

Technologien der Abwärmennutzung



ENERGIEEFFIZIENZ
IN UNTERNEHMEN

saena
Sächsische
Energieagentur GmbH

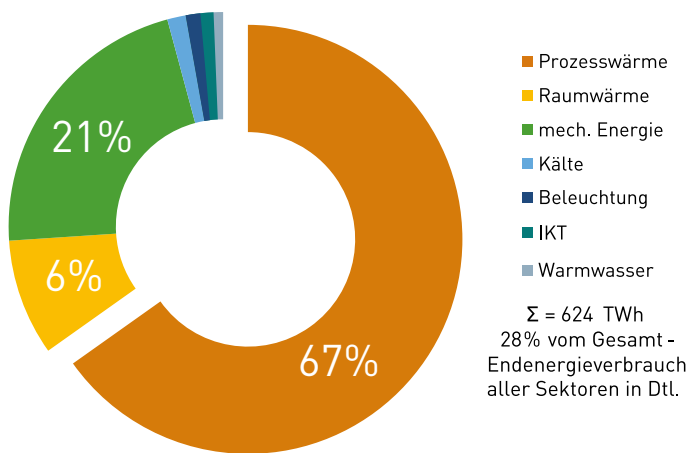


Inhaltsverzeichnis

	Einleitung	4
1	Methodik der Abwärmenutzung	6
2	Direkte Abwärmenutzung	12
2.1	Wärmeübertrager	12
2.2	Wärmespeicher	20
	Sensible Wärmespeicher	22
	Latentwärmespeicher	23
	Sorptive Wärmespeicher	24
2.3	Leitung und Transport von Abwärme	25
	Wärmetransport durch Wärmeleitungen	26
	Mobiler Wärmetransport	27
3	Indirekte Abwärmenutzung	28
3.1	Indirekte Abwärmenutzung	28
3.2	Wärmepumpen und Kältemaschinen	29
	Kompressionswärmepumpen	29
	Hochtemperaturwärmepumpe	32
	Absorptionswärmepumpe und -kältemaschine	34
	Adsorptionswärmepumpe und -kältemaschine	37
3.3	Stromerzeugung	38
	Dampfkraftprozess	39
	ORC-Prozess	40
4	Häufig übersehene Abwärmepotentiale	42
	Abwärme aus dem Produkt	42
	Abwärme zur Produktvorwärmung	44
	Nutzung diffuser Abwärme	45
	Abgaswärme bei Rekuperatorbrennern	46
	Kondensationswärme in Abgasen	47
	Keine eigene Abwärme?	49
5	Pflichten, Finanzierung und Förderung	50
	Investitionsentscheidungen	50
	SAENA-Angebote	52
	Impressum	56

Einleitung

Ein Großteil des Endenergieverbrauchs der deutschen Industrie dient der Bereitstellung von Prozesswärme. Im Jahr 2023 benötigte die Industrie hierfür zwei Drittel der eingesetzten Endenergie und damit mehr als alle anderen Nutzungsformen zusammen. Dem Thema Abwärmenutzung kommt daher in der Unternehmensführung und Energiepolitik ein hoher Stellenwert zu.



Anteil der Prozesswärmeerzeugung am Endenergieverbrauch der Industrie Deutschlands im Jahr 2023. Neben der Industrie haben außerdem die Sektoren Verkehr (31%), Haushalte (28%) sowie Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (14%) Anteil am Endenergieverbrauch.

Abwärmepotenziale zu heben ist nicht ohne die Bewältigung von technischen, organisatorischen und wirtschaftlichen Herausforderungen möglich. Real betrachtet findet man im eigenen Betrieb oft nur einen Bruchteil des vermeintlich großen Potenzials an zurückgewinnbaren Energieverbrauch. Dennoch zeigen die Zahlen den erheblichen Einfluss der benötigten Prozesswärme auf die Energiekosten – daher sind Unternehmer gut beraten, sich frühzeitig dieses Kostenfaktors anzunehmen.

Der Prozesswärmebedarf wird aktuell überwiegend durch fossile Energieträger gedeckt. Mit der Einhaltung von Klimaschutzziele müssen diese durch erneuerbare Energien ersetzt werden. Die Umstellung auf klimaneutrale Energieträger ist jedoch häufig mit erheblichen Investitionen verbunden. Die Energiekosten und indirekten Ausgaben durch ordnungspolitische Klimaschutzmaßnahmen werden weiter steigen – wer frühzeitig damit beginnt, seine Produktion auf andere Energieträger umzustellen, gerät weniger in Zugzwang.



Auf der Suche nach nutzbarer Abwärme; SAENA 2025

Abwärmenutzung ist eine Möglichkeit, um die Energieeffizienz in der Produktion zu erhöhen und damit Kosteneinsparungen zu erreichen. Nach der Umsetzung organisatorischer Maßnahmen zum Verringern des Energiesatzes ist sie oft das erste Mittel der Wahl. Abwärme fällt bei fast allen thermischen Prozessen an, für ihre Gewinnung stehen ausreichend erprobte Technologien zur Verfügung. Sie lässt sich gut speichern und vielseitig nutzen: in der Produktion kann sie zur Vorwärmung von Prozessmedien oder zur Beheizung ganzer Prozesse wieder eingesetzt werden. Fast universell möglich ist die Nutzung zur Beheizung von Räumen, zur Trinkwassererwärmung, zur Kühlung oder Stromerzeugung.

Die Erfahrung zeigt, dass sich viele Maßnahmen schon nach kurzer Zeit amortisieren. Betrachtet man die Investition in Abwärmenutzung wie eine Geldanlage, weisen solche Investitionen meist Renditen im zweistelligen Prozentbereich auf. Fließen die Energiekosteneinsparungen hingegen in die Produktpreisgestaltung ein, können aus der Abwärmenutzung Wettbewerbsvorteile und eine Steigerung des Marktanteils resultieren. In beiden Fällen wird sie sich positiv im Betriebsergebnis widerspiegeln.

Um die Hürden für die als arbeitsaufwendig und kostenintensiv empfundene Disziplin zu nehmen, brachte die Sächsische Energieagentur – SAENA GmbH im Jahr 2012 eine erste Broschüre zur Abwärmenutzung heraus, die mit einer 2. Auflage im Jahr 2016 überarbeitet und mit dieser 3. Auflage um weitere Themen ergänzt wurde.

Eine Broschüre kann keine umfassende Zusammenschau aller infrage kommenden Abwärmenutzungsmaßnahmen in einzelnen Branchen bieten. Stattdessen soll dem Leser ein Überblick über vielseitig einsetzbare Technologien gegeben werden, mit

denen die Abwärme gewonnen, gespeichert oder in andere Energieformen veredelt werden kann.

Eine einführende Methodik (Kap. 1) soll den Einstieg ins Thema vereinfachen und die Anwendung im eigenen Unternehmen anstoßen helfen.

Die Broschüre wird ergänzt durch Online-Angebote der SAENA. Der SAENA-Abwärmeeatlas Sachsen wurde durch die **Abwärmeplattform des BAFA** abgelöst. In dieser können oder müssen Betriebe sich registrieren, um ihre Abwärmepotenziale anderen Unternehmen und Institutionen sichtbar zu machen. Diese können dann bei energiebezogenen Planungen der Unternehmen sowie bei der kommunalen Wärmeplanung berücksichtigt oder nutzbar gemacht werden.



Übergabe Fernwärme in einer Heizzentrale; SAENA 2025

1 Methodik der Abwärmennutzung

Die Nutzung von Abwärme ist eine komplexe Disziplin. Wie andere Effizienzbestrebungen wird sie mitunter als hinderlich im Tagesgeschäft eines Unternehmens angesehen. Befolgt man bei der Potenzialanalyse eine vorgegebene Reihenfolge, kann man viele Hürden senken und Fehlschlüsse bei der Bewertung sowie Planungsfehler vermeiden.

1.1 Wo tritt Abwärme auf?

Abwärme fällt in nahezu allen industriellen Prozessen an. Immer dann, wenn ein Energieträger (z.B. Gas, Öl, Strom, Wasserstoff, Sonneneinstrahlung) zur Gewinnung von Wärme oder mechanischer Arbeit genutzt wird, treten Wärmeverluste auf. Der Ort, an dem diese Wärmeverluste auftreten, z.B. die technische Anlage oder der Prozess, wird als Abwärmequelle bezeichnet. Dabei spielt es keine Rolle, ob die Wärmeerzeugung beabsichtigt ist, wie z.B. bei einem Trocknungsprozess, oder unerwünscht auftritt, wie z. B. bei der Erzeugung von Druckluft.

1.2 Wie tritt Abwärme auf?

Abwärme ist an bestimmte Medien gebunden oder wird diffus an die Umgebung abgegeben. Abwärmeträger können Abgase, Abluft, Dämpfe, Brüden, Thermoöle sowie Kühl- und Prozesswasser sein, aber auch Feststoffe wie Pulver, Körnungen, fertige Produkte, Transportgestelle oder Schlacke. Abwärme aus Trägermedien ist oft in großer Menge verfügbar und kann mit Wärmeübertragern nutzbar gemacht werden. Aufgrund ihrer thermodynamischen Eigenschaften eignen sich flüssige Medien grundsätzlich besser als gasförmige. Beim Wärmeübergang spielt aber auch der bauliche Aufwand eine Rolle, so dass immer der Einzelfall zu betrachten ist.

Diffus anfallende Abwärme wird durch Wärmestrahlung oder Konvektion an Bauteile und Umgebungsluft abgegeben. Diese Form der Abwärme lässt sich in der Regel nur schwer nutzen, sie muss zuvor mithilfe eines Mediums erfasst werden (z.B. Kühlluft).

1.3 Wie sind Abwärmequellen zu bewerten?

Um das Potenzial einer vorhandenen Abwärmequelle abzuschätzen, müssen folgende Informationen bekannt sein:

- Das Medium der Abwärme (z.B. Abgas, Kühlwasser, Abluft). Damit sind i. d. R. sowohl Dichte ρ [kg/m³] als auch spezifische Wärmekapazität c_p [kJ/(kgK)] des Mediums für die spätere Abschätzung der enthaltenen Energiemenge bekannt.
- Die Temperatur T [°C oder K] und der Volumenstrom \dot{V} [m³/s]. An welcher Stelle im Prozess und mit welchen Messgeräten diese Größen bestimmt werden, ist wiederum vom Medium abhängig.
- Die zeitliche Verfügbarkeit (kontinuierlich oder schwankend, saisonal, Anzahl der Volllaststunden pro Jahr). Ein vollständiger Lastgang der Abwärme (alle Größen gemessen über die Zeit) ist für die Bewertung nützlich. Er ähnelt meist dem Lastgang des Energieverbrauchs der Anlage oder Maschine.
- Die verfügbare Wärmemenge. Sie ergibt sich aus den vorgenannten Informationen. Zunächst lässt sich die Abwärmeleistung \dot{Q} [kW] über folgende Gleichung bestimmen:

$$\dot{Q} = \rho \dot{V} c_p (T - T_U)$$

Sie ist auch abhängig von der Bezugstemperatur T_U , auf die das Abwärmemedium abgekühlt wird (abhängig von der Senke). Die Abwärmeleistung ist am größten, wenn bis auf Umgebungstemperatur abgekühlt werden kann. Die Wärmemenge Q [kWh] ergibt sich nun multipliziert mit der Betriebszeit der Anlage oder mit den Zeitabschnitten, für die jeweils konstante Werte gemessen wurden.

- Die Verschmutzung des Abwärmemediums (Staub, Öl, giftige oder brennbare Substanzen, aggressive oder korrosive Bestandteile, Ruß, Teer oder Fett).

Stehen mehrere Abwärmequellen zur Verfügung, kann man anhand des Bewertungsschemas eine Prioritätenliste generieren. Die wirtschaftlich am besten erschließbaren Quellen sollten als erstes geprüft werden. Bei zusätzlichen Wärmebedarfen können auch Abwärmepotenziale benachbarter Betriebe angefragt werden.

Temperatur

Je höher die Temperatur ...

Energiemenge / Leistung

Je höher die Abwärmeleistung ...

Kontinuität

Je kontinuierlicher der Abwärmestrom anfällt / je weniger die Leistung schwankt ...

Volllaststunden

Je höher seine Verfügbarkeit über das Jahr ...

in der Regel gilt:

... desto mehr Nutzungsmöglichkeiten kommen infrage.

... desto wirtschaftlicher lässt sich die Abwärme technisch nutzen.

1.4 Vermeidung von Abwärme

Vor den Überlegungen zur Nutzung von Abwärme sollten immer erst Anstrengungen zur Vermeidung unternommen werden. Diese können sein:

- offensichtlichen Mehrverbrauch vermeiden – z.B. sinnvolles Abschalten, Vermeiden von Sicherheitszuschlägen
- Nutzungsgrad der Energie verbessern – z.B. Auslastung optimieren, Kopplungseffekte nutzen
- Nutzenergiebedarf senken – z.B. Wärmedämmung, Falschlufte reduzieren, Vortrocknen, Temperaturabsenkung, Prozessparameter optimieren
- Energieintensive Prozesse ersetzen – z.B. Kleben statt Schweißen

Bei Beachtung dieser Punkte werden bestehende Abwärmemengen zunächst reduziert, bevor sie im nächsten Schritt auf eine mögliche Energierückgewinnung untersucht werden. Auf diese Weise lassen sich erste Einsparungen bereits ohne oder zu nur geringen Kosten erzielen. Diese Abwärmevermeidungsmaßnahmen können vor allem auch bei den Investitionskosten entscheidend sein, wenn sich herausstellt, dass dadurch evtl. viel weniger Abwärme als ursprünglich zur Verfügung steht und kleinere und günstigere Aggregate zur Abwärmenutzung ausreichend sind. Welche Ansatzpunkte für die Vermeidung von Abwärme im Einzelnen zielführend sind, ergeben sich häufig im Rahmen einer Prozessoptimierung.

1.5 Prozessoptimierung

Bevor mit der Optimierung eines bestimmten Prozesses begonnen wird, empfiehlt sich zunächst der Blick auf die gesamte Prozesskette. Optimierungen wirken systemisch, daher sind unbeabsichtigte Verschlechterungen oder Engpässe an anderer Stelle unbedingt auszuschließen. Erst mit dem Gesamtverständnis zu den Abhängigkeiten und Schnittstellen wird der eigentlich zu optimierende Prozess mit seinen einzelnen Schritten genauer untersucht.

Die wichtigen Fragen zur Prozessgestaltung, die vor oder im Zusammenhang mit der Abwärmenutzung gestellt werden sollten, sind (u.a.):

- Ist die Prozessführung optimal?
- Ist ein Abschalten oder Zusammenlegen von Prozessstufen möglich?
- Kann der Durchsatz erhöht werden? Wie entwickelt sich die Betriebszeit?
- Wie kann Ausschuss vermieden werden? Wie entwickelt sich dann die Betriebszeit?
- Können Ausfahrverluste reduziert werden (Transport- oder Brennhilfsmittel)?
- Können Verfahrensparameter verändert werden?
- Was kann durch eine Anpassung von Steuerung und Regelung erreicht werden?
- Sind die Möglichkeiten der Verbrennungsluftvorwärmung ausgeschöpft?

- Kann die Prozesstemperatur gesenkt werden?
- Was kann durch zusätzliche Wärmedämmung erreicht werden?
- Kann Falschluff oder Kühlluft reduziert werden?

Die Projektbearbeitung anhand dieser Fragen liefert häufig Verbesserungsansätze, in Folge derer der Einsatz von Prozessenergie gesenkt werden kann und damit einhergehend sich auch das Abwärmepotenzial ändert. Zum Beispiel reduziert sich die Abgasmenge, wenn weniger Gas verbrannt wird und damit auch der Abwärmestrom. Oder es reduziert sich die Abgastemperatur, wenn Brenner mit verbesserter Verbrennungsluftvorwärmung installiert werden.

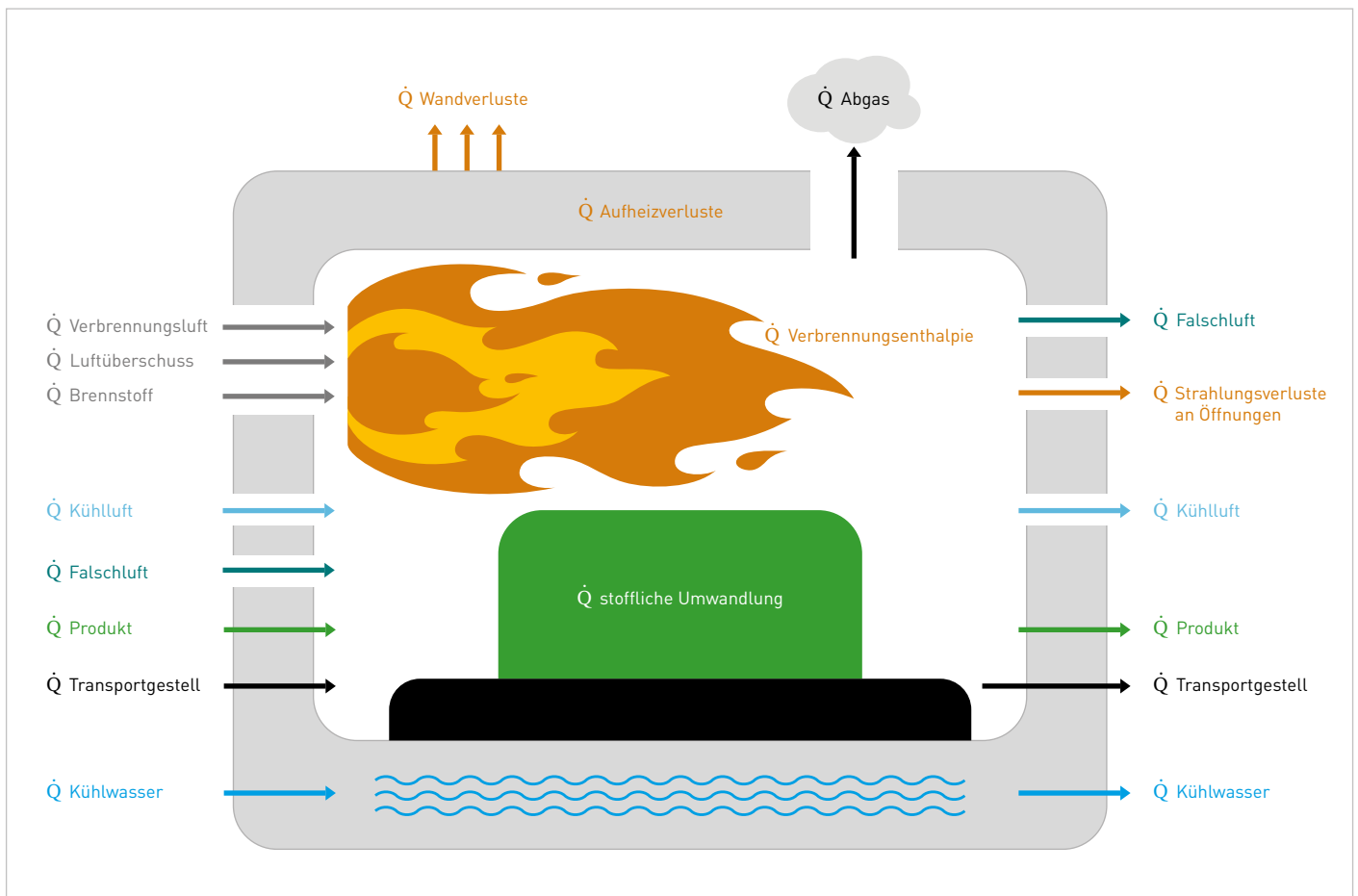
Es liegt auf der Hand, dass sich der mutige Blick eines erfahrenen Dritten – eines „Prozessoptimierers“ – auf bewährte Prozesse lohnt. Für eine ersten Prozessanalyse nutzt er als Werkzeug z.B. eine Stoff- und Wärmebilanz. Anhand dieser Bilanz lassen sich relevante Einflussparameter erkennen, mit denen der Experte bei den weiteren Betrachtungen des Prozesses die Schwerpunkte für mögliche Veränderungen setzt.

1.6 Werkzeug: Stoff und Wärmebilanz

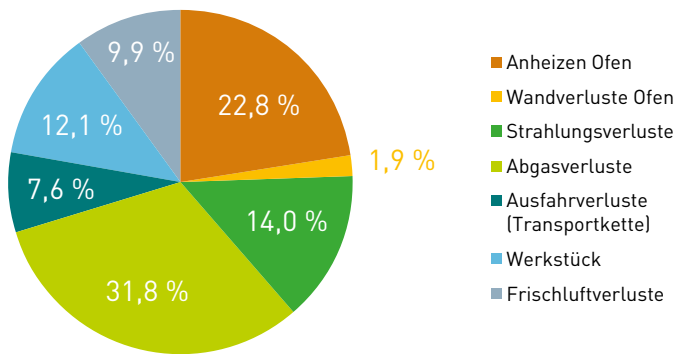
Bei der Stoff- und Wärmebilanz eines Prozesses werden alle eingehenden und ausgehenden Wärmeströme skizziert und berechnet. Insbesondere bei Chargenprozessen ist eine differenzierte Betrachtung sinnvoll, da viele Teilprozesse in der Regel nicht zeitgleich auftreten: z.B. könnte der Aufheizprozess zu Beginn, der Kühlprozess am Ende eines definierten Prozessabschnittes liegen.

In der Bilanz der Wärmeströme wird deutlich, wo die meiste Energie im Prozess hinfließt, also benötigt wird, und an welcher Stelle sie wieder abfließt, also z.B. ungenutzt an die Umgebung abgegeben wird. Durch rechnerische Veränderungen der Einflussfaktoren (z.B. Prozesstemperatur) kann das mögliche Einsparpotential einzelner oder mehrerer Prozessveränderungen abgeschätzt werden.

Erst wenn sicher ist, dass am Prozess oder der Prozesskette vorerst nichts mehr verändert werden kann – oder spätere Maßnahmen den zu nutzenden Abwärmestrom nicht verändern –, ist der Weg frei für das Abwärmeprojekt.



Stoff- und Wärmebilanz an einer thermischen Anlage



Beispielhaftes Ergebnis einer Stoff- und Wärmebilanz. Ansatzpunkte zur Verbesserung, hier z.B.: Abgasverluste reduzieren durch Wechsel des Brenners

1.7 Wohin mit der Abwärme?

Abwärmesenken finden sich in fast allen Unternehmen. Typischerweise kann Abwärme durch den Einsatz von Wärmeübertragern (ab Kap. 2.1) auf ähnlichem Temperaturniveau wiedereingesetzt werden. Diese direkte Nutzung von Abwärme ist häufig die konstruktiv einfachste und kostengünstigste Variante. Bei der indirekten Abwärmenutzung wird die Wärmeenergie der Abwärmequelle nicht unmittelbar wiedereingesetzt, sondern in andere Energieformen umgewandelt. Dabei kann aus Wärme bei höheren Temperaturen, Kälte oder mechanische Arbeit gewonnen werden. Meistens ist die Nutzung von Abwärme entsprechend folgender Reihenfolge am sinnvollsten:

Wärme

PROZESSINTERN: Reintegration der Abwärme in den Prozess. Abwärme aus dem Rauchgas einer Feuerung kann genutzt werden, um die Verbrennungsluft vorzuwärmen und damit den Brennstoffeinsatz zu verringern. Gleiches gilt für das Vorwärmen des Prozessgutes aus der Wärme der Abkühlzone. Bei der prozessinternen Abwärmenutzung stimmen der zeitliche Anfall von Abwärme mit dem Bedarf an Abwärme meistens überein. Durch die direkte prozessinterne Nutzung sinkt häufig auch der Prozessenergiebedarf und Verluste für den Transport werden vermieden. Handelt es sich um einen Batch-Prozess, ist über den Einsatz von Wärmespeichern nachzudenken (Kap. 2.2).

BETRIEBSINTERN: Integration in andere Prozesse auf einem möglichst hohen Temperaturniveau. Besteht ein Bedarf an Prozesswärme, sollte dieser primär als Senke für Abwärme in Betracht gezogen werden. Unter bestimmten Bedingungen kann es wirtschaftlich sein, aus Abwärme niedriger Temperatur Prozesswärme höherer Temperatur zu erzeugen. Dazu werden Wärmepumpen eingesetzt (Kap. 3.2). Häufig lassen sich Abwärmepotenziale mit niedrigem Temperaturniveau in der Raumheizung oder Trinkwassererwärmung nutzen.

BETRIEBSÜBERGREIFEND: Abgabe nicht intern nutzbarer Abwärme an Dritte. Lassen sich im eigenen Unternehmen keine passenden Wärmesenken finden, kann Abwärme an Dritte verkauft werden. Über eine Nahwärmeleitung oder einen mobilen Wärmecontainer kann sie in Produktionsprozessen benachbarter Unternehmen, zur Beheizung von Wohn- und Geschäftsräumen, von Sport- und Freizeitanlagen wie Schwimmbädern oder Energieversorgern zur Verfügung gestellt werden.

INDIREKTE NUTZUNG: Umwandlung von Wärme. Kann für die Abwärme im Unternehmen keine geeignete Senke gefunden werden, kann eine weitere Möglichkeit die indirekte Nutzung sein. Darunter versteht man das Anheben der Temperatur durch Wärmepumpen oder die Umwandlung in eine andere Energieart wie Kälte oder Strom.

Kälte

Wenn im Unternehmen oder seiner Umgebung Bedarf an Kälte besteht, kann die Wärme auch genutzt werden, um Kältemaschinen anzutreiben (Kap. 3.2). Der Kältebedarf kann dabei Klimakälte zur Gebäudeklimatisierung sein. Oft müssen aber auch Prozesse gekühlt werden. Während für die Prozesskühlung im Winter bevorzugt Freikühler zum Einsatz kommen, können speziell im Sommer oben genannte Kältemaschinen die stromverbrauchenden Kaltwassersätze ersetzen.

Strom

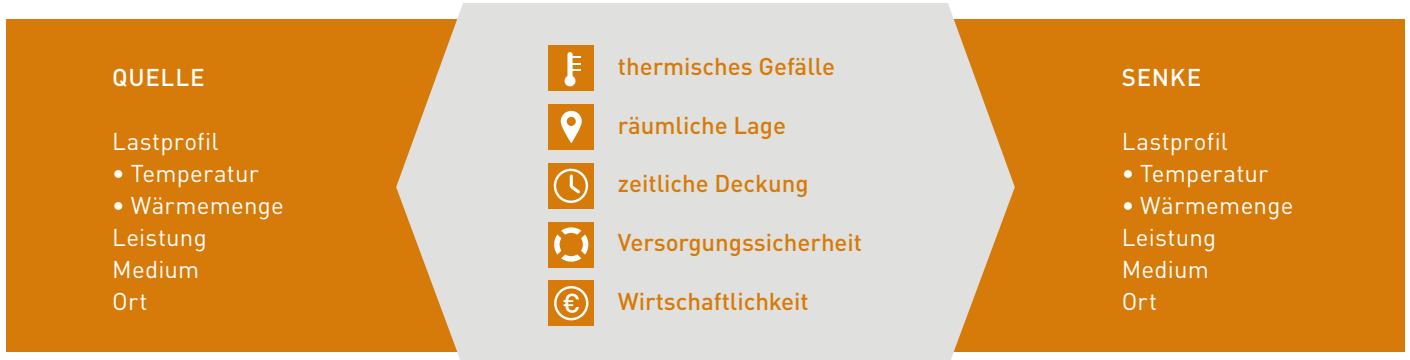
In Gas-, Dampfkraft- oder ORC-Prozessen (Kap. 3.3) wird Wärme in mechanische Arbeit umgewandelt, die zur Stromerzeugung oder direkt, z.B. zum Antreiben von Kompressoren, eingesetzt werden kann. Die Stromerzeugung stellt die variabelste Einsatzmöglichkeit der Abwärme dar. Allerdings sind die Wirkungsgrade je nach Abwärmemetemperatur gering zwischen 0–30 %, sodass die direkte Abwärmenutzung für Wärmeprozesse häufig effektiver ist.

Speicherung

Treten Wärmebereitstellung und Verbrauch zeitlich versetzt oder an verschiedenen Orten auf, so bietet sich der Einsatz von Wärmespeichern (Kap. 2.2) an. Diese ermöglichen außerdem die Zusammenführung von Abwärme aus verschiedenen Quellen und mit unterschiedlichen Temperaturniveaus sowie eine Kombination von direkter und indirekter Abwärmenutzung. Abwärme kann außerdem mehrfach genutzt werden: Bei der indirekten Nutzung fällt meist Abwärme auf niedrigerem Temperaturniveau an, die an anderer Stelle genutzt werden kann.

Mitunter finden sich Wärmesenken im Unternehmen, die über diese typischen Anwendungsfelder hinausgehen. Ihre Anbindung an eine Abwärmequelle ist selten als Standardlösung erhältlich und erfordert daher eine zugeschnittene Planung.

1.8 Abstimmung von Quelle und Senke



Welcher Verbraucher passt zur gefundenen Abwärmequelle? Lohnt es sich, die gefundene Nutzungsoption durch einen Planer prüfen zu lassen?

Ist eine Abwärmesenke gefunden, muss sie auf Eignung überprüft werden. Selten passen Abwärmequelle und Abwärmesenke direkt zusammen. Die Unterschiede können in unterschiedlichen Bereichen liegen (grob: wirtschaftlich / technisch) und als Hemmnisse für eine Nutzung der Abwärme gesehen werden.

Für einige Probleme existieren allgemeine Lösungsansätze, die hier kurz angerissen werden sollen. Andere erfordern die Kreativität aller Akteure (Unternehmer, Energieberater, Planer, Hersteller). Zwischen Abwärmequelle und Wärmesenke müssen folgende Beziehungen bestehen oder geschaffen werden:

thermisches Gefälle

Die Temperatur der Wärmequelle sollte höher sein als die der Wärmesenke. Sofern der Temperaturgradient zu gering ist, um die Prozesstemperatur einer möglichen Wärmesenke zu erreichen, kann auch eine Teilerwärmung / Vorwärmung eines Prozessstromes sinnvoll sein (z.B. Erwärmen der Frischluft eines Trockners von -10 bis 30 °C auf 50 °C Eintrittstemperatur). Zusätzlich kann auch eine Wärmepumpe eingesetzt werden.

