

Kapitel 9

Industrielle Abwärme

Martin Pehnt

9.1 Was ist Abwärme?

Neben dem Wärmebedarf für Raumwärme und Warmwasser, der im Mittelpunkt der Kap. 6, 7, und 8 gestanden hat, gibt es einen weiteren großen Bereich des Wärmemarktes: die Prozesswärme.

Prozesswärme wird für verschiedene Prozesse eingesetzt, beispielsweise die Bereitstellung von Heißwasser und Dampf, Trocknungs- und Entwässerungsprozesse, die Erwärmung von Einsatzstoffen und Materialien, Destillation und Eindampfen, Pasteurisieren, Waschen und Reinigen. Der Endenergieeinsatz für Prozesswärme beträgt mit 1 984 PJ im Jahr 2007 43% des gesamten Energiebedarfs für Wärme und ist damit ein entscheidender Nachfragesektor (Abb. 9.1).

Über 80% dieses Wärmebedarfs fallen dabei im Sektor Industrie an, 13% im Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und nur 6% im Haushalt (vornehmlich Kochen). In der Industrie wird der überwiegende Teil des Wärmebedarfs für Prozesswärme aufgewendet. Ungefähr ein Drittel des Prozesswärmebedarfs (573 PJ/Jahr) in Deutschland fällt im niedrigen und mittleren Temperaturniveau bis 500°C an.

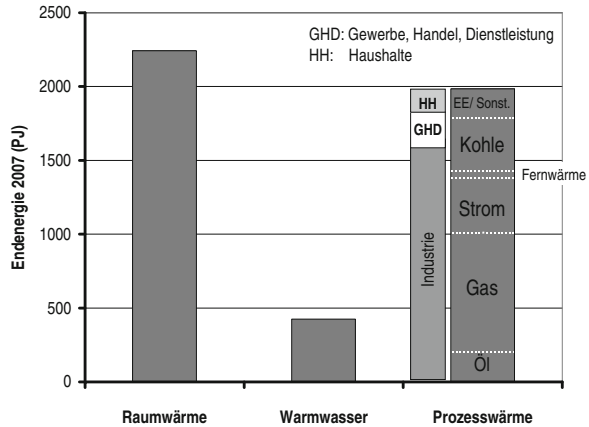
Die wärmeführenden Stoffe – beispielsweise Luft, Wasser oder Materialien – tragen nach den Prozessen einen Teil der Wärme noch „in sich“. Diese Wärme könnte für weitere Prozesse genutzt werden, für die ein niedrigeres Temperaturniveau ausreichend wäre. Diese Wärme, die ansonsten nicht genutzt worden wäre, wird mit „Abwärme“ bezeichnet.

Definitionen zum Abwärmebegriff sind sowohl in zahlreichen Publikationen als auch in deutschsprachigen Rechtsvorschriften zu finden. Im Entwurf einer Wärmenutzungs-Verordnung für Deutschland aus dem Jahr 1991 wird Abwärme bezeichnet als „die eine Anlage verlassende Wärme, ausgenommen die Wärme, deren Erzeugung der Zweckbestimmung der Anlage entspricht“.

M. Pehnt (✉)

Institut für Energie- und Umweltforschung, 69120 Heidelberg, Deutschland
e-mail: martin.pehnt@ifeu.de

Abb. 9.1 Vergleich des Prozesswärmebedarfs mit dem Gesamtwärmebedarf (BMW 2008, Darstellung Pehnt und Frisch 2009)



Abwärme umfasst demnach alle das System verlassenden fühlbaren und latenten Wärmeströme einschließlich der Verluste, aber mit Ausnahme der erzeugten Zielenergie. Sofern sie nicht genutzt wird, geht sie ungenutzt in die Umgebung und ist dann Fortwärme.

Abwärmequellen können Produktionsmaschinen sein, die Verlustwärme an die Umgebung abstrahlen, Öfen, Abwässer aus Kühlungsprozessen, aber auch Kühlanlagen, Motoren oder die in Produktionshallen anfallende Abluft.

Die Abwärmemenge Q wird beschrieben durch

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T, \quad (9.1)$$

wobei m die Masse des wärmetragenden Mediums, c die spezifische Wärmekapazität des Mediums und ΔT die Temperaturdifferenz ist. Hinzu kommen ggf. mögliche Wärmemengen aus Phasenumwandlungen (latente Wärme) beispielsweise bei der Kondensation eines Gases oder dem Erstarren einer Flüssigkeit.

Je höher also der Massenstrom bzw. die nutzbare Temperaturdifferenz, desto größer die Abwärmemenge. Ein weiteres wichtiges Entscheidungskriterium für die Nutzbarkeit von Abwärme ist die *zeitliche Verteilung* über den Tag, die Woche und das Jahr. Je kontinuierlicher ein Abwärmestrom anfällt, desto günstiger ist dies für eine wirtschaftliche Nutzung. Zudem ist zu prüfen, in wie weit *Verschmutzungen* des Wärmemediums die Nutzungsmöglichkeiten einschränken. Auch die *räumliche Entfernung* zwischen Wärmequelle und -senke kann das Potenzial einschränken.

Bei der Abwärmenutzung wird die bei einem Prozess entstehende Abwärme an andere Prozesse weitergeführt (betriebsinterne Eigenverwendung oder Weitergabe an Dritte, z. B. durch Einspeisung in ein Wärmenetz). Davon abzugrenzen ist die *Wärmerückgewinnung*, bei der die Abwärme an den selben Prozess zurückgeführt wird, wie zum Beispiel in Lüftungsanlagen.

Auch die Wärme aus KWK-Anlagen wird nicht zur Abwärme gezählt, weil in diesen Anlagen die Wärme eines der zwei Zielprodukte ist. In der betrieblichen Praxis ergeben sich gleichwohl häufig Möglichkeiten, Abwärme und Wärme aus einem KWK-Prozess zugleich zu nutzen.

