindustrie hohe Potentiale böten.

Die Ergebnisse einer Potenzialberechnung der einzelnen Bundesländer zur Abwärmeverstromung, die das ifeu auf Basis von Daten aus dem BImSchG von 2008 ermittelte, lagen in der gleichen Größenordnung wie die Ergebnisse der zuvor durch das IZES vorgestellten Studie. Pehnt wies darauf hin, dass das technische Potenzial dabei um

den Faktor 10^{87} geringer ausfällt und bestätigte seinen Vorredner darin, dass die Potenziale – insbesondere von kleineren Wärmequellen – bisher noch nicht umfassend quantifiziert worden sind.

Deutlicher besser sieht es laut Pehnt jedoch bei der Förderung aus. Er attestierte der Förderlandschaft zum Thema Abwärme in Deutschland ein sehr gutes Angebot und betonte, dass auch eine Vielzahl von Beratungsangeboten zur Verfügung steht.

Sein Fazit: Wer in Sachen Abwärmenutzung aktiv werden möchte, findet hierzu eine gute Ausgangsgrundlage vor.

Simon Hirzel vom Fraunhofer Institut ISI zeigte in seinem Vortrag sehr deutlich nochmals die Wichtigkeit und Vielschichtigkeit der Abwärmenutzung in der Industrie. Neben den Energieverbräuchen wurden die wichtigsten Branchen mit den höchsten Abwärmepotentialen vorgestellt, auf unterschiedliche Branchenbeispiele eingegangen und die vier Themen Technologieentwicklung, Potentialermittlung, Hemmnisforschung und Instrumentengestaltung näher beleuchtet.

Hirzels Fazit besagt, dass Abwärme in vielen Bereichen und Anwendungen der Industrie vorhanden ist, es vielfältige Möglichkeiten zur Verwertung von Abwärme (Wärme, Kälte, Strom) gibt, dieses im jeweiligen Kontext betrachtet und als vielschichtiges Thema wahrgenommen werden muss.

Clemens Felsmann von der Technischen Universität Dresden stellte in seinem Vortrag eine spannende Facette der (Ab)wärmenutzung in Gebäuden dar. Gebäude selbst bzw. deren Bauwerksmassen können in Zukunft mittels thermisch aktivierte Bauteilsysteme als be- und entladbare Wärmespeicher genutzt werden. Anhand von Szenarien stellte Felsmann Wärmeheiz- und Speicherstrategien vor.

Sein Fazit zeigt, dass das Thema Gebäude als Wärmespeicher Effizienzpotentiale enthält, welche für die Zukunft von Relevanz sein sollten.

Nach den primär theoretisch- und wissenschaftlich orientierten Beiträgen adressieren die nachfolgenden Vorträge insbesondere die Themen Technologien sowie Praxisbeispiele für Abwärmetechnologien. Neben Stromerzeugungsanlagen und Wärmenutzungsanlagen wurde auch auf Schlüssel- und Zukunftstechnologien eingegangen sowie der beratende- und rechtliche Aspekt beleuchtet.

Michael Schmidt von der DeVeTec GmbH erläuterte in seinem Vortrag die Funktionsweise und Vorteile einer ORC-Kolbenmaschine und verdeutlichte diese an realisierten Praxisbeispielen in der Industrie gepaart mit deren Wirtschaftlichkeit.

⁸⁷ Präsentation Pehnt: Theoretisches Potential: 20-40 TWh/a ; Technisches Potential: 2-4 TWh/a (Campana 2013)

Sein Fazit lautete insbesondere, dass die Erhebung der EEG-Umlage für eigenerzeugten Strom aus Abwärme für eine ORC-Anlage Unverständnis generiere, ein Hemmnis für deren Wirtschaftlichkeit sei und man generell für Abwärmenutzungstechnologien die Erhebung der EEG-Umlage für die Eigenstromerzeugung überdenken sollte.

Georg F. Schu von der ESI GmbH zeigt in seinem Vortrag sehr deutlich, inwieweit Brühdampf aus der Reifenherstellung sinnvoll verwertet werden kann. Im Rahmen von realisierten Praxisbeispielen in der Industrie konnten diese vorher ungenutzten Abwärme mit Hilfe des Kondithermverfahren Heizung- und Brauchwasseranwendungen zugeführt werden, ein Teil der Wärme wird sogar einem lokalen Wärmenetz außerhalb des Industrieunternehmens zugeführt.

Sein Fazit lautet, dass in vielen Fällen ein innovativer Wille eines Industrieunternehmens mit den entsprechenden Technologiepartnern zu erfolgreichen Umsetzungen von Effizienzmaßnahmen führt.

Mariusz Maciejewski von der Wallstein Ingenieur GmbH führt das Publikum durch das Thema von Wärmeübertrager, einer Schlüsseltechnologie bei der Abwärmenutzung. Insbesondere bei dem hier vorgestellt Wärmeübertrager, spezialisiert auf die Wärmauskopplung von Rauchgasen, wurde die technische Funktionsweise erläutert, mit der die Energieeffizienz deutlich erhöht werden kann.

Das Fazit von Maciejewski lautet, dass gerade der Einsatz von Wärmeübertrager und deren technologische Weiterentwicklung maßgeblich für Abwärmeeffizienzmaßnahmen und deren Wirtschaftlichkeit entscheiden sind.

Marco Deckert vom Fraunhofer Institut UMSICHT brachte dem Publikum das Thema von Latenzwärmespeichern und deren ortsungebundenen Einsatz näher. Dabei ging Deckert auf die Funktionsweise der Technologie der Latenzwärmespeicherung ein und zeigt anhand eines Praxisbeispiels aus einem Forschungsprojekt dessen mobilen Einsatz, indem Wärmeerzeugung und Wärmeverbrauch durch Einsatz eines LKWs mit einem Latenzwärmespeicher⁸⁸ verbunden wurde.

LKWs mit Latenzwärmespeichern können wirtschaftlich Abwärmequellen und Wärmesenken mit Entfernungen bis zu 50 km verbinden. Für die Wirtschaftlichkeit ist weniger die Entfernung sondern vielmehr eine hohe Frequenz der Be- und Entladezyklen maßgebend.

Sein Fazit lautet, dass die Weiterentwicklung und Verbesserung der Latenzwärmespeicher den ortsungebunden Einsatz weiter unterstützen wird und dadurch weitere Abwärmequellen, gekoppelt an Wärmesenken, erschlossen werden können.

⁸⁸ Siehe Abbildung Deckblatt

Julian Asmus Nebel von der Kanzlei Görg Rechtsanwälte stellte in seinem Vortrag den Rechtsrahmen und die gestalterischen Möglichkeiten zum Thema Abwärme dar. Dabei zeigte Nebel die fehlende Definition von Abwärme und die regulatorische Komplexität des Themas als Querschnittsthema aus dem Energierecht.

Sein Fazit besagt, dass die Hebung des Potentials von Abwärme eines integrativen und koordinierenden Regelungssystems bedarf und bspw. in die Notwendigkeit einer „Abwärmenutzungsplanung“ münden kann.

Jens Strack von Therm-Process-Consulting machte dem Publikum nochmals deutlich, dass vor einer Abwärmenutzung immer zuerst die Prozessanalyse mit der Betrachtung der Industrieprozesse in seiner Gesamtheit erfolgen muss. Erst dann können unterschiedliche Optimierungsstrategien generiert werden mit einer ggf. darauffolgenden nachgeordneten Abwärmenutzung. Diese sinnvolle Vorgehensweise konnte anhand vieler Fertigungsprozesse und deren Effizienzpotentiale im Detail vorgestellt werden.

Jens Strack bekräftigte in seinem Fazit die Prozessanalyse als notwendiges Instrument und Entscheidungsgrundlage für alle Optimierungs- und Effizienzstrategien in Industrieprozessen.