Auch die Leistung bzw. Wärmemenge der Wärmequelle sollte größer sein als der Bedarf der Wärmesenke. Andernfalls muss ein zusätzlicher Wärmeerzeuger vorgehalten werden (z.B. Spitzenkessel). Wenn bereits ein redundantes System vorhanden ist, muss dieses nur einen Teilstrom erwärmen, was seinen Energieverbrauch verringert.

räumliche Lage

Entfernung: Abwärmeträger und zu erwärmendes Nutzmedium müssen an einem Ort zusammengeführt werden. Liegen Abwärmequelle und -senke weit voneinander entfernt, erhöhen sich die Investitionskosten wegen des Verrohrungsaufwandes und des eventuellen Einsatzes eines zusätzlichen Wärmeträgers.

Platzbedarf: Die Technologien brauchen unterschiedlich großen Bauraum. Bei Wärmeübertragern wird dieser besonders vom verwendeten Medium und dem Wärmeübergangskoeffizienten bestimmt. Bei zu wenig Bauraum ist eine Prozessintensivierung (leistungsfähigere Wärmeübertrager (-bauart), Kältemaschinen / Wärmepumpen: anderes Kältemittel) oder eine Außenaufstellung (höherer Verrohrungsaufwand, Einhausung) zu prüfen.

zeitliche Deckung

Sowohl Abwärmequelle als auch -senke haben einen Lastgang (zeitliche Abhängigkeit der Leistung).

Die Verfügbarkeit der Abwärme sollte weitestgehend dem Nutzungsprofil der Abwärmesenke entsprechen. In manchen Fällen können die Betriebszeiten angenähert werden. Bei Nutzung mehrerer Abwärmequellen sind deren Betriebszeiten zu staffeln. Andernfalls sind Speicher oder redundante Systeme vorzusehen.

Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeit wird bestimmt durch Investitionskosten, Wartungs- und Betriebskosten sowie durch Erlöse (Einsparung an Energiekosten, Verkauf der Wärme usw.). Diese Kosten bzw. Erlöse sind den Kosten bei Weiterbetrieb der unveränderten Anlage gegenüberzustellen. Dabei sollten auch veränderliche Faktoren wie der Energiepreis und steigende Abgaben (z.B. CO₂-Preis) berücksichtigt werden.

Bei Abwärmenutzung handelt es sich um Maßnahmen, deren Nutzungsdauer diejenige der Abwärmequelle häufig überschreiten. Die Wirtschaftlichkeit solcher Effizienzmaßnahmen sollte demnach nach der Rendite bewertet werden.

Die Rendite ist entsprechend der Nutzungsdauer (über Amortisationszeit hinaus), verglichen mit den Gewinnmargen anderer Prozesse im Betrieb, oft hoch. Wegen der langen Nutzungsdauer werden häufig Werte von über 10% erreicht.

Kann die erforderliche Investition nicht aus eigenen Mitteln generiert werden, sollten externe Finanzierungsquellen in Betracht gezogen werden: Investitionskosten lassen sich häufig durch Einbeziehung von Fördermitteln senken, Maßnahmen durch Contracting auslagern, und für das Ausbleiben von positiven finanziellen Effekten lassen sich Versicherungen abschließen.

Versorgungssicherheit

Entsprechend der erforderlichen Versorgungssicherheit der Abwärmesenke sind redundante Anlagen zur Verfügung zu stellen. Während die Stromversorgung i.d.R. über den Netzananschluss abgesichert ist, sind bei der Wärmelieferung an einen Nachbarbetrieb u. U. zusätzliche Wärmeerzeuger für den Fall des Anlagenausfalls notwendig. Dies kann die Wirtschaftlichkeit der Maßnahme stark beeinflussen. Eventuell kann dem durch Einbeziehen weiterer Abwärmequellen abgeholfen werden.

Auch für die Kühlung der Prozesse auf der Quellenseite ist möglicherweise mit redundanten Anlagen und Ausfallkonzepten vorzusorgen, soweit sich der Ausfall der Senke auf sie auswirkt.

Weiteres

Der Verschmutzungsgrad darf der geplanten Nutzung nicht grundsätzlich entgegenstehen. Gegebenenfalls sind Genehmigungen für die Errichtung und den Betrieb zusätzlicher Anlagen einzuholen.

Diese Bedingungen bauen zum Teil aufeinander auf und beeinflussen sich dadurch gegenseitig. In jedem Fall sollte ein unabhängiger Energieberater oder Planer hinzugezogen werden, wenn eine vielversprechende Nutzungsoption gefunden wurde.

2 Direkte Abwärmennutzung

Der offensichtliche Weg: Abwärme als Wärme wiedereinsetzen und dabei an anderer Stelle Energiekosten bei der Wärmeerzeugung einsparen.

2.1 Wärmeübertrager

Bevor Abwärme an anderer Stelle genutzt werden kann, muss sie technisch wieder verfügbar gemacht werden. Dazu sind Wärmeübertrager erforderlich.

Abwärme ist in den meisten Fällen an einen Abwärmeträger gebunden, der selbst nicht mehr von Nutzen im Prozess ist (z.B. Abgas). Um sie wieder nutzbar zu machen, muss sie auf einen Stoff übertragen werden, der einem anderen Prozess oder dem gleichen Prozess an anderer Stelle zugeführt wird. Dieser Nutzwärmeträger kann z. B. die Frischluft für eine Feuerung (Abgas als Abwärmeträger) oder das Arbeitsmittel in einer Kältemaschine sein. In einem Wärmeübertrager wird der Abwärmeträger so zum Heizmedium für den zu erwärmenden Stoff. Umgekehrt fungiert letzterer als Kühlmedium für die Abwärmequelle. Wärmeübertrager sind damit grundlegendes Element aller in dieser Broschüre beschriebenen Abwärmennutzungsoptionen.

In der Planung wird häufig der Begriff „Wärmetauscher“ genutzt. Er wird als missverständlich angesehen, weil er Wärmeströme in beide Richtungen suggeriert. Außerdem schließt er Bauarten aus, die gerade für die Abwärmennutzung in Betracht kommen, häufig aber außer Acht gelassen werden – vielleicht weil sie nicht als typische „Wärmetauscher“ ins Auge springen. Um dies zu vermeiden, wird in der Broschüre durchgängig der Begriff „Wärmeübertrager“ verwendet. Dies sollte bei der Planung und bei der Herstellersuche berücksichtigt werden.

Für die Auswahl der Wärmeübertrager-Bauart sollte der Anwender die Randbedingungen seines Vorhabens zur Abwärmennutzung genau kennen. Folgenden Kriterien können bestimmten Bauarten den Vorzug geben oder prinzipbedingt zu deren Ausschluss führen:

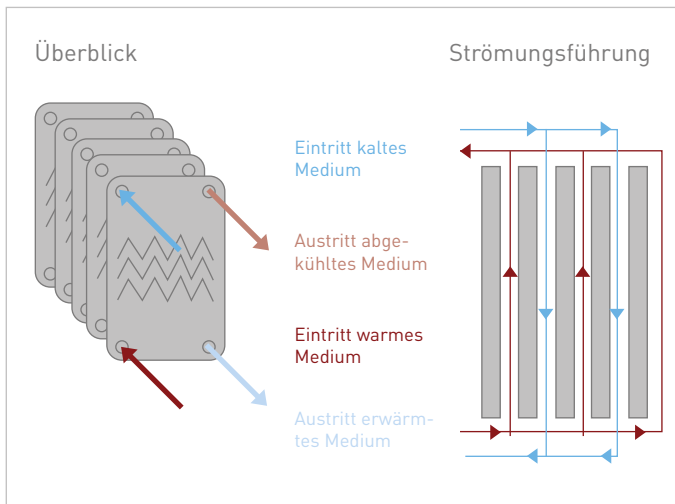
- Aggregatzustand von Abwärmemedium und Prozessmedium (flüssig/flüssig, gasförmig/flüssig, gasförmig/gasförmig, fest/gasförmig, fest/flüssig, fest/fest)
- Phasenübergang (Verdampfung oder Kondensation eines der Medien)
- Druckniveau und Druckunterschied zwischen den Medien
- Verunreinigte Medien erfordern den Einsatz von Bauarten, die weniger anfällig für Verschmutzungen sind.
- Korrosivität, Aggressivität oder Gefährlichkeit von Stoffen können bestimmte Werkstoffe erfordern, aus denen nicht alle Bauarten gefertigt werden können.
- Für eine strikte Trennung der Medien untereinander (z.B. Lebensmittel) und mittelbar auch nach außen (gefährliche Medien) existieren sogenannte Sicherheitswärmetauscher als Sonderform mancher Bauarten.

Name WÜ	Bild	Heiz- / Kühlmedium	Temperatur- niveau	Leistungsbereich	Kosten (Ermittlung per Kl)	Besonderheiten
Platten- wärmeübertrager		Flüssigkeit / Flüssigkeit, Gas / Gas, Wasser, Dampf, Kältemittel	Standard bis 180 °C, bis zu 900 °C mög- lich, Drücke bis 25 bar	bis zu 400 MW	50 bis 150 €/kW	kompakt, hohe Wärmeübertra- gungsrate, flexible Konfiguration, häufig in Heizungs- und Kühl- anwendungen eingesetzt
Rohrbündel- wärmeübertrager		Flüssigkeit / Flüssigkeit, Wasser, Dampf, Öl, Gase	-200 °C bis 550 °C, hoher Druck bis 100 bar möglich	2 kW bis >20 MW	10 bis 300 €/kW	robuste Konstruktion, geeignet für hohe Temperaturen und aggressive Medien, moderate Druckverluste
Lamellen- oder auch Rippenrohr- wärmeübertrager		Außen Gas, innen Flüssigkeit (ggf. mit Phasenwechsel)	-20 °C bis +80 °C (typisch), max. 900 °C	Typisch 1 bis 900 kW, bis 1.000 MW möglich	80 bis 200 €/kW	kompakt, vor allem in Lüftungs- und Klimaanlage, niedrige Gas- drücke, gaseitig schmutz- und feuchteempfindlich
Doppelrohr- wärmeübertrager		Flüssigkeit / Flüssigkeit (auch als Verdampfer / Kondensator), Wasser, Öl, aggressive Chemikalien	bis 200 °C, Druck bis max. 100 bar	1 bis 3.500 kW	150 bis 250 €/kW	geeignet für kleine Durchfluss- mengen und hohe Temperaturunter- schiede, relativ einfaches Design
Spiral- wärmeübertrager		Flüssigkeit / Flüssigkeit, Gas / Gas	-100 °C bis +450 °C	20 bis 800 kW	200 bis 500 €/kW	hohe Effizienz, kompakt, selbst- reinigend, sehr gut für verschmutzte Medien geeignet
Rotations- wärmeübertrager		Gas / Gas, Luft	-360 °C (Standard), bis 650 °C im Hoch- temperaturbereich	10 bis 1.600 kW	150 bis 300 €/kW	ideal für Lüftungsanlagen zur Wärmerückgewinnung, geeignet für saubere Gase / Luft
Wärmerohr- wärmeübertrager		Gas / Gas	Bis 700 °C	bis 3 kW je Rohr	100 bis 400 €/kW	hohe Wärmeleitfähigkeit durch Phasenwechsel, nur in eingegren- ztem Temperaturbereich arbeitsfähig, schmutz- und feuchteempfindlich, kompakte Bauweise
Platten- wärmeübertrager für Schüttgüter		Flüssigkeit / Flüssigkeit Feststoff / Gas	bis 100 °C (Standard) bis max. 400 °C im Hochtemperatur- bereich	bis 350 kW, > in Kaskaden anordenbar	400 bis 600 €/kW	auch Rückstaukühler / -erwärmer, ideal zur Wärmerückgewinnung rieselfähiger Feststoffe, Anlagenauslegung individuell notwendig
Rohrbündel- wärmeübertrager für Feststoffe		Feststoff / Flüssigkeit	bis 150 °C	50 kW bis 3 MW	200 bis 1200 €/kW	kompakte Bauweise, flexibel an Prozessanforderungen anpassbar, Einsatz in Chemie-, Pharma- und Lebensmittelindustrie sowie Kunst- stoff und Recycling, Durchsatz max. 6t/h
Schnecken- wärmeübertrager		Flüssigkeit / Flüssigkeit Feststoff / Gas	-10 °C bis 1000 °C	20 kW bis 1,5 MW	400 bis 1800 €/kW	Kombination aus Transport und Wärmeübertragung, hohe Effizienz durch „hohle Schneckenflügel“, elektrische Beheizung möglich, hoher Temperaturbereich
Wärmeübertrager für feines, fluidisierbares Material		Flüssigkeit / Flüssigkeit	bis 200 °C (Standard) > 200 °C (Hochtem- peraturauslegung)	0,5 MW bis 8 MW	300 bis 400 €/kW	kompakte Bauweise, schonende Produktbehandlung, Vermeidung von Agglomeration, gute Skalierbarkeit, effiziente Kühlung
Kübel- Wärmeübertrager für Schrott		Feststoff / Gas	bis 800–1400 °C	5 MW bis 40 MW	120 bis 500 €/kW	geschlossene Schrottvorwärmung → Reduzierung Emission von Staub und Abgasen
Abkühlöfen und Strahlungswär- meübertrager		Feststoff / Gas Feststoff / Flüssigkeit	bis 200 °C	2 MW bis 30 MW	100 bis 500 €/kW	spezifische Auslegung notwendig

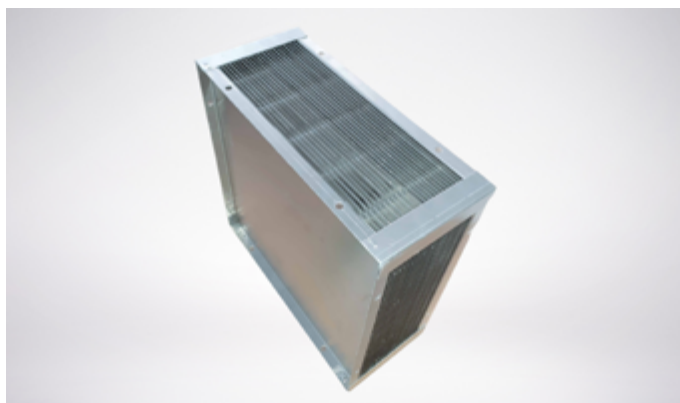
Plattenwärmeübertrager

Plattenwärmeübertrager (kurz: PWÜ) sind aus mehreren parallelen Platten aufgebaut. In den dazwischenliegenden Spalten strömt abwechselnd das Heiz- oder das Kühlmedium. Das geringe Spaltmaß und die Profilierung der Platten erzeugen eine für die Wärmeübertragung günstige Strömung. Die große Plattenanzahl vergrößert die Wärmeübertragerfläche – bei geringer Baugröße resultiert daraus eine hohe Leistungsdichte.

PWÜ gibt es in verschiedenen Bauformen und Materialien. Die einzelnen Platten sind je nach Ausführung verlötet, verschweißt oder werden durch Spansschrauben zusammengehalten. Während die verschraubte Ausführung zwecks Reinigung demontiert werden kann, sind die stofflich gefügten Modelle nur für saubere Medien geeignet. Es gibt auch Mischbauformen mit Kassetten aus jeweils zwei verschweißten Platten, die mit Spansschrauben fixiert sind. Bei den in den Abbildungen gezeigten Varianten sind die Anschlüsse der beiden Medien als Rohrstützen ausgeführt. Je nach Wahl des Werkstoffes und der Füge­technologie können Temperaturen bis 750 °C realisiert werden. Beide Medien sollten drucklos sein und über ein ähnliches Wärmeübergangsverhalten verfügen (Gas/Gas: $k \approx 10 \dots 30 \text{ W/(m}^2\text{K)}$; Flüssigkeiten: $k \approx 200 \dots 1500 \text{ W/(m}^2\text{K)}$).



Prinzip eines Plattenwärmeübertragers



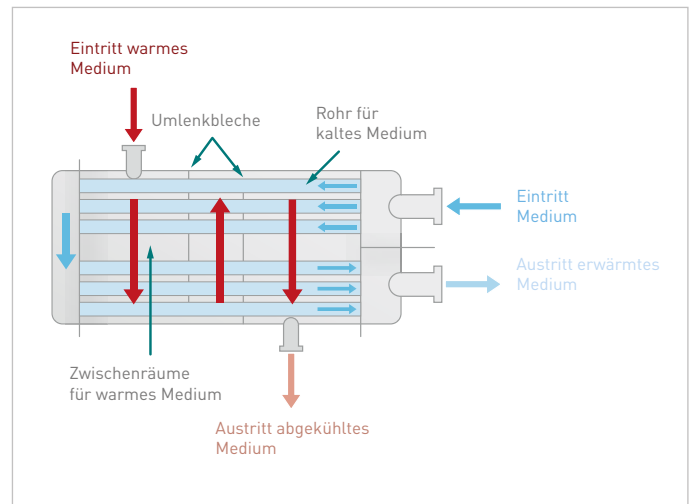
Plattenwärmeübertrager, WätaS Wärmetauscher Sachsen GmbH

Rohrbündelwärmeübertrager

Rohrbündelwärmeübertrager (kurz: RBWÜ) bestehen aus einer Vielzahl paralleler, dünnwandiger Rohre, auf die sich die Strömung eines Mediums aufteilt. Das Rohrbündel wird in einem Behälter angeordnet, der vom anderen Medium durchströmt wird. Umlenkleche sorgen dabei für eine Verlängerung des Strömungsweges und eine wärmetechnisch optimale Queranströmung der Rohre.

Rohrbündel können aus hunderten parallelen Rohren mit Längen bis zu mehreren Metern aufgebaut sein, es lassen sich große Volumenströme realisieren. Das Medium wird in mehrflutigen Ausführungen durch Verteiler-Sammler umgelenkt. Alternativ kann jedes Einzelrohr eine Umlenkung erzeugen (U-Rohr-WÜ).

RBWÜ werden vorzugsweise für Flüssigkeiten (bei Wasser $k \approx 1000 \dots 3000 \text{ W/(m}^2\text{K)}$) sowie zum Verdampfen des Mediums im Behälter genutzt, wobei die zu verdampfende Flüssigkeit das Rohrbündel überflutet. Medien mit hohen Drücken sollten aus Gründen der Festigkeit im Rohrraum strömen. Durch den komplexen Aufbau mit den vielen zu verschweißenden Rohren sind RBWÜ recht teuer in der Anschaffung. Die Rohre lassen sich mit vertretbarem Aufwand sowohl innen als auch außen durch „Ziehen“ des Rohrbündels reinigen.



Prinzip eines Rohrbündelwärmeübertragers



Rohrbündelwärmeübertrager, AEL Apparatebau GmbH Leisnig

Rippenrohrwärmeübertrager

Rippenrohrwärmeübertrager (kurz: RrWÜ) werden häufig zur Wärmeübertragung zwischen gasförmigen und flüssigen Medien eingesetzt, wobei die Flüssigkeit in den Rohren strömt. Durch die Berippung auf den Rohren wird die wärmeübertragende Oberfläche signifikant erhöht und der schlechtere Wärmeübergang in der Gasströmung auf der Rohraußenseite ausgeglichen.

RrWÜ haben entweder einzelne gerade Rippenrohre oder Rohrbündel (Heiz-/Kühlregister). Alternativ sind Rippenrohre auch in U- oder Spiralförmig verfügbar. Eine Bauform, bei der die einzelnen Rippen das gesamte Rohrbündel als Bleche durchziehen, wird als Lamellen-WÜ bezeichnet. Im Vergleich zu einzelnen Rippenrohren ist die Fertigung von Lamellen-WÜ kostengünstiger. Die benötigten Lochraster für die Rohranordnung (fluchtend oder versetzt) werden in die Bleche gestanzt, die Stanzfalz legt den Lamellenabstand fest.

Eine Strukturierung der Bleche beim Stanzen dient der Erzeugung von Turbulenzen und verbessert den gasseitigen Wärmeübergang. Die Rohre werden durch das Lochraster des Lamellenpaketes geschoben, mechanisch (Dorn) oder hydraulisch (Öl). Lamellen-WÜ werden für gasförmig/flüssig-Anwendungen eingesetzt, wobei die Flüssigkeit in den Rohren (auch mit hohem Druck) und das Gas zwischen den Lamellen strömt (z.B. Gaskühler). Die hohe Anzahl der Lamellen bei geringen Abständen und der gute Wärmeübergang in den Lamellenpaketen sorgen für hohe Wärmeleistungen.

RrWÜ-Material: vorzugsweise Aluminium, je nach Temperaturniveau und Anwendungsbereich auch Kupfer, Stahl oder Edelstahl (bei korrosiven Gasen). Durch die engen Lamellenabstände (oft < 1mm) ist der WÜ sehr empfindlich gegenüber verschmutzten und feuchten Gasen. kondensierendes Wasser (Kapillarkräfte) lässt den Schmutz an der Oberfläche anhaften, der bei Temperaturen unter 0 °C vereisen kann. Bei Kältemaschinenverdampfern setzt man daher elektrische Heizstäbe ein, um ein regelmäßiges Abtauen zu ermöglichen.



Lamellenwärmeübertrager, WätaS Wärmetauscher Sachsen GmbH

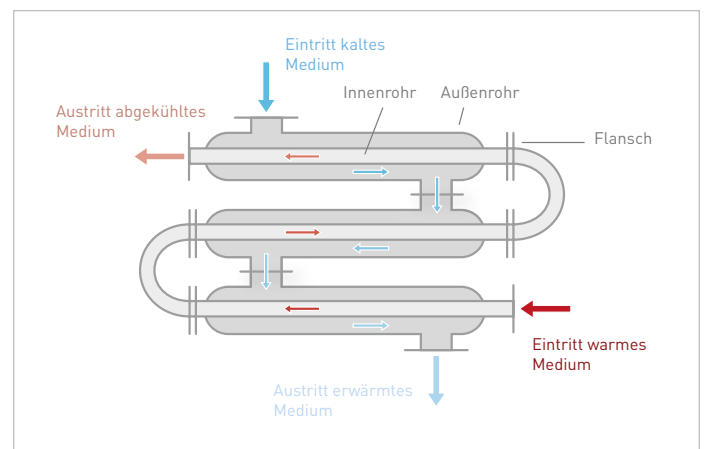
Doppelrohrwärmeübertrager

Doppelrohrwärmeübertrager bestehen aus zwei koaxial angeordneten Rohren, wobei das Innenrohr innen und außen zur Oberflächenvergrößerung berippt sein kann. Ein Medium strömt durch das Innenrohr, das andere durch den Ringspalt zwischen Innen- und Außenrohr. Die Medien (typischerweise Flüssigkeiten) fließen im Gleich- oder Gegenstrom.

In der Abbildung weiter unten ist die Betriebsweise im Gegenstrom dargestellt. Dabei handelt es sich um gerade Doppelrohre, wobei die Außenrohre über seitliche Flansche verbunden werden. Alternativ dazu können Doppelrohre auch als Rohrwendeln ausgeführt sein, um den Bauraum zu begrenzen.

Die Rohrdurchmesser von Doppelrohrwärmeübertragern können von wenigen Millimetern bis zu ca. einem Meter reichen. Als Materialien werden Stahl, Kupfer, Kupfer-Nickel oder Messing eingesetzt. Die Kosten derartiger Wärmeübertrager sind moderat gegenüber anderen, der benötigte Bauraum ist vergleichsweise groß.

Am häufigsten werden Doppelrohrwärmeübertrager in der Kältetechnik als Kondensator (Verflüssiger) eingesetzt. Bei unberippten Rohren ist die Verschmutzungsneigung gering, verschraubte Ausführungen (Flanschrohrkombinationen) sind auch gut reinigbar.



Prinzipische Skizze eines Doppelrohrwärmeübertragers



Doppelrohrwärmeübertrager, Penke, Reineward & Co. GmbH

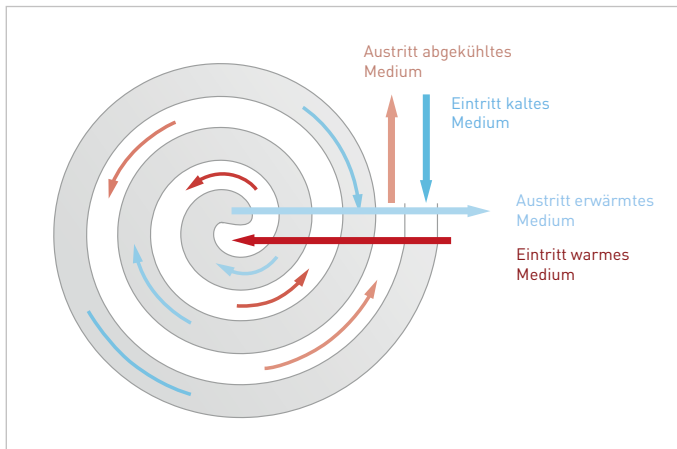
Spiralwärmeübertrager

Spiralwärmeübertrager bestehen aus Blechen, die so um einen Kern gewickelt werden, dass zwei separate, konzentrisch angeordnete, spaltförmige Strömungskanäle entstehen. Durch stirnseitige Platten wird der Wärmeübertrager abgeschlossen.

Die Medien werden durch die Seitenplatten am Umfang und in der Mitte zu- bzw. abgeführt, so dass ein Gegenstrom erzeugt wird. Die spiralförmige Kanalform erlaubt eine große Wärmeübertragerfläche bei kleinem Bauraum und einer großen Lauflänge der Strömungsmedien.

Spiralwärmeübertrager werden häufig bei schmutzbelasteten Medien und Suspensionen eingesetzt, da es durch die einfache Stromführung ohne Umlenkungen und Reduzierungen kaum zu Schmutzablagerungen an den Wärmeübertragerflächen kommt. Wenn sich eine Stirnseite öffnen lässt, ist die Reinigung überdies sehr einfach. Grundsätzlich können sowohl flüssige als auch gasförmige Medien eingesetzt werden.

Aufgrund der schwer zu realisierenden Abdichtung an den Stirnseiten sollte der Spiralwärmeübertrager nur für Medien auf etwa gleichem Druckniveau eingesetzt werden.



Prinzip eines Spiralwärmeübertragers

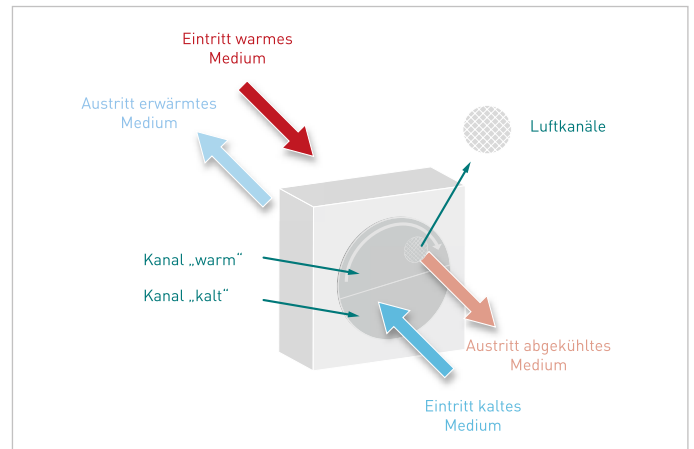


Spiralwärmeübertrager, AlfaLaval

Rotationswärmeübertrager

In einem Rotationswärmeübertrager (kurz: Wärmerad) rotiert eine zylindrische Speichermasse innerhalb zweier Strömungskanäle. Die Speichermasse nimmt dabei während einer halben Umdrehung Wärme vom Abwärmträger auf und gibt sie während der anderen halben Umdrehung an das zu erwärmende Prozessmedium ab.

Wärmeräder sind in Gasströmungen selbst bei geringen Temperaturunterschieden effizient einsetzbar. Als Speichermasse dienen Lamellenstrukturen (glatt oder strukturiert) oder durchströmte Schüttungen aus kleinen kugelförmigen Speicherelementen. Wärmeräder eignen sich nur für Gas/Gas-Anwendungen, da die Speichermasse flüssige Rückstände in den anderen Strömungskanal transportieren würde. Für verschmutzte Gase sind sie ebenfalls ungeeignet. Die Vermischung von Abwärmträger und Prozessmedium lässt sich durch besondere Konstruktionen verringern (Spülzone oder -kammer). Eine Mitrotation (Spalt-, Leckluft) lässt sich jedoch nicht gänzlich vermeiden. Insbesondere bei prozessübergreifender Anwendung ist zu beachten, dass das Prozessmedium nicht verunreinigt wird. Korrosive Gase setzen Beschichtungen voraus. Sorptive Beschichtungen ermöglichen die Übertragung von Gasfeuchte (z.B. in der Lüftungs- und Klimatechnik). Wärmeräder haben Durchmesser von 400 bis 3.000 mm. Die Bautiefe ist im Gegensatz zum Durchmesser gering.