Tabelle 9.1 Beispiele für industrielle Abwärmenutzung

Branche	Beschreibung des Prozesses	Beispielhafte Maßnahmen
Lebensmittelindustrie	Abgase eines Produktionsprozesses gelangen in eine thermische Nachverbrennung, in der unverbrannter Kohlenstoff und Luftschadstoffe verbrannt werden.	Einbau von Abgas/Wasser-Wärmetauschern in die Abgasstränge der einzelnen Prozesse.
Waschmittelproduktion	Bei der Herstellung von pulverförmigen Waschmitteln durch Dampftrocknung fällt Abwärme an.	Der Großteil der Kondensationswärme des Trocknungsprozesses wird über einen Wärmetauscher an die Fernwärme abgegeben.
Lebensmittelindustrie	Kältebereitstellung zur Kühlung von Lebensmitteln	Abwärme der Kältemaschinen wird mittels Wärmepumpe auf ein höheres Temperaturniveau gehoben; Wärmeeinspeisung in das Fernwärmenetz.
Textilindustrie/ Wäschereien	Dampf zur Kondensation im Waschprozess	In einem Sammelbecken werden warme Abwässer zusammengeführt, die zur Erwärmung des enthärteten Frischwassers durch einen speziellen Abwasserwärmetauscher genutzt werden.
Automobilindustrie	Abwärme aus diversen Prozessen	Die Abwärme der Kompressoren wird firmenintern für die Motorenvorwärmung genutzt.
Kläranlage	Abführung warmen Abwassers	Bau eines neuen Kanals, in dem ein Abwasserwärmetauscher integriert wird.
Gießerei	Abwärme aus Hauptschmelz- und Prozessöfen	Einbau eines Abgas/Wasser-Wärmetauschers in den Hauptkanal und Einspeisung in ein Nahwärmenetz.
Lackiererei	Mit der thermischen Nachverbrennung werden	Das Abgas der thermischen Nachverbrennung wird per

Tabelle 9.1 (Fortsetzung)

Branche	Beschreibung des Prozesses	Beispielhafte Maßnahmen
	Lösemitteldämpfe, die aus der Lackieranlage bzw. Trocknungsräumen abgesaugt werden, verbrannt.	Abgas/Wasser-Wärmetauscher abgekühlt. Abwärme wird direkt über die am Rande des Werkgeländes gelegene Fernwärmeheizzentrale in das Fernwärmenetz eingespeist.
Zementindustrie	Abwärme aus der Klinkerkühlanlage	Stromerzeugung mit ORC-Prozess
Metallverarbeitende Industrie	Abgaswärme im Schmelzofen	Stromerzeugung mit ORC-Prozess
Verpackungsindustrie	Abwärme aus diversen Prozessen	Abwärme wird mit Prozessdampf vorgeheizt und ins Fernwärmenetz eingespeist.
Stahlindustrie	Abwärme aus Öfen	Abwärme wird ins Nahwärmenetz eingespeist.
Lebensmittelindustrie	Abwärme aus Kühlprozessen	Gasmotor-Wärmepumpe heizt Kühlturmwasser vor; Abwärme wird ins Nahwärmenetz eingespeist.
Chemieindustrie	Abwärme aus Schwefelsäureanlage	Abwärme wird ins Nahwärmenetz eingespeist.

In der Diskussion um Abwärmenutzungspotenziale ist zu berücksichtigen, dass zunächst eine Optimierung der Prozesse erfolgen sollte, indem

- der Nutzenergiebedarf auf das notwendige Maß reduziert wird, beispielsweise durch bedarfsgerechte Regelung der Prozesse oder Umstieg auf modernere Produktionsverfahren;
- der verbleibende Nutzenergiebedarf mit einer Wärmebereitstellungsanlage möglichst effizient gedeckt wird. Dazu sollte der Kessel einen hohen Nutzungsgrad haben und die Anlage gut isoliert sein.
- Erst dann geht es darum, die Abwärme, die nicht anlagenintern genutzt werden kann, betriebsintern zu nutzen oder, wenn dies nicht geht,
- die Wärme auszukoppeln und außerhalb des Betriebes zu nutzen.

9.2 Wärmeauskopplung mit Wärmetauschern

Mittels Wärmetauschern kann Wärme von einem Medium auf ein anderes übertragen werden. Wärmetauscher sind zentral für die Auskopplung der Abwärme aus den wärmeleitenden Stoffströmen.

Das Verfahren der Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung lässt sich bei Gasen, Flüssigkeiten oder festen Stoffen einsetzen. Die Systeme lassen sich nach ihrem Wärmeübertrager oder Wärmetauscher einteilen in rekuperative und regenerative Wärmetauscher:

9.2.1 Rekuperative Wärmetauscher

In rekuperativen Wärmetauschern fließen das wärmetragende Medium und das zu erwärmende Medium in getrennten Räumen. Der Wärmeübertrag geschieht über feste Trennwände. Die Wärmeaustauscher unterscheiden sich hinsichtlich der Führung der Stoffströme (Abb. 9.2). Bei Gegenstromwärmetauschern verlaufen die beiden Stoffströme in entgegengesetzter Fließrichtung. Dadurch ergeben sich hohe Wirkungsgrade. Bei Gleichstromwärmetauschern fließen die beiden Stoffströme parallel, wobei sich die Temperaturen immer weiter annähern. Kreuzstromwärmetauscher sind eine Mischung aus diesen Konzepten: die Ströme fließen im rechten Winkel zueinander.

Der übertragene Wärmestrom ist proportional zur Wärmeaustauscherfläche A und zur mittleren Temperaturdifferenz ΔT_m :

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T_m \quad (9.2)$$

Dabei ist U der Wärmedurchgangskoeffizient (siehe Abschn. 6.4.1) des Tauschermaterials. Dieser Wert hängt stark davon ab, ob es sich um einen Gas-Gas-, Flüssigkeit-Gas- oder Flüssigkeit-Flüssigkeit-Wärmetauscher handelt. Für erstere sind Werte zwischen 5 und 35 W/m²K, für zweitere 15 bis 70 und für letztere 150 bis 1 200 W/m²K erreichbar (Petzold 1996). ΔT_m wird dabei in Analogie zu Gl. (4.19) als logarithmisches Mittel aus großer Temperaturdifferenz ΔT_g und kleiner Temperaturdifferenz ΔT_k zwischen den Medienströmen berechnet – diese Größen erläutert Abb. 9.2:

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_g - \Delta T_k}{\ln \frac{\Delta T_g}{\Delta T_k}} \quad (9.3)$$

Ein Maß für die Qualität eines Wärmeaustauschers ist der Temperaturänderungsgrad Φ , der als Quotient aus Temperaturänderung eines Mediums und anfänglichem Temperaturunterschied definiert ist. Letztendlich beschreibt er also den Prozentsatz

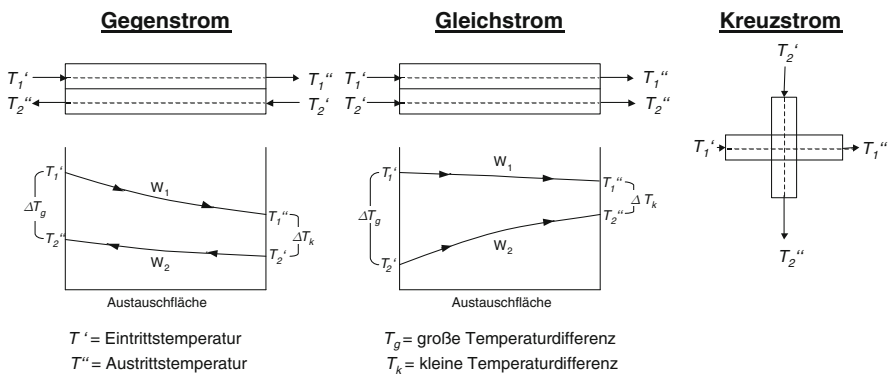


Abb. 9.2 Gegen-, Gleichstrom- und Kreuzstromwärmetauscher und deren Temperaturverlauf (Petzold 1996)

an Temperaturerhöhung, der durch eine gegebene Temperaturdifferenz erreicht werden kann. In der Lüftungstechnik bezeichnet man diesen Wert als Rückwärmezahl (siehe [Kap. 7](#)).

Verschiedene Bauformen für Wärmeaustauscher werden eingesetzt:

- Plattenwärmetauscher bestehen aus „Sandwichs“ von dünnen, wärmeleitenden Platten beispielsweise aus Aluminium, die abwechselnd vom warmen und vom kalten Medium durchflossen werden.
- Wärmerohre übertragen Wärme durch Verdampfen einer Flüssigkeit im wärmeren Teil eines Rohrs. Der Dampf steigt im Inneren des Rohres auf, kondensiert im oberen Teil, gibt dabei die Kondensationswärme wieder ab und fließt durch die Schwerkraft wieder zurück. Bei Wärmerohren wird also die Energie des Phasenwechsels flüssig/gasförmig zum Wärmeaustausch genutzt.
- Ein Sonderfall eines Systems aus Rekuperatoren sind Kreislaufverbundsysteme, in denen der Wärmetransport zwischen warmen und zu erwärmendem Medium über eine Wärmeträgerflüssigkeit (beispielsweise Wasser oder Wasser-Glykol-Gemische) erfolgt. Dadurch ist ein Wärmeaustausch auch über eine größere räumliche Entfernung zwischen Quelle und Senke möglich.

Bei Wärmetauschern sind viele Formen von Medienkombinationen realisierbar. Dazu zählen Luft/Luft- (Abgas/Luft-) Wärmetauscher, Luft/Wasser- (Abgas/Wasser) und Wasser/Wasser- (Wasser/Sonstige Flüssigkeit) Wärmeübertrager.

9.2.2 Regenerative Wärmetauscher

Regenerative Wärmetauscher, beispielsweise Rotationswärmetauscher, erlauben neben dem Austausch von Wärme auch geringfügige Vermischungen der Ströme sowie Feuchtigkeitsaustausch. Der Wärmeaustausch geschieht mit Speichermedien, die entweder feststehend sind und periodisch be- und entladen werden, oder die periodisch zwischen den Medien bewegt werden.

Die am häufigsten verwendete Technologie sind Rotationswärmetauscher, bei denen ein Wärmetauscherrad mit langsamer Drehzahl rotiert, während es von zwei Medien durchströmt wird. Der warme Stoffstrom gibt seine Energie an das Rad ab. Durch die Drehung gelangt die erwärmte Oberfläche des Rades in den anderen Stoffstrom, wo sie wieder abgegeben wird. Zusätzlich kann auch die Feuchte des warmen Stoffstroms übertragen werden. Diese Wärmetauscher werden häufig in raumluftechnischen Geräten eingesetzt.

9.2.3 Wärmespeicher

Eine zeitliche Verschiebung von Wärmeangebot und Wärmebedarf kann es notwendig machen, Wärmespeichersysteme einzusetzen. Für die Wärmespeicherung sind vor allem zwei Speicherprinzipien relevant:

- Speicherung als fühlbare bzw. sensible Wärme. Bei dieser Speicherform wird ein Medium verwendet, das als Folge der Einspeicherung seine Temperatur verändert, beispielsweise Warmwasserspeicher. Dies ist das am häufigsten verwendete Prinzip für die Wärmeversorgung von Gebäuden.
- Speicherung als latente Wärme: Durch die Wärmezufuhr wechselt das Speichermedium seinen Aggregatzustand, meist von fest zu flüssig, ohne dass sich die Temperatur dabei ändert. Gängige Materialien sind Salze oder Salzhydrate, die bei Temperaturen zwischen 50 und 80°C schmelzen, aber auch überhitzt werden können. Beim Erstarren der Schmelze wird die Latentwärme wieder abgegeben. Gängige Speicherdichten liegen bei rund 100 kWh_{th} pro Tonne (Ohl et al. 2009).

Größere Wärmemengen können in Heißwasser-, Kies-Wasser- oder Erdsonden-Wärmespeichern gelagert werden.

Speicher können auch dazu dienen, dass dem Energiewandler ein vergleichmäßiger, konstanter Wärmestrom mit konstanten Temperaturen geliefert und dadurch ein An- und Abfahren verhindert wird.

