

Industrielle Abwärmennutzung

Kurzstudie

*Simon Hirzel, Benjamin Sontag und
Dr.-Ing. Clemens Rohde*

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	5
2 Grundlagen der industriellen Abwärmenutzung	6
2.1 Unterscheidungsmerkmale für Abwärme	6
2.2 Nutzungsmöglichkeiten für industrielle Abwärme	7
2.3 Einflussfaktoren auf die Nutzbarkeit von Abwärme	8
2.4 Pro und Kontra für die industrielle Abwärmenutzung.....	10
2.5 Potenziale der industriellen Abwärmenutzung.....	11
2.6 Hemmnisse und fördernde Faktoren.....	12
2.7 Abwärmenutzung als Energieeffizienzmaßnahme.....	13
3 Technologien zur Nutzung industrieller Abwärme.....	14
3.1 Technologien zur thermischen Nutzung von Abwärme	14
3.2 Technologien zur thermischen Kältebereitstellung	19
3.3 Technologien zur Verstromung von Abwärme	19
4 Abwärmenutzung in unterschiedlichen Branchen	23
4.1 Eisen- und Stahlindustrie	23
4.2 Nichteisenmetall-Industrie	26
4.3 Zementindustrie.....	28
4.4 Papierindustrie	29
4.5 Glasindustrie	30
4.6 Chemische Industrie.....	31
4.7 Weitere Industrien und Querschnittsanwendungen	32
5 Fazit	34
6 Anhang	35
6.1 Leitfäden und Broschüren	35
6.2 Internetseiten.....	36
7 Literatur	38

1 Einleitung

Auf den Industriesektor entfallen rund 30 % des Endenergiebedarfs der Bundesrepublik Deutschland. Rund drei Viertel davon werden zur Bereitstellung von Raumwärme, Warmwasser oder als Prozesswärme, z. B. zur Dampferzeugung, zur Erwärmung von Einsatzstoffen und Materialien oder für Trocknungs- und Reinigungsprozesse eingesetzt (Abbildung 1). Der überwiegende Teil der verwendeten Energie verlässt die Einsatzbereiche in Form diffuser oder gebündelter Abwärme. Auch in Prozessen und Anwendungen, in denen kein Wärmebedarf besteht und in denen eine Wärmeentwicklung unerwünscht ist, fällt durch Reibung, Umwandlungsverluste oder thermodynamische Gegebenheiten vielfach Abwärme an.

Abwärme fällt in zahlreichen Industrieprozessen an.

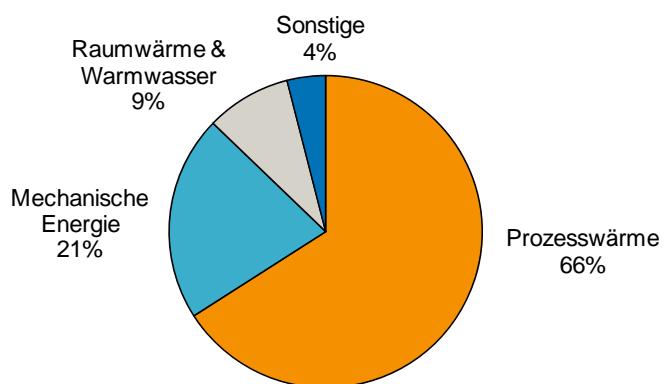


Abbildung 1:
Endenergiebedarf
der deutschen
Industrie in 2011
nach
Anwendungen
(nach Rohde 2012).

Die Freisetzung teilweise erheblicher Abwärmemengen ist aus physikalischen, technischen oder wirtschaftlichen Gründen oft nicht vermeidbar. Eine Möglichkeit, um von Abwärme dennoch zu profitieren, besteht in der industriellen Abwärmennutzung. Obwohl im Verlauf des 20. Jahrhunderts das Interesse an der Abwärmennutzung mehrfach stark gestiegen ist (vgl. Bergmeier 2003), geht nur etwa ein Zehntel (9 %) der deutschen Industrieunternehmen davon aus, dass sie ihre Potenziale zur Nutzung von Bewegungs- und Prozessenergie vollständig ausschöpfen (vgl. Schröter et al. 2009).

Ziel der vorliegenden Kurzstudie ist es daher, Einblicke in Grundlagen, Technologien und Potenziale der industriellen Abwärmennutzung zu gewähren. Einleitend werden zunächst grundlegende Aspekte der industriellen Abwärmennutzung dargestellt (Abschnitt 2). Dem folgt ein Überblick über technologische Möglichkeiten zur Nutzung von Abwärmestromen (Abschnitt 3). Daran schließen sich eine Betrachtung von Abwärmennutzungsmöglichkeiten in verschiedenen Industriebranchen (Abschnitt 4) und ein zusammenfassendes Fazit (Abschnitt 5) an. Als Einstieg für weitergehende Be trachtungen werden im Text und im Anhang jeweils Hinweise auf aktuelle For schungsarbeiten und praxisorientierte Leitfäden und Informationsquellen gegeben.

Diese Kurzstudie gibt Einblicke in Grundlagen, Technologien und Nutzungsmöglichkeiten industrieller Abwärme.

Abwärme ist ein ungenutztes Nebenprodukt von Produktionsprozessen.

Zur Unterscheidung von Abwärme dienen verschiedene Merkmale.

2 Grundlagen der industriellen Abwärmennutzung

Industrielle Abwärme bezeichnet Wärme, die in Industrieprozessen als Nebenprodukt anfällt und derzeit ungenutzt an die Umgebung abgegeben wird, die künftig jedoch einen Nutzen für Industrie und Gesellschaft haben könnte (in Anlehnung an Broberg Viklund et al. 2014). Abwärme entsteht durch Ineffizienzen von Ausrüstung und Prozessen sowie durch thermodynamische Beschränkungen (vgl. U.S. DOE 2008).¹ Ziel der industriellen Abwärmennutzung ist es, die verfügbare Abwärme sinnvoll für weitere Zwecke zu nutzen.

2.1 Unterscheidungsmerkmale für Abwärme

Als Abgrenzungsmerkmale für Abwärme können zahlreiche Merkmale herangezogen werden. Hierzu zählen unter anderem:

- **Temperaturniveau:** Anhand des Temperaturniveaus werden mit verschiedenen Abgrenzungen z. B. Niedertemperaturabwärme (unter 150 °C), Mitteltemperaturabwärme (150 bis 500 °C) und Hochtemperaturabwärme (über 500 °C) unterschieden (vgl. Schaefer 1995, für weitere Abgrenzungen z. B. auch U.S. DOE 2008; Crook 1994).
- **Abwärmemenge:** Neben dem Temperaturniveau wird häufig die Größe der Abwärmeströme als Kriterium für ihre Unterscheidung verwendet.
- **Branchen und Prozesse:** Insbesondere in Studien zu Potenzialen der Abwärmennutzung werden Abwärmeströme anhand von Brancheneinteilungen (z. B. Metallerzeugung, Nahrungsmittelindustrie) oder Prozessen (z. B. Trocknungsprozesse, Verbrennungsprozesse) diskutiert (vgl. z. B. LfU 2012; Pehnt et al. 2010; Sollesnes et al. 2009).
- **Bündelung der Abwärme:** Abwärmeströme werden ferner dahin gehend unterschieden, ob sie diffus als Strahlung/durch Konvektion abgegeben werden oder an Trägermedien gebunden sind (vgl. z. B. Schaefer 1995).
- **Trägermedien:** Als Träger für gebundene Abwärme dienen unterschiedliche, in der Regel flüssige oder gasförmige Medien. Diese umfassen Abgase, Abluft, Brüden, Dämpfe, Thermoöle sowie Kühl- und Prozesswasser (vgl. z. B. LfU 2012; SAENA 2012).
- **Art der Nutzung:** Neben einer direkten thermischen Nutzung von Abwärme ist eine indirekte Nutzung möglich, indem das Temperaturniveau der Ab-

¹ Für weitergehende Definitionen und Abgrenzungen von Abwärme siehe z. B. Bendig et al. 2013; Ammar et al. 2012; Schaefer 1995; VDI 4661.

wärme unter Energiezufuhr erhöht oder die Abwärme zur Bereitstellung anderer Energieformen verwendet wird (vgl. z. B. SAENA 2012).

Entsprechend vielfältig lassen sich Abwärmeströme strukturieren und diskutieren.

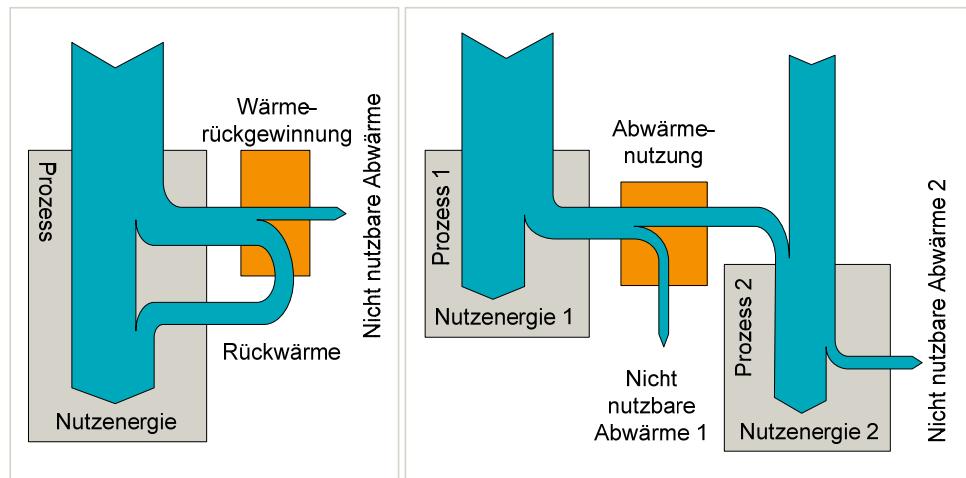
2.2 **Nutzungsmöglichkeiten für industrielle Abwärme**

Abwärme kann für unterschiedliche Zwecke eingesetzt werden. Die Nutzungsmöglichkeiten umfassen:

- **Anlagen- bzw. prozessinterne Nutzung:** Abwärme wird der Anlage oder dem Prozess, dem sie entstammt, erneut zugeführt. Diese Form der Abwärmenutzung wird auch als Wärmerückgewinnung bezeichnet (Abbildung 2).
- **Betriebsinterne Nutzung:** Abwärme wird innerhalb des gleichen Betriebs für andere Anlagen oder Prozesse verwendet.
- **Externe Nutzung:** Abwärme wird außerhalb des Betriebes am gleichen Standort oder über eine Einspeisung in Fernwärmennetze genutzt.

Die anlagen- bzw. prozessinterne Nutzung von Abwärme ist in vielerlei Hinsicht oft die nahe liegendste Variante der Abwärmenutzung. Hier sind in der Regel nur geringe Distanzen zu überwinden und es werden keine gegenseitigen Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Anlagen oder Prozessen geschaffen. Die externe Nutzung führt unter anderem dazu, dass Wärmelieferant und -abnehmer jeweils keinen direkten Einfluss auf die Wärmesenke bzw. -quelle besitzen, dass zusätzliche Infrastrukturen für den Transport (z. B. Fernwärmeleitungen) erforderlich sind und dass Verluste beim Transport der Abwärme auftreten. Darüber hinaus müssen Angebot und Abnahme vertraglich geregelt werden. Für die praktische Anwendung ist es daher zweckmäßig, Abwärme nach Möglichkeit direkt am Ort ihres Anfalls zu nutzen und erst nachrangig eine externe Nutzung in Betracht zu ziehen. Intensiv werden jedoch die Möglichkeiten der Wärmeintegration (z. B. Chew et al. 2013; Hackl et al. 2011) bzw. der Auskopplung in Wärmenetze (z. B. Fang et al. 2013; Broberg et al. 2012; Daniëls et al. 2012; Kapil et al. 2012; Ajah et al. 2007) diskutiert.

Abbildung 2:
Wärmerückgewinnung (links)
und Abwärmenutzung (rechts)
(in Anlehnung an
Gabathuler 1994)²



2.3 Einflussfaktoren auf die Nutzbarkeit von Abwärme

Die Verwertbarkeit von Abwärme hängt von zahlreichen Faktoren ab.

- **Abwärmemenge:** Die Abwärmemenge ist ein Maß für den Wärmeinhalt eines Abwärmestroms. Sie beschreibt also, wieviel Wärme mit einem Wärmestrom transportiert wird. Der Wärmeinhalt bezieht sich stets auf eine Bezugstemperatur und variiert entsprechend mit der Festlegung dieser Temperatur. Je höher die Abwärmemenge ist, desto lohnenswerter ist in der Regel die Nutzung der Abwärme.
- **Temperaturniveau:** Die Höhe der Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Wärmesenke bestimmt die Höhe des Wärmetransfers und die Qualität des Wärmestroms. Bei steigenden Temperaturdifferenzen verringert sich durch einen steigenden Wärmetransfer die Fläche, die für einen Wärmetauscher konstanter Wärmeleistung erforderlich ist. Die Qualität des Wärmestroms spiegelt die maximale Arbeitsfähigkeit des Abwärmestroms wider und lässt sich anhand des Carnot-Wirkungsgrads beschreiben (siehe Abschnitt 3.3). Je höher das Temperaturniveau der Abwärme ist, desto einfacher und kostengünstiger ist ihre Verwertung (vgl. Schaefer 1995).

² In der vorliegenden Studie wird die Wärmerückgewinnung als Sonderfall der Abwärmenutzung aufgefasst. Teilweise werden Wärmerückgewinnung (WRG) und Abwärmenutzung (AWN) auch als komplementäre Begriffe unterschieden, wobei sich die WRG dann ausschließlich auf die Nutzung von Abwärme innerhalb definierter Systemgrenzen und die AWN auf die Nutzung der Abwärme außerhalb dieser Grenzen bezieht (vgl. z. B. Gabathuler 1994).