Michael Arnemann vom Deutschen Kälte- und Klimatechnischen Vereins (DKV) griff das Thema der Abwärmenutzung aus Kälte-, Klima- und Wärmepumpentechnik auf und erläuterte die Technologie und deren Funktionsweise sowie die Möglichkeiten der Abwärmenutzung. Des Weiteren ging Arnemann auf die aktuellen nationalen Markt- und Energiedaten der Kälte-, Klima- und Wärmepumpen ein und stellte die verfügbaren Abwärmepotentiale dar.

Sein Fazit zeigt, dass in diesem Bereich sinnvolle Abwärmenutzung betrieben werden kann jedoch auch weitere Forschung und Entwicklung notwendig ist.

Dirk G. Ebling von der Fachhochschule Düsseldorf griff das Zukunftsthema Thermoelektrik auf und stellte das physikalische Prinzip, Bauweise und Zusammensetzung thermoelektrischer Generatoren vor. Dank dieser kann auch Strahlungswärme in Strom umgewandelt werden. Ebling ging hierbei auf ein Forschungs- und Demonstrationsprojekt in Verbindung mit einem Schmiedeprozess ein und zeigte die noch aktuellen wirtschaftlichen Herausforderungen für den Einsatz solcher thermoelektrischer Module.

Ebling kommt zu dem Fazit, dass thermoelektrische Generatoren ein erhebliches Potential zur Abwärmenutzung darstellen für einen Einsatz in den unterschiedlichsten Prozesse für das weitere Forschungsbedarf bzgl. Wirkungsgrade und Wirtschaftlichkeit nötig sind.

Wolfgang Müller vom Referat KI I 5 Klimaschutz und Energieeffizienz, Klimaschutztechnologien des Bundesumweltministeriums schloss, als Initiator und Mitveranstalter, die erfolgreiche Veranstaltung ab. In seinem Abschlussplenum wies er darauf, dass mit dem Nationalen Aktionsplan Energieeffizienz (NAPE) und dem Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 bereits ein Rahmen für die gezielte Adressierung von Maßnahmen zur deutlich vermehrten Ausschöpfung der Effizienzpotenziale aus der Abwärmenutzung besteht. Nunmehr gilt es, die identifizierten Themen und Aufgaben in konkrete Maßnahmen zu kleiden. Gezielte, d.h. auf Adressaten bezogene Informationen, Beratung und Motivation, bei Bedarf kombiniert mit auf die Effizienzkomponenten bezogenen wirtschaftlichen Anreizen, haben sich aus Sicht des BMUB als besonders wirksam erwiesen.

Er bemerkte am Rande, dass es im Vergleich zu den „erneuerbare Energien Technologien“ die „Energieeffizienztechnologien“ nicht gibt. Vielmehr geht es immer darum, die jeweilige Technologie der Energienutzung (z.B. Stromerzeugung, Stahlproduktion, Gebäudewärme, Erzeugung von Kälte, Beleuchtung) besonders effizient, d.h. mit möglichst geringem Einsatz von Primärenergie, zu gestalten. Das bedeutet auch, dass quasi alle Lebensbereiche berührt sind und die Palette der relevanten Akteure schier unendlich ist. Bei teilweise sehr komplexen Systemen ist zudem ein so genannter systemscher Ansatz geboten, um eine möglichst klimafreundliche und zugleich hoch wirtschaftliche Lösung zu finden.

Müller dankte allen Teilnehmern der Fachkonferenz herzlich. Er zeigte sich zuversichtlich, dass von der Tagung zusätzliche Impulse für das Themenfeld „(Ab)wärmenutzung“ ausgehen und damit ein deutlicher zusätzlicher Klimaschutzbeitrag geleistet werden kann. Dazu wünschte er allen Akteuren viel Erfolg.

Die Fachtagung und Ihre Referenten nochmals im Überblick:

- Eröffnung: Berthold Goeke, BMUB, Leiter Unterabteilung Klimaschutzpolitik
- Impulsvortrag Grundlagen der Abwärmenutzung: Guillem Tänzer, IZES gGmbH
- Potenziale und Instrumente: Dr. Martin Pehnt, Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (ifeu)
- Perspektiven industrieller Abwärmenutzung: Dr. Simon Hirzel, Fraunhofer ISI
- Gebäude als thermische Speicher: Prof. Dr.-Ing. Clemens Felsmann, TU Dresden
- Best-Practice: ORC-Verfahren in der Praxis: Michael Schmidt, DeVeTec GmbH
- Großtechnische Wärmerückgewinnung: Das Konditherm-Verfahren: Dr. Georg F. Schu, ESI GmbH
- Korrosionsbeständige Wärmeübertrager in MVA - Eine rentable Investition zur Steigerung der Energieeffizienz: Mariusz Maciejewski, Wallstein Ingenieur GmbH

- Mobile Latentwärmespeicher zur Verwertung von Abwärme aus Biomassekonversions-, Kraftwerks- und Industrieprozessen: Marco Deckert, Fraunhofer UMSICHT
- Aktuelle rechtliche Rahmenbedingungen der Abwärmenutzung: Dr. Julian Asmus Nebel, Görg Rechtsanwälte
- Prozessoptimierung als Vorstufe zur Abwärmenutzung: Dr.-Ing. Jens Strack, Therm-Process-Consulting
- Potenziale der Kälte-, Klima- und Wärmepumpentechnik zur Wärmerückführung: Prof. Dr.-Ing. Michael Arnemann, Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein (DKV)
- Strom aus Strahlungswärme: thermoelektrische Energiewandler in der Schmiedeindustrie: Dr. Dirk G. Ebling, Fachhochschule Düsseldorf
- Abschlussplenum: Wolfgang Müller, BMUB

Alle Vorträge sowie diese Studie sind auf der Internetseite der IZES gGmbH als Download unter der Rubrik *Termine / Veranstaltungen - 2015* verfügbar:

Internet: <http://www.izes.de/deutsch/termine-veranstaltungen/2015/bmub-fachtagung-klimaschutz-durch-abwaermenutzung.html>

8 Zusammenfassung und Gesamtfazit

Abwärme darf nicht länger „stiefmütterlich“ behandelt werden. Damit sie den möglichen Beitrag zur Energiewende leisten kann, ist sie entsprechend den mit ihrem Einsatz verbundenen „Null-THG-Emissionen“ eine gleichrangige Alternative zu erneuerbaren Energien. Energiewende bedeutet (u.a.) „Stromwende & Wärmewende“. Fokussiert auf die Effizienz- und Klimaschutzziele der Bundesregierung müssen zusätzliche Maßnahmen zur Abwärmenutzung auf den Weg gebracht werden.

Die hier verfasste Studie versucht in den einzelnen Kapiteln diese Relevanz nochmals zu unterstreichen. Neben der Vorstellung von Abwärmenutzungstechnologien und deren Einsatzgebiete kann man dem Kapitel 4 anhand des internationalen Studien-screensings und der Ermittlung nationaler Abwärmepotentiale entnehmen, dass anfallende Abwärme in vielen Fällen ungenutzt bleibt und die Potentiale enorm sind.

So haben bei den eingesetzten Energieträgern in der Industrie Gase mit 265 TWh (36,7 %), Strom mit 226 TWh (31,3 %) und Steinkohle mit 82 TWh (11,4 %) den überwiegenden Anteil. Es kommen also überwiegend fossile Energieträger zum Einsatz. Strom und Kohle sind dabei auf Grund der hohen Emissionsfaktoren klimapolitisch besonders nachteilig. Beim Endenergieverbrauch der Industrie entfallen 462 TWh (64,1 %) auf Prozesswärme. Aber auch der Verbrauch bei Raumwärme ist beachtlich. Er beträgt rund 65 TWh (9,0 %).

In der Studie konnte ein theoretisches Abwärmepotential ermittelt werden mit 225 TWh pro Jahr nutzbare Abwärme. Das sind 36 % des gesamten Endenergieanteils des verarbeitenden Gewerbes. Auch könnten daraus theoretisch 37 TWh Strom pro Jahr mit Hilfe heutiger Abwärmetechnologien erzeugt werden. Die Ermittlung dieser Potentiale war insofern als Herausforderung zu verstehen aufgrund unzureichender Daten. Abwärmepotentiale werden in der Regel (national und international) über Primär- oder Endenergiedaten ermittelt. Aufgrund der Heterogenität der Branchen und Unterbranchen, verbunden mit den jeweiligen vielfältigen Produktionsprozessen, ist die Ermittlung eines belastbaren technischen Potentials nicht möglich. Weitere Erhebungen könnten hier ggf. Abhilfe schaffen sowie die Fokussierung auf die wichtigsten Branchen mit den höchsten Abwärmepotentialen.