Wärmespeicher können auch als mobile Container konfiguriert werden. Dann eignen sie sich für den Wärmetransport per LKW oder Bahn zu möglichen Wärmesenken. In diesen Wärmecontainern sind Latentwärmespeicher beispielsweise mit Wärmeölen oder Speichersalzen enthalten (s. u.), die bis zu 3 MWh pro Container speichern und in rund 3 Stunden entladen werden können (BLU 2009).

Infobox 9.1 Wärmecontainer

Wie industrielle Abwärme sinnvoll und effizient genutzt werden kann, wird am Beispiel des Industrieparks Höchst bei Frankfurt deutlich. Dort wird mittels eines mobilen Latentwärmespeichers die Abwärme, die im Industriepark anfällt, gespeichert, in das 15 Kilometer entfernte Sulzbach transportiert und dort dem Nahwärmenetz eines Verwaltungskomplexes zugeführt. Der 2001 erstmals in Betrieb genommene Latentwärmespeicher speichert die Wärme mit Hilfe von Natriumacetat-Trihydrat, das im Vergleich zu Wasserspeichern deutlich weniger Speicherverluste aufweist. Dieses Speichermaterial wird auch bei den handelsüblichen Wärmekissen eingesetzt. Es beginnt, bei 58°C zu schmelzen.

Der Speicher verfügt über eine Kapazität von 3,5 MWh_{th} (bei einer Ladeleistung von 1 MW und einer Entladeleistung von ca. 0,5 MW). Durch logistische Abstimmung kann der Wärmebedarf des Gebäudekomplexes vollständig durch die Abwärme des Industrieparks genutzt werden. Neben den im Vergleich zur konventionellen Wärmebedarfsdeckung niedrigeren Wärmekosten bietet der Latentwärmespeicher zusätzlich erhebliche Umweltvorteile. Zu einer Brennstoffeinsparung von 3 900 MWh (Heizöl) jährlich kommt eine Stromeinsparung von 5 400 MWh_{el} (4 500 MWh_{el} Strom für Rückkühlung, 900 MWh_{el} Strom für Klimaanlage) hinzu, was einer gesamten CO₂-Einsparung von 5 000 Tonnen jährlich entspricht. Quelle: <http://www.energie-industrie.de/html/wrg/transheat.htm>

9.3 Technologien der Abwärmenutzung

Eine Abwärmenutzung kann erfolgen, indem ein Wärmetauscher in den Abluft- oder Abwasserstrom geschaltet wird. In diesem Wärmetauscher wird die Wärme an das Heizwasser übertragen und mit einer Umwälzpumpe zu den Verbrauchern transportiert (Abb. 9.3 oben). Ein zusätzlicher parallel oder in Reihe geschalteter Heizkessel kann eine weitere Erwärmung des Heizwassers vornehmen.

Eine solche Abwärmenutzung heißt *passiv*, weil sie im Wesentlichen ohne zusätzliche externe Energiezufuhr erfolgt – abgesehen vom Hilfsstrombedarf des Verdichters oder der Pumpe.

Nicht nur die Abwärme von Abluft, sondern auch das Abwasser beispielsweise aus Kläranlagen oder Industrieprozessen oder der Abgasstrom aus Wärmeerzeugern und Kesseln kann genutzt werden. Im letzteren Fall ist durch Filter oder Abscheider im Abgasweg sicherzustellen, dass die Wärmetauscher nicht durch Verunreinigung schnell an Wärmeaustauschfähigkeit verlieren. Auch ist zu berücksichtigen, dass eine Abkühlung unter eine Mindesttemperatur zu einer Kondensation des im Abgas enthaltenen Wasserdampfes führen kann.

Energetisch stehen der zusätzlichen Wärmenutzung erhöhte Energieaufwendungen für die Ventilatoren bzw. Pumpen entgegen, da der zusätzliche Druckverlust in den Leitungen ausgeglichen und die Transportdistanz zum Wärmekunden überwunden werden müssen.

Neben diesen passiven Wärmenutzungen gibt es weitere Nutzungsstrategien: Aus der Abwärme kann Strom erzeugt werden (Abb. 9.3 Fall 3), oder es kann zusätzliche hochwertige Energie (beispielsweise Strom oder Gas) zugeführt werden, um mittels einer Wärmepumpe die Temperatur auf ein nutzbares Niveau zu heben (Abb. 9.3 Fall 4). Darüber hinaus gibt es als weitere Möglichkeiten der Abwärmenutzung die Kälteerzeugung.

9.3.1 Wärmenetze

Um die Abwärme außerhalb des Betriebes nutzen zu können, muss sie zu den Wärmekunden transportiert werden. Dies geschieht mittels gedämmter Rohrleitungen, die je nach zu überbrückender Distanz mit höheren Temperaturen und Drücken (Fernwärmeleitungen; Vorlauftemperaturen bis zu 130°C) oder niedrigeren Temperaturen und Drücken operieren (Nahwärmenetze; Vorlauftemperatur bis zu 90°C). Durch die Vielzahl der angeschlossenen Wärmekunden ergibt sich in solchen Wärmenetzen eine gleichmäßigere tägliche, aber auch saisonale Wärmenachfrage.

9.3.2 Stromerzeugung aus Abwärme

Unter bestimmten Voraussetzungen ist es möglich, die Energie von Hochtemperaturabwärme in Elektrizität umzuwandeln. Hier finden in der Regel ORC- (Organic