- **Zusammensetzung:** Korrosive Bestandteile im Abwärmestrom beeinflussen die Lebensdauer und die Materialwahl für Wärmetauscher. Um den Ausfall von aggressivem Kondensat in Gaswärmetauschern zu vermeiden, werden Anlagen so ausgelegt, dass die Austrittstemperaturen oberhalb der Taupunkte der korrosiven Bestandteile des Abwärmestroms liegen. Die minimalen Abgastemperaturen variieren infolge dessen mit der Zusammensetzung der Brennstoffe oder durch prozessbedingte Komponenten im Abgas. So wird beispielsweise die minimale Abgastemperatur bei der Nutzung von Erdgas mit 120 °C angegeben, während bei der Nutzung schwefelhaltiger Öle und Kohle Temperaturen von 150 bis 175 °C genannt werden. Infolge prozessbedingter Schwefelgehalte im Abgasstrom von Glasschmelzöfen erreichen dort die minimalen Abgastemperaturen 270 °C (vgl. U.S. DOE 2008). Darüber hinaus können sich abhängig von der Zusammensetzung eines Wärmetstroms Ablagerungen und Biofilme bilden, die in Wärmetauschern den Wärmeübergang verschlechtern, den Durchfluss reduzieren und einen Ausfall der Wärmetauscher verursachen können.
- **Bündelung:** Ein weiterer wichtiger Faktor für die Verwertbarkeit von Abwärme besteht in ihrer Bündelung: Gebundene Abwärme kann deutlich einfacher und besser als diffuse Abwärme genutzt werden (vgl. z. B. SAENA 2012).
- **Gleichzeitigkeit:** Für eine einfache Nutzung von Abwärme sollten Wärmebereitstellung und -bedarf möglichst zeitgleich auftreten. Andernfalls sind eventuell Wärmespeicher als Puffer sowie Reservekapazitäten für die Wärmeabnahme und -bereitstellung erforderlich. Bei periodischer Nutzung von Abwärme muss ferner die Alterung der Anlagentechnik durch die thermische Wechselbeanspruchung bei der Anlagenwahl Berücksichtigung finden (vgl. U.S. DOE 2008).
- **Nutzungsdauer:** Eine möglichst lange Nutzungsdauer der Abwärme ist in zweierlei Hinsicht von Interesse: Erstens trägt eine im Jahresverlauf lange Betriebsdauer dazu bei, dass die Aufwendungen für die Abwärmeinfrastruktur rasch wieder eingespielt werden und dass die Amortisationszeiten sinken. Zweitens sollte über mehrere Jahre die Nutzung der Abwärme sichergestellt werden. Diese Überlegungen sind insbesondere dann wichtig, wenn die Abwärme extern genutzt wird. Liegt die Abnahme der Abwärme außerhalb des direkten Einflussbereichs eines Unternehmens, so ist insbesondere zu klären, was bei einer künftigen Änderung des Wärmebedarfs der Wärmesenke zu unternehmen ist.
- **Räumliche Nähe:** Je näher die Abwärmequelle und -senke räumlich beieinander liegen, desto geringer fallen die Aufwendungen für die Infrastruk-

Einige Gründe sprechen für die Nutzung von Abwärme, andere dagegen.

tur zum Wärmetransport ins Gewicht. Gleichzeitig werden Energieverluste durch lange Transportwege reduziert.

2.4 Pro und Kontra für die industrielle Abwärmennutzung

Die Nutzung von Abwärme geht mit verschiedenen Vor- und Nachteilen für Unternehmen einher. Für die Abwärmennutzung sprechen Punkte wie (vgl. z. B. auch U.S. DOE 2008; Arzbaecher et al. 2007):

- eine Reduzierung des Energiebedarfs bzw. der Energiekosten,
- eine damit einhergehende Verbesserung der Produktivität,
- eine Verringerung der Umweltbelastung,
- eine größere Unabhängigkeit von der externen Energieversorgung und
- geringere Aufwendungen für Heiz- und Rückkühlssysteme, falls Abwärme dauerhaft und zuverlässig genutzt werden kann.

Darüber hinaus kann die Abwärmennutzung zur Außendarstellung eines Unternehmens als besonders umweltfreundlicher Betrieb beitragen sowie ein besseres Verständnis zu den Energieströmen in einem Unternehmen ermöglichen. Allerdings sind auch einige Nachteile der Abwärmennutzung zu nennen (vgl. z. B. auch SAENA 2012):

- die Abwärmennutzung geht mit zusätzlichen Aufwendungen und Kompetenzen für die Beschaffung, Wartung und den Betrieb der entsprechenden Anlagentechnik einher,
- durch die Kopplung von Anlagen und Prozessen in einem Abwärmeverbund werden gegenseitige Abhängigkeiten geschaffen, die sich bei Ausfällen oder Umstrukturierungen als problematisch erweisen können,
- Reserveinfrastruktur muss eventuell für den Ausfall von Teilen des Abwärmeverbunds (Reservewärmesenke, Reservewärmequelle) bereithalten werden,
- der erforderliche Bauraum und steigende Kompetenzanforderungen für die zusätzliche Anlagentechnik sind zu berücksichtigen, und
- gegebenenfalls sind zusätzliche Genehmigungen und Überprüfungen der Anlagentechnik notwendig.

Entsprechende Punkte sind daher bei Überlegungen zur Nutzung von Abwärme zu berücksichtigen.

2.5 Potenziale der industriellen Abwärmenutzung

Eine zentrale Fragestellung im Zusammenhang mit der Abwärmenutzung betrifft die Höhe der erschließbaren Energieeinsparpotenziale durch die industrielle Abwärmenutzung. Aus gesamtwirtschaftlicher Sicht befassen sich vergleichsweise wenige Untersuchungen mit dieser Thematik. Für die deutsche Industrie beziffert eine ältere Untersuchung (Schaefer 1995) das technisch maximal verwertbare Potenzial an Abwärme auf rund 45 % des Energieeinsatzes für industrielle Prozesswärme. Eine aktuellere Untersuchung (Pehnt et al. 2010) schätzt in Anlehnung an Sollesnes et al. 2009 das technisch-wirtschaftliche Abwärmenutzungspotenzial (Temperaturniveau über 60 °C) in erster Näherung auf 18 % des Endenergieeinsatzes der deutschen Industrie.

In der Studie von Sollesnes et al. 2009, die den Arbeiten von Pehnt et al. 2010 zu grunde liegt, wird eine detailliertere Erhebung industrieller Abwärmepotenziale für Norwegen vorgenommen. Auf Basis einer Erhebung unter 76 Industrieunternehmen (etwa 63 % des Energieverbrauchs der norwegischen Industrie) und 4 Abfallverbrennungsanlagen (etwa 50 % der norwegischen Gesamtkapazitäten) wird die verfügbare Abwärme dort auf insgesamt 36 % des Energiebedarfs der betrachteten Unternehmen beziffert. Die größten Abwärmemengen werden der Eisen-, Aluminium-, Holz- und der chemischen Industrie zugerechnet. Der Untersuchung zufolge entfällt etwa die Hälfte der Abwärme (53 %) auf einem Temperaturbereich über 60 °C bei einer Referenztemperatur von 0 °C. Die verfügbare Abwärme liegt hauptsächlich in Form von Abgasen (55 %) und Warmwasser (42 %) vor.

Zwei weitere Untersuchungen (Bonilla et al. 1997, Lopéz et al. 1998) befassen sich mit industriellen Abwärmepotenzialen in der spanischen Baskenregion. Für diese Region wird die Abwärmemenge auf rund 40 % des Gesamtenergiebedarfs der untersuchten Industrien beziffert. Die größten Anteile der Abwärme entfallen auf Verbrennungsabgase (33 %) und auf verbleibende Restwärme in den Produkten (27 %). Ferner ist etwa die Hälfte (51 %) der Abwärme auf einem Temperaturniveau über 250 °C verfügbar. Eine weitere Analyse von McKenna et al. 2010 für das Vereinigte Königreich schließt, dass etwa 5 bis 10 % des Wärmebedarfs der dort betrachteten Branchen technisch nutzbar wäre. Die größten Potenziale werden in der Eisen- und Stahlindustrie, in der Chemieindustrie, der Aluminiumindustrie und der Mineralstoffindustrie insbesondere im Temperaturbereich zwischen 100 und 500 °C gesehen. Eine Gegenüberstellung vom Möglichkeiten zur Verstromung von industrieller Abwärme und ihrer Einspeisung in Wärmenetze für den Bezirk Gävleborg in Schweden nehmen Broberg Viklund et al. 2014 vor. Die Ergebnisse dieser Untersuchung weisen Abwärmepotenziale in Höhe von 8,4 % des Energiebedarfs der in der Studie befragten Unternehmen aus. Eine weitere übergreifende Untersuchung von Abwärmepotenzialen legen beispielsweise Berthou et al. 2012 für Frankreich vor.

Die Potenziale der industriellen Abwärmenutzung werden unterschiedlich beziffert; übergreifende Erhebungen sind nur begrenzt vorhanden.

Verschiedene Hemmnisse behindern die Nutzung industrieller Abwärme.

Darüber existieren verschiedene Potenzialanalysen für speziellere Bereiche der Abwärmenutzung. Themen entsprechender Arbeiten sind beispielsweise der Einsatz von Wärmepumpen zur Abwärmenutzung in der französischen Industrie (Dupont et al. 2009), unter anderem speziell in der Nahrungs- und Getränkeindustrie (Seck et al. 2013; Hita et al. 2011), die Nutzung thermophotovoltaischer Systeme im türkischen Industriesektor (Utlu et al. 2013) oder der Einsatz von ORC-Prozessen in energieintensiven Industrien in Italien (Campana et al. 2013).

Aufgrund der geringen Anzahl an Untersuchungen und der unterschiedlichen Abgrenzungen (u. a. Begriffsdefinitionen, Regionen, Industrien, Segmente) und Erhebungsmethoden (u. a. Datenermittlung, Berechnungsmethode, Referenztemperaturen) sind übergreifende Einschätzungen zu den gesamtindustriellen Potenzialen der Abwärmenutzung nur eingeschränkt möglich. Im Einzelfall unterscheiden sich die Möglichkeiten zur Verwertung von Abwärme zwischen Unternehmen aus unterschiedlichen Industriebranchen deutlich voneinander. Dies wird unter anderem anhand des Temperaturniveaus des Wärmebedarfs einzelner Branchen besonders deutlich. So wird insbesondere in der Zement-, Glas- oder Metallerzeugung Wärme auf hohen Temperaturniveaus über 1.000 °C benötigt. Demgegenüber benötigen die Textil- und Nahrungsmittelindustrie überwiegend Wärme auf Temperaturniveaus bis zu 100 °C (vgl. Pehnt et al. 2010).

2.6 Hemmnisse und fördernde Faktoren

Energieeffizienzmaßnahmen werden erfahrungsgemäß in vielen Unternehmen häufig nur zögerlich umgesetzt. Die Gründe dafür werden als Hemmnisse für die Energieeffizienz bezeichnet. Sie umfassen Aspekte wie Risiken, die mit der Umsetzung von Maßnahmen in Verbindung gebracht werden, unzureichende Informationen über Energieverbräuche bzw. Energieeffizienzmaßnahmen oder unzureichendes Kapital (siehe dazu eingehend Sorrell et al. 2011). In Verbindung mit der industriellen Abwärmenutzung sind folgende Hemmnisse besonders hervorzuheben (vgl. u. a. auch Pehnt 2010; U.S. DOE 2008):

- **Amortisationszeiten:** Die Aufwendungen für die Anlagentechnik zur Wärmerückgewinnung führen zu teilweise langen Amortisationsdauern. Die Aufwendungen steigen insbesondere an, wenn spezielle Anforderungen bezüglich der Temperatur- und Korrosionsbeständigkeit gestellt oder wenn große Wärmetauscher für Niedertemperaturanwendungen benötigt werden.
- **Anlagengröße:** Größere Anlagen zur Abwärmenutzung sind gegenüber kleineren Anlagen durch Skaleneffekte wirtschaftlich tendenziell vorteilhafter.

- **Umweltwirkungen:** Durch die Nutzung von Abwärme kann die Wirksamkeit von Anlagen zur Vermeidung von Umweltverschmutzung beeinflusst werden.
- **Erschließbarkeit:** Der verfügbare Bauraum zur Nutzung von Abwärme ist beschränkt, diffuse Abwärme lässt sich nur begrenzt bündeln und Sicherheitsanforderungen muss Rechnung getragen werden.

Neben derartigen Hemmnissen werden teilweise auch fördernde Faktoren für die Umsetzung bestimmter Energieeffizienzmaßnahmen diskutiert (vgl. z. B. Rohdin et al. 2006). Im Kontext der Abwärmenutzung können vorhandene Infrastrukturen oder anstehende Erneuerungen als fördernde Faktoren für die Umsetzung der Abwärmenutzung aufgefasst werden (vgl. Pehnt et al. 2010).

2.7 Abwärmenutzung als Energieeffizienzmaßnahme

Die vorangehende Darstellung legt nahe, dass die Abwärmenutzung als Maßnahme zur Verbesserung der industriellen Energieeffizienz interpretiert werden kann. Trotzdem nimmt die Abwärmenutzung eine gewisse Sonderrolle ein, da sie erst in Erwägung gezogen werden sollte, nachdem die Ursachen der Abwärmeentwicklung so weit wie möglich reduziert wurden (vgl. auch Fischer et al. 1999). Der Grund dieser Sonderstellung besteht darin, dass die anfallenden Abwärmemengen in der Praxis immer nur unvollständig genutzt werden können und somit stets ein Teil der ursprünglich eingesetzten Energie ungenutzt verloren geht. Wird hingegen der Energiebedarf der zugrunde liegenden Prozesse von vorne herein reduziert, spart man die entsprechende Energiemenge vollständig ein. Die Abwärmenutzung kann leicht dazu führen, dass Ineffizienzen in Prozessen verdeckt und Verluste verstetigt werden, da jede spätere Verbesserung auch die verfügbare Abwärmeleistung mindert (vgl. ähnlich auch Ludwig 2012; Pehnt et al. 2010). Daher bietet sich vor einer eingehenderen Auseinandersetzung mit der Abwärmenutzung die Klärung folgender Fragen an:

Die Nutzung von Abwärme sollte erst in Erwägung gezogen werden, wenn Abwärme unvermeidbar ist.