Zum besseren Verständnis von regulatorischen Rahmenbedingungen wurden eine statische Wirtschaftlichkeitsrechnung nach VDI 2067 für eine ORC-Anlage durch-

geführt in Form von zwei Varianten - mit 7.500 h und 4.000 h Jahresvolllaststundenzahl⁸⁹. Während bei der Variante 1 mit 7.500 h eine Wirtschaftlichkeit bei einer Eigenstromquote von 30 % erreicht wird ist bei Variante 2 selbst bei 100 % Eigenstromquote eine Wirtschaftlichkeit nicht sichtbar. Dies zeigt die Problematik in zweierlei Hinsicht:

1. Eine reine Stromeinspeisung von Abwärmetechnologien über das KWKG ist unwirtschaftlich, nur durch die Eigenstromerzeugung können diese wirtschaftlich betrieben werden. Das KWKG unterstützt hier jedoch die Wirtschaftlichkeit.
2. Ist eine Abwärmequelle bspw. nur 4.000 h Jahresvolllaststunden oder geringer verfügbar, ist ein wirtschaftlicher Betrieb nicht darstellbar, trotz Unterstützung des KWKG.

Ein Hauptgrund ist, im Vergleich bspw. von etablierten KWK-Motoren, die geringen Stückzahlen und die damit verbunden hohen spezifischen Kosten € pro kW_{el.}, welche einen Faktor 2-4 haben.

Man kann davon ausgehen, dass Abwärmequellen von vorgeschalteten Produktionsprozessen abhängig sind und daher nicht immer kontinuierlich verfügbar. Die finanziellen Rahmenbedingungen für eine Abwärmeverstromung bei geringen Vollbetriebsstunden sind ungenügend. Hier sind bspw. unterschiedliche Pfade möglich:

- Erhöhung des KWK-Zuschlags explizit für die reine Abwärmeverstromung z.B. bei geringen Jahresvollbetriebsstunden
- Einführung von unterschiedlichen Technologie-Boni oder Förderkulissen (Investitionsbeihilfen) für Effizienztechnologien zur Nutzung von (industrieller) Abwärme
- Befreiung von der EEG-Umlage für die Eigenstromerzeugung bei Effizienztechnologien zur Nutzung von (industrieller) Abwärme
- Die Pläne der Bundesregierung den KWK-Zuschlag für die Eigenstromerzeugung aufzuheben ist im Kontext von Stromerzeugungstechnologien (Effizienztechnologien) aus Abwärme als kontraproduktiv zu sehen.

Generell sollten weitere Überlegungen angestrebt werden, inwiefern die (Ab)Wärme, welche regulatorisch als Querschnittsthema wahrgenommen wird, in einem Wärme- oder Energieeffizienzgesetz behandelt werden sollte oder welche Gesetze und Verordnungen entsprechend angepasst oder ergänzt werden müssten.

⁸⁹ Repräsentativ für eine bspw. kontinuierliche und diskontinuierliche Abwärmequelle

Die Behandlung von erneuerbaren Energien und Energieeffizienzmaßnahmen (wie die Nutzung von Abwärme) sollte hierbei an den realen THG-Emissionen ausgerichtet werden.

Im Vorfeld sollte die Definition für Abwärme diskutiert werden.

9 Literaturverzeichnis

- AG Energiebilanzen e.V. (16. September 2014). *Daten und Fakten*. Von Energieflussbild (vereinfacht in PJ) 2013: http://www.ag-energiebilanzen.de/#energieflussbild-2013-pj_kurz_20140814 abgerufen
- Berthou, M., & Bory, D. (2012). Overview of waste heat in the industry in France. *ECEEE 2012 SUMMER STUDY on Energy efficiency in industry*, S. 453 - 459.
- Blesl, D.-I. M. (SS 2014). *KWK Anlagen und Systeme: ORC und Kalina-Prozess; Biomasse KWK*. Universität Stuttgart, IER.
- Böckh, P. v. (2008). *Technische Thermodynamik: "Einführendes Lehrbuch für Maschinenbauer und Verfahrenstechniker"*. Springer Verlag.
- Broberg Viklund, & Johansson. (Januar 2014). Technologies for utilization of industrial excess heat - potentials for energy recovery and CO2 emission reduction. *Energy Covers Manage*, S. 369–379.
- Broberg Viklund, & Karlsson. (2014). Industrial excess heat use: Systems analysis and CO2 emissions reduction. *Appl Energy*.
- Campana, Bianchi, Branchini, De Pascale, Peretto, Baresi, . . . Vescovo. (22. August 2013). ORC waste heat recovery in European energy intensive industries: Energy and GHG savings. *Energy Conversion and Management*, S. 244 - 252.
- Carrier GmbH. (Juni 2009). Prozesskühlung zum "Nulltarif". *Carrier-Absorptionskältemaschinen nutzen Brüdendampf der Reifenherstellung mithilfe des "Konditherm"-Systems*, S. 24-25.
- Center on Globalization. (2009). *Recycling Industrial Waste Energy*. Durham.
- Deutsche Energie Agentur - dena. (04. Juni 2014). *Experten-Workshop der Initiative EnergieEffizienz*. Von „Analyse der Energieeffizienzinstrumente und Entwicklung des Energieverbrauchs in Deutschland.“: http://www.dena.de/fileadmin/user_upload/Veranstaltungen/2014/E-Workshop_4.6.14/2_Steffen_Joest_dena_EWS_Vortra.pdf abgerufen
- Element Energy et al. (2014). *The potential for recovering and using surplus heat from industry*. London.
- Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. (November 2013). *Industrielle Abwärmenutzung - Kurzstudie*. Karlsruhe.
- Gieck. (2005). *Technische Formelsammlung*. Germering: Gieck Verlag GmbH.
- Hakenesch, P. D.-I. (V2.1). *Technische Thermodynamik - Skript zur Vorlesung*. Hochschule München: Prof. Dr.-Ing. Peter R. Hakenesch.

- Hita, A., Seck, G., Djemaa, A., & Guerassimoff, G. (2011). Assessment of the potential of heat recovery in food and drink industry by the use of TIMES model. *ECEEE 2011 SUMMER STUDY • Energy efficiency first : The foundation of a low-carbon society*, S. 735 - 743.
- ifeu et al. (2010). *Die Nutzung industrieller Abwärme – technisch-wirtschaftliche Potenziale und energiepolitische Umsetzung*. Karlsruhe.
- IZES gGmbH. (2010). *Industrielle Abwärme*. Saarbrücken.
- Langeheinecke, K., Jany, P., Sapper, E., & Thieleke, G. (2004). *Thermodynamik für Ingenieure*. Wiesbaden: Vieweg.
- McKenna, & Norman. (12. Juni 2010). Spatial modelling of industrial heat loads and recovery potentials in the UK. *Energy Policy* 38, S. 5878–5891.
- Polifke, W., & Kopitz, J. (2009). *Wärmeübertragung: Grundlagen, analytische und numerische Methoden*. München: Pearson Deutschland GmbH.
- Saena. (2012). *Technologien der Abwärmenutzung*. Dresden: Sächsische Energieagentur GmbH.
- Schu, D. G. (2009). *Das Kondithermverfahren zur Wärmerückgewinnung aus Brühdämpfen*. Hallbergmoos.
- U.S. Department of Energy. (2004). *Energy Use, Loss and Opportunities Analysis*. Columbia.
- Utlu, & Parali. (2013). Investigation of the potential of thermophotovoltaic heat recovery for the Turkish industrial sector. *Energy Conversion and Management* 74, S. 308-322.