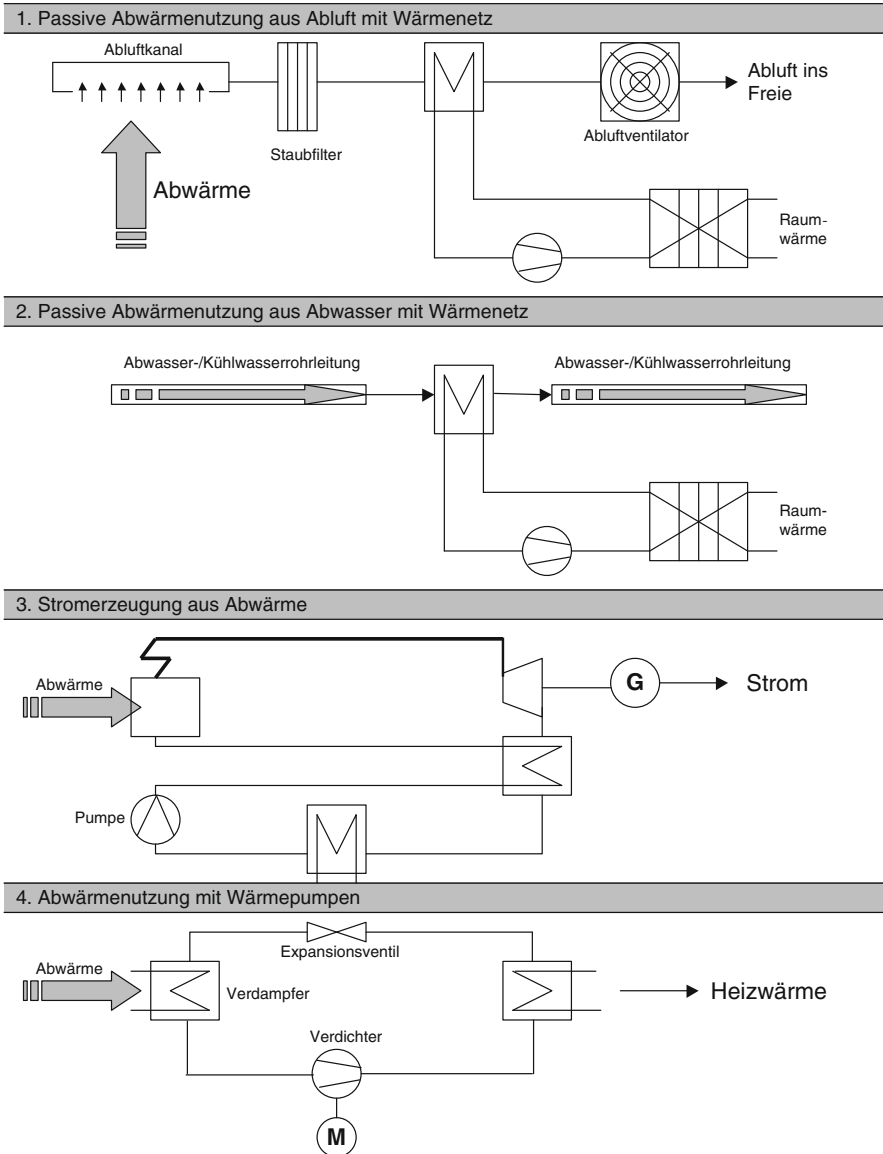


Abb. 9.3 Pfade der Abwärmenutzung (eigene Darstellung)

Rankine Cycle) Systeme Anwendung. In diesen thermodynamischen Kreisprozessen werden anstelle von Wasserdampf ein organisches Medium wie beispielsweise Butan, Pentan etc. oder Silikonöle eingesetzt, das eine wesentlich niedrigere Verdampfungstemperatur hat. ORC-Turbinen werden auch in Geothermie- und Biomasse-Kraftwerken eingesetzt (siehe [Abschn. 4.5](#)).

Infobox 9.2 Abwärmenutzung aus einer Druckerei in einem Wohngebiet

Die Firma Körner Rotationsdruck in Sindelfingen verwendet vier moderne Offset-Rotationsdruckmaschinen. Hierbei ist die Trocknung von Papierbahnen im Anschluss an den Druckprozess notwendig. Sie erfolgt mittels erdgasbefuerter Trockner, die eine integrierte Nachverbrennung der kohlenwasserstoffhaltigen Abluft beinhalten. Das daraus entstehende Reingas, das eine Temperatur von 400°C aufweist, wurde bislang ungenutzt an die Umgebung abgegeben. Nun wird die Abwärme mittels Wärmetauschern auf dem Dach der Produktionshalle zur Aufheizung von Wasser verwendet. Über eine Sammelleitung wird das aufgeheizte Wasser an eine zentrale Übergabestation transportiert.

Dort wird die Wärme über zwei weitere Wärmetauscher in das Fernwärmenetz der Stadtwerke eingeleitet. Die insgesamt auskoppelbare Wärmeleistung beträgt 2 500 kW. Die Kosten des Projektes lagen bei rund 1,5 Millionen Euro. Die Wärme, die in das Fernwärmenetz eingespeist wird, wurde bislang in Kesselanlagen und Blockheizkraftwerken erzeugt. Die Abwärmenutzung in Höhe von 6 000 Megawattstunden jährlich reduziert die CO₂-Emissionen von 980 Tonnen jährlich auf 154 Tonnen – das entspricht einer Reduktion der CO₂-Emissionen um 84%.

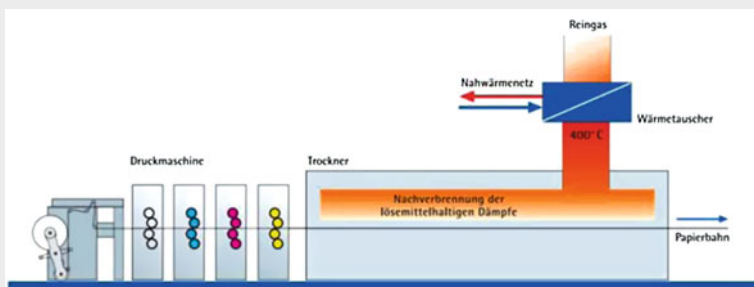


Abb. 9.4 Abwärmenutzung in der Druckerei (Bild: Stadtwerke Sindelfingen)



Abb. 9.5 Wärmetauscher und -leitungen auf dem Dach der Druckerei (Bild: Stadtwerke Sindelfingen)

In einem solchen ORC-Kraftwerk (Abb. 9.3 Fall 3) wird durch den zugeführten Abwärmestrom das Medium verdampft. Wie in einem konventionellen Dampfkraftwerk (siehe Abschn. 3.3) wird der Dampf bis auf Kondensationsdruck entspannt und vollständig verflüssigt. Mit der Arbeit, die dabei abgegeben wird, wird eine Turbine angetrieben. Eine Pumpe bringt das Kondensat anschließend wieder auf Verdampfungsdruck.