Prinzip eines Rotationswärmeübertragers

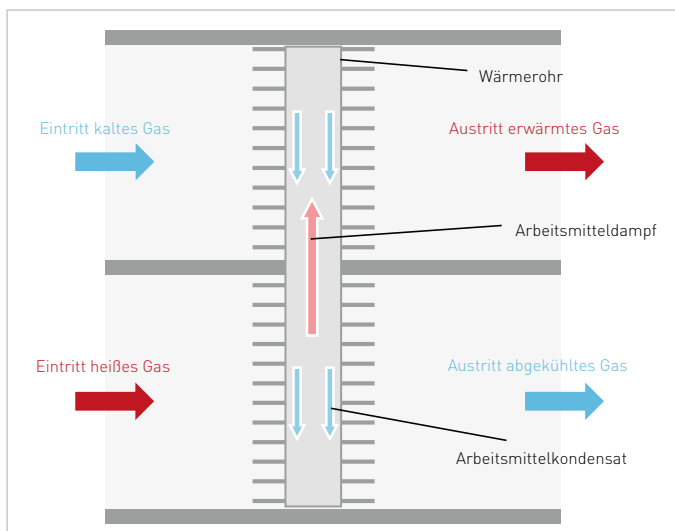


Rotationswärmeübertrager, Klingenburg GmbH

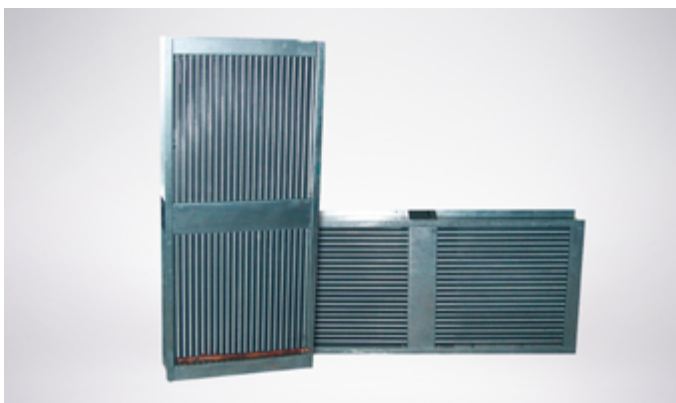
Wärmerohrwärmeübertrager

Wärmerohrwärmeübertrager (kurz: WRWÜ) werden als Gas/Gas-WÜ eingesetzt. Wärmerohre (engl.: heat pipes) transportieren große Wärmeströme in stoffgebundener Form mit Hilfe eines Arbeitsmittels, welches am „heißen Ende“ des Wärmerohres verdampft und am „kalten Ende“ kondensiert. Der interne Arbeitsmittelkreislauf entsteht entweder durch Schwerkraft (aufsteigender Dampf und zurückfließendes Kondensat) oder durch Kapillarkräfte in porösen Strukturen (lageunabhängig). Als Arbeitsmittel werden Stoffe eingesetzt, deren Verdampfungstemperatur an die Einsatzparameter des WRWÜ angepasst ist. Damit arbeiten WRWÜ nur in definierten Temperaturgrenzen.

Häufig herrschen in den Wärmerohren Drücke, die vom Umgebungsdruck abweichen (Unter-/Überdruck), so dass die Funktion nur bei langzeitstabiler Dichtheit sichergestellt werden kann. Wärmerohrdurchmesser beginnen bei wenigen Millimetern und reichen bis in den Zentimeterbereich. Mit Hilfe außen berippter Wärmerohre können große Wärmeströme zwischen zwei Gasströmungen transportiert werden. Allerdings sollte dann der Schmutz aus den Gasströmen, der sich zwischen den Rippen festsetzt und die Wärmeleistung mindert, regelmäßig entfernt werden.



Prinzip eines Wärmerohrwärmeübertragers



Wärmerohrwärmeübertrager, WätaS Wärmetauscher Sachsen GmbH

Plattenwärmeübertrager für Schüttgüter

Plattenwärmeübertrager für Schüttgüter sind speziell dafür ausgelegt, rieselfähige Materialien – wie Zucker, Düngemittel oder Gießereisand – schonend zu kühlen oder zu erwärmen. Das Schüttgut fließt dabei kontinuierlich zwischen mehreren parallelen Platten hindurch, während in diesen Platten ein Wärmeträgermedium (z. B. Wasser) zirkuliert. Auf diese Weise kann überschüssige Wärme abgeführt oder gezielt Wärme zugeführt werden.

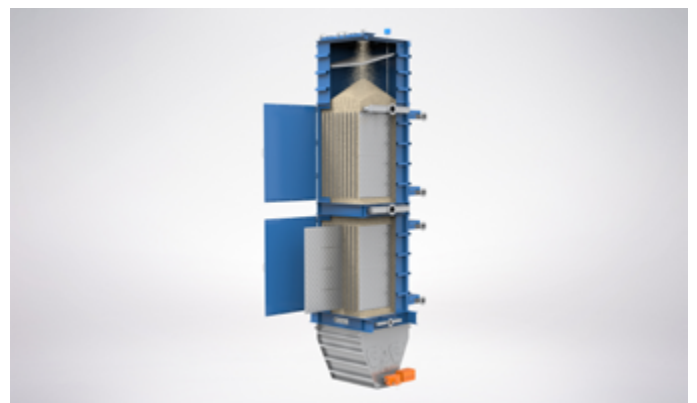
Eine häufig eingesetzte Variante dieses Aufbaus ist die Pillow-Plate-Technologie, bei der die Platten wölbungsartig gestaltet sind. Dadurch wird eine große innere Oberfläche erzielt, was zu einem sehr effizienten Wärmeaustausch bei gleichzeitig kompakter Bauform führt.

Typische Einsatzbereiche:

- Lebensmittelindustrie (z. B. Kühlung von Zucker oder Getreide)
- Chemische Industrie (Abkühlung oder Erwärmung von Granulaten)
- Gießereien (Sandkühlung)
- Pharma- und Futtermittelproduktion (auch für pastöse oder stückige Produkte geeignet)

Die robuste Konstruktion ermöglicht nicht nur einen kontinuierlichen Durchsatz mit geringem Energiebedarf, sondern erlaubt auch die Einbindung in bestehende Prozessketten.

Diese Gruppe von Wärmetauschern zeichnet sich vor allem aus durch einen guten Wärmeübergang aufgrund direkter Kontaktflächen, den modularen Aufbau mit anpassbaren Durchsatz- und Platzanforderungen sowie den schonenden Materialtransport (geringe mechanische Belastung des Produkts).



Plattenwärmeübertrager für Schüttgüter, Solex Thermal Science Inc.

Rohrbündelwärmeübertrager für Feststoffe

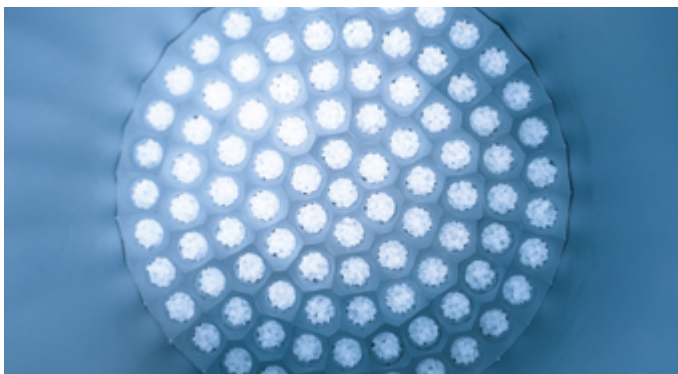
Rohrbündelwärmeübertrager für Feststoffe sind für die thermische Behandlung von Pulvern und Granulaten ausgelegt. Das zu temperierende Produkt durchströmt einen zylindrischen, robusten Wärmetauscher, in dessen Innenraum ein Medium zirkuliert (z.B. Wasser oder Thermoöl). Diese Konfiguration ermöglicht eine direkte Wärmeübertragung zwischen Produkt und Wärmeträger.

Aufgrund seiner kompakten Bauform eignet sich das System besonders für den Einbau in pneumatische Förderanlagen. Dabei kann je nach Bedarf geheizt oder gekühlt werden, wodurch unterschiedliche Prozessanforderungen flexibel abgedeckt werden.

Typische Einsatzbereiche:

- Lebensmittel- und Chemieindustrie (Pulver, Granulate, Stäube)
- Pharmazeutische Prozesse (schonende Temperierung)
- Kunststoff- oder Recyclinganwendungen (z.B. Kunststoffgranulat)

Der Wärmeübertrager eignet sich für Temperaturen von bis zu 150 °C und kann eine Durchsatzkapazität von 6.000 kg/h erreichen. Das System ist platzsparend und lässt sich daher auch gut bei geringem Einbauraum implementieren.



Der Schüttgutwärmetauscher BULK-X-CHANGE® der Coperion GmbH kann Abwärme aus anderen Prozessen nutzen (warmes Wasser), um frei fließende Schüttgüter vorzuwärmen, z.B. vor der Extrusion.

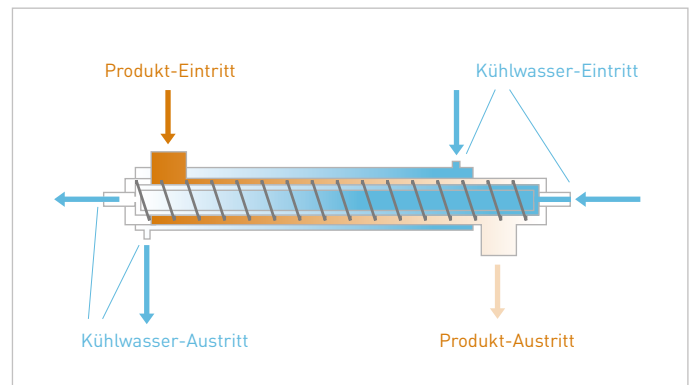
Schneckenwärmeübertrager

Bei einem Schneckenwärmeübertrager (kurz: SchneckenWÜ) wird Material durch eine beheizte oder gekühlte Transportschnecke hindurch gefördert. Die Wärmeübertragung erfolgt durch die Schnecke, durch die ein Heiz- oder Kühlmedium fließt. Je nach Ausführung durchströmt das Heizmedium nur die Achse der Schnecke oder auch die Windungen. Als Übertragungsmedium können z. B. Wasser, Dampf oder Thermoöl eingesetzt werden.

SchneckenWÜ eignen sich für Temperaturen von bis zu 1.000 °C. Bei geschlossener, staubdichter Bauweise und harter Oberflächenbeschichtung erhält man ein robustes und wartungsarmes WÜ-System, das direkt in der Prozesskette Anwendung findet.

Typische Einsatzbereiche:

- Lebensmittelindustrie (Kühlen/Erwärmen von Mehl, Pasten, Kakaomasse)
- Baustoff- und Chemiebranche (Behandlung von Kalk, Zement, Düngemitteln, Pigmenten)
- Kunststoffindustrie (Kühlen/Erwärmen von Granulaten)
- Recycling & Abfallbehandlung (Trocknung von Klärschlamm, Kühlung von Schlacken)



Kühlschnecke, AMF-Bruns Industrial Solutions GmbH & Co. KG

Wärmeübertrager für feines, fluidisierbares Material

Feine und sehr feine pulverförmige Feststoffe können fluidisiert werden und haben dann ein besonderes Riesel- bzw. Strömungsverhalten.

In der Zementindustrie, wo beim Mahlen Temperaturen auftreten, die günstige Absacktemperaturen überschreiten, wurden daher Feingutkühler entwickelt, welche für sehr große Mengen ausgelegt sind.

Der Feingutkühler nimmt das frisch gemahlene Zementmehl (oder andere staubförmige Stoffe) auf und leitet es über einen rotierenden Streuteller in den Zylinder des Kühlers. Die Fliehkraft verteilt das Material hauchdünn an der Wand, wodurch eine intensive Kontaktfläche mit dem wassergekühlten Behältermantel entsteht.

Zusätzlich sorgen Schneckenflügel oder Förderschnecken an der Innenwand dafür, dass das Produkt in axialer Richtung kontinuierlich vorwärtsbewegt wird. Gleichzeitig wird an der Mantelaußenseite ständig Frischwasser oder Prozesswasser zugeführt, das in einem internen Kreislauf zirkuliert und so die Wärme aus dem feinen Gut aufnimmt.

Das Produkt wird kontinuierlich bewegt und gekühlt, ohne Agglomerate zu bilden. Die kompakte Bauweise ermöglicht den Einbau in neue und bestehende Mahlanlagen. Die Kühlleistung lässt sich an unterschiedliche Durchsätze und Temperaturanforderungen anpassen.

Typische Einsatzbereiche:

- Zement- und Baustoffindustrie (besonders geeignet für frisch gemahlene Zement, Kalk oder ähnliche feine Schüttgüter)



Zwei Feingutkühler in einer Zementmahlanlage, thyssenkrupp Polysius GmbH

Kübel-Wärmeübertrager für Schrott

In den Abgasen bei Schmelzverfahren können sehr hohe Temperaturen vorkommen, deren Abwärme bislang kaum genutzt wird. Eine Möglichkeit der Stückgut- und Produktvorwärmung im Gießerei- und Stahlbereich ist der Schrottwärmeübertrager (das Prinzip ist grundsätzlich auch in anderen Branchen anwendbar). Die Vorwärmung kann direkt oder indirekt erfolgen.

Wenn die Schmelzöfen mit einem Kübel befüllt werden, so werden die Abgase des Ofens direkt durch diesen Kübel geleitet und geben ihre Wärme an den Schrott ab. Danach werden sie in das Abgasreinigungssystem gesaugt. Wenn ein guter Kontakt zwischen Schrott und Abgas erreicht werden kann, wirkt sich die Schockkühlung der Abgase auch positiv auf die Unterbindung von Schadstoffen aus (ähnlich dem Quenching).

Wenn die Kübel nicht in den Abgasstrom integriert werden können, gibt es die Möglichkeit, die Kübel in einem Durchstoßofen oder Kammerofen im Gesamten zu erwärmen. Die Beheizung des Ofens wird idealerweise mit Hochtemperaturabwärme aus anderen Prozessen erreicht.

Teils kann auch nur eine Teil-Vorwärmung des Schrottes mit Abwärme erreicht werden, und dann folgt eine weitere Erwärmung mittels Brenner. Die erreichbaren Vorwärmtemperaturen liegen bei 400 bis 600 °C.

Bis zu 30 kWh pro Tonne Schrott können eingespart werden, entsprechend ca. 20 % Heizenergie im Elektrolichtbogenofen. Beim integrierten Schachtofensystem werden CO und organische Emissionen verbrannt und mit den heißen Abgasen direkt genutzt. Der Schrottwärmeübertrager ermöglicht außerdem einen effizienteren Prozessablauf, indem er die Ladezeiten reduziert und die Schmelzleistung erhöht. Durch den Filtereffekt im Schrottbett entweichen weniger Staub und Abgase (geschlossene Schrottvorerwärmung).

Typische Einsatzbereiche:

- Stahl- und Gießereibetriebe (vermindert Energiebedarf beim nachfolgenden Einschmelzen)



Wärmeübertrager für Schrott, Aslantepe Industry Makine San. Tic. A.S. Türkei

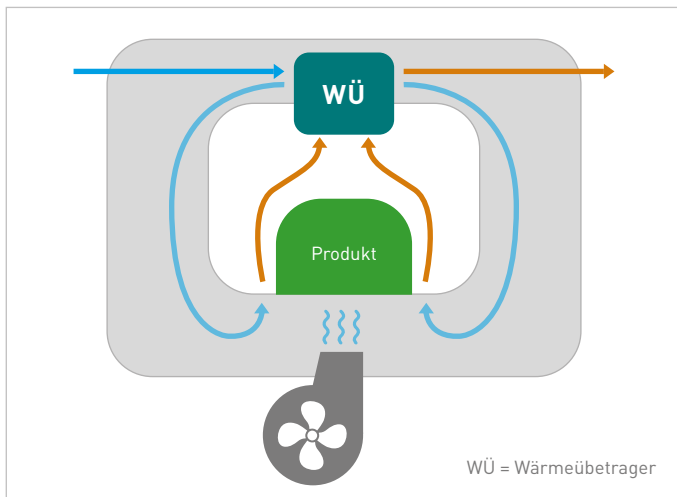
Abkühlöfen und Strahlungswärmeübertrager

Überall dort, wo Produkte mit sehr hohen Temperaturen dem Prozess entnommen werden, kühlen diese durch Strahlung und Konvektion ab. So werden z.B. die Brammen bei der Stahlerzeugung mit Temperaturen von über 900 °C zur freien Abkühlung abgelegt.

Durch Wasser, Thermoöl oder dampfdurchströmte Oberflächen, welche das heiße Produkt umgeben, kann die Wärmestrahlung aufgefangen und die Wärme an einen Wärmeträger übergeben werden. Sofern die Oberflächen z. B. Lamellen-Wärmeübertrager sind, kann zusätzlich auch noch die konvektive Wärme der umgebenden Luft genutzt werden. Eine solche Vorrichtung entspricht in Näherung einer Abkühlhaube, welche auch für Produkte und Werkstücke im unteren Temperaturbereich genutzt werden kann. Die Vielzahl an Produkten, Produktabmessungen, Temperaturen und Betriebszeiten machen oft individuelle Lösungen notwendig, welche dann werksspezifisch angefertigt werden müssen. So ist z. B. eine Wärmenutzung von Schlacken noch zu prüfen. Abkühlhauben können prinzipiell in allen Betrieben mit Produkttemperaturen über 100 °C eingesetzt werden. Es empfiehlt sich eine Kombination mit einem Wärmespeicher.

Typische Einsatzbereiche:

- Stahl- und Walzbetriebe (Umformbetriebe und Härtereien mit Luftabkühlung)
- sonstige Wärmebehandlungsbetriebe



oben: Strahlungswärmeübertrager, Danieli & C. S.p.A. Italy
unten: Prinzip Abkühlhaube

2.2 Wärmespeicher

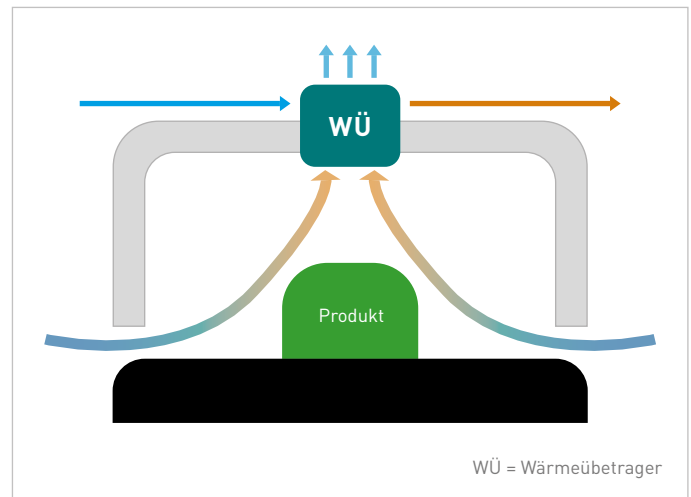
Häufig ist das Wärmeangebot einer Abwärmequelle zum Bedarf der passenden Wärmesenke zeitlich versetzt. In diesem Fall ist der Einsatz eines Wärmespeichers sinnvoll, um Angebot und Bedarf zeitlich abzustimmen.

Ein Speicher ist in der Lage, einen schwankenden Wärmestrom aus der Abwärmequelle zu verstetigen oder der Senke zu anderen Zeiten zur Verfügung zu stellen. Damit können sich weitere Nutzungsoptionen für eine Abwärmequelle ergeben, die mit Wärmeübertragern allein – etwa wegen unterschiedlicher Betriebszeiten der so gekoppelten Produktionsprozesse – ausgeschlossen wären.

Zwischen Abwärmequelle und -senke wird ein Speichermedium geschaltet, das zu deren thermischen Randbedingungen passt. Das verwendete Material bestimmt die Arbeitstemperatur des Speichers. Sie muss so gewählt werden, dass sie beim Laden unterhalb der Temperatur der Wärmequelle und beim Entladen oberhalb der Temperatur der Wärmesenke liegt.

Das Speicherprinzip definiert die Unterschiede:

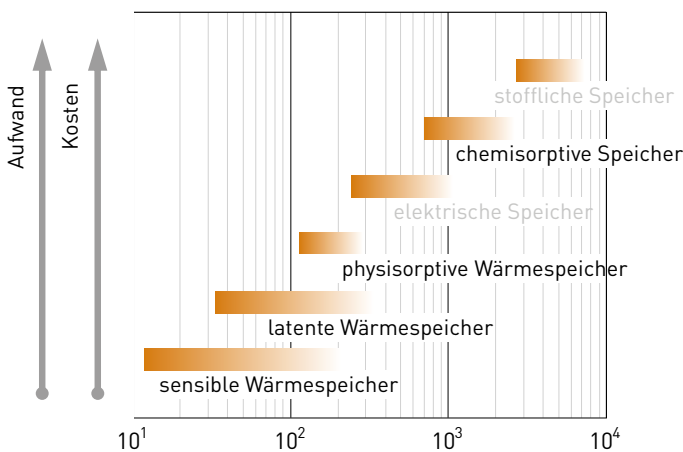
- **Sensible Wärmespeicher:** Die Energie wird in Form von sensibler Wärme durch eine Temperaturänderung des flüssigen oder festen Speichermediums gespeichert (Abhängigkeiten: Wärmekapazität des Speichermediums und verfügbare Temperaturdifferenz).
- **Latente Wärmespeicher:** Die Energie wird in Form von latenter Wärme beim Phasenwechsel des Speichermediums gespeichert. Damit ist die Speicherkapazität im Wesentlichen von der Energie abhängig, die beim Phasenwechsel (Schmelz- oder Verdampfungswärme) übergeht.
- **Sorptive Wärmespeicher:** Thermische Energie wird durch den physikalischen Prozess der Adsorption oder Absorption (Physisorption) oder durch eine chemische Reaktion (Chemisorption) gespeichert. Die Speicherkapazität hängt dabei maßgeblich von der Sorptions- oder Reaktionswärme ab.



Prinzip Abkühlhaube

Die Abbildung unten zeigt den Vergleich von Speichern hinsichtlich ihrer Energiedichte: steigt sie, so nimmt auch die Komplexität des Speichersystems zu. Zur Einordnung sind elektrische und stoffliche Speicher mit angegeben. Diese stellen keine Wärmespeicher im eigentlichen Sinne dar, da eine Energieumwandlung stattfindet und der Speicherprozess nicht reversibel ist.

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist die Speicherdauer. Eine Kurzzeitspeicherung bedeutet wenige Minuten bis Tage, während eine Langzeitspeicherung über mehrere Monate möglich sein sollte (saisonale Speicher). Für die industrielle Abwärmenutzung sind vor allem Kurzzeitspeicher relevant, da hier durch die wesentlich höhere Anzahl an Speicherzyklen, der Preis für gespeicherte Wärme bezogen auf die Lebensdauer des Speichers sinkt.



Energiespeicherdichte verschiedener Arten von Wärmespeichern bei begrenzter Temperaturdifferenz. Zum Vergleich sind stoffliche Speicher (flüssige Brennstoffe) und elektrische Speicher (Batterien) angegeben.

Schließlich unterscheidet das Temperaturniveau zwischen Wärme- und Kältespeicherung die Speicherart. Kältespeicher können in Kombination mit thermisch getriebenen Sorptionskälteanlagen eine sinnvolle Nutzung von Abwärme ermöglichen.

Zum Vergleich unterschiedlicher Speichertechnologien werden Speicherkapazität und Speicherleistung häufig auf die Masse bzw. das Volumen des Speichersystems (inkl. peripherer Komponenten) bezogen, sodass man eine gravimetrische bzw. volumetrische Speicher- bzw. Leistungsdichte erhält.

Maßgeblich für die Speichereffizienz sind Wärmeverluste an die Umgebung während des Be- und Entladens und des Speicherns (Stand- bzw. Bereitschaftsverluste). Diese sind bei kleinen Verhältnissen zwischen Speichervolumen und -oberfläche am geringsten und können durch Dämmung vermindert werden.

Wärmeverluste sind vor allem bei sensiblen und latenten Wärmespeichern relevant, da dort die Temperatur die entscheidende Größe für den Beladungsgrad des Speichers ist. Bei sorptiven Speichern kann durch die physikalische oder chemische Bindung Wärme auch langfristig nahezu verlustfrei gespeichert werden.



Fa. Leonhard Kurz in Sulzbach-Rosenberg: Einbringung eines thermischen Speichers für eine Prozessanlage zur Thermalölerhitzung, Hersteller: ENERGYNEST

Wichtige Kennwerte eines thermischen Speichers

- speicherbare Wärmemenge (Speicherkapazität [kWh])
- pro Zeiteinheit beim Laden/Entladen transportierbare Wärmemenge (Speicherleistung [kW]) und damit die Lade- und Entladedauer
- Speichertemperatur
- Speichereffizienz (Speicherwirkungsgrad)
- Lebensdauer bzw. Zyklenstabilität

Üblicherweise werden Wärmespeicher ortsfest in den Betrieb integriert. Zur Erhöhung der Flexibilität und zur Versorgung entfernter Wärmesenken ist auch der Einsatz als mobiler Speicher möglich, was bereits in verschiedenen Anwendungen demonstriert wurde. Dabei spielt die gravimetrische Speicherdichte (kWh/kg) eine besondere Rolle, weshalb dabei vor allem latente und sorptive Wärmespeicher eingesetzt werden.

Im Folgenden werden die verschiedenen Arten und deren Eigenschaften näher beleuchtet. Neben bewährten Wärmespeichertechnologien, bspw. Warmwasserspeichern, werden auch neue Technologien vorgestellt, welche sich teilweise noch in der Erprobung befinden.

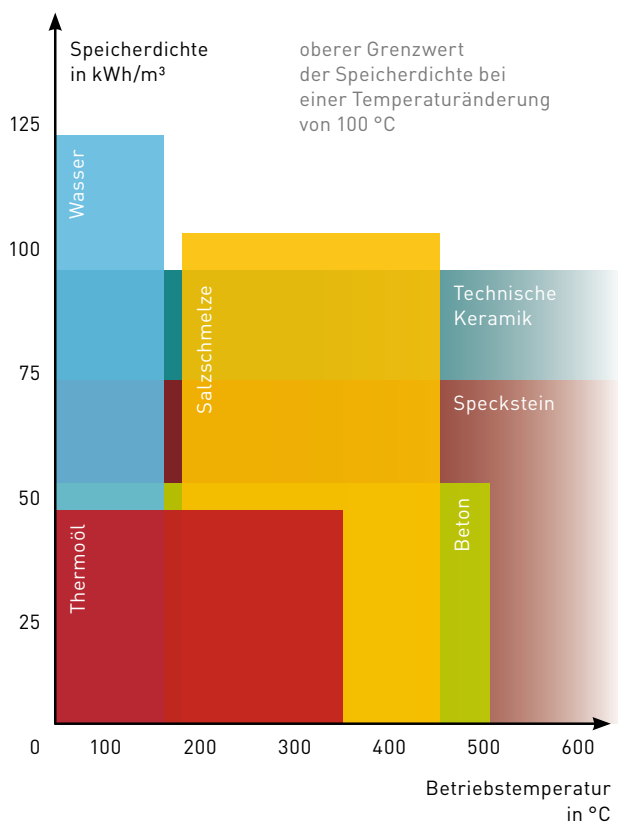
Sensible Wärmespeicher

Sensible Wärmespeicher repräsentieren die am meisten verbreitete und oftmals kostengünstigste Art von Wärmespeichern. Die Wärme wird durch Temperaturänderung des Speichermediums gespeichert. Für eine hohe Speicherdichte sollte daher die spezifische Wärmekapazität des Speichermediums möglichst hoch sein. Je größer die mögliche Temperaturänderung ist, desto mehr Wärme kann in einem festgelegten Volumen gespeichert werden. Sind nur kleine Temperaturdifferenzen verfügbar, sollte latenten Wärmespeichern der Vorzug gegeben werden.

Eine Übersicht verschiedener sensibler Speichermedien hinsichtlich Speicherdichte (bezogen auf $\Delta T_{sp} = 100 \text{ K}$) und Einsatztemperatur zeigt die folgende Grafik. Es kann zwischen festen und flüssigen Materialien unterschieden werden. Gasförmige Stoffe werden aufgrund ihrer geringen Speicherdichte nicht verwendet. Prinzipiell sind Kombinationen verschiedener Speichermedien möglich.

Flüssige Speichermedien Als flüssige sensible Speichermedien stehen vor allem Wasser, Thermoöle oder Salzschnmelzen zur Verfügung.

Wasser als Speichermedium ist am einfachsten handhabbar und weist die höchste Speicherkapazität auf ($1,16 \text{ kWh}/(\text{m}^3\text{K})$). Deshalb werden sensible Wärmespeicher bei Temperaturen bis 100°C fast ausnahmslos als Warmwasserspeicher ausgeführt. Höhere Temperaturen können zu höheren Kosten in Druckbehältern realisiert werden (Heißwasserspeicher).

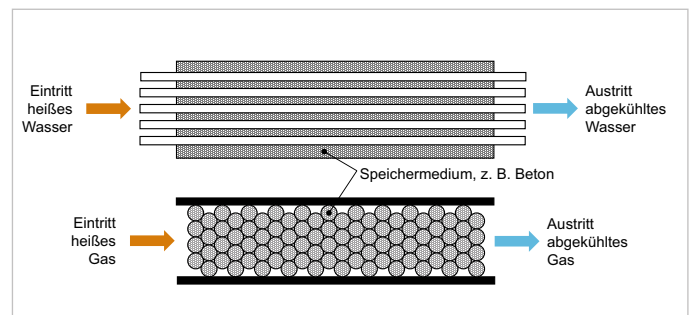


Speichermedien für sensible Wärmespeicher

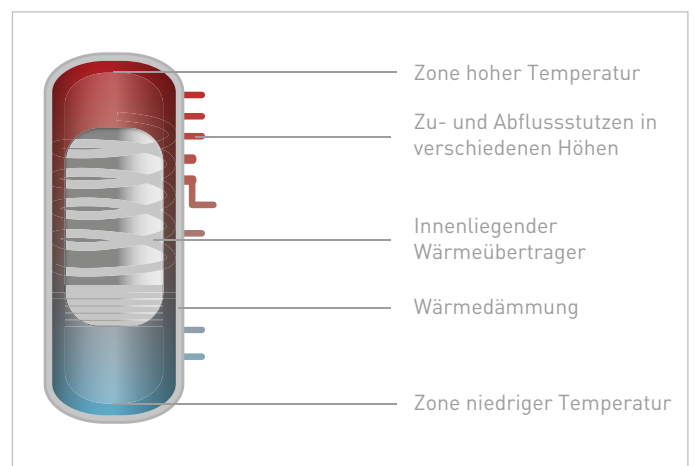
Bei höheren Speichertemperaturen werden bevorzugt Thermoöle eingesetzt (Speicherdichte $0,4\text{--}0,5 \text{ kWh}/(\text{m}^3\text{K})$). Deren maximale Anwendungstemperatur liegt in der Regel bei $350\text{--}400^\circ\text{C}$ (oberhalb: thermische Zersetzung der Öle). Salzschnmelzen (Speicherdichte $0,8\text{--}1,0 \text{ kWh}/(\text{m}^3\text{K})$) können nur oberhalb der Schmelztemperatur von $130\text{--}350^\circ\text{C}$ eingesetzt werden. Da es beim Erstarren zur Volumenkontraktion und zur mechanischen Zerstörung der Einbauten im Speicher kommt, benötigen Flüssigsalzspeicher eine Notheizung.