10 Glossar

Abwärme:	Der Begriff umfasst sowohl den von festen Oberflächen einer Anlage über Konvektion und Leitung abgegebenen Wärmestrom als auch alle ein System verlassende Enthalpieströme
Anergie:	Die Anergie ist der Teil der Energie, welcher nicht in Arbeit umgewandelt werden kann.
Endenergie:	Der Begriff bezeichnet die dem Endverbraucher z.B. über die Steckdose, Anlieferung im Heizöltank oder durch Fernwärme zur Verfügung stehende Energie, die dieser wiederum mit Hilfe von technischen Hilfsmitteln in Nutzenergie umwandelt
Enthalpie:	Enthalpie ist ein Maß für den inneren Energieinhalt eines Stoffstromes der eine Bilanzgrenze überschreitet. Sie kann entweder in einer höheren Temperatur gegenüber der Umgebung oder auch in einem chem. Energiepotenzial (z.B. Heizwert) eines ‚Brennstoffs‘ begründet sein.
Exergie:	Die Exergie beschreibt den Anteil der Energie, welcher in Arbeit umgewandelt werden kann, Die Exergie ist daher als eine Art Potential zwischen zwei Zuständen zu sehen, ein Zustand entspricht dem generell dem Umgebungszustand. Verrichtet die Exergie Arbeit wird diese in Anergie umgewandelt.
Konversionstechnologie:	Technologie zur Umwandlung eines fossilen oder regenerativen Energieträgers in Wärme- oder elektrische Energie
Kraft-Wärme-Kopplung:	Gleichzeitige Erzeugung von Strom und Wärme in einer Anlage, in der Regel Heizkraftwerken. Die entstehende Wärme wird hierbei unmittelbar möglichst vollständig z.B. für Fernwärme oder als Prozesswärme genutzt
Primärenergie:	Bezeichnet die am Beginn der Energieumwandlungskette in den Energieträgern enthaltene Energie, die noch keiner vom Menschen verursachten und beabsichtigten Umwandlung unterworfen wurde

Primärenergieträger:	Energieträger die – in Analogie zur vorangegangenen Definition – keiner vom Menschen verursachten und beabsichtigten Umwandlung unterworfen wurden. Hierbei wird unter Umwandlung eine Änderung der Energieform und der chemischen Zusammensetzung oder des nuklearen Aufbaues des Energieträgers verstanden
Primärenergiefaktor:	Der Primärenergiefaktor f_p gibt an, wie viel Primärenergie der unterschiedlichen Energieträger benötigt wird zur Umwandlung in Endenergie
Wärmerückgewinnung:	Bezeichnet die Nutzung von Abwärme unter Einsatz von Wärmeübertragern, Wärmespeichern und Hilfsenergie zum Fördern von Wärmeträgermedien

11 Anhang

11.1 Handlungsleitfaden für Betriebe zur Abwärmenutzung

Das verarbeitende Gewerbe, mit einer Vielzahl an Branchen, Unterbranchen und Sparten und geprägt von energieintensiver Nutzung von Primär- und Sekundärenergie, weist hohe theoretische Abwärmepotentiale auf. Durch die Heterogenität der Branche muss in jedem Einzelfall geprüft werden, ob diese Potentiale technologisch und wirtschaftlich genutzt werden können.

Um einen ersten Überblick zu den ggf. im jeweiligen Betrieb sinnvoll nutzbaren Abwärmepotentialen zu erhalten, empfiehlt es sich, folgenden Handlungsleitfaden anzuwenden.

Anmerkung: Der Handlungsleitfaden dient dazu das ggf. verfügbare Angebot an Abwärme mit den vorhandenen Wärmesenken gegenüberzustellen, um so Handlungsgrundlagen für die Betriebe zu ermöglichen.

1. Nutzbare Wärmequellen

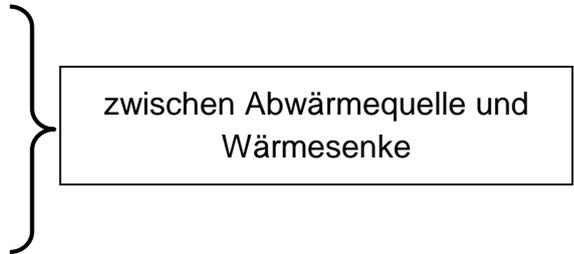
- Überblick der Produktionsprozesse im Unternehmen.
- Identifizierung von Konversionsprozessen innerhalb der Produktionsprozesse.
- Identifizierung von Abwärmequellen:
 - Räumliche Identifizierung
 - Medium (fest, flüssig, gasförmig)
 - Analyse auf chemische Verunreinigungen
 - Ermittlung der spezifischen Wärmeleitkapazität [J/(kgK)]
 - Temperaturniveau [K]
 - Volumenstrom [Nm³/h]
 - Zeitliche Verfügbarkeit im Jahr [h/a]

2. Nutzbare Wärmesenken

- Identifizierung von Wärmesenken innerhalb des Unternehmens
 - Nutzbare Wärmesenken
 - Räumlich Identifizierung
 - Medium (fest, flüssig, gasförmig)
 - Analyse auf chemische Verunreinigungen
 - Ermittlung der spezifischen Wärmeleitkapazität [J/(kgK)]
 - Temperaturniveau [K]
 - Volumenstrom [Nm³/h]
 - Zeitliche Verfügbarkeit im Jahr [h/a]

3. Abgleich der erhobenen Daten

- Räumlicher Abgleich
- Zeitlicher Abgleich
- Abgleich Medium
- Abgleich Temperaturniveaus
- Abgleich Volumenströme



4. Handlungsgrundlagen

- Sind Übereinstimmungen vorhanden?
 - JA:
 - Technologische Überprüfung
 - Wirtschaftliche Überprüfung
 - NEIN:
 - Mangel an (Ab)wärmequellen, Wärmesenken vorhanden
 - Einsatz von Wärmeerzeugern (ggf. KWK-Anlagen)
 - Technologische Überprüfung
 - Wirtschaftliche Überprüfung
 - Mangel an Wärmesenken, Abwärmequellen vorhanden
 - Zusätzliche Schaffung von Wärmesenken
 - Anschluss an (Fern-)Wärmenetze
 - Technologische Überprüfung
 - Wirtschaftliche Überprüfung
 - Nutzung der Abwärme zur Stromerzeugung (Stromeinspeisung oder Eigenstromnutzung)
 - Technologische Überprüfung
 - Wirtschaftliche Überprüfung
 - Sonstige Nutzung der Wärme

Die Ergebnisse des Handlungsleitfadens geben dem Betrieb einen Überblick, welche Abwärmequellen und Wärmesenken vorhanden und theoretisch/technisch nutzbar sind. Anhand dieser Datenerhebung können Ziele und konkrete Handlungsempfehlungen entwickelt werden.

Gesamtziel ist es, die Energiekosten des Unternehmens zu senken, eine hohe Energieeffizienz zu erreichen und einen Beitrag für den Klimaschutz zu leisten.