Eine Variante des ORC-Prozesses ist der Kalina-Prozess, in dem als Arbeitsmedium ein Ammoniak-Wasser-Gemisch verwendet wird. Vorteilhaft ist der durch unterschiedliche Mischungsverhältnisse variable Siedepunkt, mit dem Schwankungen in der Temperatur des Wärmestroms einfacher ausgeglichen werden können. Zudem weisen Kalina-Prozesse gegenüber ORC-Anlagen höhere Wirkungsgrade im Temperaturbereich um 100°C auf.

Kalina-Anlagen sind jedoch anlagentechnisch komplexer und damit kapitalintensiver. Typische Leistung liegen daher ab 1 MW, wobei es auch einige wenige Anlagen mit 500 kW gibt. Weltweit gibt es etwa 200 kommerzielle ORC-Anlagen, die in Betrieb sind; von Kalina-Anlagen wurden bisher weniger als 10 Stück gebaut, von denen nur einige aktuell in Betrieb sind.

Auf Grund des niedrigeren Temperaturniveaus, bei denen ORC-Anlagen in Abwärmenutzungen betrieben werden, ist – den thermodynamischen Gesetzmäßigkeiten (Carnot-Wirkungsgrad) folgend – der Wirkungsgrad niedriger als in konventionellen Kraftwerksanwendungen (Abb. 9.6).

ORC-Anlagen gibt es ab einer elektrischen Leistung von 300 kW_{el} (Arens 2009). In der Praxis wurden sie verschiedentlich mit Abwärmenutzung kombiniert, beispielsweise in einem Klinkerkühler der Firma Heidelberger Cement mit einer elektrischen Leistung von 1,1 MW (seit 1999 in Betrieb) oder der Gerresheimer Essen GmbH mit einer Abwärmenutzung aus zwei Schmelzöfen mit 500 kW (Steinmann 2007).

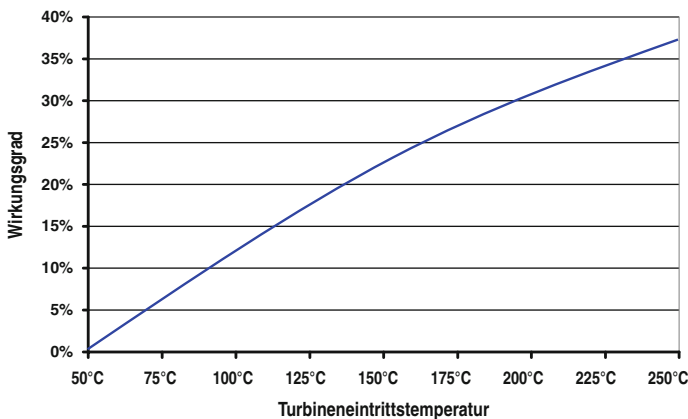


Abb. 9.6 Elektrischer Wirkungsgrad einer ORC-Anlage als Funktion der Temperatur (Brandstätter 2008)

Die Abwärme der ORC-Turbine kann auch zur weiteren Wärmenutzung herangezogen werden, so dass sich eine Nutzungskaskade ergibt. In weiterer Zukunft wird es auch möglich sein, mit anderen Verfahren aus Wärme Strom zu erzeugen, beispielsweise mit Stirlingmotoren oder mittels der Thermoelektrik, die auf dem Seebeck-Effekt beruht und bei geringen Wärmestromdichten geeignet sind.

Infobox 9.3 Stromerzeugung in einem Zementwerk

Im Zementwerk Lengfurt werden rund 3 150 Tonnen Klinker pro Tag in einem Drehofen bei Flammentemperaturen von rund 2 000°C gebrannt. Dabei entstehen heiße Ofenabgase (350°C, Wärmestrom etwa 8 MW) und Abwärme des Klinkerkühlers (275°C, ca. 60 MW). Ein Teil der Abwärme des Klinkerkühlers wird dem Ofen wieder zugeführt. Bis zur Installation der ORC-Anlage wurde der Rest, ca. 30%, ungenutzt an die Atmosphäre abgegeben.

Durch die Installation der ORC-Anlage wird nun eine elektrische Leistung von 1,1 MW bereitgestellt – damit reduziert sich der Strombedarf des Klinkerbrenn-Prozesses um rund ein Viertel. Vorher muss die Klinkerkühlluft entstaubt werden. Theoretisch könnte man auch die Ofenabgase noch verstromen. Allerdings ist die Staubbelastung des Abgases hoch; entsprechende staub-unempfindliche Wärmetauscher sind kostenintensiv.

9.3.3 Wärmepumpen

Wärmepumpen bieten die Möglichkeit, Abwärme niedrigen Temperaturniveaus durch Zufuhr höherwertiger Energie (beispielsweise elektrischer Strom oder Gas) auf nutzbare Temperaturniveaus zu bringen (siehe [Abschn. 7.2.3](#)).

Der Wärmepumpen-Prozess ist vierstufig (Abb. 9.3 unten): zunächst verdampft die zugeführte Abwärme ein im Kreislauf geführtes Kältemittel. In einem Verdichter wird es dann auf hohen Druck gebracht. Dieser Verdichter kann von einem Elektromotor angetrieben werden, aber auch von einem Gasmotor. Dessen Abwärme kann im Prozess genutzt werden.

Im Kondensator kondensiert das Kältemittel und gibt die Wärme auf höherem Temperaturniveau wieder ab. In einem Expansionsventil wird dann das Kondensat entspannt. Die Temperatur fällt unter das Temperaturniveau der zugeführten Abwärme.

Da das Temperaturniveau von Abwärme bereits deutlich höher ist als das von üblichen Wärmequellen von Wärmepumpen (Umgebungsluft, Grundwasser oder Erdwärme), ist die erforderliche Energie zum „Pumpen“ auf ein höheres Temperaturniveau deutlich niedriger (Abb. 9.7). Möglich sind Coefficients of Performance (COP) (Quotient aus abgegebener Heizwärmeleistung und zugeführter elektrischer oder Brennstoff-Energie, siehe Gl. 7.2) von über 4 bei 30°C und über 5 bei 45°C (Brandstätter 2008).