Feste Speichermedien Als feste Materialien können u.a. Beton, Gesteine oder Keramiken genutzt werden. Die volumetrische Speicherdichte ähnelt der von Flüssigkeiten (Stahl rund $1,1 \text{ kWh}/(\text{m}^3\text{K})$, Speckstein $0,75 \text{ kWh}/(\text{m}^3\text{K})$).

Besonders bei festen Medien sind konstruktive Maßnahmen zur Verbesserung der Wärmeübertragung zwischen Wärmeträger und Speichermedium notwendig. Sie decken einen großen Temperaturbereich ab (Keramik: $> 1.000^\circ\text{C}$), sind wie flüssige meist sehr zyklus- und langzeitstabil und eignen sich sowohl für flüssige als auch gasförmige Abwärmeströme. Dabei wird ein flüssiger Wärmeträger typischerweise in Rohren durch die Speicher Masse transportiert, gasförmige Wärmeträger strömen durch eine Schüttung aus einzelnen Speicherelementen. Alternativ können auch Zylinder oder Platten vom Gas umströmt werden.



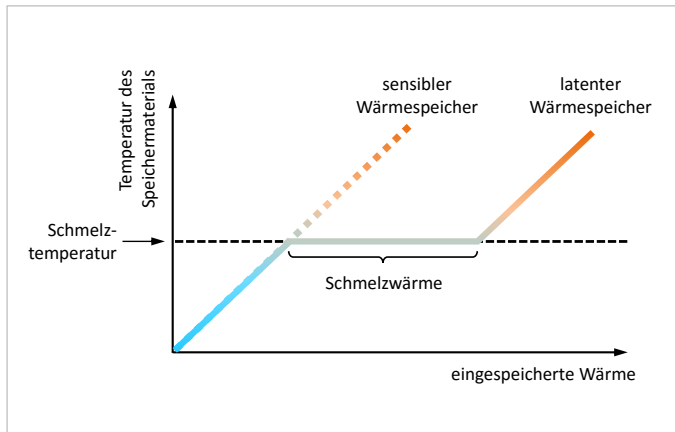
Möglichkeiten des Aufbaus eines sensiblen Wärmespeichers mit festem Speichermedium. Dargestellt ist der Beladevorgang.



Prinzipaufbau eines Warmwasserspeichers mit innenliegendem Wärmeübertrager

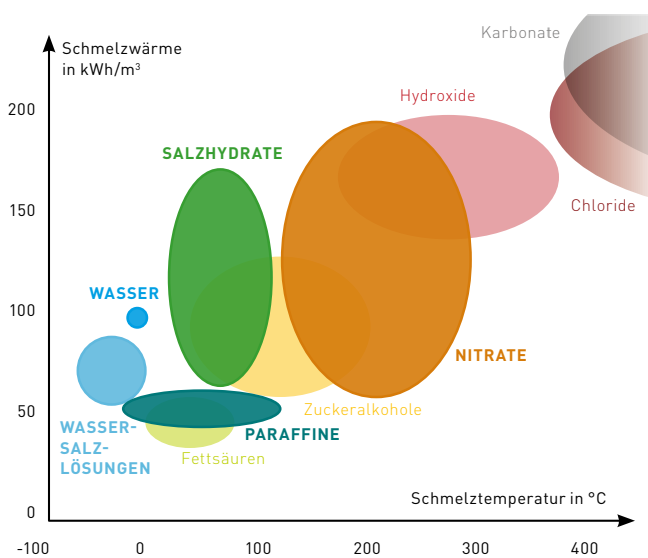
Latentwärmespeicher

Bei dieser Speicherart wird die Wärme genutzt, welche bei der Aggregatzustandsänderung des Materials aufgenommen oder abgegeben wird. Das Speichermedium wird daher als Phasenwechselmaterial (PCM, engl. Phase Change Material) bezeichnet. Im Bereich des Phasenwechsels kann viel Energie aufgenommen und abgegeben werden, wie folgende Abbildung zeigt. Beim Entladen fällt damit Wärme auf konstantem Temperaturniveau an (Schmelzwärme).



Vergleich der Speicherkapazität eines sensiblen und eines latenten Wärmespeichers. Bei latenten Speichermaterialien findet der Wärmeübergang innerhalb kleinerer Temperaturdifferenzen statt. Zusätzlich zur Latentwärme wird auch die sensible Wärme des Speichermediums genutzt. Allerdings macht sie nur einen Bruchteil der nutzbaren Wärme aus.

Als Speichermaterial stehen verschiedene Materialgruppen zur Verfügung, die mit Schmelztemperatur und volumenbezogener Schmelzwärme dargestellt sind. Mit zunehmender Schmelztemperatur steigt die Schmelzenthalpie und damit die Energiespeicherdichte.



Anwendungsbereich (Temperatur) und Speicherdichte (Schmelzwärme) unterschiedlicher Materialien für Latentwärmespeicher: Für Wasser, Wasser-Salz-Lösungen, Salzhydrate, Paraffine und Nitrate existieren kommerzielle Lösungen oder vielversprechende Pilotprojekte. Alle anderen Stoffe sind als Speichermaterialien in der Entwicklung. Mit Karbonaten und Chloriden ließen sich noch höhere Speicherdichten und Temperaturen (bis >700°C) erreichen.

Für die industrielle Abwärmenutzung sind derzeit folgende PCM von Bedeutung:

- **Paraffine:** organische Verbindungen, marktverfügbar im Temperaturbereich von 6–80°C, niedrige Speicherdichten, brennbar, ungiftig, nicht korrosiv und zyklenstabil
- **Salzhydrate:** Gemische aus einem Salz (häufig Natriumacetat) und Wasser, marktverfügbar für Raumtemperatur bzw. bis 80°C, deutlich höhere Speicherdichten bei geringeren Kosten als Paraffine, extrem korrosiv gegenüber Metallen, nur mäßig zyklenstabil und neigen beim Entladen zum Unterkühlen
- **Nitratsalze und -mischungen:** Einsatzbereich von etwa 130–400°C – daher zur Prozesswärmespeicherung gut geeignet, hohe Speicherdichten, preiswert und zyklenstabil, hoch korrosiv gegenüber Metallen
- **Wasser und Wasser-Salz-Lösungen:** für die Speicherung von Kälte bei 0 °C oder darunter (Eisspeicher), im Zusammenhang mit Abwärme nutzbar – bei der Kälteerzeugung aus Abwärme kann ein zeitlich ungünstiges Abwärmeangebot zur Kälteerzeugung als Eis gespeichert werden (Standverluste fallen dabei geringer aus, als beim Speichern der Abwärme)

PCM-Material	Typ	Temperaturbereich [°C]	Latente Wärmekapazität [kJ/kg]	Beispiele für Anwendungen
Wasser/Eis	Anorganisch	0	334	Kühlung, Gebäudetechnik
Natriumacetat-Trihydrat	Salzhydrat	58	250–300	Warmwasserspeicher
Paraffine	Organisch	20–70	150–250	Gebäudeheizung, Industrieanwendungen
Eutektische Salz-mischungen	Anorganisch	120–250	100–200	Industrielle Prozesswärme
Metalllegierungen	Metallisch	120–250	500–900	Hochtemperatur-Speicherung

Latentwärmespeicher mit dem Phasenwechsel flüssig/gasförmig (Verdampfen bzw. Kondensieren) von Wasser sind als sog. Ruths- oder Gefällespeicher bekannt und werden bereits seit Jahrzehnten als Großspeicher in Industrieanlagen eingesetzt. Im Speicher ergibt sich eine Schichtung aus siedendem Wasser und Satt Dampf. Wird zum Laden Wasserdampf zugeführt, steigt der Druck im System. Wegen der steigenden Siedetemperatur kondensiert der Dampf und erhöht den Anteil an siedendem Wasser im Speicher. Beim Entladen wird Wasserdampf entnommen. Dabei sinkt der Druck, wodurch Wasser verdampft und die Temperatur im Speicher herabgesetzt wird.

Sorptive Wärmespeicher

Bei diesem Speichertyp wird Energie nicht thermisch, sondern in Form einer umkehrbaren Reaktion zweier Stoffe gespeichert. Es können zwei Grundprinzipien unterschieden werden:

- Bei der Physisorption wird Wärme in Form von Bindungsenergie zwischen einem Gas und der Oberfläche eines Feststoffes gespeichert. Diese Wärmespeicher werden als Adsorptionsspeicher bezeichnet. Wird statt der festen eine flüssige Komponente eingesetzt, dann handelt es sich um Absorptionsspeicher.
- Bei der Chemisorption wird Wärme in Form von Reaktionswärme während einer umkehrbaren chemischen Gas-Feststoff-Reaktion gespeichert. Diese Wärmespeicher werden als thermochemische Speicher bezeichnet.

Die Vorteile sorptiver Wärmespeicher liegen in der hohen Speicherdichte, die vom verwendeten Stoffsystem abhängt, und der Tatsache, dass aufgrund des Speicherprinzips nahezu keine Selbstentladung durch Standverluste auftritt. In der Regel ist der Aufbau sorptiver Speicher wesentlich komplexer als der anderer Speichertypen, da neben dem Wärme- auch ein Stofftransport der gasförmigen Komponente realisiert werden muss. Sorptive Wärmespeicher sind daher bisher Gegenstand von Forschung und Entwicklung, wobei der praktische Einsatz in einigen Fällen bereits demonstriert werden konnte. Für einen wirtschaftlichen Betrieb ist eine hohe Anzahl an Lade- und Entladezyklen einzuplanen, um die hohen Investitionskosten auf viele Speicherzyklen umlegen zu können.

Adsorptionsspeicher verfügen über einen festen mikroporösen Stoff als Speichermedium. An dessen Oberfläche können verhältnismäßig große Mengen des Arbeitsmediums Wasserdampf angelagert (adsorbiert) werden. Bei der Anlagerung des Wasserdampfs ändert sich der Aggregatzustand des Wassers von gasförmig zu flüssig. Dabei wird die Verdampfungsenthalpie in Form von Wärme frei. Um den Speicher wieder zu regenerieren bzw. aufzuladen, wird das gebundene, flüssige Wasser durch Wärmezufuhr wieder von der Oberfläche entfernt, indem es verdampft wird.

Hauptsächlich werden Zeolithe und Silikagele als Arbeitsmittel eingesetzt. Sie sind in der Lage, bis zu 37% ihrer Trockenmasse an Wasser auf ihrer Oberfläche zu adsorbieren.

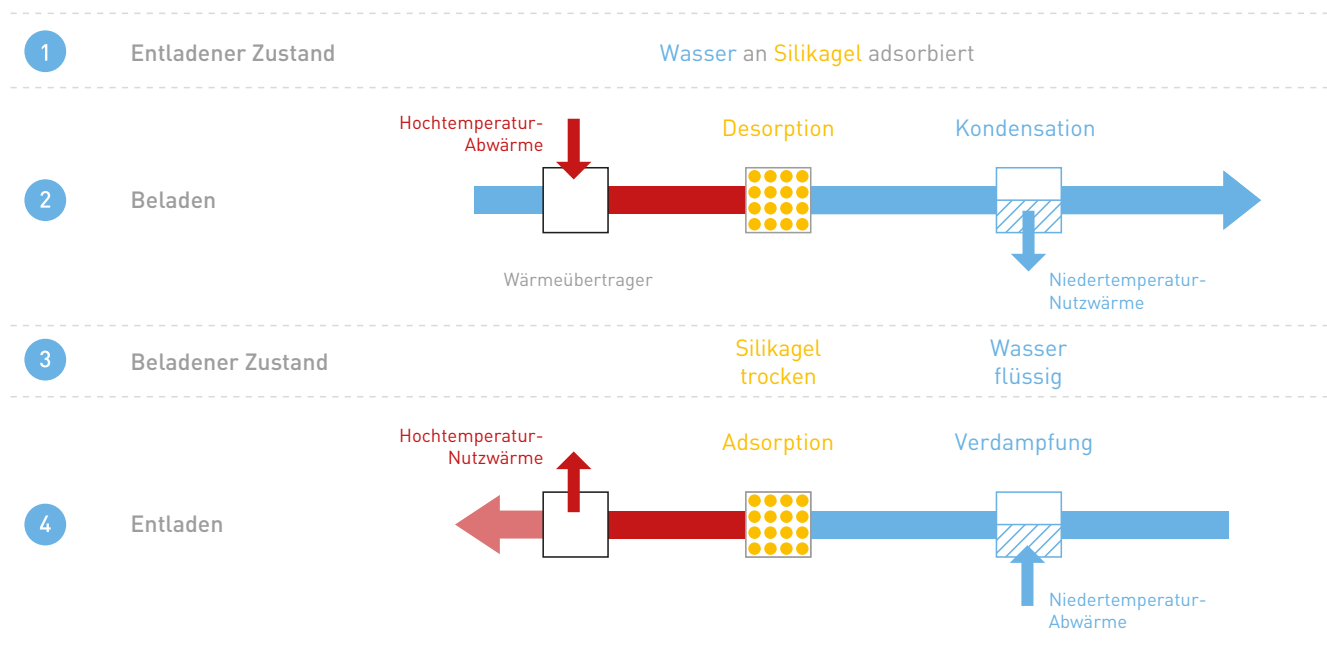
Die Abbildung rechts zeigt das Funktionsprinzip eines Adsorptionsspeichers am Beispiel des Stoffsystems Silikagel / Wasser. Das poröse Silikagel liegt als Festbettschüttung vor und wird von Luft als gasförmigen Wärmeträger durchströmt.

Im entladenen Zustand **1** ist an der porösen Oberfläche des Silikagels Wasser angelagert. Zum Beladen wird ein heißer Luftstrom durch die Schüttung geleitet **2**. Dazu kann die Luft in einem Wärmeübertrager durch Abwärme im Temperaturbereich von 100°C bis 300°C erwärmt werden. Liegt Abwärme in Form eines trockenen und sauberen Heißgases (z.B. Heißluft) vor, kann der Speicher alternativ direkt damit beheizt werden. Der Luftstrom verdampft das gebundene Wasser, kühlt sich dadurch auf 40 bis 60°C ab und strömt mit Wasserdampf gesättigt aus dem Speicher. Wird der enthaltene Wasserdampf anschließend auskondensiert, kann damit Niedertemperaturwärme gewonnen werden.

Das nach dem Beladen trockene Silikagel **3** lässt sich nahezu verlustfrei und beliebig lang lagern, wenn es luftdicht verschlossen bleibt. Zum Entladen des Speichers **4** wird Luft aus der Umgebung angesaugt und mit Wasserdampf gesättigt, wofür Niedertemperaturwärme genutzt werden kann. Die feuchte Luft strömt durch das trockene Silikagel, der Wasserdampf wird adsorbiert und die Luft durch die frei werdende Wärme erhitzt. Die nun trockene und heiße Luft strömt mit Temperaturen von bis zu 200°C aus dem Speicher. Sie kann auf direktem Weg, z.B. für Trocknungsprozesse, genutzt werden oder im Wärmeübertrager als Heizmedium für einen beliebigen Wärmeträger dienen.



sorptiver Wärmespeicher, KI-generiert mit OpenAI (2026)



Funktionsprinzip physisorptiver Speicher

2.3 Leitung und Transport von Abwärme

Zwischen Abwärmequelle und Abwärmesenke muss stets eine räumliche Distanz überwunden werden. Dies kann auf verschiedenen Arten geschehen. Ausgehend von der stoffstromgebundenen Abwärme kann das heiße Medium direkt zum Ort des Wärmebedarfs geleitet und idealerweise direkt in den Prozess eingebunden werden. Als Beispiel seien hier die Abgase aus einem Ofen genannt, die direkt in die Trocknungsmühle für die Rohstoffe geleitet werden und diese trocknen und aufwärmen.

Leitungen für große Luft- oder Abgasmengen werden oft nicht gedämmt – zu teuer. Vielleicht kommt noch hinzu, dass der leitungsgebundene Weg bis zu einer Abwärmesenke recht lang ist. In diesem Fall lohnt es sich zu prüfen, ob man die thermische Fracht mittels Wärmeübertrager an ein flüssiges Medium wie Warmwasser, Heißwasser, Dampf oder Thermoöl übertragen kann. Nachteilig wirken zwar der Temperaturverlust infolge anlagentechnischer Wärmeübertragung und durch Wärmeverluste an den Leitungen. Gerade bei kontinuierlich anfallenden und benötigten Wärmemengen kann sich das trotzdem lohnen.

Sind die Entfernungen auf dem Betriebsgelände eher gering, ist für die Wahl des Mediums der Temperaturbereich ausschlaggebend.

- Bei der Anwendung von Dampf sind Sicherheitsanforderungen zu beachten, da hier hohe Drücke vorherrschen (geschultes Personal, regelmäßige technische Prüfungen).
- Thermoöl benötigt dagegen zwar keine hohen Drücke im Prozess, birgt bei Leckagen aber die Gefahr von Grundwasser- oder Bodenverseuchung. Es wird daher oft nur betriebsintern in überwachbaren Bereichen eingesetzt.
- Ist die Wärme an Feststoffe gebunden, könnte man prüfen, ob man diese noch warm zur Abwärmesenke transportieren kann – ein Beispiel: heiße Bauteile verlassen einen Industrieofen und werden zur Restabkühlung in eine zu beheizende Lagerhalle transportiert (allerdings zu beachten: Arbeitsschutz).

Dampf, Heißwasser und Warmwasser eignen sich also für die externe Abwärmennutzung über lange Strecken, wenn eine regelmäßige dauerhafte Wärmeabnahme in ausreichender Menge vorhanden ist (z. B. in der Fernwärmeversorgung durch Stadtwerke). Manchmal ist ein Leitungsbau aber nicht möglich: entweder ist die Menge an Abwärme zu gering, die Entfernung zur Abnahmestelle zu groß oder die Akzeptanz der betroffenen Grundstückseigentümer nicht gegeben. Dann bleibt immer noch zu prüfen, ob mobile Speicher den Wärmetransport per LKW, Zug oder Schiff übernehmen können.

Wärmetransport durch Wärmeleitungen

Zum leitungsgebundenen Wärmetransport gehört neben der Leitung auch die Wärmedämmung, die Verlegung oder Aufständerung, die Ausgleichsbögen (Ausdehnung, thermische Spannungen), Ausgleichsgefäße, Pumpen, Überdruckventile sowie Mess- und Regeltechnik. Heute existieren Angebote, bei denen mehr oder weniger alles in einem einzigen teils flexib-

len System verbunden ist. Je kälter das Medium, desto einfacher das System – aber auch umso geringer die Wärmemenge, die pro Volumen bzw. Rohrdurchmesser transportiert werden kann. Insbesondere für die externe Nutzung industrieller Abwärme in Verbindung mit Netzen der Stadtwerke kommen bislang folgende Medien zum Einsatz:

Wärmeträger	Temperaturbereich	Druckbereich	Wärmeverluste pro Meter (W/m)	Dämmwert Isolation (W/mK)	Übliche Transportstrecke	Baukosten (€/km)	Baukosten (€/m)
Warmwasser	30–90 °C	1–6 bar	5–15 W/m	0,026–0,045	bis zu 10 km	500.000–1.000.000 €	500–1.000 €
Heißwasser	90–180 °C	6–25 bar	15–30 W/m	0,026–0,045	bis zu 50 km	700.000–1.200.000 €	700–1.200 €
Wasserdampf	180–500 °C	10–100 bar	30–50 W/m	0,026–0,045	bis zu 100 km	1.000.000–2.000.000 €	1.000–2.000 €

Eigenschaften von wasserbasierten Wärmeträgern für den Wärmetransport

Welcher Temperaturbereich für die Einspeisung in ein bestehendes Fernwärmenetz infrage kommt, ist im Einzelfall zu klären. Sofern die vom Wärmenetzbetreiber geforderte Vorlauftemperatur nicht eingehalten werden kann, bleibt immer noch die Prüfung der Einspeisemöglichkeit über den Rücklauf.

Prinzipiell kommt natürlich auch der Einsatz einer Wärmepumpe infrage, diese Variante ist allerdings recht kostenintensiv und mit Blick auf den Trend hin zu Kaltwärmenetzen heute eher nur noch selten zweckmäßig.

Kaltwärmenetze

Zunehmend werden auch sogenannte kalte Wärmenetze gebaut und eingesetzt, um Abwärme auf einem niedrigen Temperaturniveau wie z. B. aus Kühlungen nutzen zu können.

Diese kalte Abwärme auf einem Niveau von 25–45 °C ist bei Unternehmen mit Kühlbedarf oft in großen Mengen vorhanden.



„Kaltes“ Nahwärmenetz sorgt für Wärme (und Strom),
Verbandsgemeinde Offenbach
an der Queich

Kostenrelevante Vorteile:

- geringe Wärmeverluste aufgrund geringer Vorlauftemperatur
- weniger Wärmedämmung erforderlich
- deutlich besserer Wirkungsgrad durch Nutzung der Wärmepumpentechnologie beim Endkunden
- geringe Betriebskosten in der Verteilung und Nutzung

Kostenrelevante Nachteile:

- große Rohrquerschnitte
- große Pumpenleistungen für große Mengen an Wärmeträger
- Investitionsmehrkosten auch beim Endkunden (Wärmepumpe und Niedertemperatursysteme statt Heizkessel und handelsübliche Heizkörper)

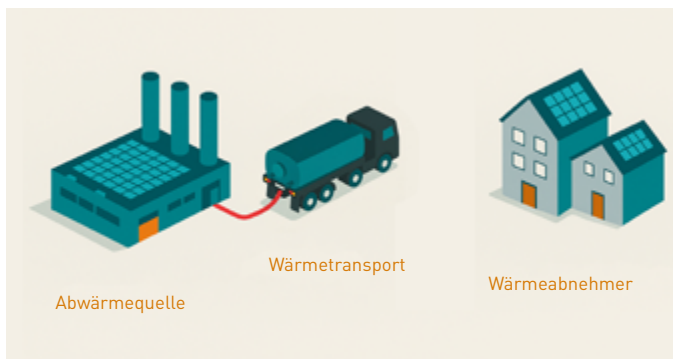
Mobiler Wärmetransport

Wenn die Kosten für den Bau einer Fernwärmeleitung aufgrund Entfernung, Gelände oder Zulassungsverfahren zu hoch sind, kann die Wärme mittels eines mobilen Wärmespeichers auch zum Abnehmer gefahren werden. Ein Speicher wird an der Abwärmequelle mit Energie geladen, dann zum Verbraucher gefahren und dort entladen. Bei konstantem Wärmebedarf sind dann mindestens zwei Speicher notwendig.

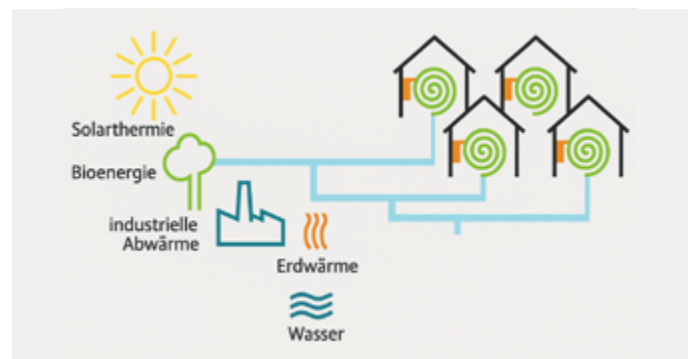
Hierzu sind bereits verschiedene Systeme auf dem Markt. Im Niedrig-Temperaturbereich werden Latentspeichermaterialien eingesetzt, im höheren Temperaturbereich (z. B. von Abgasen) Feststoffspeicher mit entsprechender Materialkombination.

Die Wirtschaftlichkeit dieser Energietransportmethode ist neben den Speicherkosten auch von der Projektgestaltung bzw. den Transportkosten abhängig. So werden z. B. Transportkosten eines Landwirtes von seiner Biogasanlage zum Gemeindeamt anders bewertet als die einer Spedition, welche dafür einen LKW bereithält.

Mit zunehmenden steigenden direkten und indirekten Energiekosten ist von einer wachsenden Wirtschaftlichkeit und einem erhöhten CO₂-freien Wärmebedarf auszugehen. Laut Herstellerangaben kann der Transport auf einer Entfernung von bis zu 20 km zwischen Quelle und Senke schon wirtschaftlich sein.



Kommt leitungsgebundener Wärmetransport nicht infrage, kann ein mobiler Speicher die Lücke schließen.



Das Prinzip der kalten Nahwärme

Hersteller	Systemname	Speichertechnologie	Speicherkapazität	Temperaturniveau	Transportkosten	Kosten pro kWh Wärme pro km	Lade-/Entladeleistung
Axiotherm GmbH	Mobile Wärmespeicher	PCM-Hybrid-Speicher mit Phasenwechselmaterialien (Salzhydrate, Paraffine)	bis zu 2 MWh (bei 25 K Temperaturspreizung)	Schmelztemperaturen von 58°C und 84°C; weitere Temperaturen zwischen -22°C und 119°C auf Anfrage	Nicht angegeben	Nicht angegeben	Nicht angegeben
swilar eetec GmbH	Mobiler Wärmetransportcontainer	Latentwärmespeicher mit Natriumacetat-Trihydrat als Speichermedium	rund 2,5 MWh	Schmelzpunkt bei 58°C	Größter Kostenfaktor ist die Logistik mit einem Schwertransport	Wärmelieferpreise von 7–9 Cent pro kWh	Be- oder Entladung jeweils ca. 8 Stunden
ENERMOVE	ENERMOVE 20 HC	Makroverkapselte PCMs	1,7–2,2 MWh	Nicht angegeben	Nicht angegeben	Nicht angegeben	Variable Leistungsanpassung durch makroverkapselte PCMs
Kraftblock	Mobiler Hochtemperaturspeichercontainer	Hochtemperatur-Feststoffspeicher mit recycelten Materialien	mehrere MWh (genaue Kapazität nicht angegeben)	Bis zu 1.300°C	Nicht angegeben	Nicht angegeben	Ab 300 kW Lade-/Entladeleistung
regryd GmbH	regryd-Speicher	Hochtemperatur-Langzeitspeicher mit Basalt-Gestein	Bis zu 405 kWh/m ³	Bis zu 850°C	Nicht angegeben	Nicht angegeben	Nicht angegeben

3 Indirekte Abwärmenutzung

Abwärme kann noch mehr, als nur Stoffe erwärmen: Wärmepumpen machen Abwärme auf höherem Temperaturniveau verfügbar, und Abwärme selbst kann als treibende Kraft genutzt werden, um Kälte oder Strom zu erzeugen.

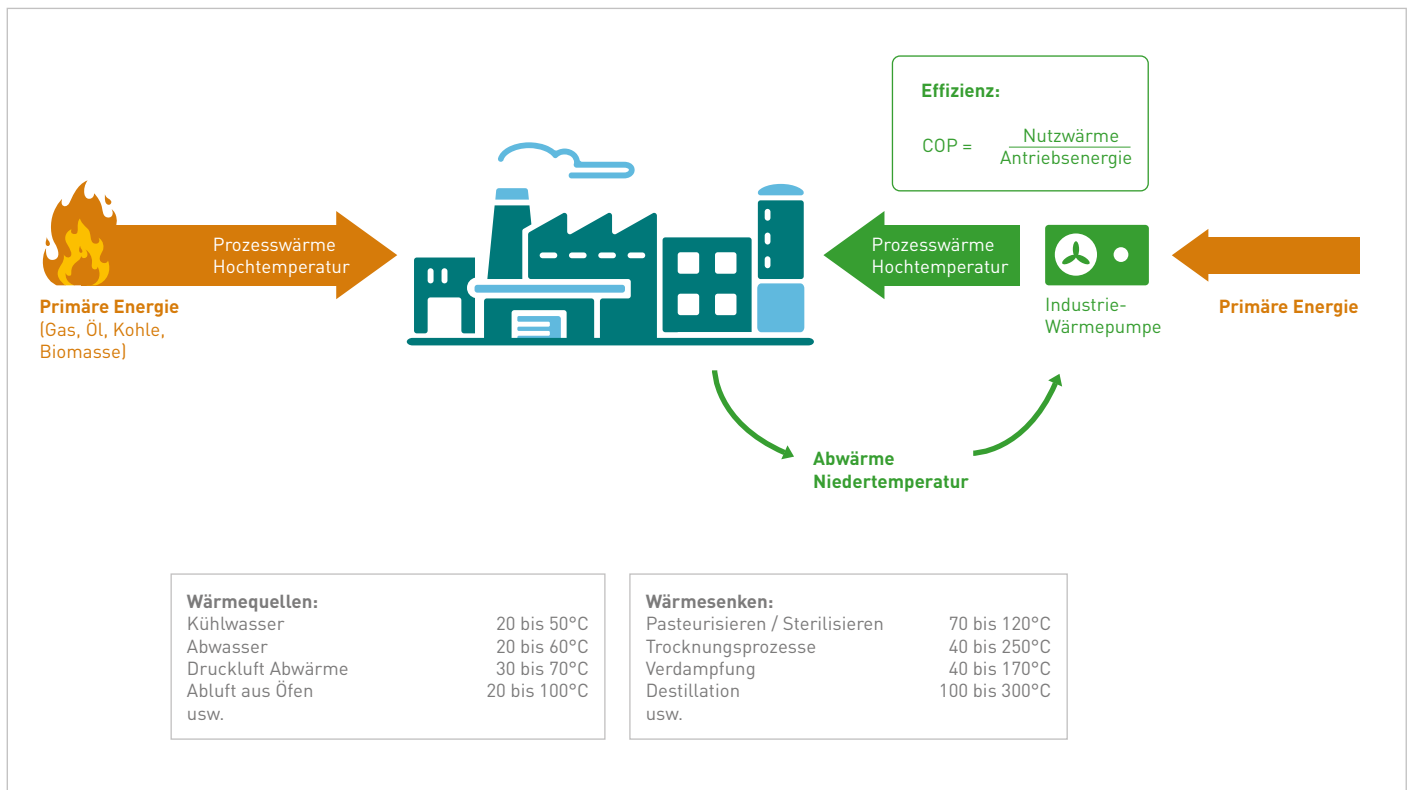
3.1 Indirekte Abwärmenutzung

Bei der indirekten Abwärmenutzung wird die Abwärme auf ein anderes Temperaturniveau transferiert oder in Antriebskraft umgewandelt. Das Temperaturniveau kann dabei durch Wärmepumpen angehoben oder bei Anwendung von Kältemaschinen gesenkt werden.