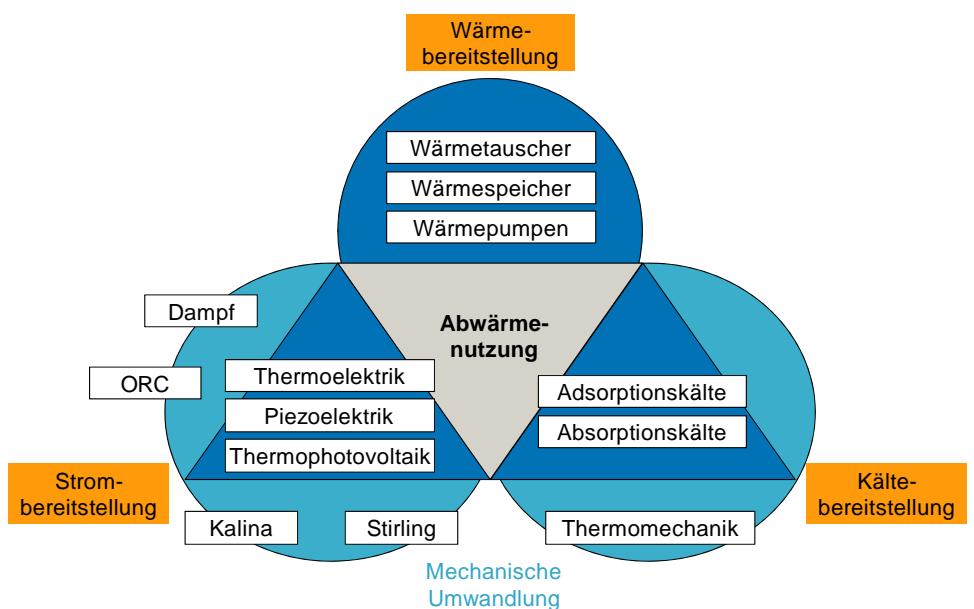
- **Dimensionierung:** Ist der zugrunde liegende Prozess richtig dimensioniert oder sind unnötige Überkapazitäten vorhanden?
- **Steuerung:** Wird die Anlage oder der Prozess richtig gesteuert? Sind ineffiziente Betriebspunkte oder Leerläufe vorhanden und vermeidbar?
- **Temperaturniveau:** Ist das derzeit gewählte Temperatur- bzw. Intensitätsniveau tatsächlich erforderlich?
- **Isolation:** Kann eine bessere Isolation die Abwärmemengen reduzieren?
- **Alternativen:** Sind energetisch vorteilhere Alternativprozesse einsetzbar, um das gleiche Resultat zu erzielen?

Abwärme kann thermisch genutzt oder in Strom oder Kälte umgewandelt werden.

*Abbildung 3:
Technologien zur
Nutzung von
Abwärme*

3 Technologien zur Nutzung industrieller Abwärme

Abwärme kann zur Wärmebereitstellung für thermische Prozesse oder zur Bereitstellung von Strom oder Kälte genutzt werden. Bei der Strom- und Kältebereitstellung sind zwei Möglichkeiten gegeben: Entweder wird Abwärme unmittelbar umgewandelt oder es wird über eine Zwischenstufe zunächst mechanische Energie erzeugt, die dann einen elektrischen Generator oder eine Kältemaschine antreibt (Abbildung 3).³ Im Folgenden werden die jeweiligen Technologien eingehender dargestellt.



3.1 Technologien zur thermischen Nutzung von Abwärme

Wesentliche Komponenten zur thermischen Nutzung von Abwärme sind Wärmetauscher, Wärmespeicher und Wärmepumpen.

- **Wärmetauscher** erlauben die Übertragung von Wärme von einem warmen Medium auf ein kälteres Medium. Damit sind sie ein Grundbestandteil eines Abwärmennutzungssystems. Wärmetauscher werden in verschiedener Form auch für die thermisch getriebene Strom- und Kältebereitstellung eingesetzt.
- **Wärmespeicher** dienen der zeitlichen Entkopplung zwischen Wärmebedarf und Wärmeanfall. Sie erlauben eine zeitweise Einspeicherung der verfügbaren Wärme.

³ Weitere verwandte Ansätze der Wärmebereitstellung durch solarthermische Verfahren, Kraft-Wärme-Kopplung oder die Verbrennung von Abfällen werden hier nicht weiter betrachtet.

ren Wärme. Später kann diese Wärme aus dem Speicher wieder abgerufen werden. Wärmespeicher erhöhen somit die zeitliche Flexibilität der Abwärmenutzung.

- **Wärmepumpen** erlauben es, unter Energiezufuhr das Temperaturniveau vorhandener Abwärme zu variieren. Dadurch kann die Nutzbarkeit von Abwärme für Wärmesenken mit höheren Temperaturanforderungen verbessert werden.

Wärmetauscher (Wärmeübertrager) werden in der Industrie vielfältig eingesetzt. Bei vielen Wärmetauschern werden ein warmes und ein kaltes Medium gleichzeitig an einer gemeinsamen Wärmeübertragungsfläche vorbeigeleitet. Der Wärmestrom, der durch diese Wärmeübertragungsfläche transferiert wird, variiert mit dem Wärmedurchgangskoeffizienten des Wärmetauschers, der Größe der Wärmeübertragungsfläche und der mittleren Temperaturdifferenz zwischen den beiden Medien. Anhand ihrer Bauart und Funktionsweise werden verschiedenen Bauarten von Wärmetauschern unterschieden (vgl. SAENA 2012):

Wärmetauscher sind ein Grundbestandteil von Abwärmenutzungssystemen.

- **Rohrbündel-Wärmetauscher** bestehen aus Bündeln mehrerer Rohre, die durch einen Behälter geführt werden. Durch sie strömt ein erstes Medium, durch den Behälter ein zweites. Der Wärmeaustausch zwischen den Medien findet über die Oberfläche der Rohre statt. Besonderheiten dieser Wärmetauscher sind die druckfeste Ausführbarkeit und der hohe Durchsatz bei entsprechenden Baugrößen. Gegenüber Plattenwärmetauschern gelten die Rohrbündel-Wärmetauscher tendenziell als teurer und als aufwendiger zu warten.
- **Platten-Wärmetauscher** setzen sich aus mehreren verlötzten, verschraubten oder verschweißten Platten zusammen. Zwischen den Platten bilden sich voneinander getrennte Zwischenräume, durch die zwei Wärmeträgermedien geleitet werden und Wärme austauschen. Besonderheiten dieser Wärmetauscher liegen in ihrer geringen Baugröße und günstigen Anschaffung.
- **Doppelrohr-Wärmetauscher** bestehen aus koaxial angeordneten Innen- und Außenrohren. In den Innenrohren fließt das erste Medium, im Spalt zwischen den Innen- und Außenrohren das zweite Medium. Durch die Rohrwand erfolgt der Wärmeaustausch. Doppelrohrwärmetauscher gelten aufgrund ihrer einfachen Bauweise als kostengünstig, allerdings auch als relativ platzintensiv.
- **Lamellen-Wärmetauscher** bestehen aus mit Lamellen bestückten Rohren. Sie werden insbesondere für den Wärmeaustausch zwischen flüssigen und gasförmigen Medien eingesetzt. Das flüssige Medium fließt durch die lamellenbesetzten Rohre, die vom gasförmigen Medium umströmt werden. Be-

sonderheiten dieser Wärmetauscher liegen in der kompakten Bauweise und dem günstigen Preis.

- **Rippenrohr-Wärmetauscher** werden ebenfalls häufig für die Wärmeübertragung zwischen flüssigen und gasförmigen Medien eingesetzt. Die in diesen Wärmetauschern eingesetzten Rohre sind mit Rippen versehenen. Ihre Varianten reichen von einfachen geraden Rohren bis hin zu komplexen Kühlregistern. Wie bei Lamellenwärmetauschern werden die Rohre vom flüssigen Medium durchströmt und vom gasförmigen Medium umspült. Diese Wärmetauscher gelten ebenfalls als relativ preiswert und langlebig.
- **Wärmerohr-Wärmetauscher** (Heatpipes) bestehen aus abgeschlossenen, mit einer Flüssigkeit gefüllten, ansonsten jedoch evakuierten Rippenrohren. Diese Rohre reichen jeweils zum Teil in zwei Medien hinein. Im wärmeren Medium verdampft die eingeschlossene Flüssigkeit unter Wärmeaufnahme, steigt im Rohr auf und kondensiert unter Wärmeabgabe im kälteren Medium. Eine Besonderheit dieser Wärmetauscher liegt im definierten Temperaturbereich, der durch die verwendete Flüssigkeit bestimmt wird.
- **Spiral-Wärmetauscher** bestehen aus spiralförmig um einen Kern gewickelten Blechen. Zwischen den Einzelwicklungen bilden sich zwei Strömungskanäle, durch die die Wärmeträger geleitet werden. Aufgrund einer bauartbedingt guten Wartbarkeit werden diese Wärmetauscher häufig für schmutzbelastete Medien eingesetzt.
- **Rotations-Wärmetauscher** werden zur Wärmeübertragung zwischen zwei gasförmigen Medien eingesetzt. Sie bestehen aus einem rotierenden Regenerator, der je zur Hälfte von zwei voneinander getrennten Medien durchströmt wird. Bei der Durchleitung des wärmeren Mediums nimmt der Regenerator Wärme auf und speichert diese. Da der Regenerator kontinuierlich in Rotation gehalten wird, gelangt dieser erwärmte Teil des Regenerators im Verlauf der Drehung in das kältere Medium, an das er die gespeicherte Wärme wieder abgibt. Besonderheiten dieser Wärmetauscher liegen in ihrer vergleichsweise kürzeren Lebensdauer durch den Verschleiß des Rotors und in der möglichen gegenseitigen Kontamination der Medien durch zeitweise Ablagerungen im Rotor (vgl. U.S. DOE 2008).
- **Regenerative Wärmetauscher** (Winderhitzer) besitzen eine ortsfeste Wärmespeichermasse (z. B. hitzebeständige Steine) und arbeiten im Gegensatz zu den bisher genannten Wärmetauschern diskontinuierlich. Die Speichermasse wird zunächst von einem warmen Medium durchströmt und erwärmt sich dabei. Nach der Erwärmung der Speichermasse wird ein kälteres Medium durch die Speichermasse geleitet und wird dabei durch die von ihr abgegebene Wärme aufgeheizt. Regenerative Wärmetauscher zählen zu den

größten Wärmetauschern und werden insbesondere bei großen Thermoprozessanlagen z. B. als Winderhitzer im Hochofenprozess eingesetzt.

- **Verbrennungsluftvorwärmer** stellen eine besondere Art Wärmetauscher dar. Sie werden zur Nutzung von Abwärme in Verbrennungsabgasen eingesetzt, um die zugeführte Verbrennungsluft vorzuwärmen. Als Verbrennungsluftvorwärmer werden Rekuperator- und Regenerator-Brenner unterschieden. Rekuperator-Brenner nutzen die heißen Abgase direkt zur Erwärmung der zugeführten Verbrennungsluft, indem die Abgase an den Zuluftleitungen des Brenners vorbeigeführt werden. Regenerator-Brenner verfügen über zwei regenerative Wärmespeicher, durch die im Wechsel die heißen Verbrennungsabgase oder die kältere Zuluft geleitet werden. Regenerator-Brenner erreichen eine höhere Effizienz als Rekuperator-Brenner, gehen allerdings mit einem größeren konstruktiven Aufwand und höheren Investitionen einher.

Eine Gegenüberstellung der verschiedenen Wärmetauscherarten nach Leistungs- und Anwendungstemperaturbereichen gibt Tabelle 1.

Art des Wärmetauschers	Leistungsbereich	Temperaturbereich	Medien
Rohrbündel-Wärmetauscher	2 kW bis 20 MW	bis 300 °C	flüssig/flüssig
Plattenwärmetauscher	2 kW bis 400 MW	bis 150 °C ²	flüssig/flüssig
Doppelrohr-Wärmetauscher	1 kW bis 3,5 MW	bis 200 °C	flüssig/flüssig
Lamellen-Wärmetauscher	1 kW bis 900 kW	bis 900 °C	gasförmig/flüssig
Rippenrohr-Wärmetauscher	5 kW bis 1 MW	bis 400 °C	gasförmig/flüssig
Wärmerohr-Wärmetauscher	3 W bis 3 kW ¹	bis 700 °C	gasförmig/gasförmig
Spiral-Wärmetauscher	20 bis 800 kW	-100 bis 450 °C	fl./fl.; gasf./gasf.
Rotations-Wärmetauscher	bis 1,6 MW	bis 300 °C ³	gasförmig/gasförmig
Regenerative Wärmetauscher	bis 140 MW	bis 1300 °C	gasförmig/gasförmig

¹ je Rohr; ² bei geschweißten Wärmetauschern bis 900 °C; ³ im Hochtemperaturbereich bis 650 °C

Tabelle 1: Typische Einsatzbereiche unterschiedlicher Wärmetauscher (mit Änderungen nach SAENA 2012).

Wärmepumpen erlauben unter Zufuhr von Energie die Änderung des Temperaturniveaus von Abwärmestromen. Anhand ihrer Bauart lassen sich insbesondere Kompressions-Wärmepumpen und sorptionsbasierte Wärmepumpen unterscheiden:⁴

- **Kompressionswärmepumpen** nutzen mechanische Energie als Antriebsenergie für einen mechanischen Verdichter, der das Druckniveau eines Käl-

Wärmepumpen ermöglichen die Aufwertung von Niedertemperatur-Abwärme.

⁴ Für weitere Bauarten siehe z. B. Wolf et al. 2012.

temittels verändert. Die Druckabhängigkeit der Siedetemperatur des Kältemittels lässt sich für eine Temperaturerhöhung der verfügbaren Abwärme nutzen. Die erreichbaren Temperaturen dieser Wärmepumpen werden mit rund 65 °C, bei Sonderlösungen mit bis zu 90 °C, angegeben (vgl. SAENA 2012). Längerfristig wird durch die Entwicklung geeigneter Kältemittel ein Temperaturbereich bis zu 140 °C als erreichbar angesehen (vgl. Wolf et al. 2012). Der Wirkungsgrad von Kompressionswärmepumpen wird als Leistungszahl (COP) bezeichnet und als das Verhältnis der nutzbaren Wärmeleistung bezogen auf die eingesetzte elektrische Energie beschrieben. Die Leistungszahl typischer Kompressionswärmepumpen bewegt sich im Bereich zwischen 3,5 und 6 (vgl. SAENA 2012).