11.2 Anhang Tabellen

Erlöse KWKG bei Stromeigenverbrauch Prozentualer Anteil Stromeigennutzung	Erläuterung	Kosten					Kosten 100%	Zeit
		20%	40%	60%	80%	100%		
Vollastbetriebsstunden [h/a]	7500							
El. Leistung [kW]	345							
Produzierter Strom [kWh]	2587500							
Eigenentzelter Strom [kWh]		517500	1035000	1552500	2070000	2587500	pro Jahr	
Eingespeicherter Strom [kWh]		2070000	1552500	1035000	517500	0	pro Jahr	
Eingesparte Netto-Stromkosten (für die Industrie) [€/kWh]	0,1556	80.523,00 €	161.046,00 €	241.569,00 €	322.092,00 €	402.615,00 €	pro Jahr	
30 % EEG-Umlage (31.07.14-01.01.16) : EEG2015: 0,0617 [€/kWh]	-0,01851	- 9.578,93 €	- 19.157,85 €	- 28.736,78 €	- 38.315,70 €	- 47.894,63 €	pro Jahr	
35 % EEG-Umlage (31.12.15-01.01.17) : EEG2015: 0,0617 [€/kWh]	-0,021595	- 11.175,41 €	- 22.350,83 €	- 33.526,24 €	- 44.701,65 €	- 55.877,06 €	pro Jahr	
40 % EEG-Umlage (ab 01.01.17) : EEG2015: 0,0617 [€/kWh]	-0,02468	- 12.771,90 €	- 25.543,80 €	- 38.315,70 €	- 51.087,60 €	- 63.859,50 €	pro Jahr	
Stromvergütung 4. Q. 2015 (EEX) [€/kWh]	0,03482	72.077,40 €	54.058,05 €	36.038,70 €	18.019,35 €	- €	pro Jahr	
Zuschlag KWKG 2012 für 30.000 Vbh [€/kWh] bis 50 kW	0,0511	19.162,50 €	19.162,50 €	19.162,50 €	19.162,50 €	- €	pro Jahr	
Zuschlag KWKG 2012 für 30.000 Vbh [€/kWh] 50-250 kW	0,04	60.000,00 €	47.100,00 €	26.400,00 €	5.700,00 €		pro Jahr	
Zuschlag KWKG 2012 für 30.000 Vbh [€/kWh] > 250 kW	0,024	4.680,00 €					pro Jahr	
Vermiedene Netznutzungsentgelte* [€/kWh] <= 2500 Vbh ; > 2.500 Vbh	0,02	41.400,00 €	31.050,00 €	20.700,00 €			pro Jahr	
	0,0345				17.853,75 €		pro Jahr	
Gesamterlös 1 (2015)		268.263,98 €	293.258,70 €	315.133,43 €	344.511,90 €	354.720,38 €	pro Jahr	
Gesamterlös 2 (2016)		266.667,49 €	290.065,73 €	310.343,96 €	338.125,95 €	346.737,94 €	pro Jahr	
Gesamterlös 3 (2017)		265.071,00 €	286.872,75 €	305.554,50 €	331.740,00 €	338.755,50 €	pro Jahr	

Tabelle 11-1: Erlöse der ORC-Anlage mit unterschiedlichen Eigenstromquoten (7.500 h)

Jahre	Ausgaben	Einnahmen							
		KWKG 0% Eigennutzung	KWKG 20% Eigennutzung	KWKG 40% Eigennutzung	KWKG 60% Eigennutzung	KWKG 80% Eigennutzung	100% Eigennutzung		
1	220.252,90 €	238.109,25 €	268.263,98 €	293.258,70 €	315.133,43 €	344.511,90 €	354.720,38 €		
2	440.505,80 €	476.218,50 €	534.931,46 €	583.324,43 €	625.477,39 €	682.637,85 €	701.458,31 €		
3	660.758,70 €	714.327,75 €	800.002,46 €	870.197,18 €	931.031,89 €	1.014.377,85 €	1.040.213,81 €		
4	881.011,60 €	952.437,00 €	1.065.073,46 €	1.157.069,93 €	1.236.586,39 €	1.346.117,85 €	1.378.969,31 €		
5	1.101.264,50 €	1.094.283,75 €	1.330.144,46 €	1.443.942,68 €	1.542.140,89 €	1.677.857,85 €	1.717.724,81 €		
6	1.321.517,40 €	1.236.130,50 €	1.511.372,96 €	1.730.815,43 €	1.847.695,39 €	2.009.597,85 €	2.056.480,31 €		
7	1.541.770,30 €	1.377.977,25 €	1.692.601,46 €	1.995.821,55 €	2.153.249,89 €	2.341.337,85 €	2.395.235,81 €		
8	1.762.023,20 €	1.519.824,00 €	1.873.829,96 €	2.216.431,80 €	2.458.804,39 €	2.673.077,85 €	2.733.991,31 €		
9	1.982.276,10 €	1.661.670,75 €	2.055.058,46 €	2.437.042,05 €	2.764.358,89 €	3.004.817,85 €	3.072.746,81 €		
10	2.202.529,00 €	1.803.517,50 €	2.236.286,96 €	2.657.652,30 €	3.069.913,39 €	3.336.557,85 €	3.411.502,31 €		
11	2.422.781,90 €	1.945.364,25 €	2.417.515,46 €	2.878.262,55 €	3.329.905,39 €	3.668.297,85 €	3.750.257,81 €		
12	2.643.034,80 €	2.087.211,00 €	2.598.743,96 €	3.098.872,80 €	3.589.897,39 €	4.000.037,85 €	4.089.013,31 €		
13	2.863.287,70 €	2.229.057,75 €	2.779.972,46 €	3.319.483,05 €	3.849.889,39 €	4.331.777,85 €	4.427.768,81 €		
14	3.083.540,60 €	2.370.904,50 €	2.961.200,96 €	3.540.093,30 €	4.109.881,39 €	4.663.517,85 €	4.766.524,31 €		
15	3.303.793,50 €	2.512.751,25 €	3.142.429,46 €	3.760.703,55 €	4.369.873,39 €	4.995.257,85 €	5.105.279,81 €		

Tabelle 11-2: Erlösstruktur der ORC-Anlage für 15 Jahre (7.500 h)

Erlöse KWKG bei Stromeigenverbrauch Prozentualer Anteil Stromeigennutzung	Erläuterung	Kosten					Kosten 100%	Zeit
		20%	40%	60%	80%	100%		
Vollastbetriebsstunden [h/a]	4500							
Ei. Leistung [kW]	345							
Produzierter Strom [kWh]	1552500							
Eigenenutzter Strom [kWh]		310500	621000	931500	1242000	1552500	pro Jahr	
Eingespeicherter Strom [kWh]		1242000	931500	621000	310500	0	pro Jahr	
Eingesparte Netto-Stromkosten (für die Industrie) [€/kWh]	0,1556	48.313,80 €	96.627,60 €	144.941,40 €	193.255,20 €	241.569,00 €	pro Jahr	
30 % EEG-Umlage (31.07.14-01.01.16) ; EEG2015: 0,0617 [€/kWh]	-0,01851	- 5.747,36 €	- 11.494,71 €	- 17.242,07 €	- 22.989,42 €	- 28.736,78 €	pro Jahr	
35 % EEG-Umlage (31.12.15-01.01.17) ; EEG2015: 0,0617 [€/kWh]	-0,021595	- 6.705,25 €	- 13.410,50 €	- 20.115,74 €	- 26.820,99 €	- 33.526,24 €	pro Jahr	
40 % EEG-Umlage (ab 01.01.17) ; EEG2015: 0,0617 [€/kWh]	-0,02468	- 7.663,14 €	- 15.326,28 €	- 22.989,42 €	- 30.652,56 €	- 38.315,70 €	pro Jahr	
Stromvergütung 4. Q. 2015 (EEX) [€/kWh]								
Zuschlag KWKG 2012 für 30.000 Vbh [€/kWh] bis 50 kW	0,03482	43.246,44 €	32.434,83 €	21.623,22 €	10.811,61 €	- €	pro Jahr	
Zuschlag KWKG 2012 für 30.000 Vbh [€/kWh] 50-250 kW	0,0511	11.497,50 €	11.497,50 €	11.497,50 €	11.497,50 €	- €	pro Jahr	
Zuschlag KWKG 2012 für 30.000 Vbh [€/kWh] > 250 kW	0,04	36.000,00 €	28.260,00 €	15.840,00 €	3.420,00 €		pro Jahr	
Vermiedene Netznutzungsentgelte* [€/kWh] <= 2500 Vbh ; > 2.500 Vbh	0,024	2.808,00 €					pro Jahr	
	0,02	24.840,00 €	18.630,00 €				pro Jahr	
	0,0345			21.424,50 €	10.712,25 €		pro Jahr	
Gesamterlös 1 (2015)		160.958,39 €	175.955,22 €	198.084,56 €	206.707,14 €	212.832,23 €	pro Jahr	
Gesamterlös 2 (2016)		160.000,49 €	174.039,44 €	195.210,88 €	202.875,57 €	208.042,76 €	pro Jahr	
Gesamterlös 3 (2017)		159.042,60 €	172.123,65 €	192.337,20 €	199.044,00 €	203.253,30 €	pro Jahr	