Ein anderer Weg ist die Umwandlung von Wärme in Strom mittels eines Generators. Es können aber auch Maschinen, wie z. B. Kompressoren, direkt angetrieben werden. Die indirekte Nutzung von Abwärme ist stets mit einem größeren technischen Aufwand verbunden als deren direkte Nutzung. Damit gehen höhere Investitions-, Wartungs- und Betriebskosten einher.

Außerdem ist die Umwandlung der Energie thermodynamisch bedingt mit Verlusten verbunden, da der Wirkungsgrad kleiner 1 ist. Sofern eine solche Wahl zwischen direkter und indirekter Nutzung besteht, ist in der Regel die direkte Nutzung der indirekten vorzuziehen.

Dennoch sollte auch die indirekte Nutzung von Abwärme konzeptionell stets mitbetrachtet werden. Durch Wärmepumpen können Temperaturverluste durch Wärmeübertrager oder Speicherung ausgeglichen werden. Eine Stromerzeugung kann zur Eigenstromerzeugung bei Dunkelflauten oder ähnlichem unter Umständen eventuell strategisch sinnvoll sein.



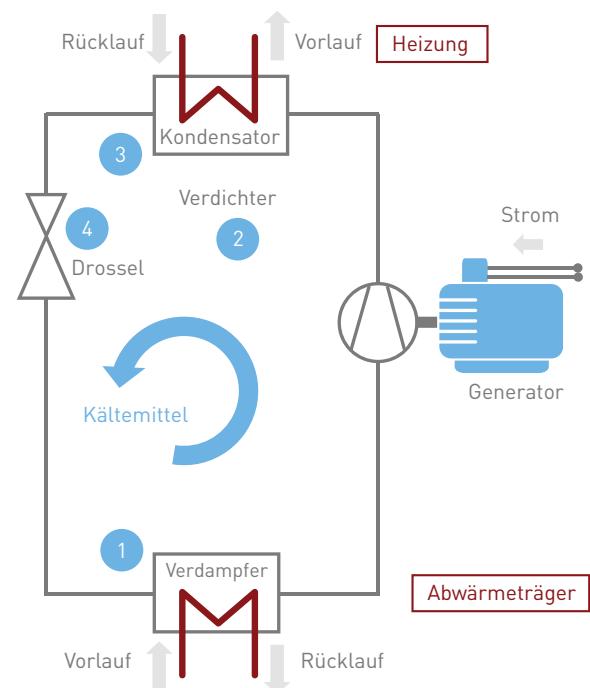
Prinzip der innerbetrieblichen Abwärmenutzung mittels industrieller Wärmepumpen

3.2 Wärmepumpen und Kältemaschinen

Die nachfolgend beschriebenen Wärmepumpen und Kältemaschinen dienen ausschließlich der indirekten Nutzung industrieller Abwärme. Alle Anlagen nutzen den linksläufigen Clausius-Rankine-Prozess (den sog. Kaltdampfprozess), bei dem die Teilprozesse der Wärmezufuhr bzw. Wärmeabfuhr mit einer Verdampfung bzw. Kondensation des Arbeitsmittels (= Kältemittel) einhergehen.

Kompressionswärmepumpen werden dazu genutzt, das Temperaturniveau einer Abwärmequelle zu Heizzwecken anzuheben. Im Gegensatz zum Kreisprozess in Kältemaschinen läuft dieser hier vollständig oberhalb der Umgebungstemperatur ab. Die notwendige mechanische Arbeit wird in der Regel von einem elektrisch angetriebenen Verdichter aufgebracht.

Bei Ab- bzw. Adsorptionswärmepumpen kann die wertvolle Verdichterarbeit weitgehend durch Zufuhr von Abwärme oder Verwendung eines Brennstoffes (Gaswärmepumpe) ersetzt werden, man spricht von einem „thermischen Verdichter“. Ab- bzw. Adsorptionskältemaschinen können auf diese Weise mithilfe von Abwärme Kälte erzeugen.



WÄRMEPUMPENPROZESS MIT KOMPRESSOR

- 1 Abwärmenutzung zur Verdampfung des Kältemittels
- 2 Verdichtung des Dampfes zur Temperaturerhöhung
- 3 Abgabe von Wärme an ein Heizsystem
- 4 Druck- und Temperaturminderung des Kältemittels

Schematische Darstellung einer Kompressionswärmepumpe

Kompressionswärmepumpen

Wärmepumpen können die Temperatur eines Abwärmestromes erhöhen. Die wirtschaftlich sinnvolle Temperaturerhöhung liegt dabei in der Regel bei 50–60 K. Kompressionswärmepumpen sind die am weitesten verbreiteten Wärmepumpen. Sie sind relativ einfach aufgebaut und in einem weiten Leistungsbereich am Markt verfügbar.

Das Schema rechts zeigt die wesentlichen Komponenten einer Kompressionswärmepumpe. Im Verdampfer 1 wird das Arbeitsmittel bei niedrigem Druck und niedriger Temperatur verdampft. Die dazu benötigte Wärme wird einer Abwärmequelle entzogen, wobei es sich um einen gasförmigen oder flüssigen Abwärmeträger (Abluft, Abwasser) handeln kann.

Das verdampfte und damit gasförmige Arbeitsmittel wird im Verdichter 2 unter Zufuhr von Arbeit (elektrischer Strom) komprimiert, dabei steigt neben dem Druck auch die Temperatur. Im Verflüssiger bzw. Kondensator 3 gibt das Arbeitsmittel danach bei hohem Druck Wärme ab, die dem Heizsystem zugeführt wird. Dabei kondensiert das Arbeitsmittel vollständig. In einem Drosselventil 4 verringern sich Druck und Temperatur des Arbeitsmittels anschließend wieder auf Verdampfenniveau und der Kreisprozess wird erneut durchlaufen.

Als Arbeitsmittel werden sog. Kältemittel eingesetzt, die – abhängig vom jeweiligen Druck – bereits bei niedrigen Temperaturen verdampfen. Typische Kältemittel sind Ammoniak für Großanlagen und sog. Sicherheits-Kältemittel (z.B. R134a oder R152a) für kleinere Wärmepumpen.



Großwärmepumpe von Ochsner

Wärmepumpen sind dann interessant, wenn die Anforderung an das Temperaturniveau einer möglichen Abwärmesenke höher ist als die der Quelle.

Weiterhin sind Wärmepumpen eine gute Möglichkeit die Temperaturverluste durch Wärmetauscher, Speicher o.ä. auszugleichen und dem Prozess wieder die entnommene Abwärme auf gleichem oder höherem Temperaturniveau zuzuführen.

Technologisch muss eine Wärmepumpe mit einem zum Temperaturbereich passenden Arbeitsmittel betrieben werden. Standardwärmepumpen kommen bis zu einer Vorlauftemperatur von ca. 65 °C zum Einsatz, Hochtemperatur-WP bis 100 °C und Höchst-Temperatur-WP bis 165 °C. Am weitesten verbreitet sind dabei Kompressionswärmepumpen, die in diesem Kapitel betrachtet werden.

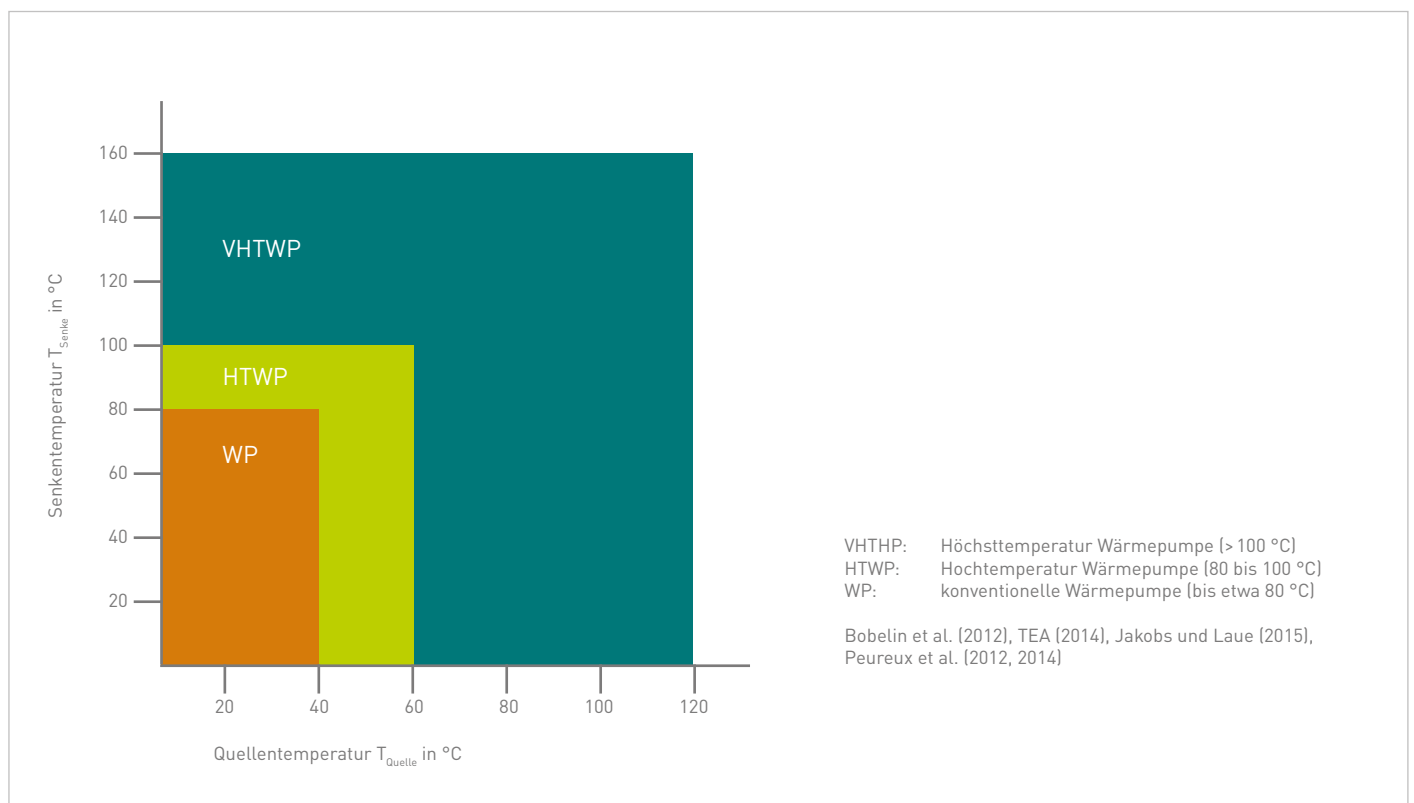
Die Effizienz einer Kompressionswärmepumpe wird durch die sog. Leistungszahl (häufig auch COP, coefficient of performance) beschrieben.

$$\epsilon = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{\text{Heizwärme}}{\text{Verdichterarbeit}} = \frac{Q_H}{W_V}$$

Eine Leistungszahl von 4 bedeutet, dass aus 1 kWh elektrischer Verdichterarbeit 4 kWh Heizwärme erzeugt und dabei der Abwärmequelle (4-1) kWh = 3 kWh Wärme entzogen werden.

Kompressions-Wärmepumpen arbeiten dann wirtschaftlich, wenn deren Leistungszahl größer ist als das Verhältnis zwischen den Strom- und Wärmegestehungskosten eines Unternehmens. Eine Wärmepumpe mit einer Leistungszahl 4 kann z. B. eine Kilowattstunde Wärme für 5 Cent erzeugen, wenn der Strompreis 20 Cent /kWh beträgt. Wenn die Kosten alternativ erzeugter Wärme (Gaskessel) höher liegen, dann ist die Wärmepumpe wirtschaftlich (ohne Invest- und sonstige Betriebskosten).

Der COP ist immer abhängig von der Temperaturerhöhung, die eine Wärmepumpe erzeugen soll. Handelt es sich um kleine Temperaturerhebungen kann der COP mit 8 sehr hoch sein, während bei hohen Anforderungen zur Temperaturerhöhung der COP und damit die Wirtschaftlichkeit stark nachlässt.



Entwicklung der Temperaturniveaus für Kompressionswärmepumpen

Mögliche Anwendungsfälle für Wärmepumpen

Wärmequellen:

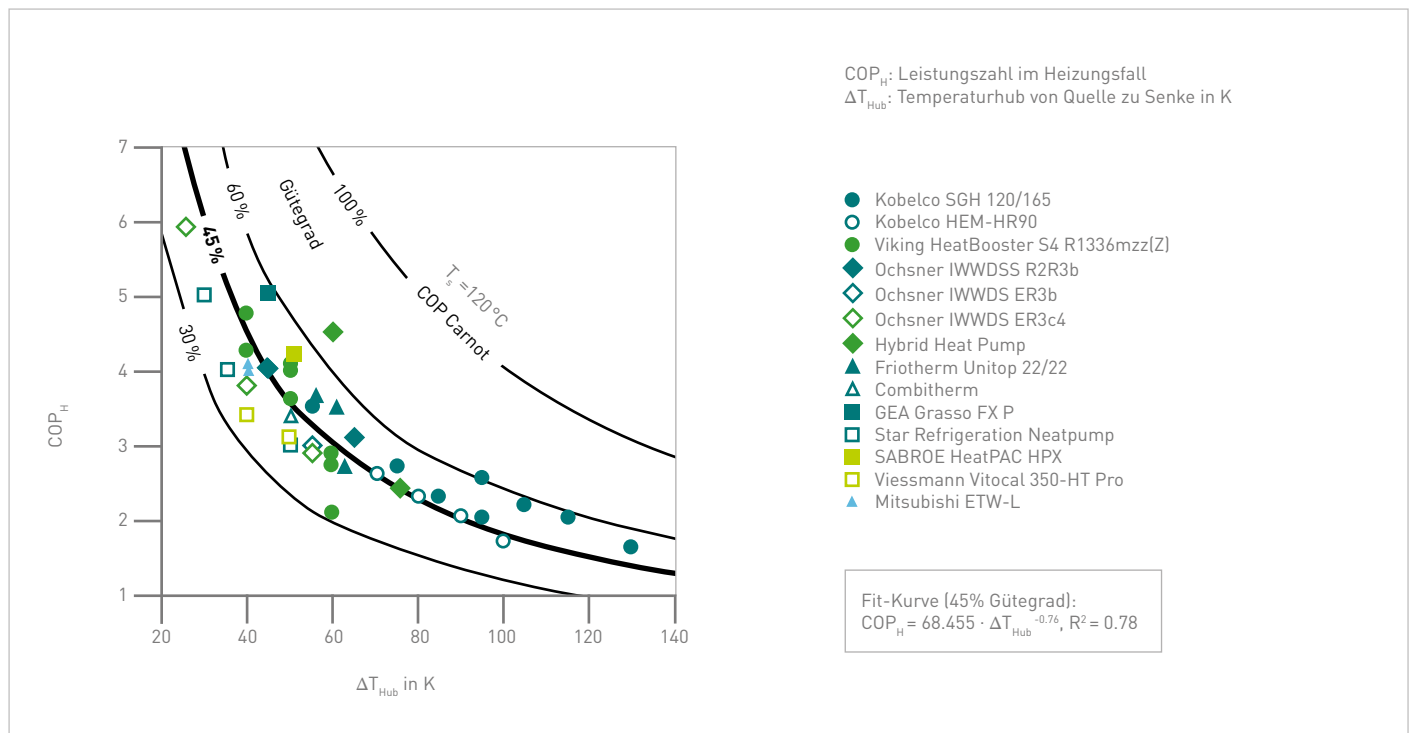
- Kühlwasser
- Abwasser
- Druckluft Abwärme
- Abluft aus Öfen

Abwärmesenken:

- Gebäudebeheizung,
- Brauchwassererwärmung
- Frischluftvorwärmung
- Vorwärmung Trocknungsprozesse



industrielle Großwärmepumpe im Einsatz, Standort Dresden



COPs verschiedener industrieller HTWP Produkte in Funktion vom Temperaturhub

Hochtemperaturwärmepumpe

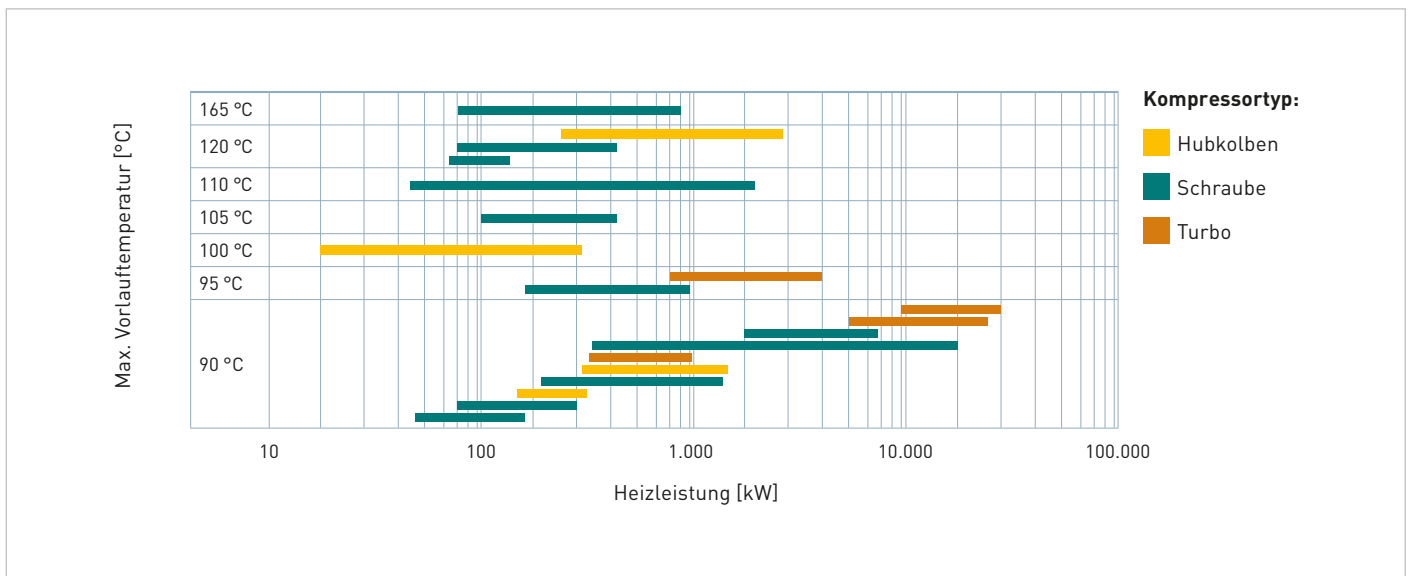
Mit fortschreitender Forschung und Entwicklung sind Hochtemperaturwärmepumpen in einem breiten Temperatur- und Leistungsspektrum marktverfügbar und für Vorlauftemperaturen von bis zu 165 °C vorhanden. Unabhängig vom eingesetzten Verdichter ist auch hier die Wirtschaftlichkeit grundsätzlich von der Temperaturerhöhung abhängig. Bei einem Temperaturhub von 40 bis 95 °C können COP von 2,4 bis 5,8 realisiert werden.

Durch die höheren Vorlauftemperaturen von über 100 °C erweitert sich das Anwendungsspektrum. Damit ist die Wärmepumpe nun auch für viele industrielle thermische Prozesse wie in der Papier-, Lebensmittel- oder metallverarbeitenden Industrie für die Abwärmenutzung interessant.

Einsatzgebiete können sein:

- Heißluftzerzeugung und Luft-Vorwärmung für Trocknungsprozesse (Holz, Papier, Klärschlamm, Stärke, Ziegel, Tiernahrung)
- Niederdruckdampf für die Sterilisation und Pasteurisierung von Lebensmitteln
- Heißwassererzeugung für Wasch- und Reinigungsprozesse
- Wärmerückgewinnung aus Abgaskondensation von Biomasseverbrennungen oder Trocknern
- Vorwärmung von Kunststoffrohstoff bei der Spritzgusserstellung

Ein weiterer Anwendungsfall von Hochtemperatur-Wärmepumpen ist die Temperaturanhebung von industrieller Abwärme, z. B. aus Kühlprozessen oder Abgaskondensation, für die Einspeisung in Nah- und Fernwärmenetze (z. B. von Stadtwerken und Kommunen) mit deren hohen Temperaturanforderungen (90–130 °).



Auswahl auf dem Markt verfügbarer Wärmepumpen, Quelle: Cordin Arpagaus (2019), grafische Darstellung: Deutsche Energie-Agentur (dena)

Technologie Reifegrad von Wärmepumpen (Tabelle rechts):

- konventionelle Wärmepumpen < 80°C, etabliert in der Industrie
- kommerziell erhältliche HTWP 80–100°C, Schlüsseltechnologie
- Prototypenstatus, Technologieentwicklung, HTWP 100–140°C
- Forschung im Labormaßstab, Funktionsmodelle, Proof of Concept, HTWP > 140°C

Absorptionswärmepumpe und -kältemaschine

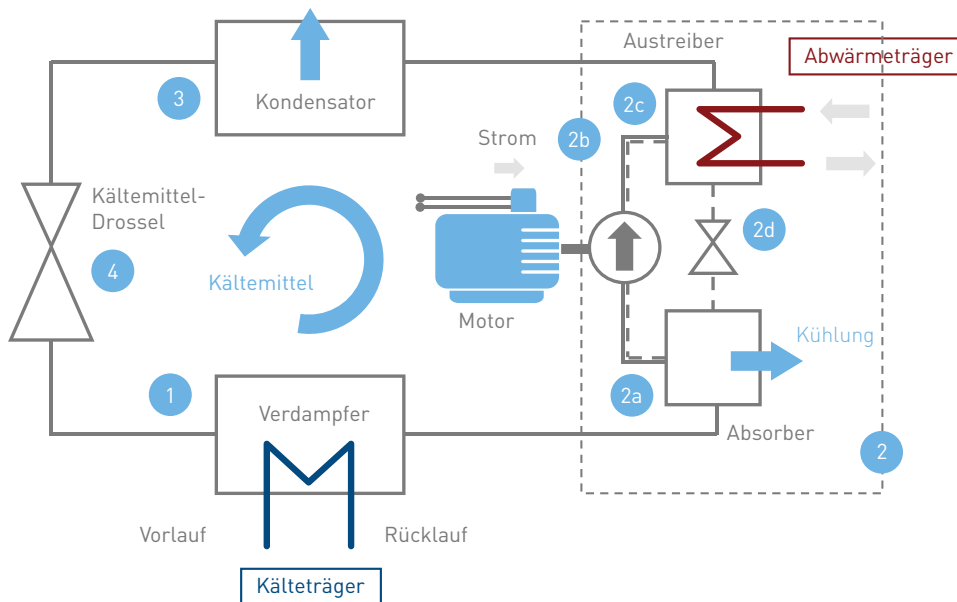
Absorptionswärmepumpen bzw. -kältemaschinen besitzen anstelle des mechanischen Verdichters einen sog. thermischen Verdichter. Dieser besteht aus vier Komponenten, dem Absorber, der Lösungsmittelpumpe, dem Austreiber und dem Lösungsmittel-Expansionsventil. Die restlichen Komponenten des Kreislaufes (Verdampfer, Verflüssiger, Kältemittel-Expansionsventil) entsprechen denen der Kompressionsanlagen.

Der Vorteil dieser Technologie besteht darin, dass der Anteil an mechanischer Antriebsleistung, der elektrisch zugeführt werden muss, gering ist. Ein Großteil der Antriebsleistung kann auf thermischem Weg aus Abwärme anderer Prozesse bereitgestellt werden. Die Abbildung unten zeigt den Prozess schematisch am Beispiel einer Absorptionskältemaschine.

Im Verdampfer **1** wird das Kältemittel bei niedrigem Druck verdampft, die dazu erforderliche Wärme wird einem Kälte-träger entzogen (z. B. Kaltwasser zur Klimatisierung). Der Kältemitteldampf gelangt in den Absorber **2a** wo er vom flüssigen Lösungsmittel absorbiert wird. Dabei wird Wärme freigesetzt,

die an ein Kühlsystem abgeführt werden muss. Die kältemittelreiche Lösung wird dann durch eine Pumpe **2b** mit geringer Leistung auf Kondensatordruck komprimiert und in den Austreiber **2c** transportiert.

Als Arbeitsmittelgemische (Kältemittel / Lösungsmittel) kommen ausschließlich Wasser/Lithiumbromid ($\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$) bzw. Ammoniak/Wasser ($\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$) zur Anwendung. $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ -Absorptionsanlagen sind aufgrund des großen Dampfdruckunterschiedes beider Stoffe einfacher aufgebaut und damit kostengünstiger, erreichen jedoch wegen des Wassers als Kältemittel nur Verdampfertemperaturen oberhalb 0°C (Klimakälteerzeugung). $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ -Absorptionsanlagen können Kälte bis -30°C erzeugen, erfordern jedoch einen technologisch sehr aufwendigen Austreiber (mehrstufige Verdampfung, sog. Rektifikation).



KÄLTEMASCHINENPROZESS MIT THERMISCHEM VERDICHTER

- 1** Erzeugung von Kälte bei Verdampfung des Kältemittels
- 2** thermische Verdichtung
 - 2a** Absorption des Kältemitteldampfes in einer Lösung
 - 2b** energieeffiziente Verdichtung der Lösung auf Kondensatordruck
 - 2c** Abwärmennutzung zum Austreiben des Kältemittels aus der Lösung
 - 2d** Rückführung des Lösungsmittels in den Absorber durch ein Drosselventil
- 3** Abgabe niedertemperierter Abwärme am Kondensator (ggf. zu Heizzwecken)
- 4** Druck- und Temperaturminderung des Kältemittels

Prinzip einer Absorptions-Kältemaschine

Aufgrund weniger beweglicher Bauteile haben Absorptionskältemaschinen und -wärmepumpen lange Standzeiten und einen geringen Wartungsbedarf.

Absorptionskältemaschinen benötigen relativ niedrige Temperaturen im Austreiber, sodass ein Betrieb mit Niedertemperaturabwärme (z. B. Heißwasser ab 80 °C oder Niederdruck-Abdampf) möglich ist. Die Erzeugung von Kälte aus Wärme bezeichnet man als (Kraft-)Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK, wenn Abwärme aus Stromerzeugung verwendet wird).

Die Effizienz einer Absorptionskältemaschine wird durch das Wärmeverhältnis ζ beschrieben. Die Kennzahl setzt die zur Verfügung gestellte Kälte zur Antriebswärme – dem Anteil der verfügbaren Abwärme, der im Austreiber genutzt werden kann – ins Verhältnis:

$$\zeta = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{\text{Kälte}}{\text{Antriebswärme}} = \frac{Q_K}{Q_{Ab}}$$

Der Wert des Wärmeverhältnisses ist häufig kleiner eins. Das bedeutet, dass eine größere Wärmemenge eingesetzt werden muss, als Kälte durch die Anlage zur Verfügung gestellt wird. Dies kann für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Bedeutung sein, wenn eine alternative Nutzungsoption für die Abwärme zur Verfügung steht – z. B. wenn die Abwärme stattdessen auch Erdgas zu Heizzwecken ersetzen könnte – und abgewogen werden muss, welche Nutzungsoption vorzuziehen ist.

Bei der Kühlung des Absorbers und des Kondensators wird Wärme abgeführt, die zur Verbesserung der Effizienz für eine Niedertemperaturheizung genutzt werden kann.

Für große Temperaturspreizungen zwischen Kälte-träger und Kondensator-Kühlmittel können mehrstufige Anlagen eingesetzt werden.

Absorptionskältemaschine

Leistungsbereich	5 kW bis 12 MW
Spezifische Investkosten	200... 1.250 €/kW _{th}
Abwärmeträger	Flüssigkeit, Dampf
Abwärmetemperaturniveau	ab 70 °C
Wärmeverhältnis	0,5 ... 0,8

Die Austreibertemperatur liegt immer über der des Kondensators. Da bei Absorptionswärmepumpen die Kondensatorabwärme genutzt werden soll – z. B. zur Heizwassererzeugung bis 65 °C – muss Austreiberheizwärme auf einem deutlich höheren Temperaturniveau zur Verfügung stehen (größer 120 °C). Zur Beheizung wird deshalb häufig die Verbrennung eines fossilen oder regenerativen Brennstoffes genutzt. Erdgas beheizte Absorptionswärmepumpen heißen auch kurz Gaswärmepumpen.



Absorptionskältemaschine (WEGRACAL SE 200) mit Stoffpaarung Wasser/LiBr und 200 kW Kälteleistung (Kühlwasser bei 9 °C). Bestehend aus Verdampfer-Absorber-Einheit (vorn) und Kondensator-Austreiber-Einheit, heißwasserbetrieben (266 kW, 86 °C, $\zeta=0,75$). Quelle: istock/imantsu

Die Effizienz einer Absorptionswärmepumpe wird ebenfalls durch ein Wärmeverhältnis beschrieben, welches hier speziell Heizzahl genannt wird.

$$\zeta = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{\text{Heizwärme}}{\text{Austreiberwärme}} = \frac{Q_H}{Q_{\text{Aus}}}$$

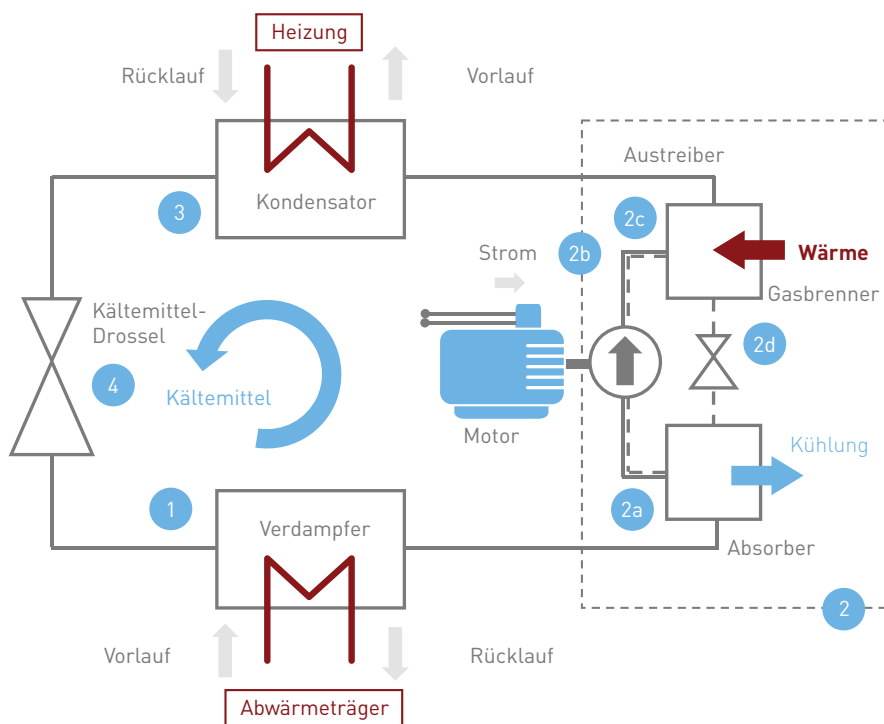
Die Heizzahlen sind größer eins (im Bereich um 1,5).

Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten, industrielle Abwärme mit einer Absorptionswärmepumpe zu nutzen. Als Verdampfer-Wärmequelle eignen sich aufgeheizte Raumluft (diffuse Abwärme), Niedertemperaturwärme eines Abwärmeträgers (z.B. Warmwasser) oder auch eine externe Wärmequelle (Brunnen, Erdreich).

Ziel ist meist die Erzeugung von Heißwasser für eine Heizung. Man unterscheidet je nach Wärmequelle Luft / Wasser- und Wasser / Wasser-Absorptionswärmepumpen. Als Austreiber-Heizmedium kann Brennstoff (Gaswärmepumpe) oder Hochtemperatur-Abwärme (z. B. Prozessabdampf) verwendet werden. Die höchste Effizienz lässt sich erreichen, wenn auch die Absorberabwärme zum Heizen genutzt wird (Parallel- oder Reihenschaltung Kondensator/Absorber).

Direkt befeuerte Absorptionswärmepumpe

Leistungsbereich	10 kW bis 20 MW
Spezifische Investkosten	500... 1.200 €/kW _{th}
Abwärmeträger	Flüssigkeit
Abwärmetemperaturniveau	bis 200 °C
Heizzahl	1,4 ... 2,2



GASBETRIEBENER WÄRMEPUMPENPROZESS

- 1 Verdampfung des Kältemittels durch Nutzung von Abwärme
- 2 thermische Verdichtung
 - 2a Absorption des Kältemitteldampfes in einer Lösung
 - 2b energieeffiziente Verdichtung der Lösung auf Kondensatordruck
 - 2c Austreiben des Kältemittels aus der Lösung mit Gasbrenner
 - 2d Rückführung des Lösungsmittels in den Absorber durch ein Drosselventil
- 3 Abgabe der Wärme am Kondensator zu Heizzwecken
- 4 Druck- und Temperaturminderung des Kältemittels

Adsorptionswärmepumpe und -kältemaschine

Alternativ zur Absorption (Lösen eines Gases in einer Flüssigkeit) kann in thermischen Verdichtern auch der physikalische Effekt der Adsorption (Anlagern eines Gases an eine Festkörperoberfläche) genutzt werden. Die Umkehrung beider Effekte wird Desorption genannt.

Da das feste Adsorptionsmittel nicht gepumpt werden kann, müssen Adsorptionsmaschinen diskontinuierlich arbeiten. In zwei oder mehr mit Adsorptionsmittel gefüllten Arbeitskammern laufen wechselweise Adsorptions- und Desorptionsprozess ab. Durch Umschalten zwischen den Kammern wird der zyklische Prozess dann quasi zu einem kontinuierlichen.

Als feste Adsorptionsmittel werden Silikagel (amorphes Siliziumdioxid) oder Zeolith (Alumosilikat) eingesetzt, hochporöse Stoffe mit einer extrem großen volumenbezogenen Oberfläche für die Gasanlagerung. Als Kältemittel kommt Wasserdampf zum Einsatz, so dass damit Prozess- bzw. Heizwärme oder Klimakälte (Temperatur $> 0\text{ }^{\circ}\text{C}$) erzeugt werden kann.

Das Prinzip einer direkt befeuerten Adsorptionswärmepumpe wird im Folgenden kurz beschrieben (vgl. Abb. links).

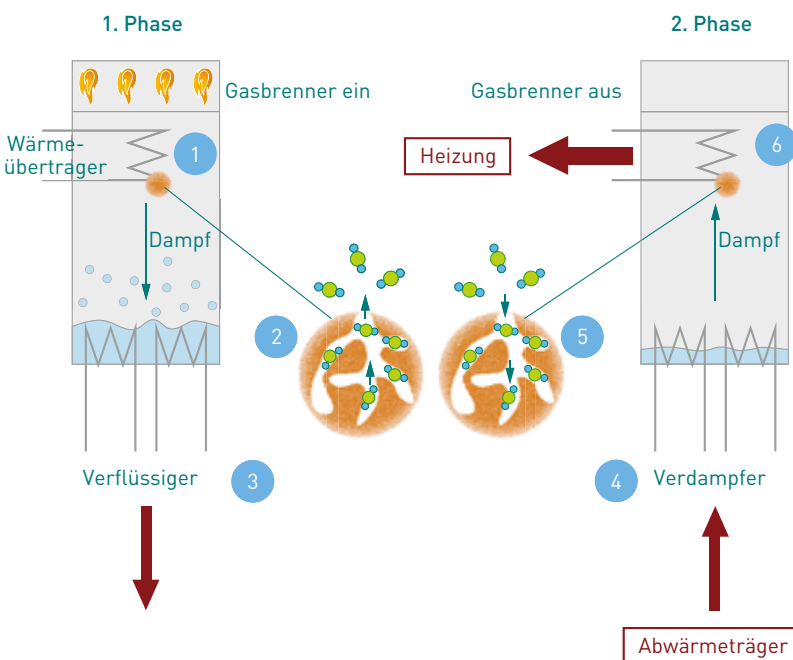
Zu Beginn der ersten Phase (Desorptionsphase) ist die Oberfläche des Adsorptionsmittels mit Molekülen des Kältemittels besetzt. Das Adsorptionsmittel ist dabei gut wärmeleitend. Durch einen Wärmeübertrager (Gasadsorptionswärmepumpe) oder eine andere Hochtemperatur-Abwärmequelle wird dem Adsorptionsmittel Wärme zugeführt (1) und die Gasmoleküle werden von der Oberfläche gelöst (Trocknen bzw. Ausheizen des Adsorbers) (2).

Der Kältemitteldampf strömt zum Kondensator (3) und wird dort verflüssigt, die dabei frei werdende Wärme kann zum Heizen genutzt werden. Durch die Wahl des Systemdruckes wird die Temperatur der abgegebenen Wärme festgelegt (Siedetemperatur Kältemittel). Phase 1 ist beendet, wenn das Adsorptionsmittel vollständig getrocknet ist.

In der zweiten Phase wird durch Zufuhr von Niedertemperaturwärme das Kondensat wieder verdampft (4). Der Kältemitteldampf strömt zum Adsorptionsmittel und lagert sich an dessen Oberfläche an (5). Die dabei frei werdende Hochtemperaturwärme wird über den Wärmeübertrager (6) abgeführt und genutzt. Wenn das Adsorptionsmittel komplett benetzt ist, endet der Zyklus.

Ein weitgehend kontinuierlicher Betrieb ist nur bei kurzen Zykluszeiten erreichbar, dazu müssen der Stofftransport bei der Ad-/Desorption und der Wärmetransport zwischen Adsorptionsmittel und Wärmeübertrager optimiert werden. Dies stellt eine große Herausforderung dar und ist Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten.

Adsorptionskältemaschinen arbeiten nach dem gleichen Prinzip wie Adsorptionswärmepumpen. Der Verdampfungsprozess findet bei starken Unterdrücken statt, so dass damit Kälte erzeugt werden kann. Die bei der Verflüssigung entstehende Wärme (3) auf niedrigem Temperaturniveau wird meist über einen Kühler abgeführt.



WÄRMEPUMPENPROZESS NACH ADSORPTIONSPRINZIP

- 1 Ausheizen des Adsorptionsmittels mit Gasbrenner
- 2 Desorption des Kältemittels
- 3 Abgabe niedererwertiger Abwärme (ggf. zu Heizzwecken)
- 4 Verdampfung des Kältemittels durch Nutzung von Abwärme
- 5 Adsorption des Kältemitteldampfes
- 6 Abgabe der Wärme zu Heizzwecken

Prinzip einer direkt befeuerten Adsorptionswärmepumpe

Adsorptionswärmepumpe

Leistungsbereich	7,5 ... 500 kW
Spezifische Investkosten	1.500 €/kW _{th}
Abwärmeträger	Flüssigkeit
Abwärmemeterniveau	bis 90 °C
Heizzahl	1,3 ... 1,6

Adsorptionskältemaschine

Leistungsbereich	5 bis 350 kW
Spezifische Investkosten	350..1.500 €/kW _{th}
Abwärmeträger	Flüssigkeit
Abwärmemeterniveau	55 ... 100 °C
Wärmeverhältnis	0,6 ... 0,7



Adsorptionskältemaschine auf Silikagel-Basis, betrieben mit Heißwasser zwischen 50 und 90 °C, SorCool GmbH

3.3 Stromerzeugung

Neben Wärme auf höherem Temperaturniveau oder Kälte kann mithilfe von Abwärme auch Strom erzeugt werden. Dazu stehen Dampfturbinen, Gasturbinen und Stirlingmotoren zur Verfügung, die thermodynamische Rechtsprozesse nutzen. Dabei fällt Niedertemperatur-Abwärme an, die als Heiz- oder Prozesswärme weiter genutzt werden kann (Kraft-Wärme-Kopplung). Alternativ kann Wärme auch in thermoelektrischen Generatoren direkt in Strom umgewandelt werden.

Stromerzeugung kann als universelle Abwärmenutzungsoption angesehen werden, weil sie unabhängig von Wärmesenken betrieben werden kann und sich in der Regel vollständig an das Wärmeangebot anpassen lässt. Voraussetzung ist, dass große Abwärmeleistungen verfügbar sind, da die Wirkungsgrade der Anlagen im unten Prozentbereich liegen, dadurch mit anderen Nutzungsmöglichkeiten konkurrieren und vergleichsweise hohe Investitionen erforderlich sind.

Sofern im Betrieb mehrere Nutzungsoptionen für eine Abwärmequelle zur Verfügung stehen, ist Stromerzeugung nur sinnvoll, wenn die Einsparung bei Eigenstromversorgung mehr einbringt als die Einsparung aus einer alternativen Nutzung der Abwärme. Dazu ein Beispiel: In einem Betrieb besteht die

Option, die Abwärme eines Ofens entweder mit 10 % Wirkungsgrad zu verstromen oder in einem mit Wärme zu versorgenden Prozess zu nutzen. Werden in diesem Fall durch Eigenstromversorgung 20 Cent/kWh gespart, sollte die Abwärmeverstromung der direkten Nutzung nur vorgezogen werden, wenn der Wärmebedarf des zweiten Prozesses für weniger als 2 Cent/kWh gedeckt werden kann. Bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung sollte man außerdem die Strompreisspanne über die Nutzungsdauer im Blick haben.

Statt der Stromerzeugung ist mitunter auch ein direkter Antrieb von Arbeitsmaschinen wie Verdichtern, Ventilatoren oder Pumpen mit einigen Expansionsmaschinen möglich. Entscheidend ist dabei, dass die Expansionsmaschine entweder auf die erforderliche Drehzahl geregelt werden kann oder die Betriebsweise des versorgten Prozesses sowie die Bauart der Arbeitsmaschine variable Drehzahlen erlauben.

Dampfkraftprozess

Beim Dampfkraftprozess wird die Abwärme an einen Kreisprozess übertragen, in dem Wasser und Wasserdampf als Arbeitsmittel genutzt werden, um eine Turbine anzutreiben. Der Prozess kommt auch in konventionellen Wärmekraftwerken zum Einsatz.

Abwärme kann an verschiedenen Stellen in einen Dampfkraftprozess eingekoppelt werden. Üblicherweise wird die Abwärme zur Dampferzeugung genutzt. In Verbindung mit einem Abgas kommt dafür ein Abhitzeessel zum Einsatz.

Fällt im Unternehmen Hochdruck-Prozessabdampf an, kann dieser direkt in einer Dampfturbine entspannt und nach der anschließenden Kondensation in den Prozess zurückgespeist werden. Dazu muss der Dampf allerdings eine für die Turbine ausreichende Qualität aufweisen. Stehen Restdampfmen gen auf mehreren Druckstufen zur Verfügung, können sie in einer Turbine mit sogenannten Einspeisungen in den Prozess integriert werden.

Eine weitere Option besteht darin, die Abwärme in die Vorwärm säule eines bestehenden Dampfkraftprozesses einzukoppeln. Damit sinkt die Dampferzeugerleistung, die z. B. aus Brennstoff bereitgestellt wird. Abwärme in Form von qualitativ hochwertigem Wasserdampf kann dabei über einen Mischvorwärmer eingebunden werden. Über Oberflächenvorwärmer lassen sich beliebig weitere Abwärmequellen an dieser Stelle einbinden.

Für einen hohen Wirkungsgrad sind eine hohe Frischdampf temperatur, das heißt die Nutzung an Hochtemperatur-Abwärmequellen, und eine niedrige Kondensatortemperatur, möglichst durch äußere Aufstellung der Kühlung, anzustreben. In der Regel sind die Wirkungsgrade von Dampf- wie auch von ORC-Prozessen jedoch verhältnismäßig gering, sodass sich eine Investition nur bei entsprechend großen, kontinuierlich anfallenden Abwärmemengen lohnt.

Nach dem Druckniveau am Turbinenausstritt unterscheidet man verschiedene Betriebsarten. Bei Gegendruckturbinen wird der Abdampf weiter als Prozessdampf auf mittlerem Druckniveau genutzt. Zur Stromerzeugung wird nur ein Teil der Arbeitsfähigkeit des Dampfes aufgewendet. In Kondensationsturbinen wird der Dampf bis in den Unterdruckbereich entspannt, was niedrige Austrittstemperaturen und einen höheren Wirkungsgrad zur Folge hat. Die Kondensationsabwärme wird selten genutzt, kann aber mitunter der Warmwasserbereitung dienen.

Industriedampfturbinen sind ab Leistungen im Bereich um 100 kW bis zu wenigen 100 MW und häufig sowohl als Gegendruck- als auch als Kondensationsturbine verfügbar.

Bei schwankenden Abwärmeleistungen bietet sich die Kombination mit Ruths-Speichern an. Die Turbine wird dazu auf die im Mittel verfügbare Abwärmeleistung ausgelegt. Die Menge an erzeugtem Dampf richtet sich nach der momentanen Abwärmeleistung und wird über den Ruths-Speicher gepuffert. Überschüssige Dampfmen gen stehen dadurch für Zeiten bereit, in denen die erzeugte Dampfmenge unterhalb des Auslegungspunkts liegt. Die Turbine arbeitet damit immer bei Nennlast und hohem Wirkungsgrad.

In Anlagen kleinerer Leistungsklasse wird anstelle der Turbine eine Kolbenmaschine als Expansionsmaschine verwendet. Diese Bauart ist besser für Teillast geeignet, kann also bei Leistungsschwankungen der Abwärme eingesetzt werden. Während Turbinen in unterschiedlichen Größenklassen verfügbar sind, können Kolbenmaschinen zum Teil durch modulare Bauweise an die Abwärmequelle oder den Strombedarf angepasst werden.

Auf Anlagenebene werden bei größeren Anlagen, in der Regel solche mit Dampfturbine, alle weiteren Komponenten für den Anwendungsfall ausgelegt. Kleinere Anlagen mit Kolbenmaschine werden in Modul- oder Containerbauweise angeboten. Sie umfassen neben Kolbenmaschine und Generator bereits Kondensator, Speisewasserpumpe sowie Steuerungstechnik. Hier muss meist nur der dampferzeugende Wärmeübertrager anwendungsspezifisch ausgewählt und dimensioniert werden.

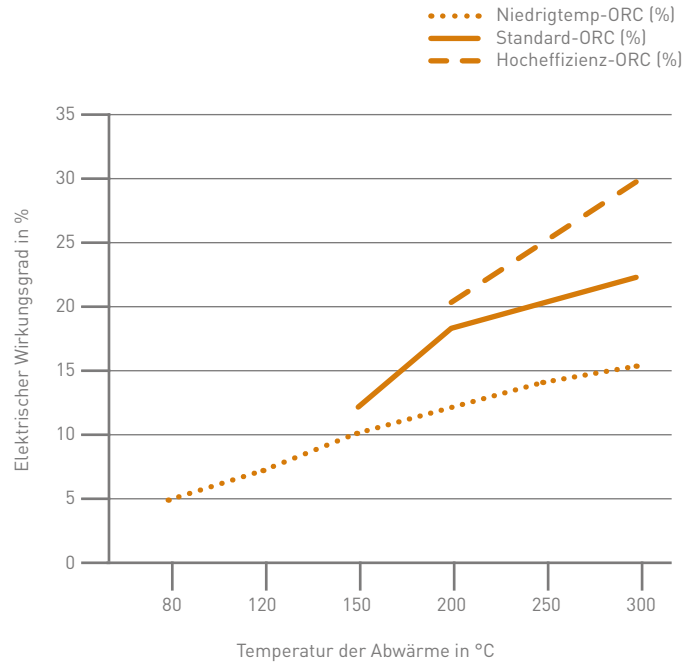


5-stufige Mini-Kondensationsturbine von M+M Turbinen-Technik, 350 kWel

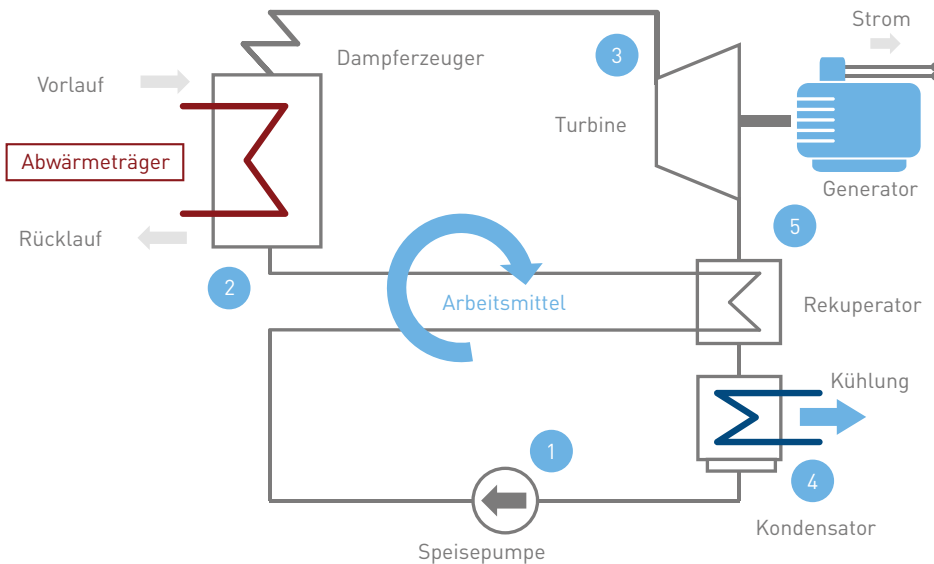
⚡ ORC-Prozess

Der ORC-Prozess (Organic Rankine Cycle) ähnelt prinzipiell dem Dampfkraftprozess mit Wasser. Anstelle von Wasser wird jedoch eine organische Flüssigkeit als Arbeitsmittel verwendet. Die verfügbaren Arbeitsmittel haben vor allem bei niedrigeren Temperaturen thermodynamische Vorteile gegenüber Wasser. ORC-Prozesse haben deshalb bei niedrigen Temperaturen der Abwärmequelle einen höheren Wirkungsgrad als Wasserdampfprozesse.

Der Aufbau von ORC-Anlagen ist im Vergleich zum Kreisprozess mit Wasser stark vom verwendeten Arbeitsmittel abhängig. So können ORC-Anlagen einen Rekuperator zur inneren Wärmeübertragung aufweisen, wie im Schema unten **5** gezeigt. Er ist bei einigen Arbeitsmitteln notwendig, um das nach der Entspannung immer noch arbeitsfähige Arbeitsmittel ohne Verluste auf Kondensationstemperatur abzukühlen. Die dadurch verfügbare Wärme wird genutzt, um das Arbeitsmittel vor Eintritt in den Dampferzeuger vorzuwärmen.



Wirkungsgrad der Verstromung im Abhängigkeit von der Abwärmtemperatur



DAMPFKRAFTPROZESS MIT ORC-TURBINE

- 1 Druckerhöhung auf Frischdampfdruck
- 2 Abwärmenutzung zur Verdampfung des organischen Arbeitsmittels
- 3 Entspannung des Dampfes in der Turbine zur Stromerzeugung
- 4 Kondensation des entspannten Dampfes
- 5 innere Wärmeübertragung zur Vorwärmung des Arbeitsmittels

Schaltbild eines ORC-Prozesses



ORC-Anlage (70 kW elektrisch, von Dürr Cyplan) zur Nutzung der Abgaswärme eines Biogas-Blockheizkraftwerks.

Im Gegensatz zu den verschiedenen Nutzungsoptionen bei Dampfkraftprozessen mit Wasser wird die Abwärme bei ORC-Prozessen ausschließlich zur Beheizung des Dampferzeugers genutzt. Dessen wärmetechnische Auslegung muss sicherstellen, dass das Arbeitsmittel nicht über die zulässige Betriebstemperatur hinaus erwärmt wird, da es sich sonst thermisch zersetzt. Hierzu wird häufig ein Zwischenkreis mit Thermoöl oder Heißwasser eingesetzt, und damit ein Überschreiten der zulässigen Arbeitsmitteltemperatur verhindert. Ein Zwischenkreis ermöglicht auch die Einbindung von Speichertechnologien.

Die Leistungsklasse einer ORC-Anlage wird wie bei Dampfkraftanlagen in erster Linie durch die Expansionsmaschine bestimmt. Auch hier werden entweder Turbinen oder Kolbenmaschinen eingesetzt. Solche mit Kolbenmaschine lassen sich flexibler bei schwankender Abwärmeleistung nutzen. ORC-Anlagen werden entweder als Modul mit größtenteils festgelegter Leistungsklasse angeboten oder wie größere Dampfkraftprozesse auf den Anwendungsfall zugeschnitten. Zudem bieten einige Hersteller von Kolbenmaschinen die Möglichkeit an, die mechanische bzw. elektrische Leistung durch Abschaltung einzelner Zylinder während des Betriebs an die Abwärmeleistung anzupassen.

Gerade im unteren Temperaturbereich werden fluorhaltige Arbeitsmedien eingesetzt, die wegen ihres Treibhauspotenzials klimaschädigende Wirkung zeigen, falls sie in die Umwelt gelangen. Alternativ können Anlagen unter bestimmten Bedingungen für den Einsatz von natürlichen Arbeitsmitteln wie Ethanol, Butan oder Pentan ausgelegt werden. Deren Verwendung geht allerdings mit höheren Sicherheitsanforderungen einher.

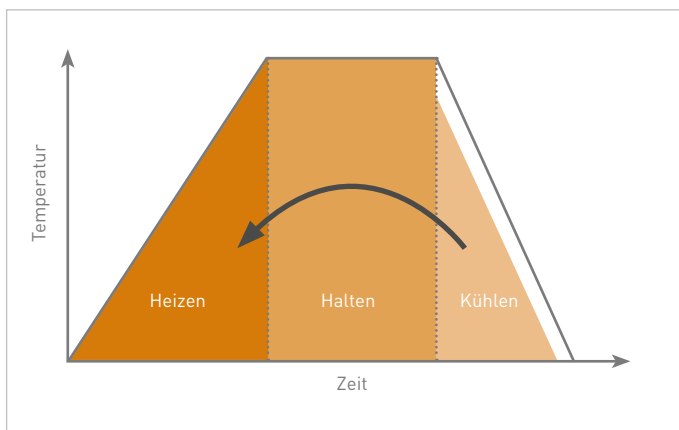
Eine Alternative zum ORC-Prozess ist der Kalina-Prozess, bei dem statt eines organischen Arbeitsmediums ein Ammoniak-Wasser-Gemisch eingesetzt wird. Das Mischungsverhältnis bestimmt dabei die Siedetemperatur, die dadurch gezielt auf den Anwendungsfall angepasst werden kann. Der Kalina-Prozess wird aktuell zur Stromerzeugung in der Geothermie eingesetzt. Er ist in der Anlagentechnik aufwendiger als der ORC-Prozess, da eine Stofftrennung erfolgt und die Dampferzeugung komplexer ist.

4 Häufig übersehene Abwärmepotentiale

Neben den klassischen – in der Praxis häufig erschlossenen – Abwärmepotenzialen bestehen noch weitere weniger bekannte bzw. selten erkannte Nutzungsmöglichkeiten.

Abwärme aus dem Produkt

In Durchlauföfen mit sehr hohen Temperaturen ist die Nutzung der Abwärme aus dem Kühlprozess standardmäßig prozessintegriert. Bei Chargen- oder Trocknungsprozessen hingegen wird die Nutzung der Wärme häufig übersehen: Sie steckt im Produkt oder Bauteil, das den Ofen am Ende des Prozesses wieder verlässt. Möglicherweise unterschätzt man das Potenzial, da das Produkt z.B. definiert gekühlt werden muss, oft mit hohem Energieeinsatz.



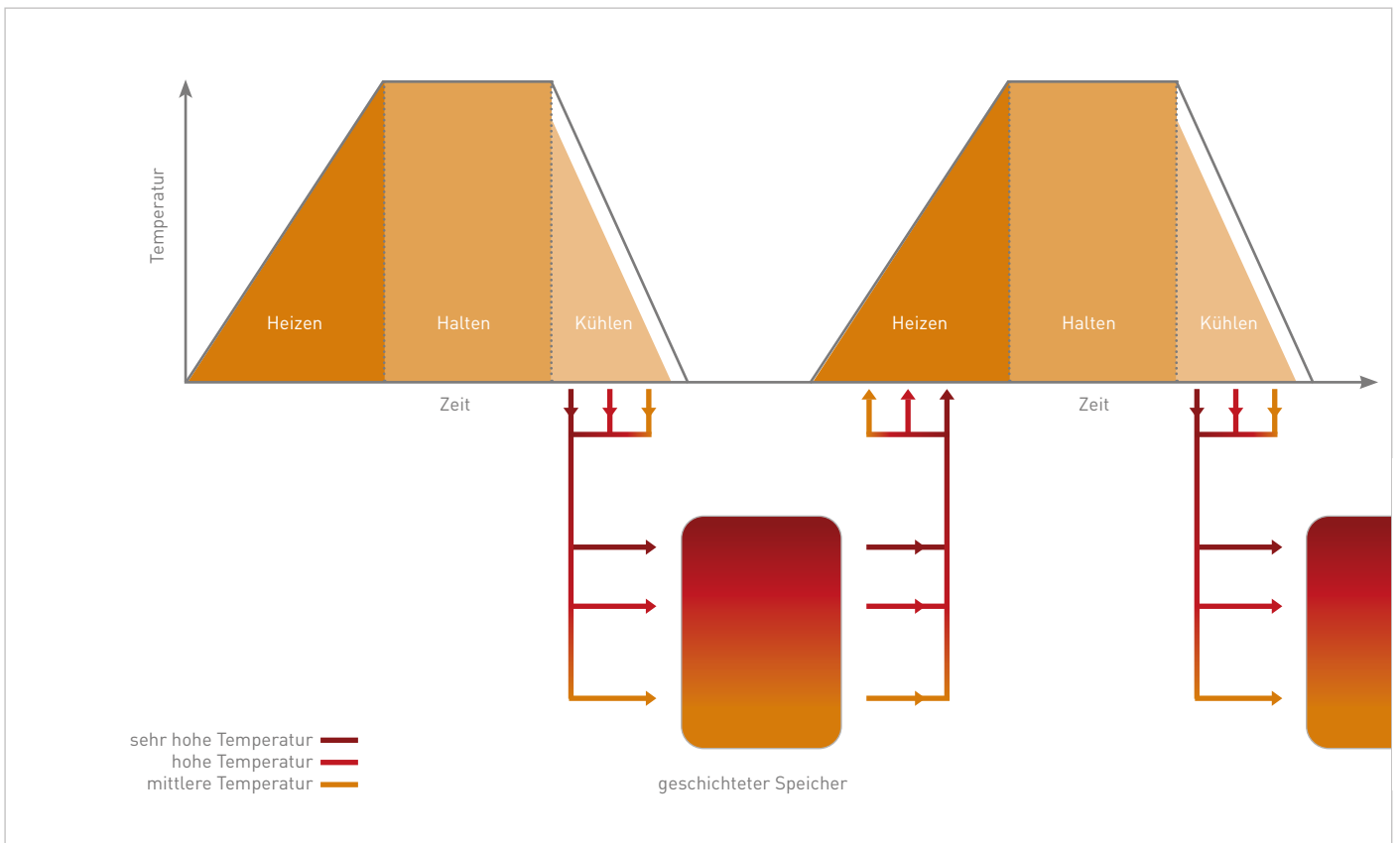
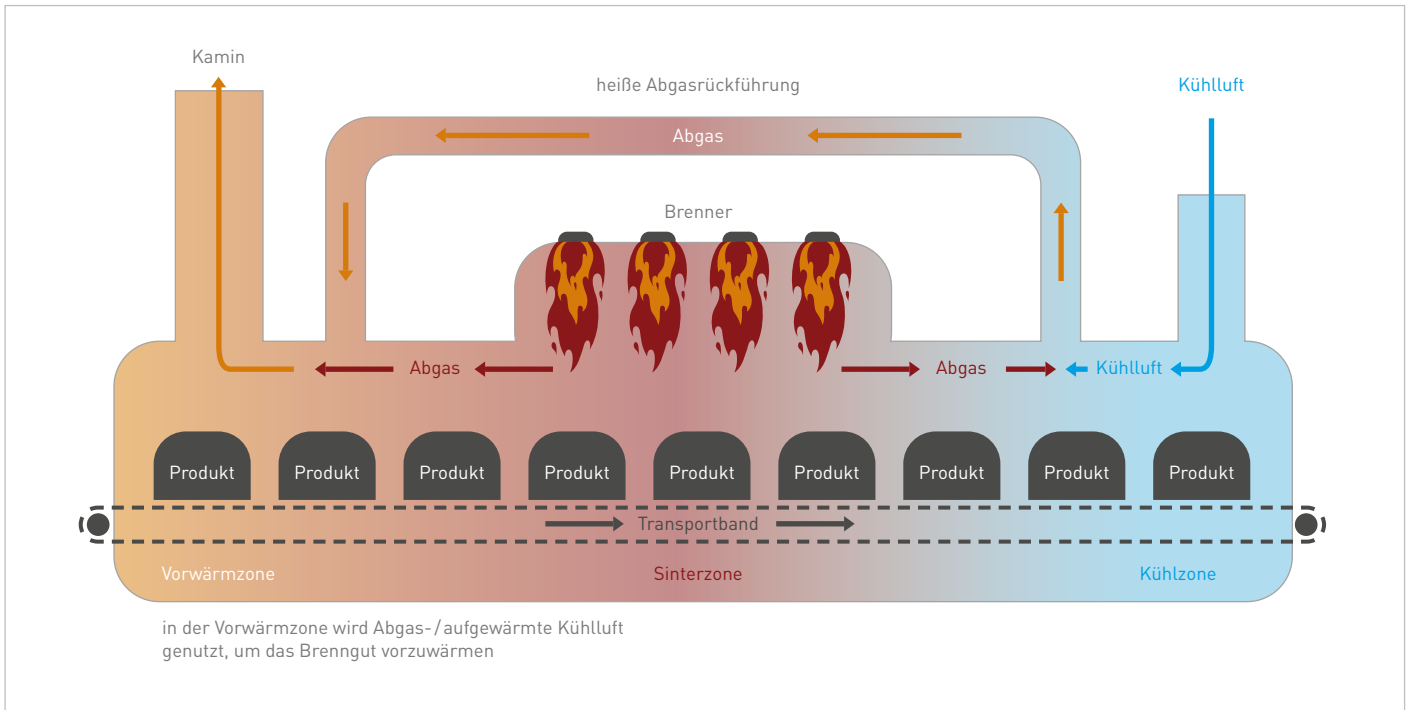
Typisches Temperaturprofil eines Ofens (hellste Farbe = theoretisches Abwärmepotential, was zum Aufheizen des Ofens verwendet werden könnte)

Beispiele, in denen die Produktabwärme verworfen wird, obwohl sie noch nutzbar wäre, gibt es viele:

- Kühlluftströmungen aus keramischen Brennprozessen oder die Abluft aus Autoklaven
- Körnungen aus Trocknungsprozessen
- Eisenteile aus einem Wärmebehandlungssofen
- Gießsandformen während des Abkühlprozesses

Für jedes Beispiel können individuelle Lösungen zur Abwärmenutzung entwickelt werden:

- Beim Autoklaven-Prozess nimmt ein Feststoffspeicher die Abluft des Prozesses auf und stellt sie für die Wiedererwärmung der nächsten Charge zur Verfügung. Gerade bei kurzen schnellen Kühlphasen kommt es darauf an, einen Speicher auszuwählen, der schnell die Wärme aufnehmen und dann bedarfsabhängig abgeben kann.
- Beim Sandtrocknungsprozess kann die Kühlphase des Trockners nach außen verlagert werden, indem der Sand mittels eines externen Schüttgutkühlers nach Ofenausritt gekühlt wird. Neben der gewonnenen Abwärme kann durch Umbau des Trockners die ehemalige Kühlzone zum weiteren Trocknen verwendet und damit der Durchsatz gesteigert werden.
- Die Eisenteile, die einen Wärmebehandlungssofen verlassen und häufig noch Temperaturen von deutlich über 100 °C haben, können in eine geschlossene Abkühlkammer mit Umluft gefahren werden, statt sie neben dem Ofen abzukühlen. Diese Abwärme ist in anderen betriebsinternen Prozessen oder zu Gebäudebeheizung nutzbar.
- Beim Gießsandformen kann die Abkühlung unter Hauben erfolgen, welche die warme Luft dann in Betriebsbereiche leiten, die sonst geheizt werden müssten.