Der Markt für kleine Wärmepumpen für den Einsatz als Heizung hat sich in den letzten Jahren dynamisch entwickelt; aber auch im großen Leistungssegment stehen Wärmepumpen mit einer Heizleistung bis zu 34 MW zur Verfügung (Lambauer und

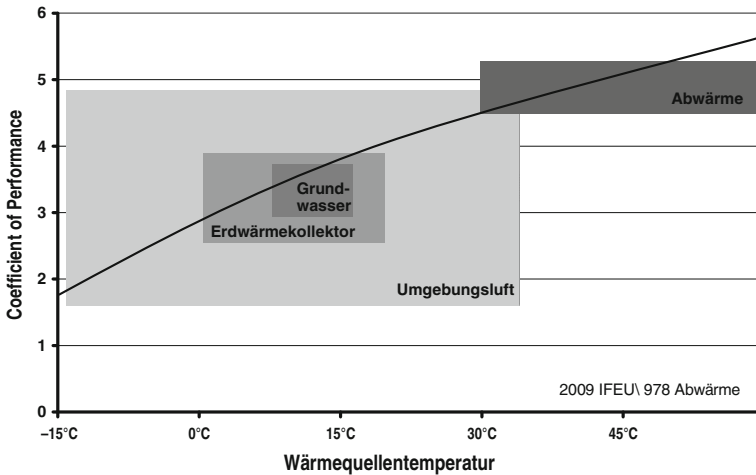


Abb. 9.7 Coefficient of Performance von Wärmepumpen als Funktion der Quelltemperatur (Brandstätter 2008)

Blesl 2008), die Heiztemperaturen von derzeit bis zu 75°C, zukünftig bis zu 90°C bereitstellen können.

Anstelle einer Wärmepumpe können auch Kälteanlagen mit Abwärme betrieben werden, beispielsweise in Absorptionskältemaschinen.

9.4 Potenziale und Hemmnisse der Abwärmenutzung

Das gesamte Potenzial der Abwärmenutzung ist schwer zu bestimmen, da es keine Studie gibt, die systematisch die einzelnen Branchen, Temperaturniveaus und Einsatzzwecke untersucht hat. Verschiedene internationale Studien etwa aus Norwegen, den USA oder Österreich zeigen allerdings auf, dass in bestimmten Branchen ein sehr hohes Potenzial zu heben wäre. Beispielsweise liegt der Anteil der Abwärme mit einem Temperaturniveau über 140°C, der in einer norwegischen Studie erhoben wurde, für die Zement-Industrie bei 40% (Arens 2010), für Eisenlegierungen 30%. Das Abwärmepotenzial der chemischen Industrie wird in dieser wie auch in einer amerikanischen Studie auf 8% geschätzt.

Erschwert wird die Nutzung dieser Potenziale durch zahlreiche Hemmnisse. Einige der Hemmnisse gelten generell für viele Effizienzmaßnahmen, insbesondere finanzielle und informatorische Hemmnisse. Andere, vor allem technologische Hemmnisse sind spezifisch für industrielle Abwärme (Tabelle 9.2).

9.4.1 Technologische Hemmnisse

Wird die Abwärme betriebsintern genutzt, muss zunächst überhaupt ein zusätzlicher Wärmebedarf nahe des Ortes der Abwärme-Entstehung vorhanden sein. Ist dies

Tabelle 9.2 Hemmnisse der Abwärmenutzung (IFEU/ISI 2010)

Hemmnis	Lösungsmöglichkeit	Spezifisch für Abwärme?
<i>Technologische Hemmnisse</i>		
Keine Wärmesenke in der Nähe bei betriebsinterner Nutzung bei Wärmeabgabe an Dritte	Bau von Wärmeleitungen, Wärmetransport	Ja
Keine Information über Wärmesenke in der Nähe	Abwärmebörse (Informationsportal) Suche nach Nachbarunternehmen, z. B. in Industriegebieten	Ja
Zeitliche Diskrepanz Wärmeanfall/-bedarf	Andere Art von Wärmenutzung (z. B. Stromerzeugung oder Netzeinspeisung), Speicherung	Ja
Temperaturniveau zu niedrig	Einsatz von Wärmepumpen	Ja
zu hoch	Zumischen von Dampf o. ä., Kaskadennutzung	Ja
Betriebsablauf wird gestört		Ja
Produktionssicherheit während der Umrüstphase andauernd		Ja Ja
Ausfallsicherheit in Heizzentrale	Redundante Heizkessel	Nein
<i>Finanzielle und administrative Hemmnisse</i>		
Verfügbarkeit von Investitionsmitteln	Förderprogramme, Kredite	Nein
Priorität bei Kerngeschäft	Einsatz von Dienstleistern, Abwärme-Contracting	Nein
Zu hohe Amortisationserwartungen	Information über Lebenszykluskosten	Nein
Unsicherheit bezügl. wirtschaftlicher Zukunft für das investierende Unternehmen für potenzielle Wärmekunden		Nein Ja
Administrativer Aufwand für Genehmigung, Durchführung und Abrechnung		Nein
<i>Information</i>		
Mangel an betrieblichem Wissen und Personalkapazität	Spezielle Informationskampagnen und technikspezifische Fortbildungsangebote für ausgewählte Zielgruppen	Nein
Zu hohe Suchkosten	Entwicklung Investitionsberechnungshilfen für beratende Ingenieure und Energiemanager in den Betrieben	Nein

nicht der Fall, so bleibt lediglich die Möglichkeit der Abwärmeabgabe an externe Dritte. Ist eine Wärmesenke vorhanden, so muss der Anfall von Abwärme an der Quelle und der Wärmebedarf am Ort des Zielprozesses gleichzeitig anfallen. Eine *zeitliche Abweichung* lässt folglich nur die Option einer zeitweiligen Speicherung der Abwärme zu.

Auch das *Temperaturniveau* muss zu der erforderlichen Anwendung passen. Ggf. kann es durch Zumischen von Dampf, Nacherhitzung oder Wärmepumpen angepasst werden, wobei dies zusätzlichen technologischen Aufwand erfordert, oder die Abwärme wird lediglich zur Vorwärmung eingesetzt.