Tabelle 11-3: Erlöse der ORC-Anlage mit unterschiedlichen Eigenstromquoten (4.500 h)

Jahre	Ausgaben	Einnahmen							
		KWK 0% Eigennutzung	KWK 20% Eigennutzung	KWK 40% Eigennutzung	KWK 60% Eigennutzung	KWK 80% Eigennutzung	100% Eigennutzung		
1	220.252,90 €	142.865,55 €	160.958,39 €	175.955,22 €	198.084,56 €	206.707,14 €	212.832,23 €		
2	440.505,80 €	285.731,10 €	320.958,88 €	349.994,66 €	393.295,43 €	409.582,71 €	420.874,99 €		
3	660.758,70 €	428.596,65 €	480.001,48 €	522.118,31 €	585.632,63 €	608.626,71 €	624.128,29 €		
4	881.011,60 €	571.462,20 €	639.044,08 €	694.241,96 €	777.969,83 €	807.670,71 €	827.381,59 €		
5	1.101.264,50 €	714.327,75 €	798.086,68 €	866.365,61 €	970.307,03 €	1.006.714,71 €	1.030.634,89 €		
6	1.321.517,40 €	857.193,30 €	957.129,28 €	1.038.489,26 €	1.162.644,23 €	1.205.758,71 €	1.233.888,19 €		
7	1.541.770,30 €	976.955,85 €	1.116.171,88 €	1.210.612,91 €	1.354.981,43 €	1.404.802,71 €	1.437.141,49 €		
8	1.762.023,20 €	1.062.063,90 €	1.275.214,48 €	1.382.736,56 €	1.547.318,63 €	1.603.846,71 €	1.640.394,79 €		
9	1.982.276,10 €	1.147.171,95 €	1.400.718,40 €	1.554.860,21 €	1.739.655,83 €	1.802.890,71 €	1.843.648,09 €		
10	2.202.529,00 €	1.232.280,00 €	1.509.455,50 €	1.726.983,86 €	1.931.993,03 €	2.001.934,71 €	2.046.901,39 €		
11	2.422.781,90 €	1.317.388,05 €	1.618.192,60 €	1.863.723,33 €	2.124.330,23 €	2.200.978,71 €	2.250.154,69 €		
12	2.643.034,80 €	1.402.496,10 €	1.726.929,70 €	1.963.654,65 €	2.316.667,43 €	2.400.022,71 €	2.453.407,99 €		
13	2.863.287,70 €	1.487.604,15 €	1.835.666,80 €	2.063.585,97 €	2.509.004,63 €	2.599.066,71 €	2.656.661,29 €		
14	3.083.540,60 €	1.572.712,20 €	1.944.403,90 €	2.163.517,29 €	2.701.341,83 €	2.798.110,71 €	2.859.914,59 €		
15	3.303.793,50 €	1.657.820,25 €	2.053.141,00 €	2.263.448,61 €	2.893.679,03 €	2.997.154,71 €	3.063.167,89 €		

Tabelle 11-4: Erlösstruktur der ORC-Anlage für 15 Jahre (7.500 h)

WZ Schlüssel	Bezeichnung (Verarbeitendes Gewerbe)	Betriebe		Beschäftigte	Umsatz Tsd. EUR	Kohle	Heizöl	Erdgas	Strom	(Primär-) Energieverbrauch insgesamt (Kohle, Heizöl, Erdgas, Strom)	Primärenergiefaktor ρ		
		Anzahl	Anzahl								1.1 Umwandlung Erdenergie Kohle	1.1 Umwandlung Erdenergie Heizöl	1.1 Umwandlung Erdenergie Erdgas
WZ08-24	Metallerzeugung und -bearbeitung	1.098	267.115	110.900.787 €	460.555.284	19.772.442	13.772.442	164.363.189	17.974.948	418.866.622	17.974.948	135.269.910	68.464.662
WZ08-20	Herstellung von chemischen Erzeugnissen	1.559	311.088	120.520.454 €	36.287.627	89.407.061	316.968.501	652.876.749	81.279.146	32.988.762	17.974.948	316.968.501	74.381.359
WZ08-23	H.v. Glas-, waren, Keramik, Verarb. v. Steinen u. Erden	3.236	192.103	36.516.388 €	66.722.982	23.978.316	106.744.673	46.090.226	243.596.197	60.657.266	21.708.169	97.040.612	19.304.261
WZ08-17	Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus	974	137.163	37.923.832 €	23.349.468	4.582.766	115.213.277	77.017.859	20.163.918	24.226.768	4.166.151	104.759.752	39.090.774
WZ08-05	Kornbearbeitung	42	48.634	4.324.986 €	144.667.160	971.109	27.129.466	172.767.765	131.515.618	182.827	17.681.615	86.498.881	11.303.944
WZ08-10	Herstellung von Nahrungsmitteln	5.173	469.143	93.612.289 €	10.137.273	19.460.996	55.021.761	179.786.799	9.233.865	8.242.117	17.681.615	17.681.615	22.928.734
WZ08-19	Kokerei und Mineralölverarbeitung	66	20.478	93.631.219 €	9.096.329	30.691.472	19.542.424	25.726.759	85.026.984	8.242.117	2.284.332	33.217.700	26.697.553
WZ08-29	Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenantrieben	1.369	770.377	334.035.210 €	1.089.946	2.512.766	36.539.470	61.674.126	101.816.306	990.859	5.667.034	33.505.724	19.148.638
WZ08-25	Herstellung von Metallenergieerzeugnissen	7.059	631.028	105.117.782 €	361.330	6.222.737	36.866.237	45.966.730	89.397.094	328.462	9.063.634	24.862.024	17.737.995
WZ08-28	Maschinenbau	6.027	987.402	222.960.282 €	194.243	9.969.988	27.348.227	42.715.168	80.227.655	176.594	4.721.914	20.285.569	21.247.348
WZ08-11	Herstellung von Gummi- und Kunststoffwaren	3.144	365.937	67.529.062 €	402.794	5.194.105	22.314.126	50.993.636	76.904.661	366.176	2.049.340	14.279.975	3.688.588
WZ08-27	Getränkeherstellung	621	62.954	20.140.000 €	546.713	1.927.012	15.707.972	8.852.611	27.951.929	497.011	1.596.031	14.279.975	3.688.588
WZ08-26	Herstellung von elektrischen Ausrüstungen	2.210	405.954	83.119.435 €	638.212	1.927.012	9.649.844	20.296.574	32.510.643	580.193	1.751.829	8.772.586	8.456.489
WZ08-26	H.v. DV-Geräten, elektron. u. opt. Erzeugnissen	1.780	283.448	76.464.323 €	638.212	1.927.012	9.332.186	22.601.230	33.006.934	-	975.925	10.588.606	9.417.179
WZ08-08	Gewinnung von Steinen und Erden, sonstiger Bergbau	1.053	28.462	5.020.624 €	2.581.086	2.254.274	11.647.467	6.623.777	25.106.603	2.346.441	2.049.340	7.000.316	3.593.240
WZ08-16	H.v. Holz-, Flecht-, Korb- u. Korkwaren (ohne Möbel)	1.270	84.404	17.722.876 €	0	2.240.171	7.700.347	16.840.268	26.780.786	-	2.049.340	10.588.606	3.593.240
WZ08-13	Herstellung von Textilien	794	72.568	11.115.969 €	916.272	1.324.578	11.024.025	8.314.842	21.579.717	832.975	1.204.162	10.021.840	3.464.518
WZ08-18	H.v. Druckerei-, Verw. v. Ton-, Bild-, Datenträgern	1.643	120.184	18.150.171 €	0	1.500.719	8.629.148	10.160.267	20.290.135	-	1.364.290	7.844.680	4.233.445
WZ08-21	Herstellung von pharmazeutischen Erzeugnissen	305	117.630	38.805.902 €	0	652.344	8.759.952	7.705.126	17.117.422	-	593.040	7.963.593	3.210.469
WZ08-32	Herstellung von sonstigen Waren	1.577	137.978	21.168.820 €	0	6.336.150	3.648.108	4.716.186	14.700.444	-	5.760.136	3.316.462	1.985.078
WZ08-31	Herstellung von Möbeln	1.056	111.434	19.174.518 €	0	8.031.169	1.568.763	5.025.774	14.615.705	-	7.301.063	1.417.057	2.094.072
WZ08-06	Gewinnung von Erdöl und Erdgas	29	3.059	6.414.550 €	0	3.848	9.148.526	1.869.182	11.021.856	-	3.498	8.317.114	778.826
WZ08-30	Sonstiger Fahrzeugbau	290	113.549	29.383.142 €	0	332.203	4.424.566	5.038.568	9.795.337	6.265.387	302.003	4.022.332	2.099.403
WZ08-33	Reparatur u. Installation von Masch. u. Ausrüstungen	2.178	199.544	37.125.839 €	0	651.099	2.453.452	3.160.836	2.244.708	-	591.909	2.230.411	1.317.015
WZ08-12	Tabakverarbeitung	27	9.565	12.284.789 €	0	179.884	1.094.818	980.007	1.994.446	-	163.530	986.188	408.336
WZ08-14	Herstellung von Bekleidung	381	37.882	8.140.791 €	0	403.903	800.658	789.885	1.267.968	-	367.185	727.671	329.119
WZ08-15	Herstellung von Leder, Ledervern und Schuhen	166	17.649	3.106.327 €	0	291.626	475.936	500.406	1.267.968	-	265.114	432.670	208.502
WZ08-09	Dienstleistungen f.d. Bergbau u. Gewinnung v. Steinen	13	2.683	454.836 €	0	0	60.195	24.553	84.748	-	-	54.723	10.230
Summe		45.192	6.005.968	1.665.860.393 €	757.536.735	242.810.900	1.063.276.117	900.703.292	2.964.327.043	688.669.759	220.737.182	966.614.651	375.293.038