Abwärmennutzungsprinzip eines keramischen Chargenofens (oben) und Temperaturprofil mit Wärmerückgewinnung und Speicher (unten)

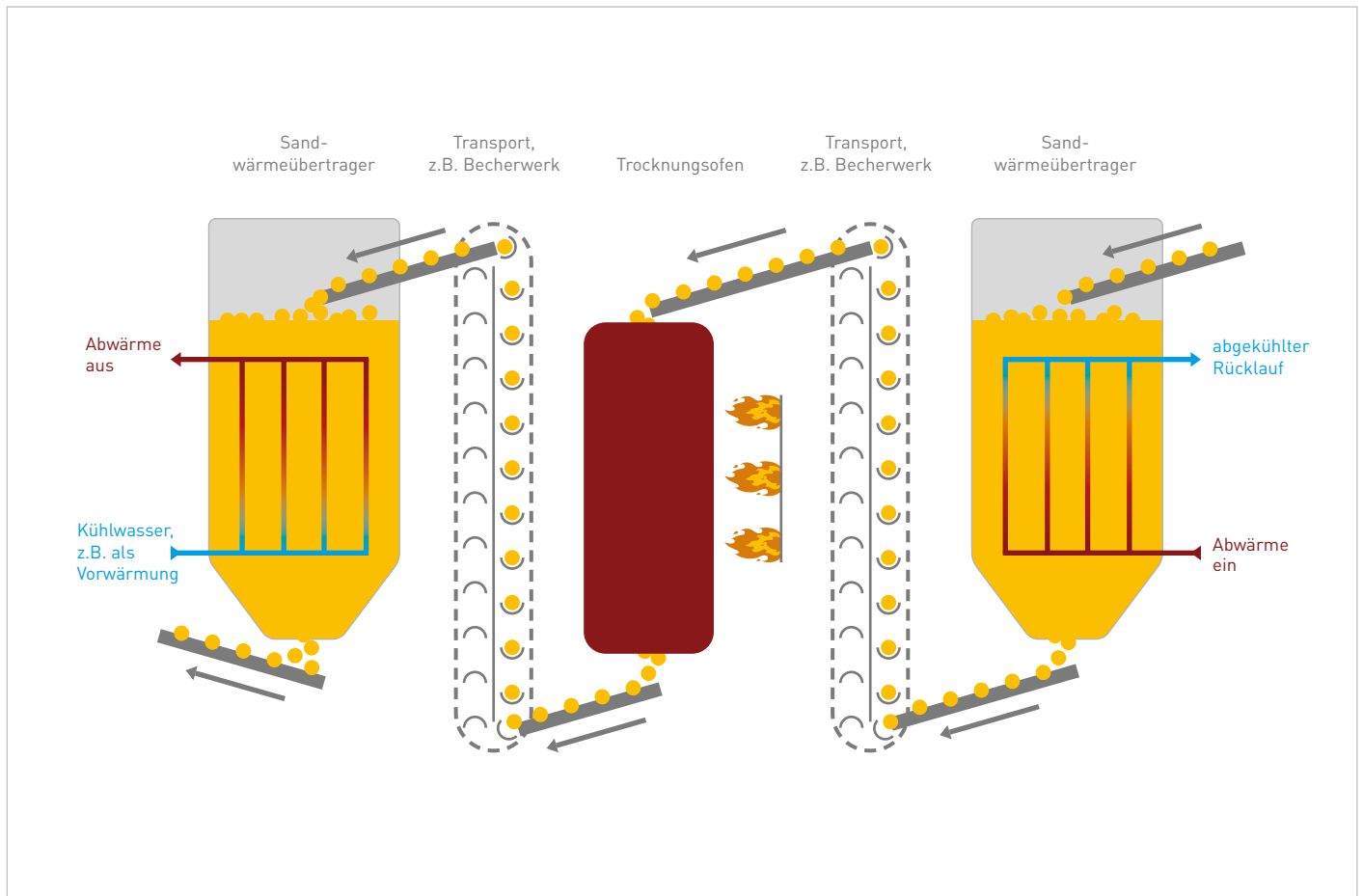
Abwärme zur Produktvorwärmung

Bei der Suche nach Möglichkeiten, Abwärme im Betrieb unterzubringen, wird leider oft übersehen, dass man ohne viel Aufwand das Prozessgut vorwärmen kann. Dabei ist die Produktvorwärmung eine hochrelevante Wärmesenke: Oft ist die zeitliche Verschiebung zwischen Verfügbarkeit und möglicher Verwertung der Wärme gar nicht so groß.

Selbst wenn z. B. aus prozesstechnischen Gründen nur eine geringe Teilerwärmung möglich ist, kann ein erheblicher Einspareffekt erreicht werden. Häufig ist er sogar höher als bei den „klassischen“ Effizienzmaßnahmen (z. B. Motorentausch).

Ein Beispiel: Das Bauteil wird bei 800 °C geblut. Zur Vorwärmung liefert die Abwärme aus dem Abkühlprozess thermische Energie für eine Erhöhung der Eingangstemperatur um 80 Kelvin. In diesen Prozessschritt entspricht das einer Energieeinsparung von 10%. Hinzu kommen oft noch weitere Einsparungen, z. B. durch die Verringerung der Abgasverluste im Glühprozess.

Weitere Wärmequellen sind z. B. die aus der Anlage kommenden Produkte oder die Abgaswärme. Neben dem Prozessgut kann bei Trocknern oder Abzügen auch die Frischluft vorgewärmt werden. Bei Öfen mit Transportgestellen und Produktaufnahmen ist zu beachten, dass diese sowohl vorgewärmt als auch als Wärmequelle genutzt werden können.



Sandofen mit zwei Wärmetauschern

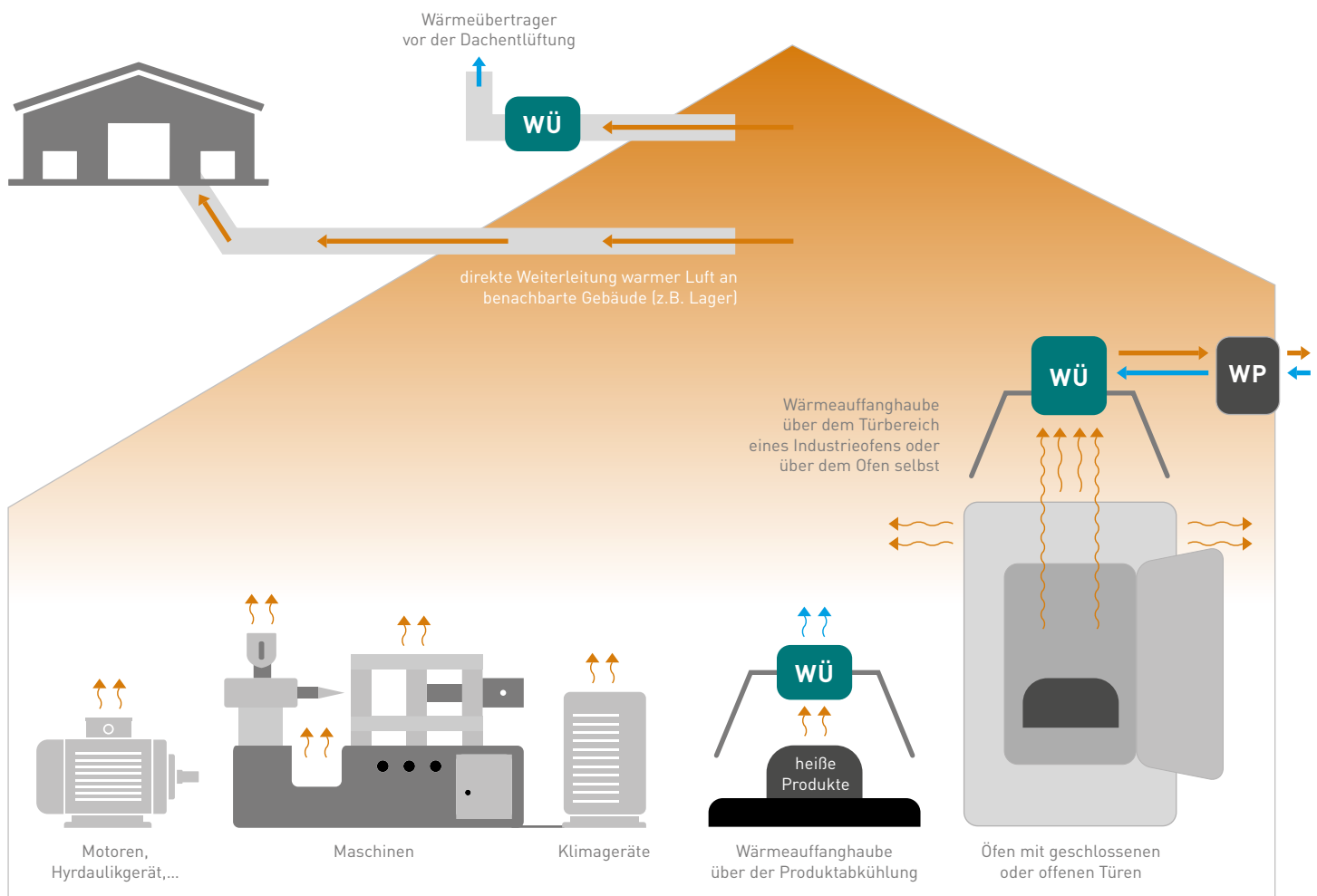
Nutzung diffuser Abwärme

Diffuse Abwärme tritt in fast allen Unternehmen auf. Es ist die Abwärme, die beim Betrieb von Maschinen z. B. von Motoren abgegeben wird. Häufig haben Maschinen auch eigene Kühlaggregate, die die Wärme dann wieder in die Halle abgeben.

Die größten diffusen Abwärmemengen entstehen an Thermoanlagen, es sind die als Energieverluste definierten Kilowattstunden über die Wände, geöffnete Türen oder noch heißen Produkte. Insbesondere im Sommer stehen daher bei den Unternehmen die Hallentore und Dachluken weit offen.

Dabei ist es grundsätzlich möglich, diese warme Luft über Wärmeübertrager abzusaugen und dann je nach Temperatur direkt für die Erwärmung anderer Betriebsbereiche zu nutzen (z. B. für die Logistik), sie mittels Wärmepumpe für Prozesse oder als Heizwärme zur Verfügung zu stellen (z. B. für das Reinigen oder Beizen).

Über Industrieanlagen mit hohen Wärmeverlusten können auch direkt Hauben angebracht werden. Vorher ist allerdings zu klären, woher die diffuse Abwärme wirklich stammt. Bei einem Pulverbeschichtungssofen mit einer Prozesstemperatur von 200°C rührt die Abwärme nicht selten vom regelmäßigen Öffnen der Tür für die Be- und Entladung. In diesem Fall ist das System zur Abwärmennutzung auf die spezifischen Gegebenheiten der diskontinuierlich auftretenden Abwärme auszugestalten. Die Abwärme, die so aufgefangen wird, kann z. B. auch auf einem niedrigen Temperaturniveau zum Vorwärmen der Zuluft von Abzugshauben wiederverwendet werden.



Beispiele diffuser Abwärmennutzung in der Fertigung

WÜ = Wärmeübertrager
WP = Wärmepumpe

Abgaswärme bei Rekuperatorbrennern

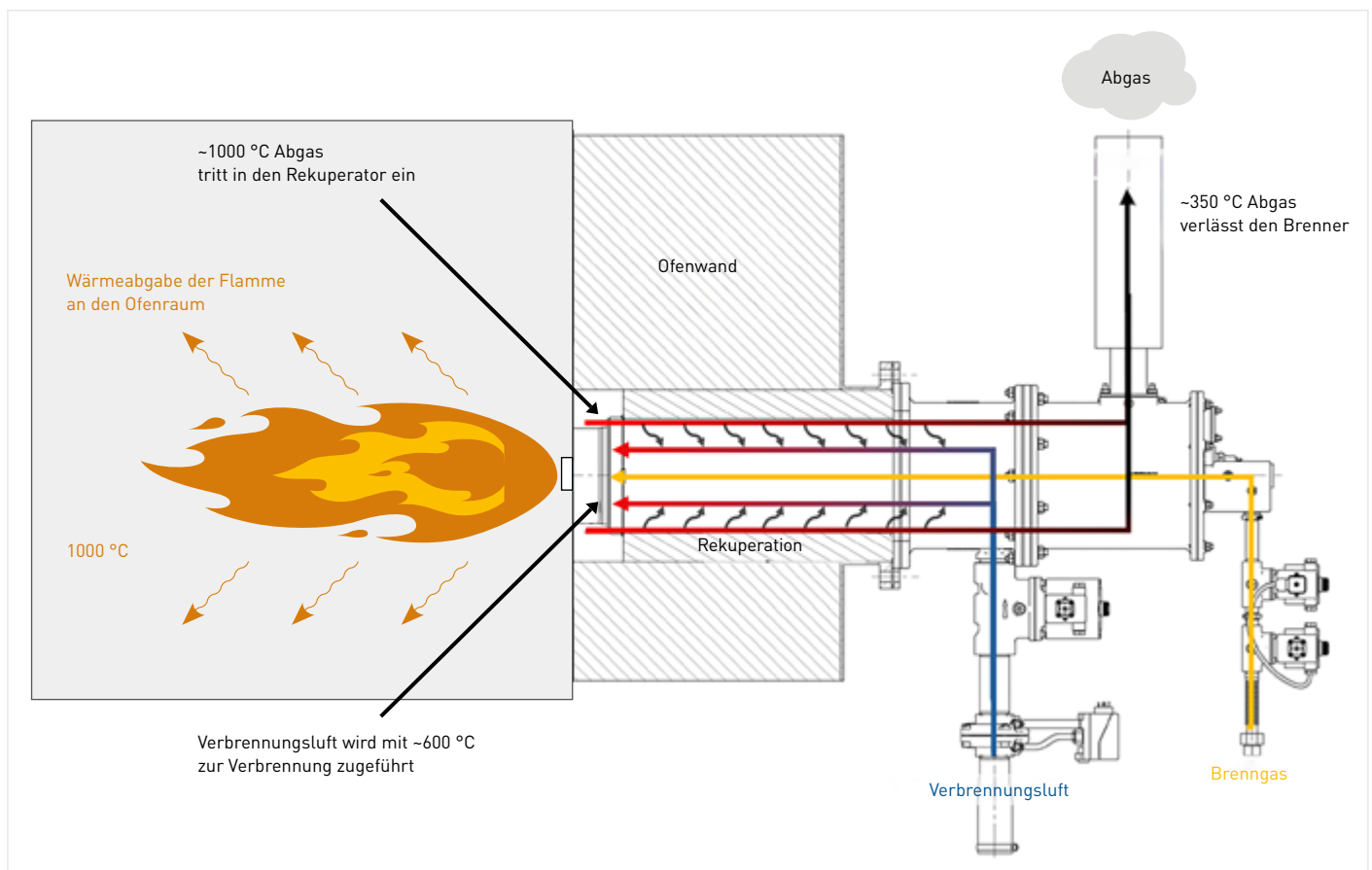
Rekuperatorbrenner nutzen die Wärme der Abgase zur Verbrennungsluftvorwärmung. Werden sie in Thermoprozessanlagen bereits eingesetzt, scheint die Abwärmenutzung aus dem Abgas abgeschlossen. In der Regel kühlen diese Brenner aber nicht die Abgase bis zur Mindest-Schornsteintemperatur ab, häufig sind es noch 200–600 °C. Die messbare Abgastemperatur im Schornstein ist nicht selten deutlich niedriger – dann sind die Brenner oft drucktechnisch vom Schornsteinsystem getrennt und saugen Falschluff an. Sie vermischt sich mit dem Abgas und senkt das Temperaturniveau. Die Folge: Das Abwärmepotenzial ist zwar noch vorhanden, jetzt aber mit einem gestiegenen Abgasvolumenstrom auf niedrigerem Temperaturniveau.

Durch zusätzlich direkt an die Brenner angebrachte Wärmeübertrager oder durch eine Abgastrennung in Kombination mit einem Wärmeübertrager vor dem Schornstein kann weiteres Abwärmepotenzial erschlossen werden – nutzbar für die Produktvorwärmung, für Reinigungsbäder, Gebäudeheizung oder Kältererzeugung.

Für die Umsetzung eines solchen Konzepts zieht der Energie-Experte neben den Ofen- und Brennerherstellern auch die Planer des Abgassystems zu Rate.



Hochgeschwindigkeitsbrenner mit integriertem Metallschaumrekuperator zur höchstmöglichen Wärmerückgewinnung, NOXMAT GmbH



Schema zum Arbeitsprinzip eines Rekuperatorbrenners, NOXMAT GmbH

Kondensationswärme in Abgasen

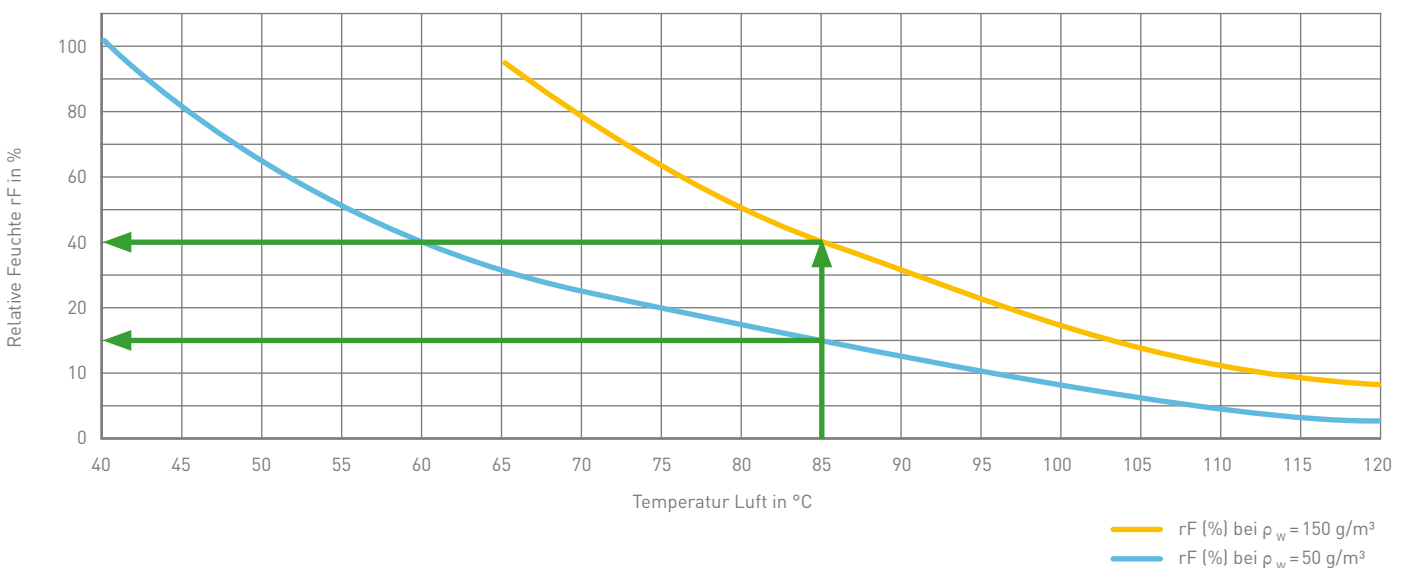
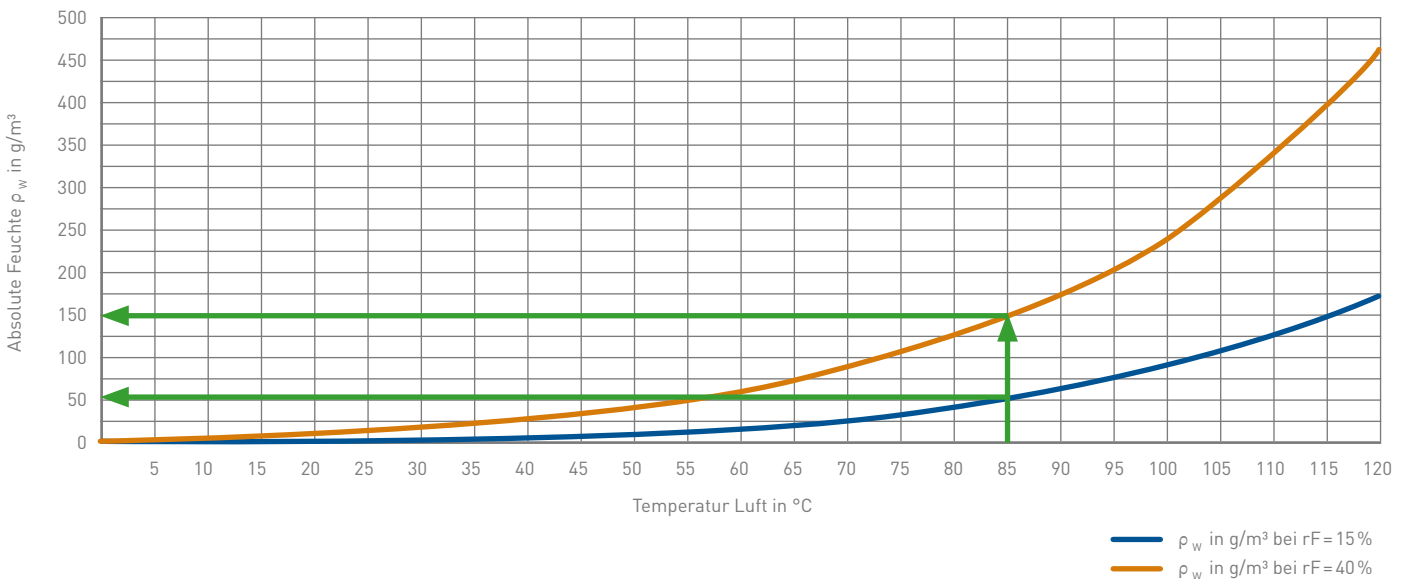
Insbesondere bei der thermischen Behandlung von feuchtem Prozessgut ist ein hoher Feuchtegehalt in der Abluft enthalten. Möglicherweise lässt sich hier eine Kondensation der Abgasfeuchte realisieren.

Der aus dem Gebäudebereich bekannte Brennwertkessel nutzt z.B. die Kondensationswärme des im Abgas dampfförmig enthaltenen Wassers zur Wärmebereitstellung.

In der Industrie wird üblicherweise darauf geachtet, mit der Abgastemperatur nicht in den Bereich des Taupunktes zu kommen. Bei schwefelwasserstoffhaltigen Abgasen kommt es sonst zu starken Korrosionserscheinungen im Abgassystem.

Zudem sollte man einer Kondensation von Feuchtigkeit in Filtern vorbeugen. Tatsächlich ist jedoch in den meisten Abgasen kaum Schwefel enthalten. Wird der Wärmeübertrager hinter dem Filter installiert, stellt das Kondensationswasser auch keine Gefährdung mehr dar.

Durch die Abkühlung des Abgases bis zum Taupunkt erweitert sich das nutzbare Temperaturprofil und es kann zusätzlich Kondensationsabwärme gewonnen werden. Dies ist insbesondere dann interessant, wenn die Abgase einen besonders hohen Wassergehalt haben, wie das z.B. bei Trocknungsprozessen der Fall ist. Es kann sinnvoll sein, zwei Wärmeübertrager mit unterschiedlichen Vorlauftemperaturen für verschiedene Nutzungs- oder Vorwärmbereiche einzusetzen.



Zahlreiche thermische Prozesse und Anlagen haben einen Kühlbedarf. Je nach Verfahren und Technologie muss

- der gesamte Prozess,
- verschiedene Anlagenteile,
- das Prozessgut selbst, das Werkzeug oder indirekt
- ein Abschreckbad

gekühlt werden.

Geht es um die Abkühlung des Prozessgutes, sind oft strenge Prozessrichtlinien zu beachten. Dennoch sollte man mutig klären – am besten in einer qualifizierten Sensitivitätsanalyse –, inwieweit die Temperatur des Kühlmediums angehoben werden kann, ohne dass der Prozess oder die Produktqualität beeinflusst wird. Eine Reduzierung der wirksamen Temperaturdifferenz kann z.B. durch einen verbesserten Wärmeübergang in Folge optimierter Anströmung ausgeglichen werden.

Eine Beispielbetrachtung: Ausgehend von 1.000°C Prozess-temperatur macht die Erhöhung der Kühlmitteltemperatur von 30°C auf 50°C bei einer Abkühltemperatur von 200°C gerade einmal 2–10% aus.

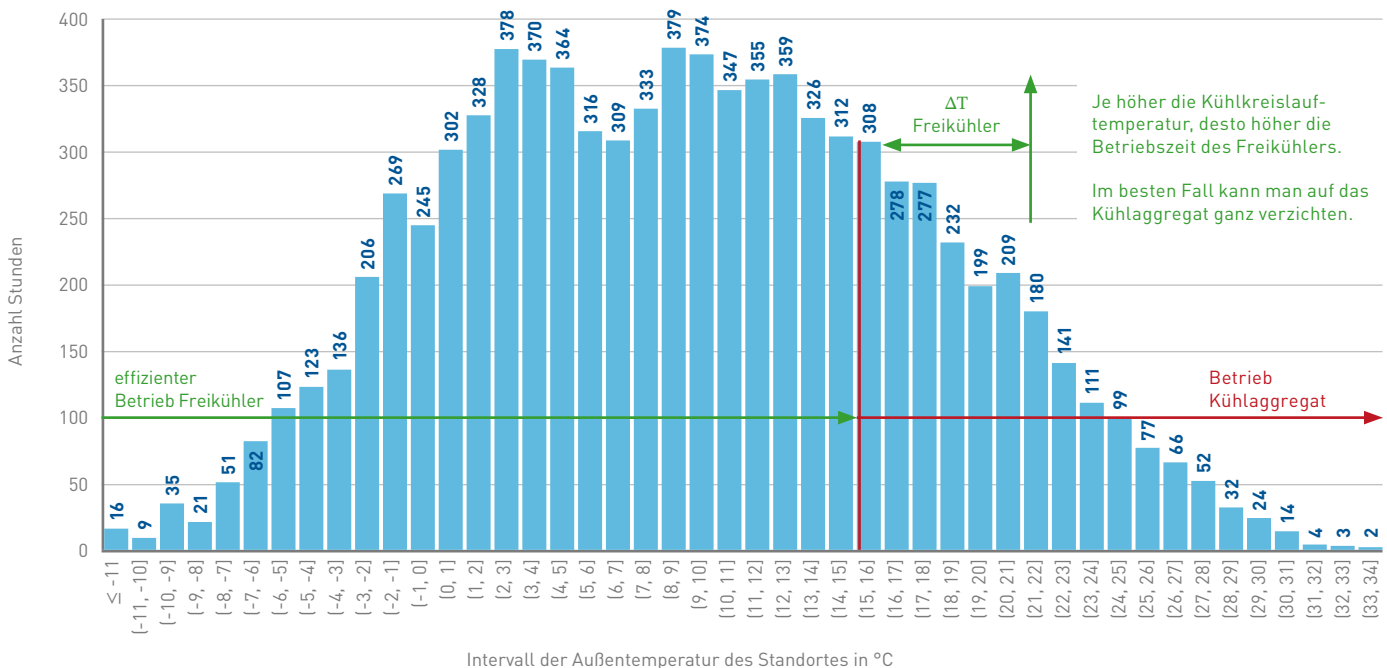
Der Vorteil einer höheren Kühlltemperatur liegt vor allem in einer energieeffizienteren Nutzungs- oder Entsorgungsmöglichkeit der Kühlabwärme. Bei der Niedertemperaturabwärme

machen 20 K einen wesentlichen Unterschied aus. Mit dieser Abwärme kann man dann z.B. die Frischluft bei einem Trocknungsprozess oder das Produkt selbst vorwärmen. Dadurch senkt sich nicht nur der Energiebedarf, sondern es lassen sich auch jahreszeitlich konstante Prozessbedingungen auf einem Niveau von z. B. 40°C kostenneutral mit Abwärme realisieren.