- **Sorptionswärmepumpen** besitzen statt eines mechanischen einen thermisch betriebenen Verdichter, der durch thermische Energie einer Hochtemperaturwärmequelle (z. B. Gasbrenner, Hochtemperaturabwärme) angetrieben wird. Diese Wärmepumpen machen sich den Ab- bzw. Adsorptionsvorgang eines Kältemittels an ein Lösungsmittel bzw. an ein Adsorbermedium zunutze, um das Temperaturniveau der zugeführten Abwärme zu erhöhen. Für absorptionsbasierte Wärmepumpen wird das maximale Temperaturniveau für das erzeugte Heißwasser mit rund 65 °C angegeben. Für adsorptionsbasierte Wärmepumpen gilt eine Temperatur von bis zu 300 °C als realisierbar. Der Wirkungsgrad von Sorptionswärmepumpen wird durch die Heizzahl beschrieben. Sie spiegelt das Verhältnis von eingesetzter Antriebwärme zu Nutzwärme wider. Für Sorptionswärmepumpen wird als Orientierungswert eine Heizzahl im Bereich von 1,3 bis 1,6 angegeben (vgl. SAENA 2012).

Wärmespeicher dienen der Entkopplung von Wärmebedarf und Wärmeangebot.

Wärmespeicher spielen dann eine wichtige Rolle, wenn Abwärmeanfall und Wärmebedarf zeitlich voneinander entkoppelt sind. Anhand der Art der Wärmespeicherung lassen sich sensible Speicher, Latentwärmespeicher und thermochemische Speicher unterscheiden. Bei sensiblen Speichern ändert sich bei Be- und Entladung die Temperatur des Speichermediums. Latentwärmespeicher beruhen hingegen auf der Änderung des Aggregatzustandes des Speichermediums. Bei thermomechanischen Speichern wird Wärme durch chemische Reaktionen in das Medium ein- oder ausgespeichert. Bestimmungsfaktoren für die Auswahl von Wärmespeichern sind unter anderem Be- und Entladungsgeschwindigkeit, Speicherkapazität, Speicherdauer oder Nutzungshäufigkeit des Speichers (vgl. eingehender SAENA 2012).

3.2 Technologien zur thermischen Kältebereitstellung

Besteht kein Wärmebedarf im Unternehmen oder kann der vorhandene Wärmebedarf nicht sinnvoll aus Abwärme gedeckt werden, kann neben der Bereitstellung von Wärme auch die Bereitstellung von Kälte aus Abwärme in Erwägung gezogen werden. Die thermisch getriebenen Verfahren der Kältebereitstellung lassen sich in thermomechanische Verfahren und Sorptionsverfahren untergliedern (vgl. Henning et al. 2009).:

*Ist kein
Wärmebedarf
vorhanden, kann
auch Kälte erzeugt
werden ...*

- **Thermomechanische Kälteerzeugung:** Die Verfahren der thermomechanischen Kältebereitstellung beruhen auf einer Umwandlung thermischer Energie in mechanische Energie. Die mechanische Energie wird entweder separat von der Kältemaschine bereitgestellt und zum Betrieb eines klassischen Kälteverdichters genutzt. Oder die Umwandlung erfolgt integriert, z. B. in der Dampfstrahlkältemaschine. Im Fall der Dampfstrahlkälte ersetzt ein Strahlverdichter den Kältekompessor einer klassischen Kompressionskältemaschine, um das Druckniveau des Kältemittels im Kreisprozess zu erhöhen (vgl. weitergehend Feddeck 2002).
- **Sorptionsbasierte Kälteerzeugung:** Die sorptionsbasierten Verfahren der Kälteerzeugung basieren wie die Sorptionswärmepumpen auf einer reversiblen Anlagerung eines Arbeitsmittels an ein Sorptionsmittel. Je nachdem, ob die Anlagerung an ein flüssiges oder festes Medium erfolgt, werden Absorptions- und Adsorptionskältemaschinen unterschieden. Absorptionskältemaschinen arbeiten mit Abwärmtemperaturen im Bereich von etwa 80 bis 160 °C und erreichen je nach Abwärmtemperatur, Stufigkeit der Kältemaschine und eingesetztem Kälte-/Sorptionsmittel typischerweise Kältetemperaturen von 5 °C (Stoffpaar: Wasser-Lithiumbromid) bis hinab zu Temperaturen unter 0 °C (Stoffpaar: Ammoniak-Wasser). Der COP als Verhältnis von Kälte- und Antriebswärmeleistung liegt in einem typischen Bereich von 0,3 bis 1,2 (vgl. Henning et al. 2009). In Absorptionskältemaschinen wird als Kältemittel häufig Wasser eingesetzt, das an einen Feststoff wie Silicagel oder Zeolith reversibel gebunden wird. Die typischen Antriebstemperaturen von Adsorptionskältemaschinen liegen tiefer als die minimalen Antriebstemperaturen für Absorptionskältemaschinen und werden mit 60 bis 95 °C angegeben. Der COP der Adsorptionskältemaschinen liegt etwa im Bereich zwischen 0,4 und 0,7 (vgl. Henning et al. 2009).

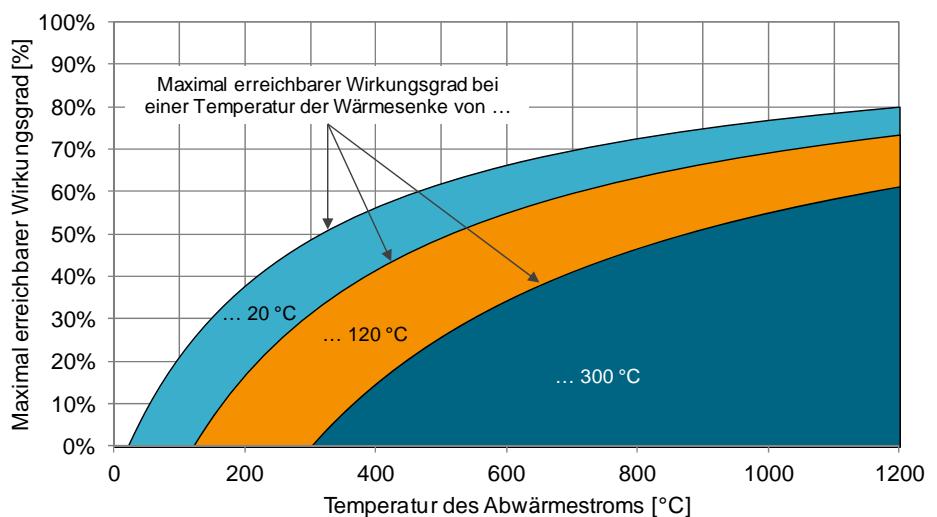
3.3 Technologien zur Verstromung von Abwärme

Als dritte Variante der Abwärmenutzung kann die Verstromung der Abwärme betrachtet werden. Der bei einem geschlossenen Kreisprozess thermodynamisch maxi-

... oder Strom.

mal erreichbare Wirkungsgrad der Stromerzeugung ist vom Temperaturniveau der Abwärmequelle und der Wärmesenke abhängig. Er wird durch den Carnot-Wirkungsgrad beschrieben (Abbildung 4). Bei einer Temperatur der Wärmesenke von beispielsweise 20 °C können aus einem Abwärmestrom mit einer Temperatur von 70 °C theoretisch etwa 15 % der im Wärmestrom mitgeführten Energie in mechanische Energie und damit in Strom umgewandelt werden. Liegt die Temperatur des Abwärmestroms bei gleicher Temperatur der Wärmesenke hingegen bei 520 °C, steigt dieser Anteil auf rund 63 %. Dies verdeutlicht, dass der maximal erreichbare Wirkungsgrad der Stromerzeugung insbesondere bei niedrigen Temperaturen aufgrund der thermodynamischen Gegebenheiten relativ gering ist.

*Abbildung 4:
Maximaler
Wirkungsgrad der
Verstromung von
Abwärme in
Abhängigkeit von
ihrer Temperatur
und der
Temperatur der
Wärmesenke.*



Die Prozesse zur Verstromung von Abwärme können wie dargelegt in Prozesse mit und ohne mechanische Zwischenstufe unterschieden werden. Als wesentliche Prozesse zur Verstromung **mit mechanischer Zwischenstufe** lassen sich die Dampf-, ORC-, Kalina- sowie Stirling-Prozesse nennen. Ihre jeweilige Anwendbarkeit hängt von den eingangs dargestellten Faktoren ab, darunter insbesondere das Temperaturniveau der Abwärmequelle.

- **Dampf-Prozesse** auf Grundlage des klassischen Dampfprozesses (Clausius-Rankine-Kreisprozess) werden am häufigsten zur Stromerzeugung aus Abwärme eingesetzt. Bei Dampf-Prozessen wird Wasserdampf zum Antrieb einer Dampfturbine verwendet, die an einen elektrischen Generator gekoppelt ist. Bei Temperaturen im Bereich ab etwa 350 °C gelten Dampfprozesse als effizienteste Lösung zur Verstromung von Abwärme. Mit niedrigeren Temperaturen steigt der Platzbedarf der Anlagen und die Überhitzung des Dampfes wird schwieriger. Daher sind bei niedrigeren Temperaturen der

ORC- und der Kalina-Prozess tendenziell besser für die Abwärmenutzung geeignet (vgl. U.S. DOE 2008). Der elektrische Wirkungsgrad von Dampfprozessen wird mit rund 25 bis 42 % bei einem Temperaturniveau von 250 bis 540 °C angegeben (vgl. SAENA 2012).

- **ORC-Prozesse** (Organic Rankine Cycle) besitzen denselben funktionalen Aufbau wie Dampf-Prozesse. In ORC-Prozessen werden als Arbeitsmedien jedoch organische Flüssigkeiten eingesetzt, die bereits bei geringeren Temperaturen bzw. Drücken als Wasser sieden. Aufgrund der niedrigeren Betriebstemperaturen sind die Wirkungsgrade der ORC-Prozesse gegenüber den Dampf-Prozessen geringer. Die Wirkungsgrade von ORC-Prozessen werden bei Temperaturen von 70 bis 350 °C auf rund 10 bis 20 % beziffert (vgl. SAENA 2012).
- **Kalina-Prozesse** nutzen im Gegensatz zu klassischen Dampf-Prozessen und zu ORC-Prozessen kein einzelnes Arbeitsmedium, sondern ein Stoffgemisch aus Ammoniak und Wasser. Während bei der Verdampfung eines einzelnen Arbeitsmediums die Temperatur konstant bleibt, kann durch das Gemisch die Temperatur während der Verdampfung ansteigen und besser an das Temperaturniveau von Wärme- und Rückkühlströmen angepasst werden. Dadurch sind bei Kalina-Prozessen höhere Effizienzen erreichbar (vgl. U.S. DOE 2008). Unter anderem aufgrund größerer Wärmetauscherflächen und einer notwendigen Stofftrennung von Ammoniak und Wasser gelten Kalina-Prozesse gegenüber den ORC-Prozessen allerdings als aufwendiger (vgl. Wietschel et al. 2010).
- **Stirling-Prozesse** nutzen die Expansion und Kontraktion eines Arbeitsgases unter Wärmezufuhr bzw. Wärmeentzug, um eine mechanische Welle anzureiben. Diese Welle ist wiederum mit einem elektrischen Generator verbunden. Stirlingmotoren gelten als leise und wartungsarme Maschinen zur Abwärmenutzung, die bereits bei geringen Drehzahlen ein großes Drehmoment entwickeln können. In Verbindung mit Temperaturen zwischen 650 und 1.000 °C wird ein Wirkungsgrad von 13 bis 23 % angegeben (vgl. SAENA 2012).

Neben diesen Verfahren gibt es verschiedene Ansätze zur Stromerzeugung ohne mechanische Zwischenstufe. Zu diesen Technologien zählen die thermoelektrische, die piezoelektrische und die thermophotovoltaische Stromerzeugung. Während die bereits genannten Verfahren mit Zwischenstufe im Rahmen der Industriellen Abwärmenutzung in unterschiedlichem Umfang bereits eingesetzt werden, handelt es sich

bei den Verfahren ohne Zwischenstufe um Konzepte, die sich noch weitgehend in der Entwicklung befinden (vgl. U.S. DOE 2008).

- **Thermoelektrische Stromerzeugung:** Die Umwandlung thermischer Energie in elektrische Energie basiert bei der Thermoelektrik darauf, dass es zwischen zwei Halbleitermaterialien, die einer Temperaturdifferenz ausgesetzt werden, zu einer Verschiebung von Elektronen kommt (Seebeck-Effekt). Daraus resultiert eine elektrische Spannung, die zur Erzeugung eines Gleichstroms genutzt werden kann. Der Wirkungsgrad thermoelektrischer Generatoren wird mit rund 2 bis 5 % angegeben; längerfristig wird eine Erhöhung des Wirkungsgrades auf über 15 % als realisierbar erachtet (vgl. Hendricks et al. 2006). Dem breiten Einsatz der Thermoelektrik stehen Investitionen von rund 30 Dollar/Watt gegenüber (vgl. Hendricks et al. 2006). Ferner wird darauf hingewiesen, dass zur Nutzung industrieller Abwärme mit der Thermoelektrik eine hohe Wärmestromdichte (10 bis 20 W/cm³) und eine hohe Temperaturdifferenz vorliegen sollte (vgl. Wietschel et al. 2010).
- **Piezoelektrische Stromerzeugung:** Die piezoelektrische Stromerzeugung basiert auf einer oszillierenden Flüssigkeits-Gas-Expansion in einem geschlossenen Arbeitsraum. Durch sie wird eine piezoelektrische Membran in Schwingung versetzt und darüber eine Spannung erzeugt. Ein Vorteil der piezoelektrischen Stromerzeugung wird darin gesehen, dass sie am effizientesten im Bereich von 100 bis 150 °C arbeitet und damit auch zur Verstromung bei niedrigen Temperaturen geeignet ist. Ihr Wirkungsgrad beträgt jedoch lediglich 1 % und die Investitionen sind mit geschätzten 10.000 Dollar/Watt derzeit noch sehr hoch (vgl. Hendricks et al. 2006).
- **Thermophotovoltaische Stromerzeugung:** Die thermophotovoltaische Stromerzeugung basiert auf einer Umwandlung von Strahlungsenergie in elektrische Energie. Das Grundprinzip ist ähnlich zur solaren Photovoltaik. Anwendungsgebiete der Thermophotovoltaik werden insbesondere im Hochtemperaturbereich über 1.000 °C gesehen (vgl. Utlu et al. 2013).