Tabelle 11-5: Berechnung von Abwärmepotentialen im verarb. Gewerbe

WZ Schlüssel	Bezeichnung (Verarbeitendes Gewerbe)	Wirkungsgrade									
		66.80%		60.00%		90.00%		15.00%		Mögliche th. Wärmennutzung W _{th}	Mögliche th. Stromnutzung W _{st}
		(End-) Energieverbrauch insgesamt (Kohle, Heizöl, Erdgas, Strom) GJ	Anteil in %	(End-) Energieverbrauch pro Betrieb GJ/Betrieb	Anteil Prozesswärme GJ	Nutzbarer Abwärmeanteil GJ	Reine Wärmennutzung W _{th} GJ	Maximale Stromnutzung W _{st} GJ			
WZ08-24	Metallerzeugung und -bearbeitung	640.415.633	28,45%	584.321	427.797.643	256.678.586	231.010.727	38.501.788	64.170	10.695	
WZ08-20	Herstellung von chemischen Erzeugnissen	505.618.167	22,46%	324.322	337.752.935	202.651.761	182.386.585	30.397.764	50.663	8.444	
WZ08-23	H.v.Glas-waren,Keramik,Verarb. v.Steinen u.Erden	198.700.598	8,83%	61.403	132.732.000	79.639.200	71.675.280	11.945.880	19.910	3.318	
WZ08-17	Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus	162.223.485	7,21%	166.554	108.365.274	65.019.165	58.517.248	9.792.875	16.255	2.709	
WZ08-05	Kohlenbergbau	143.702.389	6,38%	3.421.485	95.993.196	57.595.917	51.836.326	8.639.388	14.399	2.400	
WZ08-10	Herstellung von Nahrungs- und Futtermitteln	136.350.314	6,06%	26.348	91.082.010	54.649.206	49.184.285	8.197.381	13.662	2.277	
WZ08-19	Kokerei und Mineralölverarbeitung	64.628.778	2,87%	979.224	43.172.024	25.903.214	23.312.883	3.885.482	6.476	1.079	
WZ08-29	Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenanteilen	62.190.444	2,76%	45.428	41.543.216	24.925.930	22.433.337	3.738.889	6.231	1.039	
WZ08-25	Herstellung von Metallerezeugnissen	58.639.877	2,60%	8.249	39.171.438	23.502.863	21.152.577	3.525.429	5.876	979	
WZ08-28	Maschinenbau	51.900.238	2,31%	8.611	34.669.359	20.801.615	18.721.454	3.120.242	5.200	867	
WZ08-22	Herstellung von Gummi- und Kunststoffwaren	46.621.008	2,07%	14.829	31.142.833	18.665.700	16.817.130	2.802.855	4.671	779	
WZ08-11	Getränkeherstellung	21.051.605	0,94%	33.900	14.062.472	8.437.483	7.593.735	1.265.622	2.109	352	
WZ08-27	Herstellung von elektrischen Ausrüstungen	19.561.097	0,87%	8.851	13.066.813	7.840.088	7.066.079	1.176.013	1.960	327	
WZ08-26	H.v. DV-Geräten, elektron. u. opt. Erzeugnissen	18.876.910	0,84%	10.605	12.609.776	7.565.865	6.809.279	1.134.880	1.891	315	
WZ08-08	Gewinnung von Steinen und Erden, sonstiger Bergbau	18.577.628	0,83%	17.643	12.409.856	7.445.913	6.701.322	1.116.887	1.861	310	
WZ08-16	H.v. Holz-, Flecht-, Korb- u. Korkwaren (ohne Möbel)	16.053.613	0,71%	12.641	10.723.813	6.434.288	5.790.859	965.143	1.609	268	
WZ08-13	Herstellung von Textilien	15.523.495	0,69%	19.551	10.369.695	6.221.817	5.599.635	933.273	1.555	259	
WZ08-18	H.v. Druckerz., Verwelf.v. Ton-,Bild-,Datenträgern	13.442.415	0,60%	8.182	8.979.533	5.367.720	4.848.948	808.158	1.347	224	
WZ08-21	Herstellung von pharmazeutischen Erzeugnissen	11.767.102	0,52%	38.581	7.860.424	4.716.254	4.244.629	707.438	1.179	197	
WZ08-32	Herstellung von sonstigen Waren	11.041.675	0,49%	7.002	7.375.839	4.425.504	3.982.953	663.826	1.106	184	
WZ08-31	Herstellung von Möbeln	10.812.192	0,48%	10.239	7.222.944	4.333.527	3.900.174	650.029	1.083	181	
WZ08-06	Gewinnung von Erdöl und Erdgas	9.099.438	0,40%	313.774	6.076.425	3.647.055	3.282.349	547.058	912	152	
WZ08-30	Sonstiger Fahrzeugbau	6.423.739	0,29%	22.151	4.291.068	2.574.635	2.317.171	386.195	644	107	
WZ08-33	Reparatur u. Installation von Masch. u. Ausrüstungen	4.139.334	0,18%	1.901	2.765.075	1.659.045	1.493.141	248.857	415	69	
WZ08-12	Tabakverarbeitung	1.558.085	0,07%	57.706	1.040.787	624.472	562.025	93.671	156	26	
WZ08-14	Herstellung von Bekleidung	1.424.174	0,06%	3.738	901.348	570.809	513.728	85.621	143	24	
WZ08-15	Herstellung von Leder, Ledervern und Schuhen	906.286	0,04%	5.395	605.399	363.240	326.916	54.486	91	15	
WZ08-09	Dienstleistungen f.d. Bergbau u. Gewinnung v. Steinen	64.953	0,00%	4.996	43.389	26.033	23.430	3.905	7	1	
Summe		2.251.314.631	100%	49.817	1.503.878.173	902.326.904	812.094.214	135.349.036	225.582	37.597	

Tabelle 11-6: Fortsetzung Tabelle Berechnung von Abwärmepotentialen im verarb. Gewerbe