Kommt bei einer Kühlabwärme von 30°C noch keine direkte Gebäudeklimatisierung infrage, so könnte dies mit indirekt bereitgestellten 50°C jedoch der Fall sein: Beim Einsatz einer Wärmepumpe erhöht sich der COP¹ bei 20°C höherer Wärmequellentemperatur erheblich. Wird die Abwärme in ein Kaltwärmenetz gespeist, erhöht sich mit zunehmender Temperatur der Wert der Abwärme.

Besteht keine Verwendung für die Abwärme, reduzieren sich durch solche Maßnahmen immerhin die Kühlkosten: So ist es möglich, ganzjährig einen energieeffizienten Freikühler einzusetzen.

Geht es konkret um die Kühlung in einer Thermoprozessanlage, ist grundsätzlich der Anlagenhersteller zu kontaktieren. Vielleicht reagieren die Hersteller zunächst verhalten bis ablehnend und argumentieren mit dem möglichen Verfall von Garantieleistungen bei unerlaubtem Eingriff in die Anlagen. Dennoch gibt es Beispiele, in denen die Nachrüstung bzw. der Umbau auf eigenes Risiko erfolgreich war. Diese Anlagen laufen heute kosteneffizienter und verschaffen dem Betreiber einen langfristig wirkenden Wettbewerbsvorteil.



Keine eigene Abwärme?

Nicht jeder Betrieb verfügt über eigene Abwärmequellen, aber immer gibt es Heizwärmebedarf. Insbesondere dort, wo kaum Maschinen eingesetzt werden, ist eine Abwärmenutzung auf den ersten Blick nicht möglich. Möglicherweise werden vereinzelt thermische Anlagen betrieben, das Abwärmepotenzial hat aber aufgrund des niedrigen Temperaturniveaus eine nur geringe Qualität.

Dann ist zu prüfen, ob evtl. benachbarte Unternehmen Abwärmepotenziale aufweisen. Dabei ist es zunächst unerheblich, ob nur die oben beschriebene diffuse Abwärme verfügbar, oder sogar höherwertige Kühlabwärme nutzbar ist. Über Nahwärmeleitungen kann die Abwärme grundsätzlich einfach von einem Grundstück zum nächsten transportiert werden. Die Kontaktaufnahme zum Nachbarn ist eine verhältnismäßig günstige wie einfache Maßnahme, um Abwärmepotenziale für das eigene Unternehmen zu finden. Gern hilft auch ein Energie-Experte, das Potenzial einzuschätzen.



Freikühler Thermofin horizontale Bauart



Thermofin Hybridkühler für besonders niedrige Rücklauftemperaturen

¹ „Coefficient of Performance“, Kennzahl zur Bestimmung der Energieeffizienz einer Wärmepumpe

5 Pflichten, Finanzierung und Förderung

Investitionsentscheidungen

Zuschüsse und Förderkredite

Bund und Länder bieten wechselnde Zuschüsse und Förderkredite für energiebezogene Maßnahmen an.

Allgemein gilt:

- Je nach Förderangebot kann es sein, dass ein geplantes Vorhaben zwar nicht namentlich genannt ist, aber einem der Fördergegenstände zugeordnet werden kann (z.B. „Investitionen in Anlagen und Prozesse“). Der Antragsteller sollte bei der Fördermittelrecherche also Richtlinien und zugehörige Merkblätter aufmerksam lesen und im Zweifelsfall bei der Bewilligungsstelle oder der regionalen Energieagentur um Rat fragen.
- Planungsleistungen sind häufig bis zu einem bestimmten Anteil an den Gesamtkosten förderfähig.
- Beratungskosten, die im Vorfeld einer Maßnahme entstehen, können ebenfalls anteilig durch die dieselbe Förderung abgedeckt werden. Alternativ können separate Förderprogramme in Anspruch genommen werden.
- Anträge müssen grundsätzlich vor Beginn des Vorhabens gestellt werden.

Finanzierung

Crowdfunding ist eine Finanzierungsform, über die ein Unternehmen die Investition in seine Energieeffizienzmaßnahme privaten Anlegern zur Verfügung stellen kann. Die Kosteneinsparungen bleiben nicht vollständig beim Unternehmen, sondern fließen über eine Laufzeit von typischerweise mehreren Jahren auch an die Geldgeber. Dafür sinken die initialen Investitionskosten für das Vorhaben.

Entsprechend den Risiken von Abwärmenutzungsvorhaben setzt sich der Anleger dem Risiko eines Totalverlusts seines eingesetzten Vermögens aus. Öffentlichkeitsarbeit (z.B. in sozialen Netzwerken) und Transparenz sind daher wichtige Voraussetzungen für eine erfolgreiche Finanzierung. Aus dieser Öffentlichkeitswirkung kann umgekehrt auch ein Nutzen für das Tagesgeschäft entstehen.

Förderprogramme unterliegen erfahrungsgemäß häufigen Änderungen und abgedruckte Informationen sind schnell überholt. Aktuelle Details zu Förderprogrammen für Abwärmenutzung finden Sie unter:

[SAENA-Fördermittelberatung](#)

[Förderdatenbank](#)

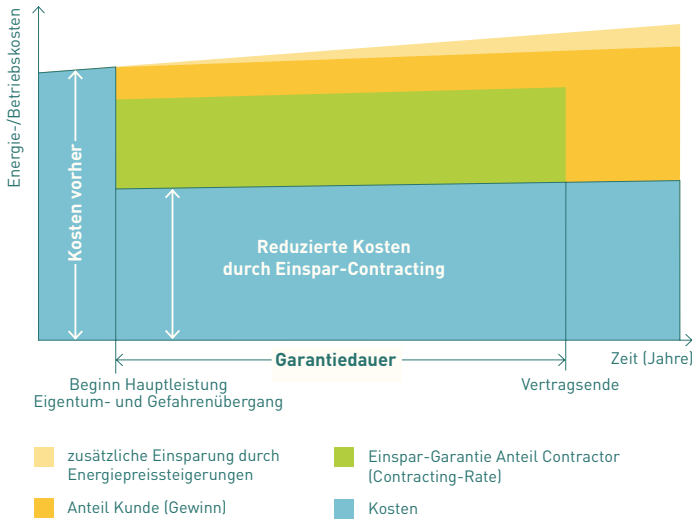


Plattformen, die sich für Energieeffizienzmaßnahmen anbieten, sind auf der Website des [Bundesverband Crowdfunding](#) zu finden:



Contracting und Beteiligungsmodelle

Vorhaben zur Abwärmenutzung lassen sich gut finanzieren: infrage kommen hierfür Leasing, Einspar-Contracting, Beteiligungsmodelle oder Genossenschaften. Auch Wärmeliefer-Contracting kann eine Option sein.



Kostenstruktur beim Einspar-Contracting

Ist das Risiko einer Kredit-Finanzierung zu hoch, können Ausfallbürgschaften unterstützend wirken. Mit diesem Instrument wird ein konkretes Kreditverhältnis zwischen der (Haus-)Bank und dem Kreditnehmer besichert. Zwar entbindet ihn die Bürgschaft nicht von seiner Rückzahlungsverpflichtung, aber das Risiko wird übertragen: im Falle ausbleibender Einsparungen zahlt die Bürgschaftsbank. Der Investor erhält so Zugang zu Krediten, die er ohne Bürgschaft nicht bekäme. Im Contracting bieten Bürgschaftsbanken der Länder explizit für beide Vertragspartner Bürgschaften an.

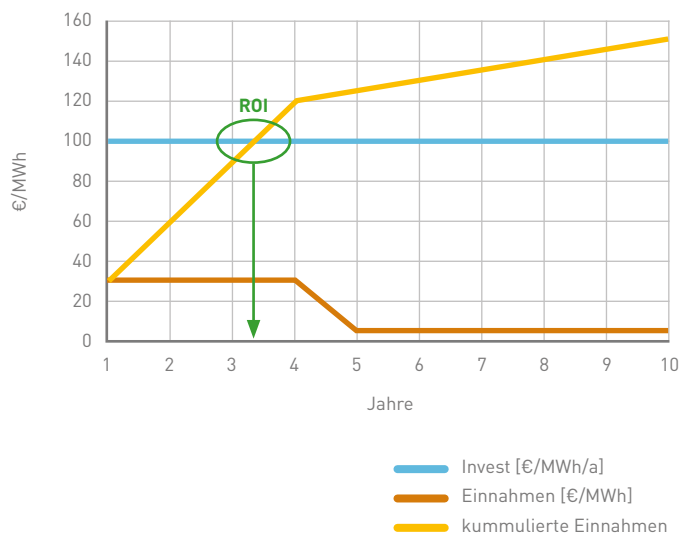
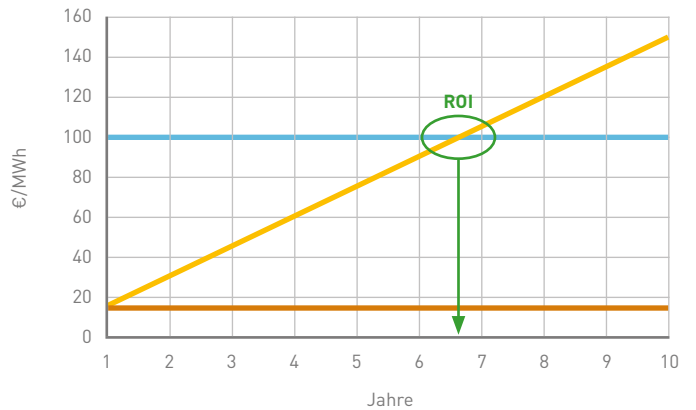
Das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle informiert zum Thema „**Contracting**“ unter:

Bürgschaften ersetzen fehlende Sicherheiten – die **Bürgschaftsbank Sachsen** informiert unter:

Vertragsgestaltung

Bei betriebsübergreifenden Abwärmeprojekten arbeiten Partner mit unterschiedlichen Interessen zusammen: der liefernde Industriebetrieb legt einen großen Wert auf einen kurzen „Return On Invest“ (ROI), der empfangende Wärmenetzbetreiber kann sich einen längeren ROI vorstellen. Eine für beide Seiten wirtschaftliche Lösung wird durch die Vertragsgestaltung bestimmt.

Sollte der Wärmenetzbetreiber in der Anfangsphase des Projektes bereit sein, einen höheren Preis für die Abwärme zu bezahlen, so verkürzt sich die Amortisationszeit beim industriellen Abwärmelieferanten. In einer nachfolgenden Projektphase liefert dann der Industriebetrieb die Wärme zu einem deutlich geringeren Preis, so dass auch der Wärmenetzbetreiber durch die geringeren Wärmebezugskosten über die Gesamtlaufzeit sein Wirtschaftlichkeitsziel erreicht. Die folgenden Abbildungen verdeutlichen, wie durch eine zeitlich variable Preisgestaltung der ROI beim Industriebetrieb verkürzt werden kann.

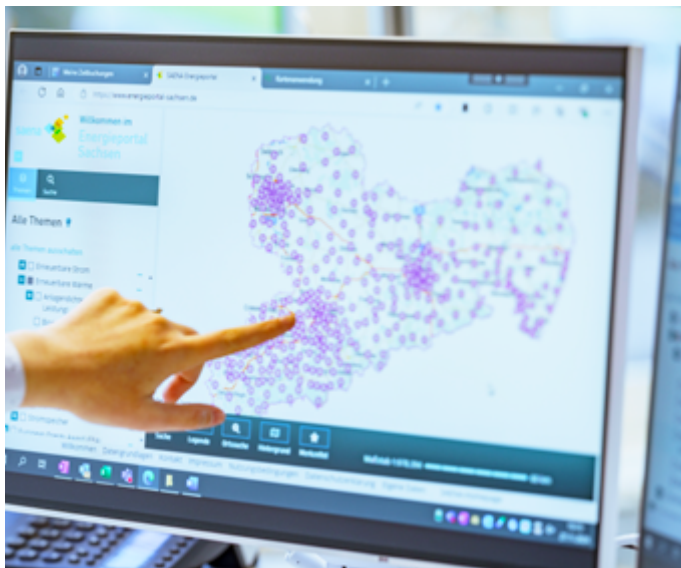


Beispiel für eine Verkürzung der Amortisation durch eine veränderte Vertragsgestaltung aus der Sicht eines Wärmelieferanten (z.B. Gewerbebetrieb mit Abwärme)

SAENA-Angebote

Initial- und Förderberatung

Wenn Investitionsentscheidungen die Energiekosten stabilisieren sollen, dann sind das oft Maßnahmen, die der Bund oder die Länder finanziell bezuschussen können. Die SAENA berät kostenfrei zu den wechselnden Angeboten und begleitet Unternehmen bei der Vorbereitung von Energiemaßnahmen bis zur Beantragung von Fördermitteln bei der Sächsischen Aufbau-bank – Förderbank – (SAB).



Qualifizierte Energieberater, Planer, Handwerker oder Experten zum Thema Energie finden Sie im Netzwerk „Energie-Experten Sachsen“, zu finden im [Energieportal Sachsen](#) – mit Themenkarten und weiteren Infos.



Die SAENA ist Netzwerkpartner der [Energieeffizienz-Expertenliste](#) für Förderprogramme des Bundes, die von der dena im Auftrag des [BMW](#) geführt wird.



Sächsischer Gewerbeenergiepass

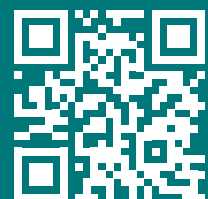
Der Sächsische Gewerbeenergiepass – kurz SäGEP – ist ein Zertifikat des Freistaates Sachsen und bescheinigt dem in-nerhabenden Unternehmen ein vorbildliches Energieeinsparkonzept. Denn erst wenn detaillierte Kenntnisse über die Energieflüsse im Unternehmen und deren wirtschaftliche Bewertung vorliegen, können qualifizierte Entscheidungen für individuelle Energieeinsparmaßnahmen getroffen werden. Über 300 sächsische Unternehmen aus dem Handwerk, der Industrie und dem Einzelhandel wurden bereits mit diesem Zertifikat ausgezeichnet und profitieren so von vielen Vorteilen (z.B. von Förderboni bei der Sächsischen Aufbau-bank – Förderbank).



Der Pass entspricht einer umfassenden energetischen Betriebsanalyse und kann nur durch qualifizierte Energieeffizienz-Expertinnen und -Experten erstellt werden. In seiner Struktur ist er wie ein Energieaudit nach DIN EN 16247-1 aufgebaut und findet daher u. a. bei der Erstattung des Spitzensteuerausgleichs für das produzierende Gewerbe Anwendung. Darüber hinaus bietet er eine wichtige Grundlage für Investitionsentscheidungen in neue Anlagen sowie Fertigungs- und Betriebsprozesse. Warum? – Weil heute nahezu jede Investition im Zusammenhang mit Energiekosten steht!

Die Anwendung des Instruments erfolgt ausschließlich durch qualifizierte und zertifizierte Energieeffizienz-Expertinnen und -Experten, die „Sächsische Gewerbeenergieberaterinnen und -berater“. Ständige Weiterbildung und Erfahrungsaustausch über aktuelle Technologieanwendungen garantiert Expertise über das jeweilige Spezialgebiet hinaus. Mehr Informationen zum Netzwerk der „Sächsischen Gewerbeenergieberaterinnen und -berater“ sind unter dem Stichpunkt „SäGEP-Netzwerk“ zu finden.

Weitere Informationen zum Sächsischen Gewerbeenergiepass und dem SäGEP-Beraternetzwerk unter: www.saena.de/sagep



Energieeffizienzgesetz und Plattform Abwärme

Gemäß dem aktuellen Referentenentwurf zum Energieeffizienzgesetz (EnEfG) sind nur noch große Industrieanlagen, Versorgungseinrichtungen und Rechenzentren verpflichtet, eine Kosten-Nutzen-Analyse zur Nutzung der technisch unvermeidbaren Abwärme am Standort und außerhalb des Standortes durchzuführen. Dabei geht es um alle gerichteten, d.h. an ein gefasstes Medium gebundene Abwärmeströme oberhalb der Bezugstemperatur von 25 °C. Diffuse Abwärme bleibt vorerst unberücksichtigt.

Ausgenommen von dieser Pflicht sind Abwärmeströme unterhalb folgender Bagatellgrenzen:

- Abwärmemenge pro Standort: < 800 MWh/a
- Abwärmeströme: < 1500 Bh/a
- Abwärmeströme: < 200 MWh/a
Bezugstemperatur (derzeit) 25 °C

Hierfür hat die Bundesstelle für Energieeffizienz (BfEE) im Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) eine Abwärmeplattform geschaffen. Diese Übersicht schafft Transparenz und ermöglicht die Vernetzung zwischen nutzbaren Abwärmepotentialen und in der Nähe befindlichen Wärmesenken. Dies kann der Planung von neuen Unternehmensstandorten nützlich sein.

Gemeldet werden:

- Wärmemenge pro Jahr [kWh/a]
- Maximale Thermische Leistung [kW]
- Durchschnittliches Temperatur-Niveau [°C]
- Tägliche Verfügbarkeit des Abwärmepotentials in Stunden [h/d]
- Kurze Beschreibung des Abwärmepotentials
- Monatliches Leistungsprofil [kW] für jeden Monat

In einem Gutachten zu den Bagatellschwellen wurde darauf hingewiesen, dass Abwärmequellen bzw. -projekte stets individuell betrachtet werden müssen und aufgrund der zahlreichen Einflussfaktoren kein Projekt einfach mit dem anderen verglichen werden kann. Daher empfiehlt es sich, bei Interesse an einem Abwärmeprojekt mit externer Nutzung schon frühzeitig die jeweils notwendige Fachexpertise als Unterstützung einzubinden.



Zahlreiche Kamine, Schornsteine, Abzüge, Kühlaggregate und Freikühler deuten meistens auf das Vorhandensein von Abwärme hin. Quelle: KI-generiert mit OpenAI (2026)

Die jeweils gültige Auslegung des EnEfG seitens der überwachenden Behörde (BfEE, BAFA) findet sich auf deren Internetseite und den entsprechenden Merkblättern, die unter der Rubrik Informationen zum Thema / Publikationen stets aktuell gehalten werden.

Die **Plattform für Abwärme** schafft erstmals eine Übersicht zu gewerblichen Abwärmepotentialen in Deutschland. Ziel ist es, diese Abwärme nutzbar zu machen und damit die Energieeffizienz in Deutschland weiter zu steigern. Dafür werden die Abwärmedaten von Unternehmen mit einem Gesamtenergieverbrauch von mehr als 2,5 Gigawattstunden pro Jahr auf einer öffentlichen Plattform bereitgestellt und sichtbar gemacht.



Einbindung von unvermeidbarer Abwärme in die kommunale Wärmeplanung

Nach Wärmeplanungsgesetz vom 20.12.2023 (WPG) sind die Länder verpflichtet, für Kommunen mit mehr als 100.000 Einwohnern bis 30.6.2026 und Kommunen mit weniger als 100.000 Einwohnern bis 30.6.2028 die Erstellung von Wärmeplänen zu gewährleisten. Übergreifendes Ziel dieses Gesetzes ist es, einen wesentlichen Beitrag für eine treibhausgasneutrale und bezahlbare Wärmeversorgung bis 2045 zu leisten. Hierfür soll die Erzeugung und Versorgung mit Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme für Bürger, Kommunen und Unternehmen auf erneuerbare Energien, unvermeidbare Abwärme oder einer Kombination hieraus umgestellt werden.

Das sächsische Kabinett hat am 17.6.2025 die sächsische Wärmeplanungsverordnung (SächsWPVO) beschlossen. Mit der Verordnung werden die Gemeinden als planungsverantwortliche Stelle für die Erstellung von Wärmeplänen verpflichtet und mit den für die Durchführung der Wärmeplanung notwendigen Rechten ausgestattet. Zudem werden Regelungen zum vereinfachten Verfahren sowie der gemeinsamen Erstellung von Wärmeplänen getroffen.

Im Rahmen der Bestandsanalyse ist die planungsverantwortliche Stelle befugt, bei Unternehmen Angaben zu:

- Prozesswärmeverbräuchen,
 - eingesetzten Energieträgern,
 - unvermeidbare Abwärmemengen und
 - Transformationsplänen zur Prozesswärmeversorgung
- abzufragen.

Auf Basis der vorliegenden Informationen werden anschließend Potenziale ermittelt, ein Zielszenario und Umsetzungsmaßnahmen für eine treibhausgasneutrale Wärmeversorgung bis 2045 entwickelt.

Die planerische Einbindung von industrieller Abwärme in ein Zielszenario ist von mehreren Anforderungen abhängig. Zunächst muss es sich um unvermeidbare Abwärme handeln. Abwärme gilt nach WPG als unvermeidbar, soweit sie aus wirtschaftlichen, sicherheitstechnischen oder sonstigen Gründen im Produktionsprozess nicht nutzbar ist und nicht mit vertretbarem Aufwand verringert werden kann.

Die planungsverantwortliche Stelle muss nach Abfrage der Transformationspläne zur Prozesswärmeerzeugung bei den Unternehmen bewerten, ob auch in Zukunft signifikante unvermeidbare Abwärmemengen vorhanden sind. Erst dann kann die planungsverantwortliche Stelle unter Einbeziehung von Risiko- und Wirtschaftlichkeitsabwägungen eine Einbindung in bestehende, zu erweiternde oder noch zu errichtende Wärmenetze in der Wärmeplanung empfehlen.

Da in vielen Unternehmen noch erhebliche Unsicherheiten hinsichtlich des einzuschlagenden Dekarbonisierungspfades bestehen und die langfristigen Geschäftsmodelle von Wärmeversorgungsunternehmen eine möglichst kontinuierliche oder zumindest zeitlich sicher prognostizierbare Einspeisung unternehmerischer Abwärme erfordern würde, besteht auf Grund der aus dem üblichen Produktionsprozess resultierenden Beschränkungen und Risiken (z. B.: keine 24/7-Produktion, Wartung und Instandhaltung, Betriebsferien, Kurzarbeit, Produktionsverlagerung, Insolvenz, etc.) eine Zurückhaltung bei der planerischen Integration von unternehmerischer Abwärme seitens der Wärmeversorger und Betreiber von Wärmenetzen.

Der **Leitfaden Wärmeplanung – Empfehlungen zur methodischen Vorgehensweise für Kommunen und andere Planungsverantwortliche** richtet sich in erster Linie an diejenigen, die die Wärmeplanung durchführen oder deren Durchführung verantworten und begleiten. Er richtet sich darüber hinaus an die Akteure, die im Wärmeplanungsprozess zwingend zu beteiligen sind oder beteiligt werden können.

Kompetenzzentrum Kommunale Wärmewende (KWW): Die Nutzung von unvermeidbarer Abwärme durch Wärmetauscher oder Wärmepumpen erhöht die Energieeffizienz. Förderbar und gesetzlich reguliert bietet sie ein enormes Potenzial für die Wärmewende, besonders durch Einspeisung in Wärmenetze.



Energieeffizienz- und Klimaschutz-Netzwerke



Ein Energieeffizienz- und Klimaschutz-Netzwerk ist eine Plattform für den systematischen und zielgerichteten Erfahrungsaustausch zwischen den teilnehmenden Unternehmen. Dafür finden in der Regel in einem Zeitraum von 2 Jahren mindestens 8 Treffen statt. Es werden gemeinsam Ideen zur Steigerung der Energieeffizienz, Energiekostensenkung und Treibhausgas-Reduktion sowie die Entwicklung von konkreten Klimastrategien diskutiert. Eine Teilnehmeranzahl von 10–15 Unternehmen je Netzwerk hat sich dabei als optimal erwiesen.

Energiespar- und Dekarbonisierungspotentiale erkennen

Zu Beginn wird durch eine qualifizierte Energieberatung, intern oder extern, für jedes Unternehmen das mögliche Energiesparpotential ermittelt. Basierend auf dieser Datengrundlage setzt sich jedes Unternehmen sein individuelles Einsparziel für die vereinbarte Laufzeit des Netzwerkes. Kumuliert ergibt sich somit ein Gesamt-Einsparziel für jedes Netzwerk.

Erfahrungsaustausch

Anschließend beginnt der Erfahrungsaustausch. Die regelmäßigen Treffen werden von erfahrenen Moderatoren geleitet und von Fachexperten unterstützt. Betriebsrundgänge im Rahmen dieser Treffen haben sich als ein besonders beliebtes Element der Energieeffizienz- und Klimaschutznetzwerke etabliert. Auf freiwilliger Basis fungiert hierbei ein Unternehmen als Gastgeber. Die Teilnehmer lernen sich kennen und profitieren von Erfahrungen im Bereich der Effizienzmaßnahmen anderer.

Monitoring

Abschließend werden die Ergebnisse der Maßnahmenumsetzungen in einem Monitoring zusammengetragen und mit der Zielstellung abgeglichen. Basierend auf den bisherigen Erfahrungen der sächsischen Energieeffizienz- und Klimaschutznetzwerke werden die Zielstellungen i.d.R. übererfüllt.

Vorteile auf einen Blick

- Ausbau von Know-How zu Energieeinsparung und Effizienzsteigerung
- Austausch von Erfahrungen zur Identifikation eigener Effizienzmaßnahmen
- Entwicklung konkreter Klimastrategien
- Nutzung von Förderprogrammen mit fachlicher Unterstützung
- Gewinnung neuer Projektpartner
- Profitieren von Vernetzung mit Politik, Wirtschaft und anderen Akteuren

Sächsisches Netzwerkkonzept

- Teilnehmerzahl: 8–15, branchenübergreifend in jeder Unternehmensgröße
- Anzahl Netzwerktreffen: 2–8 pro Jahr, jeweils ca. 5 Stunden zu Gast bei einem Teilnehmer
- Inhalte: Vorträge wechselnder Experten, moderierter und offener Erfahrungsaustausch, Betriebsrundgang beim Gastgeber
- Dauer: 2 Jahre
- Finanzierung mit Unterstützung durch den Freistaat Sachsen

Impressum

Auflage

3. Auflage, März 2026

Herausgeber

Sächsische Energieagentur – SAENA GmbH

Pirnaische Str. 9

01069 Dresden

Telefon: 0351 4910-3179

Telefax: 0351 4910-3155

E-Mail: info@saena.de

Internet: www.saena.de

Redaktion

Sächsische Energieagentur – SAENA GmbH

Therm-Process-Consulting, Dr.-Ing. Jens Strack

Redaktion der 1. Auflage (2012)

Sächsische Energieagentur – SAENA GmbH

Therm-Process-Consulting, Dr.-Ing. Jens Strack

DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH, Fachgebiet Gasanwendung

Redaktion der 2. Auflage (2016)

Sächsische Energieagentur – SAENA GmbH

Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM, Dresden

Geschäftsfeld Energie und Thermisches Management

Prof. Dr.-Ing. Jens Meinert

Gestaltung & Satz

Mai & März GmbH

Bildnachweis

Titelseite – links: SAENA, rechts oben: KI-generiert mit OpenAI 2026,
rechts unten: erikkrüger / photography;

Inhalt – S. 4: SAENA; S. 5: erikkrüger / photography; S. 14 links: WätaS GmbH, rechts: AEL Apparatebau GmbH Leisnig; S. 15 links: WätaS GmbH, rechts: Penke, Reineward & Co. GmbH; S. 16 links: Alfa Laval, rechts: Klingenburg GmbH; S. 17 links: WätaS GmbH, rechts: Solex Thermal Science Inc.; S. 18 links: Coperion GmbH, rechts: AMF-Bruns Industrial Solutions GmbH & Co. KG; S. 19 links: thyssenkrupp Polysius GmbH, rechts: Aslantep Industry Makine San. Tic. A.S. Türkei; S. 20: Danieli & C. S.p.A. Italy; S. 21: ENERGYNЕСТ; S. 24: KI-generiert mit OpenAI 2026; S. 26: VG Offenbach/Queich; S. 29: Ochsner; S. 31: SAENA; S. 35: istock/imantsu; S. 38: SorCool GmbH; S. 39: M+M Turbinen-Technik; S. 41: Dürr Systems AG; S. 46: NOXMAT GmbH; S. 49 oben und unten: thermofin GmbH; S. 52: erikkrüger / photography; S. 53: KI-generiert mit OpenAI 2026; S. 55: SAENA

Tabelle S. 13 – Bilder von oben nach unten: WätaS GmbH; AEL Apparatebau GmbH Leisnig; WätaS GmbH, Penke, Reineward & Co. GmbH; Alfa Laval; Klingenburg GmbH; WätaS GmbH; Solex Thermal Science Inc.; Coperion GmbH; AMF-Bruns Industrial Solutions GmbH & Co. KG; thyssenkrupp Polysius GmbH; Aslantep Industry Makine San. Tic. A.S. Türkei; Danieli & C. S.p.A. Italy