4 Abwärmenutzung in unterschiedlichen Branchen

Die Einsatzbereiche der Abwärmenutzung sind sehr vielfältig. Im Folgenden wird die Abwärmenutzung in unterschiedlichen Branchen diskutiert. Der Schwerpunkt der Betrachtung liegt aufgrund ihrer hohen Relevanz für die Abwärmenutzung auf den Prozessen der energieintensiven Branchen. Energieintensive Branchen sind dadurch gekennzeichnet, dass sie einen hohen Anteil am Gesamtenergiebedarf der Industrie besitzen und ihre anteiligen Energiekosten an den gesamten Produktionskosten deutlich über dem Durchschnitt der Industrie liegen. Zu den energieintensiven Branchen zählen insbesondere die Eisen- und Stahlindustrie, die Nichteisenmetallindustrie, die Zementindustrie, die Papierindustrie, die Glasindustrie und die Grundstoffchemie (Abbildung 5).

Die Nutzung von Abwärme ist für energieintensive Prozesse besonders relevant.

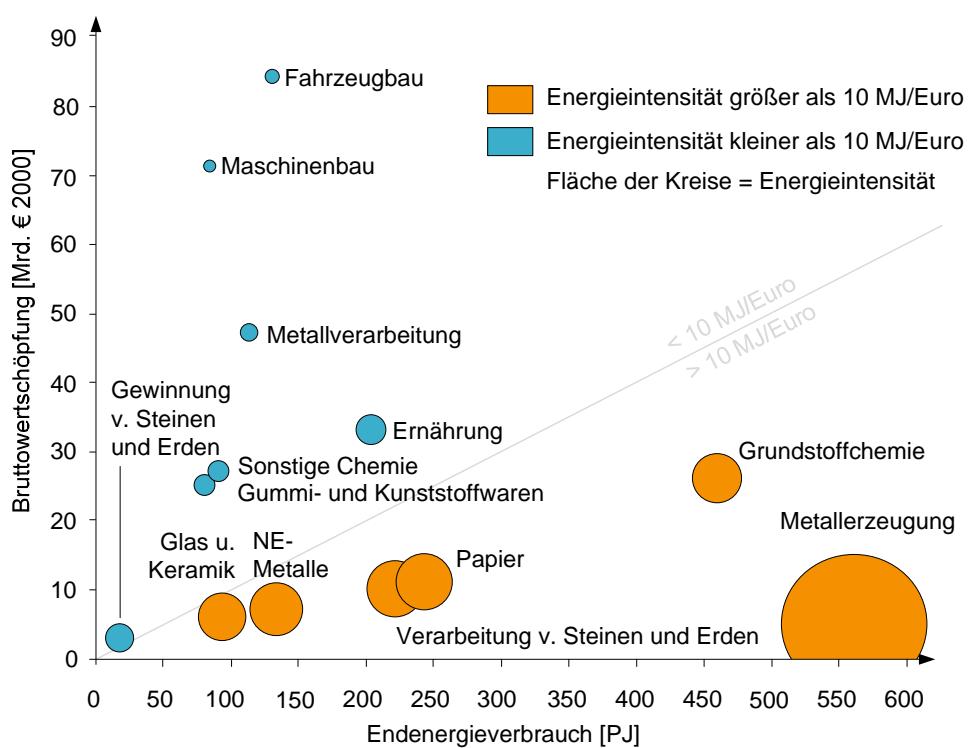


Abbildung 5:
Energieintensität unterschiedlicher Branchen 2007 (mit Änderungen übernommen aus Fleiter et al. 2013)

4.1 Eisen- und Stahlindustrie

Die Eisen- und Stahlindustrie zählt mit einem Anteil von 4 bis 5 % des weltweiten Energiebedarfs zu den größten Energieverbrauchern (vgl. Zhang et al. 2013b) und Emittenten von Kohlendioxid. Die Produktion von Eisen- und Stahl folgt im Wesentlichen zwei Herstellungs Routen: Etwa zwei Drittel der Stahlproduktion werden weltweit über die Primär route aus Koks, Eisenerz und Zuschlagsstoffen durch den Hochofenprozess produziert. In der Sekundär route wird Stahlschrott im Elektrolichtbogenofen-Prozess aufgeschmolzen. In Deutschland entfallen etwa 80 % des Energiebe-

Die Eisen- und Stahlindustrie zählt zu den größten Energieverbrauchern.

darfs auf die Primär- und 20 % auf die Sekundärroute. Da zahlreiche Prozesse hohe Temperaturen erfordern, gilt die Abwärmenutzung in der Stahlindustrie als zentrales Thema für die Verbesserung der Energieeffizienz (vgl. Fleiter et al. 2013).

Die Herstellung von Roheisen entlang der Primärroute umfasst die Bereitstellung von Koks in der Kokerei, die Aufbereitung des Eisenerzes in der Sinteranlage, die Herstellung von Roheisen im Hochofen sowie die Umwandlung des Roheisens zu Stahl im Konverter. In all diesen Herstellungsschritten fällt Abwärme an.

- **Kokerei:** In der Kokerei ist Abwärme insbesondere an das Kokereigas und an Abgase des Koksofens gebunden. Das bei der Pyrolyse der Kohle entstehende, etwa 650 bis 980 °C heiße Kokereigas enthält Teer und andere Verunreinigungen. Das Gas kann entweder direkt verbrannt oder aufbereitet werden. Bei der direkten Verbrennung kann über einen Abwärmekessel die Energie der Verbrennungsabgase genutzt werden. Bei einer Aufbereitung wird das Kokereigas abgekühlt und von Verunreinigungen befreit. Die bei der Abkühlung des Kokereigases anfallende Abwärme kann aufgrund der Verunreinigungen des Gases nur in begrenztem Umfang genutzt werden. Das gereinigte Gas kann später als Brennstoff im integrierten Hüttenwerk verwendet werden. Dabei kann die bei dessen Verbrennung anfallende Abwärme im Abgas genutzt werden (vgl. U.S. DOE 2008). Daneben verbleibt etwa die Hälfte der eingesetzten Energie als sensible Wärme im heißen Koks (vgl. Fleiter et al. 2013).
- **Sinteranlage:** In der Sinteranlage werden feinkörnige Rohstoffe (Eisenerz, Koksgrus, weitere Zuschlagsstoffe) unter Wärmezufuhr zu homogenen Agglomeraten für den Hochofenprozess gesintert. Abwärme wird durch die Abgase des Sinterprozesses und durch den Sinterkühler ausgetragen. Die Abgastemperatur wird mit 200 bis 300 °C angegeben, wobei die Nutzung dieser Abwärme aufgrund der Zusammensetzung der Abgase ebenfalls als erschwert angesehen wird (vgl. Fleiter et al. 2013).
- **Hochofen:** Im Hochofen wird aus den bereitgestellten Einsatzstoffen Roheisen gewonnen. Abwärme ist dabei sowohl in den Abgasen für die Bereitstellung heißer Zuluft für den Hochofen sowie im Gichtgas vorhanden, das während des Hochofenprozesses anfällt. Die Zuluft wird durch Winderhitzer bereitgestellt, die durch Brennstoffe wie Gicht- oder Kokereigas erhitzt werden. Die etwa 250 °C warmen Verbrennungsabgase der Winderhitzer sind vergleichsweise sauber und können zur Vorwärmung von Verbrennungsluft oder von Brenngasen genutzt werden. Wie das Kokereigas muss das Gichtgas des Hochofens vor einer Verwendung als Brenngas ebenfalls gereinigt und dabei in der Regel abgekühlt werden (vgl. U.S. DOE 2008).

- Konverter:** Im Konverter des Hochofens werden unter Sauerstoffzufuhr Verunreinigungen aus dem Roheisen entfernt. Der Prozess läuft als exotherme Reaktion ab. Das dabei freiwerdende Konvertergas kann verbrannt und die dabei entstehende Abwärme verwertet werden (vgl. U.S. DOE 2008).

Zur Herstellung von Eisen über die Sekundärroute wird Stahlschrott sowie Alteisen zusammen mit Zuschlägen in einem Elektrolichtbogenofen aufgeschmolzen. Die Energie für den Prozess wird dabei über zwei Elektroden bereitgestellt. Die Abgas-temperaturen des Ofens können einen Spitzenbereich von 1.370 bis 1.925 °C erreichen. Eine typische Maßnahme zur Verwertung der Abwärme im Abgas, die etwa 20 % des Energieeinsatzes beträgt, ist das Vorwärmen des zugeführten Schrotts (vgl. U.S. DOE 2008). Diese Nutzung von Abwärme wird allerdings auch aufgrund des Batch-Betriebs der Elektroöfen sowie der Bildung von Dioxinen als problematisch diskutiert (vgl. Fleiter et al. 2013).

Abwärmestrom	Medium	Temperatur-niveau
Kokereigas	Gas	650 – 980 °C
Abgase des Kokereigasverbrennung	Abgas	200 °C
Abgase der Sinteranlage	Abgas	200 – 300 °C
Abgase der Winderhitzer ohne Wärmerückgewinnung	Abgas	250 °C
Abgase der Winderhitzer bei Wärmerückgewinnung	Abgas	130 °C
Gichtgas	Gas	200 °C
Konvertergas	Gas	1.700 °C
Abgase des Elektrolichtbogenofens ohne Schrottvorwärmung	Abgas	200 °C
Abgase des Elektrolichtbogenofens mit Schrottvorwärmung	Abgas	1.200 °C

Tabelle 2:
Wesentliche
gasbasierte
Abwärmeströme in
der Eisen- und
Stahlindustrie
(teilweise gerundet
nach Fleiter et al.
2013; U.S. DOE
2008).

Einen Überblick über verschiedene Abwärmeströme in Gasen der Eisen- und Stahl-industrie gibt Tabelle 2. Neben der Abwärme der Prozesse verbleibt ein Großteil der eingesetzten Energie als sensible Wärme in den hergestellten Haupt- und Nebenprodukten. Dies betrifft den Koks, die Hochofen- und Konverterschlacken sowie den Stahlguss und den warmen Walzstahl (Tabelle 3).

Abwärmestrom	Sensible Wärme [GJ/t warmer Walzstahl]	Maximaltemperatur
Warmer Koks	0,24 GJ/t	1100 °C
Hochofenschlacke	0,39 GJ/t	1300 °C
Konverterschlacke	0,02 GJ/t	1500 °C
Stahlguss	1,39 GJ/t	1600 °C
Warmer Walzstahl	1,04 GJ/t	900 °C

Tabelle 3:
Wesentliche fest-
stoffbasierte
Abwärmeströme in
der Eisen- und
Stahlindustrie
(nach U.S. DOE
2008; Beer et al.
1998).

Koks wird im Kokskühler üblicherweise nass gekühlt, wobei die Wärme mit dem dabei entstehenden Wasserdampf verloren geht. Alternativ ist eine anlagentechnisch aufwendig nachrüstbare Kokstrockenkühlung möglich. Dort wird zur Kühlung inertes Gas verwendet, das bei Temperaturen von etwa 880 °C zur Dampf- oder Stromerzeugung eingesetzt werden kann (vgl. Fleiter et al. 2013).

Die im Herstellungsprozess anfallende Schlacke kann als Rohmaterial zur Herstellung von Zement, Glaskeramiken oder als Straßenmaterial verwendet werden (vgl. z. B. Bisio 1997). Ihre Nutzbarkeit hängt dabei von den Abkühlbedingungen ab (vgl. Zhang et al. 2013b). Hochofenschlacke wird derzeit überwiegend per Wasserkühlung (75 %) abgekühlt (vgl. EC 2012a). Dabei geht die in der Schlacke enthaltene Hochtemperaturabwärme verloren (vgl. Zhang et al. 2013b). Alternativ können verschiedene physikalische und chemische Verfahren herangezogen werden, die eine Nutzung der vorhandenen Abwärme erlauben (vgl. z. B. Gutiérrez Trashorras et al. 2013; Zhang et al. 2013a; Zhang et al. 2013b; Barati et al. 2011). Als Herausforderungen erweisen sich dabei unter anderem die hohe Viskosität und die geringe Wärmeleitfähigkeit der Schlacke. Eine weitere Variante der Abwärmenutzung ist die direkte Zuführung der noch warmen Brammen zum Walzwerk. Dadurch kann der Energieeinsatz für das erneute Aufwärmen des Materials reduziert werden. Ferner kann gegebenenfalls Wärme aus Kühlwasser, das bei der Kühlung des gewalzten Stahls auf einem Temperaturniveau von rund 80 °C anfällt, in Verbindung mit Wärmepumpen weiter genutzt werden (vgl. U.S. DOE 2008).

Eingehendere Analysen zur Abwärmenutzung in der Eisen- und Stahlindustrie speziell in China nehmen Ma et al. 2012 vor. Der Anteil der Branche am industriellen Gesamtenergiebedarf Chinas wird auf etwa 15 bis 20 % beziffert. Weitere Arbeiten zu Eisen- und Stahlindustrie befassen sich unter anderem mit der Stromerzeugung aus Abwärme (Johansson et al. 2013, Krenn et al. 2009), darunter die Abwärme von Koksofen (Walsh et al. 2012), sowie mit der Nutzung von Abwärme im Direktreduktionsverfahren als alternativer Stahlherstellungsroute (Kumar et al. 2012).

4.2 Nichteisenmetall-Industrie

Unter den Nichteisenmetallen ist die Aluminiumproduktion energetisch besonders relevant.

Über die Eisen- und Stahlindustrie hinaus sind auch in der Nichteisenmetall-Industrie zahlreiche Abwärmequellen anzutreffen. Zu den Produkten der Nichteisenmetall-Industrie zählen unter anderem Aluminium, Kupfer, Zink, Blei und die Edelmetalle. Aus energetischer Sicht dominiert die Aluminiumindustrie den Gesamtenergiebedarf der Nichteisenmetall-Erzeugung. Ähnlich wie Stahl kann Aluminium als Primäralsinium aus Mineralien (Bauxit) gewonnen werden oder als Sekundäralsinium aus

Aluminiumschrott. Der spezifische Energiebedarf für die Herstellung von Primäraluminium liegt etwa sechs Mal höher als der Bedarf für Sekundäraluminium.