Studie		Betrachtete Größen	Wert	Einheit	Bezugsgröße
SAENA et al. (2012)		Enthält u.a. Anleitung zur Potentialabschätzung (Abwärmeleistung), jedoch keine quantitativen Angaben			
Aus ifeu et al. (2010)	Enova (2009)	Abwärmepotential > 140 °C	40	%	Endenergiebedarf der deutschen Zementindustrie
			30	%	Endenergiebedarf der Branche Eisenlegierung in Deutschland
			8	%	Endenergiebedarf der deutschen Chemiebranche
	U.S. Department of Energy (2004)	Verlustenergie	36	%	Endenergie in der chemischen Industrie in den USA
			8	%	Endenergiebedarf der chemischen Industrie in den USA
			2	%	Endenergiebedarf der Holzverarbeitenden Industrie in den USA.
			14	%	Endenergiebedarf der Raffinerien in den USA
	Brandstätter (2008) (Studie unveröffentlicht;	Abwärme > 30 °C	10	%	Gesamtenergiebedarf des Landes Oberösterreich

	Werte beziehen sich auf Pressemitteilung)		25	%	Energieeinsatz der Industrie des Landes Oberösterreich
Aus Fraunhofer ISI (2013)	Schaefer (1995)	technisch maximal verwertbares Potential an Abwärme	45	%	Energieeinsatz für industrielle Prozesswärme in der deutschen Industrie
	IFEU et al. (2010)	Technisch-wirtschaftliches Abwärmennutzungspotential > 60 °C	18	%	Endenergieeinsatz der deutschen Industrie
	Sollesnes et al. (2009)	Abwärme (hauptsächlich > 60 °C)	36	%	Energiebedarf von 76 norwegischen Industrieunternehmen
	Bonilla et al. (1997) López et al. (1998)	Verfügbare Abwärmemenge	40	%	Gesamtenergiebedarf der untersuchten Industrien in der spanischen Baskenregion
	McKenna et al. (2010)	Technisch-nutzbares Abwärmepotential	5-10	%	Wärmebedarf der betrachteten Branchen (Vereinigtes Königreich)
	Broberg Viklund, Karlsson (2014)	Abwärmepotential	8	%	Energiebedarf der befragten Unternehmen in Gävleborg
DOE et al. (2004)	Technisches Abwärmepotential in der US amerikanischen Industrie	467	TWh/a		

Aus Center on Globalization (2009)	Bailey & Worrell (2005)	Potential zur Erzeugung einer elektrischen Leistung in US Industrie	100	GW	
		Potential zur Emissionsvermeidung durch Abwärmenutzung in US Industrie	400 Mio.	t CO ₂	
HREII DEMO Observatory (2013)		Zurück gewinnbare elektrische Energie bei 5.000 Betriebsstunden in EU-Industrie	13	TWh/a	
		Zurück gewinnbare elektrische Energie und entsprechende Emissionseinsparung bei 8.000 Betriebsstunden in EU-Industrie	20	TWh/a	
			4,8	%	Stromverbrauch der europäischen Industrie in 2009
			7,5 Mio.	t CO ₂	
Ecofys et al. (2014)		Abwärmemenge der Industrie in Großbritannien	48	TWh/a	
		Technisches Abwärmepotential der Industrie in Großbritannien bei Kombination von Maßnahmen zur größtmöglichen CO ₂ -Emissionsvermeidung	11	TWh/a	

	Davon ökonomisches Abwärmepotential der Industrie in Großbritannien	8	TWh/a	Bei Verzinsung von 3,5 %
		7	TWh/a	Bei Verzinsung von 10 %
		2,4	%	Industrieller Gesamtenergieverbra uch in Großbritannien
		4	%	Energieverbrauch der acht wärmeintensivsten Industriezweige
	Ökonomisches Abwärmepotential bei zügiger Amortisation (Kommerziell)	5	TWh/a	
McKenna & Norman (2012)	Anteil des Abwärmepotential s in den Sektoren Eisen, Stahl, Chemie, Zement und Glas (ca. 100 bis 500 °C)	80	%	Gesamtpotential zur Abwärmenutzung in Großbritannien
	Anteil des Abwärmepotential s in den Sektoren Eisen und Stahl (ca. 100 bis 500 °C)	50	%	Gesamtpotential zur Abwärmenutzung in Großbritannien
	Anlagenspezifisc hes technisches Abwärmepotential	2,7	PJ/a	Anlage im Bereich Eisen und Stahl
		750	GWh/a	
		0,6	PJ/a	Anlage im Bereich Aluminium
		167	GWh/a	
		0,3	PJ/a	Anlage im Bereich Zement
83	GWh/a			

	Technisches Gesamtpotential zur Abwärmenutzung im industriellen Sektor in Großbritannien	36 bis 71	PJ/a	
		10 bis 20	TWh/a	
Broberg Viklund, Karlsson (2014)	Endenergieverbrauch und einhergehende Emissionen in Gävelborg County in 2011	20	TWh/a	
		1,58	Mt CO ₂ /a	
	Endenergiebedarf der ansässigen energieintensiven Industrien	11,3	TWh/a	
	Ungenutztes Abwärmepotential	0,8	TWh/a	
	der auf eine Umfrage antwortenden Unternehmen	8,4	%	Endenergienutzung der antwortenden Unternehmen
Berthou, Bory (2012)	Endenergieverbrauch der französischen Industrie	423	TWh/a	
		25	%	Nationaler Endenergieverbrauch
	Jährliche Abwärmemenge in französischer Industrie	110	TWh/a	
	Anteil der Abwärme in den fünf großen Industriesektoren (Lebensmittel, Papier- und Zellstoff, Chemische)	80	%	

	Grundstoffe, sonstige Erzeugnisse aus nichtmetallischen Mineralien, Investitionsgüter)			
Dupont, Sapora (2009)	Gesamtmenge nutzbarer Abwärme aus Luftkompressoren, Kühlgeräten und Waschmaschinen (35 - 70°C)	2,34	TWh/a	
		10,6	TWh/a	
		1,9	TWh/a	
	Möglicher Deckungsgrad durch Niedertemperaturnutzung mittels Wärmepumpen in den Branchen Lebensmittel- und Getränkeproduktion, Milcherzeugnisse, Transportausrüstung, Herstellung von Zement, Kalk und Gips	104	%	
		109	%	
		127	%	
		131	%	
Hita et al. (2011)	Anteil der französischen Lebensmittelindustrie	12	%	Energieverbrauch der französischen Industrie
	Technisches Potential zur Substitution von Wärme im französischen Lebensmittelsektor	11	TWh	
		15	%	Endenergieverbrauch im Lebensmittelsektor

	Wirtschaftlich nutzbarer Anteil (Kann vermutlich bis auf 100 % gesteigert werden)	30	%	Technischer nutzbarer Anteil der Abwärme
		3,6	TWh/a	
Utlu, Parali (2013)	Abwärmepotential der Industriezweige, die 95 % des Energieverbrauchs des gesamten Industriesektor ausmachen	448	PJ	
	Anhand von thermophotovoltaischer Systeme nutzbares Abwärmepotential	22 bis 67	PJ	
		6,1 bis 18,6	TWh	
	Wirkungsgrade thermophotovoltaischer Systeme	5 bis 15	%	
Campana et al. (2013) (Die Studienergebnisse dieser Studie beziehen sich ausdrücklich auf die erläuterte Auswahl realer Industrieanlagen, die zum Zeitpunkt der Studiendurchführung in Betrieb waren oder errichtet wurden.)	Installierbare Bruttostromerzeugungsleistung in den Sektoren Zement, Stahl und Glas sowie in Gaskompressorstationen und Gasspeicherfeldern anhand von ORC-Anlagen in Europa (EU27)	2.705	MW	
	Mögliche Stromerzeugungsmenge anhand von ORC-Anlagen in	21,6	TWh/a	

	genannten Sektoren			
	Jährliche mögliche Kosteneinsparung	Bis zu 1,95	Mrd. €	
	Menge der möglichen Emissionsvermeidung	Bis zu 8,1	Mio. t CO ₂	

Tabelle 11-7: Zusammenfassung der Kernaussagen der analysierten Studien