Darüber hinaus existieren Hemmnisse bei der Weitergabe der Abwärme an Dritte außerhalb des Unternehmens. Zum einen können *Transportwege* zum Ort der Wärmesenke zu lang sein. Zum anderen wirkt sich hemmend aus, wenn eine geeignete Leitungsstrasse nicht oder nur mit erheblichem Aufwand realisiert werden kann. Auch muss hier der Wärmebedarf mit der Abgabe der Abwärme zeitlich kongruent sein.

Zudem können in Unternehmen Bedenken bezüglich des Betriebsablaufs und der Produktionssicherheit während der technischen Installations-/Umrüstungsphase bestehen, die hemmend auf die Umsetzung von Maßnahmen zur Abwärmepotenzialerschließung wirken können.

9.4.2 *Finanzielle Restriktionen*

Um Abwärmepotenziale heben zu können, sind Mehrinvestitionen in neue Technologien erforderlich. Häufig sind es jedoch *finanzielle Restriktionen* der Unternehmen, die dazu führen, dass Maßnahmen zur Realisierung von Abwärmepotenzialen nicht durchgeführt werden können; entweder weil keine ausreichenden Eigenkapitalmittel zur Verfügung stehen oder weil die Finanzierung durch Kredite nicht in Anspruch genommen wird oder Kredite nicht verfügbar sind. Hiervon dürften insbesondere kleinere, bis zu einem gewissen Grad auch mittelständische Unternehmen betroffen sein.

In der Industrie spielen darüber hinaus eher investive Maßnahmen eine Rolle, die das eigentliche *Kerngeschäft* des Unternehmens betreffen und damit im Hauptinteresse der Unternehmen liegen (z. B. Produktionssteigerung zur Erzielung größerer Marktanteile, Verbesserung der Qualität der Produkte). Investitionen in Technologien zur Abwärmenutzung stehen demzufolge stets in Konkurrenz zu anderen Investitionen.

Die Entscheidung über Investitionen ist auch abhängig davon, ob sich eine technologische Umsetzung zur Abwärmenutzung bzw. Abwärmerückgewinnung in einem vom Investor gewünschten Zeitraum *amortisiert* oder nicht. In Unternehmen werden allerdings häufig sehr kurze Kapitalwiedereinbringungszeiten vorgegeben, so dass Kosteneinsparungen durch Abwärmetechnologien, die über die vorgegebene Amortisationszeit hinausgehen, bei Investitionsentscheidungen nicht im ausreichenden Maß Berücksichtigung finden. Somit wird die zu erzielende Rendite einer verbesserten Abwärmenutzung oftmals vernachlässigt.

Bei der Abgabe von Abwärme an Dritte entstehen weitere Hemmnisse. Aus Sicht der Unternehmen stellen die Erwartung an *Investitionssicherheit* und aus Sicht der Abnehmer die Erwartung an Versorgungssicherheit Hemmnisse dar. Einerseits wollen die Unternehmen sicherstellen, dass Abwärme auch abgenommen und abgekauft wird. Die Insolvenz eines Wärmekunden gefährdet die Wirtschaftlichkeit der Infrastruktur. Andererseits möchte natürlich auch der Abnehmer, der von der Wärmelieferung abhängig ist, eine kontinuierliche Versorgung gewährleistet sehen. Zum Beispiel könnten bei verringerter Produktionsleistung des abwärmeliefernden Unternehmens Versorgungsengpässe entstehen.

9.4.3 Informationsdefizite

Defizite im informationellen Bereich stellen eine weitere wichtige Gruppe von Umsetzungshemmnissen dar. Den Unternehmen kann ein Überblick darüber fehlen, welche Möglichkeiten einer Abwärmenutzung innerbetrieblich überhaupt vorhanden sind. Es kann aber auch sein, dass trotz der Kenntnis bezüglich technologischer Möglichkeiten diese schlichtweg noch nicht vollständig analysiert und bewertet wurden. Eine Analyse ist unabdingbar, da im Bereich der Abwärme bestimmte Voraussetzungen gegeben sein müssen. So stellen Kenntnisse über notwendige Temperaturniveaus, das zeitliche Zusammenfallen von Wärmeabgabe und Wärmebedarf, geeignete Speichersysteme oder Möglichkeiten zur Weitergabe an Dritte bei einer Bewertung der Abwärmepotenziale wichtige Parameter dar.

Ferner schätzen viele Betriebe die Such-/Informationskosten für Effizienzpotenziale im Verhältnis zu den ökonomischen Vorteilen der Abwärmetechnologien als zu hoch ein (KfW 2008).

9.4.4 Personelle Hemmnisse

Personelle Hemmnisse ergeben sich vor allem daraus, dass kein spezielles Personal für Effizienztechnologien im Allgemeinen und Abwärmetechnologien im Speziellen in den Unternehmen vorhanden ist. Eine Untersuchung hat gezeigt, dass „Unternehmen mit Energiefachpersonal in der Tendenz ihr Energieeinsparpotenzial höher einschätzen und häufiger Energieeffizienzmaßnahmen umgesetzt haben als die anderen Unternehmen ohne solches Fachpersonal“ (KfW 2008).

9.4.5 Administrative Hemmnisse

Sobald Abnehmer und Lieferant von Abwärme nicht dieselbe Person sind, entstehen oft Hemmnisse, eine optimierte Nutzung der Abwärme technologisch zu realisieren. Die Einrichtung der Infrastruktur (wie beispielsweise Abrechnungszähler, Übergabestellen) sowie die Bearbeitung der Abrechnung und Rechnungsstellung gehören vielfach nicht zu den Kerninteressen der Unternehmen.

Zudem ergeben sich bei der Umrüstung auf Abwärmenutzungstechnologien Hemmnisse, denn die Einhaltung der rechtlichen Vorgaben (v.a. umweltrechtliche, beispielsweise immissionsschutzrechtliche Vorgaben) bedarf eines zusätzlichen bürokratischen, d.h. zeitlich und personellen Aufwands.

Zur Überwindung dieser Hemmnisse sind *politische Unterstützungsmaßnahmen* erforderlich, beispielsweise Förder- und Beratungsprogramme oder ordnungsrechtliche Vorgaben, die Unternehmen zu einer Analyse und eventuellen Nutzung von Abwärmemengen verpflichten.