- **Primäraluminiumherstellung:** Bei der Herstellung von Primäraluminium wird Aluminiumoxid über eine Elektrolyse in einem Schmelzbad bei rund 960 °C zu Aluminium reduziert (vgl. EC 2001). Abwärme wird im Wesentlichen über die Wände der Elektrolysezellen sowie geringfügig über deren Abgase ausgetragen. Während die Verluste in den Abgasen rund 1 % des elektrischen Energieeinsatzes für die Zelle betragen und wirtschaftlich als kaum verwertbar gelten, werden über die Zellwände aus prozesstechnischen Gründen rund 45 % des elektrischen Energiebedarfs ausgetragen. Zur Nutzung der ausgetragenen Abwärme liegen derzeit keine technologischen Lösungen vor, allerdings sind thermoelektrische oder thermophotovoltaische Ansätze zur Reduzierung bzw. Nutzung von Abwärme zumindest vorstellbar (vgl. U.S. DOE 2008).
- **Sekundäraluminiumherstellung:** Zur Sekundäraluminiumherstellung wird Aluminiumschrott gereinigt und in brennstoff- oder elektrisch betriebenen Schmelzöfen aufgeschmolzen. Bei brennstoffbeheizten Öfen wird Wärme durch die Abgasströme, durch Wand- und Chargierverluste sowie durch die Gussstücke ausgetragen (vgl. Stephan et al. 2005). Die Abgastemperaturen können bis zu 1200 °C betragen. Beim Einsatz von Rekuperator-Brennern sinkt die Temperatur auf etwa 500 °C und bei Regenerator-Brennern auf bis zu 180 °C; bei Vorwärmung des Schmelzgutes beträgt die Abgastemperatur bis zu 300 °C (vgl. Stephan et al. 2005). Bei elektrisch beheizten Induktionsöfen fällt Abwärme im Kühlwasser für die Induktionsspulen sowie im Abluftstrom an. Aufgrund der niedrigen Temperaturen (Kühlwasser bis 70 °C; Abluft 40 bis 50 °C) ist eine Verwertung der Abwärme auf Niedertemperaturanwendungen (Brauchwassererwärmung, Hallenheizung, Niedertemperaturprozesswärme) beschränkt (vgl. Stephan et al. 2005).

Für die Nutzung der Abwärme in den Gussteilen existieren keine standardisierten technischen Lösungen. Möglichkeiten zur Verwertung dieser Wärme sind insbesondere die Vorwärmung des Schmelzgutes, die direkte Weiterverarbeitung der Gussteile vor ihrer Auskühlung und die Einrichtung von Auskühlkammern zur Nutzung erwärmter Abluft beispielsweise für die Hallenbeheizung (vgl. eingehender Stephan et al. 2005). Einen Überblick verschiedener Abwärmeströme in der Aluminiumindustrie gibt Tabelle 4.

*Tabelle 4:
Beispiele für
Abwärmeströme in
der Aluminium-
industrie (mit Ände-
rungen nach Ste-
phan et al. 2005).*

Abwärmestrom	Medium	Temperaturniveau
Abgase von Ofentypen mit Kaltluftbrenner	Abgas	900 – 1100 °C
Abgase von Ofentypen mit Rekuperator-Brenner	Abgas	400 – 600 °C
Abgase von Ofentypen mit Regenerator-Brenner	Abgas	180 – 300 °C
Abluft über Absaugung	Luft	40 – 80 °C
Gießprozesse	Gussstücke	50 – 300 °C

Eine weitergehende Diskussion von Abwärmemengen und Wärmeintegration in der Primäraluminiumindustrie ist beispielsweise Nowicki et al. 2012 zu entnehmen. Die Nutzung der während der Abkühlung des Metalls freigesetzten Abwärme zur Vorwärmung von Schmelzgut wird eingehender in Selvaraj et al. 2012 analysiert.

4.3 Zementindustrie

Die Energie verursacht rund 30 bis 40 % der Produktionskosten der Zementherstellung.

Die Zementindustrie zählt ebenfalls zu den energieintensivsten Industriebranchen. Der Energiekostenanteil an den Produktionskosten beträgt etwa 30 bis 40 % (vgl. Madlool et al. 2012). Die Herstellung von Zement umfasst die Förderung der Rohmaterialien, ihre Aufbereitung und Zerkleinerung zu Rohmehl, das Brennen des Rohmehls bei rund 1450 °C in einem Drehrohrofen zu Zementklinker und das Mahlen des Klinkers. Während des Mahlens wird durch Beimischung von Zumahlstoffen der endgültige Zement hergestellt. Der Energiebedarf für die Herstellung einer Tonne Zementklinker beträgt zwischen 3 und 6,5 GJ. Für eine Tonne Zement beträgt der Energiebedarf im Schnitt rund 3 GJ (vgl. Karellas et al. 2013).

Als einfachste Varianten zur Verwertung von Abwärme in der Zementindustrie gelten die Nutzung der Abgase des Drehrohrofens sowie des nachgelagerten Klinkerkühlers (vgl. Madlool et al. 2011). Typische Abgastemperaturen des Drehrohrofens beim überwiegend eingesetzten Trockenverfahren werden mit 450 °C angegeben (vgl. U.S. DOE 2008). Bei einer Nutzung der Abwärme zur Vorwärmung der Rohmaterialien sinkt die Temperatur abhängig von der Anzahl der Vorwärmer auf ungefähr 200 °C (5-6 Stufen) bis 340 °C (4 Stufen) (Tabelle 5). Anstelle der Vorwärmung kann aus den heißen Abgasen auch Strom über den Dampfprozess erzeugt werden (vgl. U.S. DOE 2008; Madlool et al. 2011).

Daneben bietet sich eine Verwertung der Abwärme des Klinkers an, der beim Verlassen des Drehrohrofens eine Temperatur von 1200 bis 1250 °C besitzt. Im Klinkerkühler wird er auf Temperaturen von etwa 100 bis 300 °C abgekühlt. Die dabei anfallende Abwärme kann beispielsweise zur Vorwärmung von Verbrennungsluft für den Ofen oder als Trockenluft für die Aufbereitung der Rohmaterialien genutzt werden (vgl. Achternbosch et al. 2000). Daneben ist eine Abwärme zur Stromerzeugung über Dampf-, ORC- oder Kalina-Prozesse denkbar (vgl. U.S. DOE 2008). Betrachtungs-

gegenstand von Arbeiten zur Abwärmenutzung in der Zementindustrie sind entsprechend unter anderem die Stromerzeugung (Saneipoor et al. 2011) sowie die Verwertung von Wärmeverlusten des Drehrohrofens (Caputo et al. 2011; Sögüt et al. 2010).

Abwärmestrom	Medium	Temperaturniveau
Trockenverfahren ohne Vorwärmer / Vorkalzinator	Abgas	450 °C
Trockenverfahren mit Vorwärmer / Vorkalzinator	Abgas	200 – 340 °C

*Tabelle 5:
Beispiele für Abwärmeströme in der Zementindustrie (nach U.S. DOE 2008).*

4.4 Papierindustrie

Als weitere energieintensive Brache gilt die Papierindustrie. Die Schritte der Papierherstellung umfassen im Wesentlichen die Halbstofferzeugung, die Stoffaufbereitung, die Papiermaschine und die Veredelung. In der Halbstoffbereitung werden aus Holz und Altpapier Faserstoffe gewonnen. Die Faserstoffe werden in der Stoffaufbereitung aufbereitet, gemischt und unter Zusatz von Füll- und Hilfsstoffen zu einem Fertig- oder Ganzstoff für den Einsatz in der Papiermaschine vorbereitet. In der Papiermaschine wird der Ganzstoff dann zunächst zu einer Papierbahn geformt, im Anschluss gepresst, getrocknet und aufgerollt. Teilweise wird nachgelagert das Papier durch Streichen oder Glätten der Oberfläche veredelt (vgl. z. B. LfU 2003).

Abwärme fällt in der Papierherstellung insbesondere auf niedrigeren Temperaturniveaus an (Tabelle 6). Aufgrund dessen gilt die Wärmeintegration in der Papierindustrie als zu bevorzugende Maßnahme für die Abwärmenutzung. Obwohl die Wärmeintegration in den vergangenen Jahren verstärkt wurde gelten die Möglichkeiten zur Abwärmenutzung als noch nicht ausgeschöpft (vgl. AGBP 2009). Eine thermische Verwertung von Abwärme kann an verschiedenen Stellen des Papierherstellungsprozesses erfolgen. Beispielsweise kann die heiße Abluft der Trockenhaube einer Papiermaschine zur Vorwärmung der Haubenzuluft genutzt werden. Daneben kann die Abwärme der Papiermaschine zur Erwärmung von Sieb-/Klarwasser bzw. Warmwasser eingesetzt werden. Auch bei Streichmaschinen ist die Möglichkeit einer Abwärmenutzung zur Luftvorwärmung oder Warmwassernutzung gegeben. Daneben wird auch der Einsatz von Wärmepumpen zur Bereitstellung von Prozesswärme aus Niedertemperaturabwärme als Möglichkeit der Abwärmenutzung gesehen (vgl. AGBP 2009).

Ferner ist das Abwärmeniveau in Papierfabriken teilweise ausreichend für den Betrieb thermischer Kälteanlagen. Allerdings wird der Bedarf an Prozess- und Klimakälte in der Papierindustrie als relativ gering eingeschätzt (vgl. AGBP 2009). Die Stromerzeugung aus Abwärme wird in der Papierindustrie ebenfalls eher selten verfolgt. Die Nutzung von Abwärme über den ORC-Prozess, den Kalina-Prozess und gegebenenfalls über Stirlingmotoren ist zwar denkbar, entsprechende Möglichkeiten werden

In der Papierindustrie fällt Abwärme auf vergleichsweise geringeren Temperaturniveaus an.

allerdings großtechnisch nicht umgesetzt (vgl. AGBP 2009). Aktuelle Fragestellungen zur Nutzung von Abwärme in der Papierindustrie betreffen unter anderem die Möglichkeiten der Abwärmeverwendung im Bereich der Trockenpartie von Papiermaschinen (Laurijssen et al. 2010; Sivill et al. 2009) sowie im Bereich der Halbstofferzeugung (Jönsson et al. 2008). Daneben wird auf derzeit eher weniger beachtete Möglichkeiten der Abwärmeverwendung hingewiesen (Abwärmeverwendung von Rotationsgebläsen der Filzkonditionierung, Abwärme zur Trocknung von Klärschlamm in angeschlossenen Klärwerken, Vorwärmung von Spritzwasser zur Sieb- oder Filzkonditionierung, Dampfwiederverwendung durch Dampfstrahlverdichter) (vgl. Fleiter et al. 2013).

*Tabelle 6:
Beispiele typischer
Abwärmeströme in
der Papierindustrie
(mit Änderungen
nach AGBP 2009).*

Abwärmestrom	Medium	Temperaturniveau
Abwasser der Papiermaschine	Abwasser	20 – 40 °C
Abwasser der Stoffaufbereitung	Abwasser	30 – 60 °C
Abwasser von Prozessen der Halbstofferzeugung	Abwasser	60 – 70 °C
Abluft der Produktionshalle	Luft	30 – 40 °C
Abluft der Vakuumpumpen	Luft	40 – 50 °C
Abluft der Vakuumgebläse	Luft	130 – 160 °C
Abluft der Trockenpartie der Papiermaschine	Luft	60 – 80 °C
Abluft der Trockenpartie der Streichmaschine	Luft	100 – 140°C

4.5 Glasindustrie

In der Glasindustrie werden Produkte wie Behälterglas, Flachglas, Glasfasern oder Glaswolle gefertigt. Die Prozessschritte der Glasherstellung umfassen die Gemengezubereitung aus Rohstoffen (z. B. Silizium-, Natrium-, Kalziumoxid), das Aufschmelzen des Gemenges in Glasschmelzöfen, das Läutern der Schmelze (Entfernen von Gasblasen und Homogenisierung) sowie die Formgebung und Abkühlung der Produkte (vgl. z. B. D'Antonio et al. 2003).

Typische Prozesstemperaturen der Glasherstellung liegen im Bereich zwischen 1.300 und 1.550 °C. Zur Abwärmeverwendung werden in der Glasindustrie Regeneratoren und Rekuperatoren zur Verbrennungsluftvorwärmung eingesetzt. Ohne Abwärmeverwendung liegen die Abgastemperaturen typischerweise über 1.300 °C (vgl. U.S. DOE 2008). Die Abgastemperaturen sinken beim Einsatz von Rekuperatoren auf rund 980 °C, beim Einsatz von Regeneratoren auf rund 320 bis 540 °C. Daneben wird Abwärme in unterschiedlichen Varianten zur Materialvorwärmung (vgl. z. B. Zippe 2011) und in Dampfprozessen zur Stromerzeugung eingesetzt (vgl. EC 2012b).

4.6

Chemische Industrie

Die chemische Industrie umfasst eine Vielzahl unterschiedlicher Prozesse mit verschiedenen Produkten. Viele Produktionsketten der chemischen Industrie sind komplex und stark miteinander verkoppelt. Als Beispiele für die Wärmerückgewinnung im Bereich der chemischen Industrie werden insbesondere die Ethylen- und Ammoniakproduktion als besonders relevante Prozesse für den Brennstoff- und Dampfbedarf dieser Branche betrachtet.

Die chemische Industrie umfasst viele stofflich und energetisch stark verkoppelte Prozesse.

- **Ethylenproduktion:** Ethylen ist ein Hauptrohstoff für die petrochemische Industrie, der großtechnisch über den Steam-Cracking-Prozess aus gasförmigem Kohlenwasserstoff, Naphta und Gasöl gewonnen wird (vgl. Fleiter et al. 2013). Dazu werden die Rohstoffe zunächst auf 650 °C vorgewärmt und unter Zufuhr von überhitztem Dampf in einer endothermen Reaktion bei rund 850 °C aufgespalten. Um die Reaktion abzubrechen wird das Gemisch im Anschluss auf rund 400 °C abgeschreckt – wobei Dampf auf hohem Druckniveau anfällt – und weiter mit Wasser abgekühlt. Im Anschluss daran findet eine Tieftemperaturabscheidung bei bis zu -150 °C bei Drücken von bis zu 35 bar statt (vgl. McKenna et al. 2010; Fleiter et al. 2013). Die Wärmeintegration von Crackern gilt als hoch. Die Abgastemperaturen der Cracker variieren stark; als Durchschnittstemperatur werden rund 150 °C genannt (vgl. McKenna et al. 2010; U.S. DOE 2008).
- **Ammoniakproduktion:** Ammoniak ist das Ausgangsmaterial für künstlichen Dünger. Die Herstellung von Ammoniak besteht aus zwei integrierten Prozessstufen, dem Synthesegas-Prozess und der Ammoniak-Synthese. Der energieintensive Prozessschritt der Ammoniakherstellung liegt in der Bereitstellung des Synthesegases (vgl. McKenna et al. 2010). Es wird über einen Steam-Reforming-Prozess oder die partielle Oxidation gewonnen. Beim in Deutschland überwiegend eingesetzten mehrstufigen Steam-Reforming liegt das Temperaturniveau des Wärmebedarfs bei rund 800 °C (Primärreformer) bzw. 1.200 °C (Sekundärreformer), bei der partiellen Oxidation bei etwa 1.200 bis 1.500 °C (vgl. Fleiter et al. 2013). Beim Steam-Reforming wird überschüssige Wärme zur Bereitstellung von Hochdruckdampf verwendet, wodurch die entsprechenden Anlagen häufig weitgehend unabhängig von einem Dampf- oder Strombezug von außen werden. Bei der partiellen Oxidation ist die Wärmeintegration in Ermangelung heißer Abgase nur eingeschränkt möglich (vgl. Fleiter et al. 2013). Bei der Ammoniaksynthese an sich handelt es sich um einen exothermen Prozess, der ebenfalls zur Erzeugung von Dampf genutzt werden kann (vgl. Fleiter et al. 2013).

4.7 Weitere Industrien und Querschnittsanwendungen

Auch in nicht-energieintensiven Branchen fällt häufig nutzbare Abwärme an.

In diesen Branchen wird Abwärme insbesondere durch Querschnittstechnologien freigesetzt.

Neben der Nutzung von Abwärme in energieintensiven Branchen fällt auch in nicht-energieintensiven Betrieben häufig nutzbare Abwärme an. Beispielhaft kann hier die Nahrungsmittelindustrie genannt werden. Prozesse wie Trocknen, Waschen, Pasteurisieren, Kochen, Wärmebehandeln und Entwässern benötigen Wärme in einem Temperaturbereich von etwa 30 bis 120 °C (vgl. LfU 2012). Während die einfachste Möglichkeit zur Nutzung von Abwärme in der Wärmeintegration von Prozessen liegt (vgl. z. B. Atkins et al. 2012, Atkins et al. 2011) werden unter anderem auch Möglichkeiten zur Stromerzeugung (Aneke et al. 2012) oder zum Einsatz von Wärmepumpen (Seck et al. 2013; Hita et al. 2011) thematisiert. Herausforderungen stellen insbesondere der Wärme- und Massentransfer, die engen Temperaturänderungen und die Bildung von Ablagerungen (vgl. z. B. Atkins et al. 2011) bzw. das Fließverhalten der entsprechenden Medien dar (vgl. Law et al. 2013).

Im Schwerpunkt besteht die Möglichkeit zur Nutzung von Abwärme in zahlreichen nicht-energieintensiven Prozessen insbesondere im Bereich dort eingesetzter Querschnittstechnologien (vgl. z. B. auch LfU 2012) wie:

- **Verbrennungsanlagen:** Neben der Nutzung von Verbrennungsabgasen in den oben diskutierten branchenspezifischen Prozessen liegen Abgase auch durch Querschnittsanwendungen wie Heißwasserkesseln, Schmelzöfen, Brennöfen oder Dampferzeugern vor. Abhängig von den jeweiligen Prozessen erreichen die Abgase Temperaturen von teilweise mehreren Hundert Grad, für die entsprechend unterschiedliche der genannten Nutzungsmöglichkeiten technisch und wirtschaftlich sinnvoll sein können.
- **Trocknungsanlagen:** Trocknungsprozesse sind ebenfalls in vielen Branchen anzutreffen (z. B. Trocknung von Milchpulver, Papier oder Lösungsmitteln). Die im Abgasstrom nach dem Trocknen vorhandene Energie kann durch Wärmetauscher und gegebenenfalls durch eine Rückgewinnung von Kondensationswärme für andere Zwecke erschlossen werden.
- **Raumlufttechnische Anlagen:** Wird Abluft direkt nach außen abgeführt, geht die darin enthaltene Kälte oder Niedertemperaturwärme mit ihr verloren. Durch den Einsatz von Wärmetauschern in raumlufttechnischen Anlagen (vgl. z. B. Mardiana-Idayu et al. 2012) ist es möglich, rund 35 bis 90 % der in der Abluft vorhandenen Energie für die Vorwärmung von Frischluft zu verwenden (vgl. LfU 2012).
- **Druckluftkompressoren:** Bei der Verdichtung von Umgebungsluft fallen thermodynamisch bedingt große Abwärmemengen an. Diese warme Abluft von Druckluftkompressoren liegt rund 20 °C über der Umgebungstemperatur.

tur und kann beispielsweise im Winter zur Hallenbeheizung genutzt werden. Daneben kann über Wärmetauscher Warmwasser im Temperaturbereich zwischen 70 und 80 °C zur Brauch- oder Prozesswassererwärmung genutzt werden.

- **Kälteanlagen:** Bei Kälteanlagen (z. B. für die Maschinen oder Werkzeugkühlung) kann sowohl Wärme aus dem Kühlkreislauf als auch vom Kältekompessor erschlossen werden. Die Temperaturniveaus werden mit weniger als 35 °C respektive 50 bis maximal 70 °C angegeben (vgl. LfU 2012). Ähnlich zu Druckluftkompressoren kann die Abwärme der Kältekompressoren bei entsprechendem Bedarf über die Abluft oder die Warmwasserkreisläufe erschlossen werden.
- **Abwasser:** Abhängig von ihrem Temperaturniveau kann gegebenenfalls eine Abwasserwärmerückgewinnung unter anderem für die Vorwärmung von Frischwasser genutzt werden.

5 Fazit

In der vorliegenden Kurzstudie wurde ein Überblick über Grundlagen, Technologien und Potenziale der industriellen Abwärmenutzung gegeben. Während detaillierte gesamtwirtschaftliche Erhebungen zu den erschließbaren Potenzialen im nationalen wie im internationalen Raum nur begrenzt vorhanden sind, legen die betrachteten Quellen nahe, dass eine breitere Abwärmenutzung einen erkennbaren Beitrag zur Steigerung der Energie- und Ressourceneffizienz leisten kann.

Zur Nutzung von Abwärme können verschiedene der dargestellten technologischen Lösungen herangezogen werden. Am nahe liegendsten ist bei einem entsprechenden Wärmebedarf stets eine Lösung, bei der die Abwärme am Ort ihres Anfalls thermisch verwendet wird. Ist dies nicht möglich, stehen die anderen Varianten der Abwärmenutzung (Umwandlung in andere Energieformen, Nutzung an anderer Stelle) zur Verfügung. Generell steigt dabei die Attraktivität der Abwärmenutzung und die Anzahl der Nutzungsmöglichkeiten mit dem Temperaturniveau, der Abwärmemenge und der Bündelung und Reinheit des Abwärmestroms.

Mit Blick auf Temperaturniveau und Menge ist die Abwärmenutzung insbesondere für energieintensive Anwendungen und Prozesse von Interesse, sofern diesen im Einzelfall keine technischen Gründe entgegen stehen (z. B. aggressives Kondensat, Bildung von Ablagerungen). Dennoch sind wie gezeigt auch in anderen Branchen Möglichkeiten für die Abwärmenutzung gegeben. Da Abwärme dort jedoch tendenziell auf geringeren Temperaturniveaus anfällt, sind die Möglichkeiten der Verwertung weniger vielfältig. Insbesondere bei niedrigen Temperaturniveaus der Abwärme bietet sich primär eine thermische Nutzung der Abwärme (z. B. Heizungsunterstützung) an, sofern entsprechende Wärmesenken vorhanden sind.

In welchen Fällen eine Abwärmenutzung sinnvoll und welche konkrete Umsetzung zu wählen ist, ist von vielen Faktoren abhängig und muss vor dem Hintergrund der Rahmenbedingungen des jeweiligen Einzelfalls genau geprüft werden. Allgemein lässt sich jedoch festhalten, dass der Anfall von Abwärme nicht als gegeben hingenommen werden sollte. Vielmehr sollte zunächst untersucht werden, ob die Möglichkeiten zur Abwärmevermeidung ausgeschöpft wurden. Erst danach sollte eine eingehendere Auseinandersetzung mit den Möglichkeiten der Abwärmenutzung angestrebt werden.

6 Anhang

Eine Auswahl weitergehender Informationsmaterialien zur industriellen Abwärmenutzung bieten verschiedene Leitfäden, Internetseiten und weitere Informationsquellen.

6.1 Leitfäden und Broschüren

Abwärmenutzung im Betrieb. Klima schützen – Kosten senken

Herausgeber: Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2012

Beschreibung: Leitfaden für Unternehmen zur Identifizierung ungenutzter Abwärmepotenziale.

Verfügbar: http://www.lfu.bayern.de/energie/co2_minderung/doc/leitfaden_Abwaermenutzung_betrieb.pdf

Technologien zur Abwärmenutzung

Herausgeber: Sächsische Energieagentur GmbH (SAENA), 2012

Beschreibung: Bewertungsschema, Praxisbeispiele, Technologien und Beispiele für die Abwärmenutzung in Unternehmen.

Verfügbar: http://www.saena.de/download/Broschueren/BU_Technologien_der_Abwaermenutzung.pdf

Waste Heat Recovery: Technology and Opportunities in U.S. Industry

Herausgeber: U.S.- amerikanisches Energieministerium, 2008

Beschreibung: Darstellung zu Wärmenutzungstechnologien, Wärmequellen, Anwendungen und Hemmnissen für die Abwärmenutzung in der U.S.-Industrie (in Englisch).

Verfügbar: www1.eere.energy.gov/manufacturing/intensiveprocesses/pdfs/waste_heat_recovery.pdf

Leitfaden zur Abwärmenutzung in Kommunen

Herausgeber: Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2008

Beschreibung: Leitfaden für Kommunalpolitiker und Planungsbüros für die systematische Analyse von Möglichkeiten der Abwärmenutzung.

Verfügbar: http://www.lfu.bayern.de/energie/co2_minderung/doc/leitfaden_abwaermenutzung.pdf

Industrielle Abwärmenutzung: Beispiele & Technologien

Herausgeber: Land Oberösterreich, 2008

Beschreibung: Broschüre mit Best-Practice-Beispielen zur außerbetrieblichen Verwertung industrieller Abwärme.

Verfügbar: http://www.esv.or.at/fileadmin/esv_files/Medien/us_industrielle_abwaerme.pdf

6.2 Internetseiten

Energieatlas Bayern

Betreiber: Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit

Beschreibung: Der Energieatlas bietet Hintergrundinformationen zur Abwärmenutzung und eine Abwärmeinformationsbörse für das Bundesland Bayern.

Verfügbar: http://www.energieatlas.bayern.de/thema_abwaerme.html

Abwärmeatlas Sachsen

Betreiber: Sächsische Energieagentur GmbH (SAENA)

Beschreibung: Der Abwärmeatlas bietet eine Übersicht über Wärmequellen und -senken für das Bundesland Sachsen.

Verfügbar: <http://www.saena.de/angebote/abwaermeatlas.html>

Wärmerückgewinnung in der Industrie

Betreiber: PIUS-Internet-Portal

Beschreibung: Hintergrundinformationen zur Wärmerückgewinnung und Berechnungstool für die Wärmerückgewinnung von Lüftungsanlagen.

Verfügbar: http://www.piushome.de/pius_info_pool/tools/waermerueckgewinnung/index.html

Wärmerückgewinnung bei Druckluftsystemen

Betreiber: Bundesamt für Energie Schweiz

Beschreibung: Berechnungstool für die Wärmerückgewinnung bei Druckluftanlagen.

Verfügbar: <http://www.ennergieschweiz.ch/de-ch/unternehmen/stromeffizienz/druckluft/berechnungstools.aspx>

Process Heating Assessment and Survey Tool

Betreiber: U.S. Energieministerium

Beschreibung: Softwaretool für die Analyse von Wärmeströmen in Industrieprozessen.

Verfügbar: http://www1.eere.energy.gov/manufacturing/tech_assistance/software_phast.html

7 Literatur

- Achterbosch, M.; Bräutigam, K.-R. (2000): Herstellung von Zementklinker. Verfahrensbeschreibung und Analysen zum Einsatz von Sekundärabbrennstoffen. Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse. Wissenschaftliche Berichte. FZKA 6508.
- Ajah, A. N.; Patil, A. C.; Herder, P. M.; Grievink, J. (2007): Integrated conceptual design of a robust and reliable waste-heat district heating system. *Applied Thermal Engineering*, 27 (7), S. 1158–1164.
- Ammar, Y.; Joyce, S.; Norman, R.; Wang, Y.; Roskilly, A. P. (2012): Low grade thermal energy sources and uses from the process industry in the UK. *Applied Energy*, 89, S. 3–20.
- Aneke, M.; Agnew, B.; Underwood, C.; Wu, H.; Masheiti, S. (2012): Power generation from waste heat in a food processing application. *Applied Thermal Engineering*, 36, S. 171–180.
- Arbeitsgemeinschaft Branchenenergiekonzept Papier (AGBP) (Hrsg.) (2009): Branchenleitfaden für die Papierindustrie. Ausgabe 2009. Duisburg.
- Arzbaecher, C.; Fouche, E.; Parmenter, K. (2007): Industrial Waste-Heat Recovery: Benefits and Recent Advancements in Technology and Applications. Proceedings of the ACEEE 2007 Summer Study on Energy Efficiency in Industry, White Plains, Vereinigte Staaten von Amerika, S. 2-1 - 2-13.
- Atkins, M. J.; Walmsley, M. R. W.; Neale, J. R. (2011): Integrating heat recovery from milk powder spray dryer exhausts in the dairy industry. *Applied Thermal Engineering*, 31, S. 2101–2106.
- Atkins, M. J.; Walmsley, M. R. W.; Neale, J. R. (2012): Process integration between individual plants at a large dairy factory by the application of heat recovery loops and transient stream analysis. *Journal of Cleaner Production*, 34, S. 21–28.
- Barati, M.; Esfahani, S.; Utigard, T. A. (2011): Energy recovery from high temperature slags. *Energy*, 36, S. 5440–5449.
- Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (LfU) (Hrsg.) (2003): Klimaschutz durch effiziente Energieverwendung in der Papierindustrie. Nutzung von Niedertemperaturabwärme. Augsburg.
- Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (LfU) (Hrsg.) (2012): Abwärmenutzung im Betrieb. Klima schützen - Kosten senken. Augsburg.
- Beer, J. de; Worrell, E.; Blok, K. (1998): Future Technologies For Energy-Efficient Iron and Steel Making. *Annual Review of Energy and the Environment*, 23, S. 123–205.
- Bendig, M.; Maréchal, F.; Favrat, D. (2013): Defining “Waste Heat” for industrial processes. *Applied Thermal Engineering*, 61, S. 134–142.
- Bergmeier, M. (2003): The history of waste energy recovery in Germany since 1920. *Energy*, 28, S. 1359–1374.
- Berthou, M.; Bory, D. (2012): Overview of waste heat in the industry in France. Proceedings of the ECEEE 2012 Summer Study on Energy Efficiency in Industry, Arnhem, Niederlande, S. 453–459.

- Bisio, G. (1997): Energy recovery from molten slag and exploitation of the recovered energy. *Energy*, 22 (5), S. 501–509.
- 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.
- 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.
- Broberg, S.; Backlund, S.; Karlsson, M.; Thollander, P. (2012): Industrial excess heat deliveries to Swedish district heating networks: Drop it like it's hot. *Energy Policy*, 51, S. 332–339.
- Campana, F.; Bianchi, M.; Branchini, L.; De Pascale, A.; Peretto, A.; Baresi, M.; Fermi, A.; Rossetti, N.; Vescovo, R. (2013): ORC waste heat recovery in European energy intensive industries: Energy and GHG savings. *Energy Conversion and Management*, 76, S. 244–252.
- Caputo, A. C.; Pelagagge, P. M.; Salini, P. (2011): Performance modeling of radiant heat recovery exchangers for rotary kilns. *Applied Thermal Engineering*, 31 (14–15), S. 2578–2589.
- Chew, K. H.; Klemeš, J. J.; Alwi, S. R. W.; Manan, Z. A. (2013): Industrial implementation issues of Total Site Heat Integration. *Applied Thermal Engineering*, 61, S. 17–25.
- Crook, A. W. (Hrsg.) (1994): Profiting From Low-Grade Heat. The Watt Committee on Energy Report No. 26. London: The Institution of Electrical Engineers.
- Daniëls, B.; Wemmers, A.; Wetzel, W. (2012): Dutch industrial waste heat in district heating: Waste of effort?. Proceedings of the ECEEE 2012 Summer Study on Energy Efficiency in Industry, Arnhem, Niederlande, S. 391–397.
- D'Antonio, M.; Hildt, N.; Patil, Y.; Moray, S.; Shields, T. (2003): Energy Efficiency Opportunities in the Glass Manufacturing Industry. Proceedings of the ACEEE 2003 Summer Study on Energy Efficiency in Industry, Rye Brook, Vereinigte Staaten von Amerika, S. 4-87 - 4-98.
- Dupont, M.; Sapora, E. (2009): The heat recovery potential in the French industry: which opportunities for heat pump systems?. Proceedings of the ECEEE 2009 Summer Study, La Colle sur Loup, Frankreich, S. 1115–1123.
- Europäische Kommission (EC) (2012a): Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control).
- Europäische Kommission (EC) (Hrsg.) (2001): Reference Document on Best Available Techniques in the Non Ferrous Metals Industries. Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC).
- Europäische Kommission (EC) (Hrsg.) (2012b): Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Manufacture of Glass. Industrial Emission Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control).
- Fang, H.; Xia, J.; Zhu, K.; Su, Y.; Jiang, Y. (2013): Industrial waste heat utilization for low temperature district heating. *Energy Policy*, 62, S. 236–246.

- Feddeck, P. (2002): Neue Anwendungen der Dampfstrahlkältemaschine. Eggenstein-Leopoldshafen: BINE Informationsdienst. Fachinformationszentrum Karlsruhe, Gesellschaft für wissenschaftlich-technische Information mbH. projektinfo 10/02.
- Fischer, S.; Jochem, E.; Knopf, V.; Tönsing, E. (1999): Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung in kleinen und mittleren Unternehmen. Karlsruhe: Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung.
- Fleiter, T.; Schlamann, B.; Eichhammer, W. (Hrsg.) (2013): Energieverbrauch und CO₂-Emissionen industrieller Prozesstechnologien - Einsparpotenziale, Hemmnisse und Instrumente. ISI-Schriftenreihe "Innovationspotenziale". Stuttgart: Fraunhofer.
- Gabathuler, H. R. (1994): Elektrizität und Wärme. Grundlage und Zusammenhänge RAVEL im Wärmesektor Heft 1. Bern: Bundesamt für Konkunkturfragen.
- Gutiérrez Trashorras, A. J.; Álvarez Álvarez, E.; Río González, J. L.; Suárez Cuesta, J. M.; Xiberta Bernat, J. (2013): Design and evaluation of a heat recuperator for steel slags. *Applied Thermal Engineering*, 56, S. 11–17.
- Hackl, R.; Andersson, E.; Harvey, S. (2011): Targeting for energy efficiency and improved energy collaboration between different companies using total site analysis (TSA). *Energy*, 36, S. 4609–4615.
- Hendricks, T.; Choate, W. T. (2006): Engineering Scoping Study of Thermoelectric Generator Systems for Industrial Waste Heat Recovery. o. O.: U.S. Department of Energy (U.S. DOE).
- Henning, H.-M.; Urbaneck, T.; Morgenstern, A.; Núñez, T.; Wiemken, E.; Thümmler, E.; Ulig, U. (2009): Kühlen und Klimatisieren mit Wärme. BINE-Informationspaket. Berlin: Solarpraxis.
- 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. Proceedings of the ECEEE 2011 Summer Study, Belambra Presqu'île de Giens, Frankreich, S. 735–743.
- Johansson, M. T.; Söderström, M. (2013): Electricity generation from low-temperature industrial excess heat - an opportunity for the steel industry. *Energy Efficiency* (Im Druck).
- Jönsson, J.; Svensson, I.-L.; Berntsson, T.; Moshfegh, B. (2008): Excess heat from kraft pulp mills: Trade-offs between internal and external use in the case of Sweden Part 2: Results for future energy market scenarios. *Energy Policy*, 36 (11), S. 4186–4197.
- Kapil, A.; Bulatov, I.; Smith, R.; Kim, J.-K. (2012): Process integration of low grade heat in process industry with district heating networks. *Energy*, 44 (1), S. 11–19.
- Karellas, S.; Leontaritis, A.-D.; Panousis, G.; Bellos, E.; Kakaras, E. (2013): Energetic and exergetic analysis of waste heat recovery systems in the cement industry. *Energy*, 58, S. 147–156.
- Krenn, C.; Fresner, J.; Bürki, T.; Wastl, H. (2009): Ökoeffizienz durch Abwärmenutzung in der stahlverarbeitenden Industrie. Energieeffizienzsteigerung und Reduktion der CO₂-Emissionen durch Einsatz von ORC-Anlagen und Absorptionswärmepumpen am Beispiel des Nahtlosrohrwalzwerks der voestalpine Tubulars GmbH & Co KG. In: Baumgartner, R. J.; Biedermann, H.; Zwainz, M. (Hrsg.): Öko-

- Effizienz. Konzepte, Anwendungen und Best practices. Sustainability Management for Industries 3. München: Hampp, S. 55–66.
- Kumar, V.; Khanam, S. (2012): Recovery and utilization of waste heat in a coal based sponge iron process. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 56, S. 19–28.
- Laurijssen, J.; De Gram, F. J.; Worrell, E.; Faaij, A. (2010): Optimizing the energy efficiency of conventional multi-cylinder dryers in the paper industry. *Energy*, 35 (9), S. 3738–3750.
- Law, R.; Harvey, A.; Reay, D. (2013): Opportunities for low-grade heat recovery in the UK food processing industry. *Applied Thermal Engineering*, 53, S. 188–196.
- López, 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.
- Ludwig, J. (2012): Energieeffizienz durch Planung betriebsübergreifender Prozessintegration mit der Pinch-Analyse. Dissertation. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing.
- Ma, G.-y.; Cai, J.-j.; Zeng, W.-w.; Dong, H. (2012): Analytical Research on Waste Heat Recovery and Utilization of China's Iron & Steel Industry. *Energy Procedia*, 14, S. 1022–1028.
- Madlolo, N. A.; Saidur, R.; Hossain, M. S.; Rahim, N. A. (2011): A critical review on energy use and savings in the cement industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, S. 2042–2060.
- Madlolo, N. A.; Saidur, R.; Rahim, N. A.; Islam, M. R.; Hossian, M. S. (2012): An exergy analysis for cement industries: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, S. 921–932.
- Mardiana-Idayu, A.; Riffat, S. B. (2012): Review on heat recovery technologies for building applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, S. 1241–1255.
- 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.
- Nowicki, C.; Gosselin, L. (2012): An Overview of Opportunities for Waste Heat Recovery and Thermal Integration in the Primary Aluminum Industry. *JOM*, 64 (8), S. 990-996.
- Pehnt, M. (2010): Industrielle Abwärme. In: Pehnt, M. (Hrsg.): Energieeffizienz. Ein Lehr- und Handbuch. Berlin: Springer, S. 291–307.
- 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).
- Rohde, C. (2012): Erstellung von Anwendungsbilanzen für das Jahr 2011 für das verarbeitende Gewerbe. Studie für die Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB). Karlsruhe: Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung.

- Rohdin, P.; Thollander, P. (2006): Barriers to and driving forces for energy efficiency in the non-energy intensive manufacturing industry in Sweden. *Energy*, 31, S. 1836–1844.
- Sächsische Energieagentur GmbH (SAENA) (2012): Technologien der Abwärmenutzung. Dresden.
- Saneipoor, P.; Naterer, G. F.; Dincer, I. (2011): Heat recovery from a cement plant with a Marnoch Heat Engine. *Applied Thermal Engineering*, 31, S. 1734–1743.
- 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.
- Schröter, M.; Weißfloch, U.; Buschak, D. (2009): Energieeffizienz in der Produktion – Wunsch oder Wirklichkeit?. Energieeinsparpotenziale und Verbreitungsgrad energieeffizienter Techniken. Modernisierung der Produktion. Karlsruhe: Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung.
- Seck, G. S.; Guerassimoff, G.; Maïzi, N. (2013): Heat recovery with heat pumps in non-energy intensive industry: A detailed bottom-up model analysis in the French food & drink industry. *Applied Energy*, 111, S. 489–504.
- Selvaraj, J.; Ramachandran, K. (2012): Energy conservation in aluminium foundries by waste heat recovery from solidifying molten metal. *International Journal of Energy Technology and Policy*, 8 (1), S. 32–49.
- Sivill, L.; Ahtila, P. (2009): Energy efficiency improvement of dryer section heat recovery systems in paper machines – A case study. *Applied Thermal Engineering*, 29, S. 3663–3668.
- Sögüt, Z.; Oktay, Z.; Karakoç, H. (2010): Mathematical modeling of heat recovery from a rotary kiln. *Applied Thermal Engineering*, 30, S. 817–825.
- Sollesnes, G.; Helgerud, H.-E. (2009): Utnyttelse av spillvarme fra norsk industri - en potensialstudie. Trondheim: ENOVA.
- Sorrell, S. M. A.; Nye, S. (2011): Barriers to industrial energy efficiency: A literature review. Working Paper 10/2011. Development Policy, Statistics and Research Branch. Wien: United Nations Industrial Development Organization (UNIDO).
- Stephan, W.; Zitzmann, K.; Pröbstle, G.; Kapischke, J. (2005): Effiziente Energieverwendung in der Industrie – Teilprojekt "Metallschmelzbetriebe". Effiziente Energienutzung in Nicht-Eisen-Metall-Schmelzbetrieben. Augsburg: Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (LfU).
- U.S. Department of Energy (U.S. DOE) (Hrsg.) (2008): Waste Heat Recovery: Technology and Opportunities in the U.S. Industry. o. O.
- Utlu, Z.; Parali, U. (2013): Investigation of the potential of thermophotovoltaic heat recovery for the Turkish industrial sector. *Energy Conversion and Management*, 74, S. 308–322.
- VDI (2003): VDI 4661. Energiekenngrößen. Definitionen – Begriffe – Methodik. Berlin: Beuth.

- Walsh, C.; Thornley, P. (2012): The environmental impact and economic feasibility of introducing an Organic Rankine Cycle to recover low grade heat during the production of metallurgical coke. *Journal of Cleaner Production*, 34, S. 29–37.
- Wietschel, M.; Arens, M.; Dötsch, C.; Herkel, S.; Krewitt, W.; Markewitz, P.; Möst, D.; Scheufen, M. (2010): Energietechnologien 2050 – Schwerpunkte für Forschung und Entwicklung. Technologienbericht. ISI-Schriftenreihe "Innovationspotenziale". Stuttgart: Fraunhofer.
- Wolf, S.; Lambauer, J.; Blesl, M.; Fahl, U.; Voß, A. (2012): Industrial heat pumps in Germany: Potentials, technological development and market barriers. *Proceedings of the ECEEE 2012 Summer Study on Energy Efficiency in Industry*, Arnhem, Niederlande, S. 543–550.
- Zhang, H.; Dong, L.; Li, H.-q.; Chen, B.; Tang, Q.; Fujita, T. (2013a): Investigation of the residual heat recovery and carbon emission mitigation potential in a Chinese steelmaking plant: A hybrid material/energy flow analysis case study. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2, S. 67–80.
- Zhang, H.; Wang, H.; Zhu, X.; Qiu, Y.-J.; Li, K.; Chen, R.; Liao, Q. (2013b): A review of waste heat recovery technologies towards molten slag in steel industry. *Applied Energy*, 112, S. 956–966.
- Zippe, P. (2011): Recent Developments of Batch and Cullet Preheating in Europe - Practical Experiences and Implications. In: Drummond, C. H., III (Hrsg.): 71st Conference on Glass Problems. Ceramic Engineering and Science Proceedings. Volume 32, Issue 1. Hoboken: Wiley, S. 3–18.

Diese Kurzstudie entstand im Rahmen des Begleitforschungsprojekts Effizienzfabrik – Innovationsplattform Ressourceneffizienz in der Produktion, FKZ 02PO2551, welches mit Mitteln des BMBF innerhalb des Rahmenkonzepts „Forschung für die Produktion von morgen“ zum Schwerpunkt „Ressourceneffizienz in der Produktion“ gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut wird.

Herausgeber
Fraunhofer-Institut für
System- und Innovationsforschung ISI
Breslauer Straße 48
76139 Karlsruhe
www.isi.fraunhofer.de

Ansprechpartner:
Simon Hirzel
Telefon: +49 (0) 721 6809-405
E-Mail: simon.hirzel@isi.fraunhofer.de