



Technologien der Abwärmennutzung



ENERGIEEFFIZIENZ
IN UNTERNEHMEN

saena

Sächsische
Energieagentur GmbH





Inhaltsverzeichnis

	Einleitung	4
1	Methodik der Abwärmenutzung	7
2	Direkte Abwärmenutzung	13
2.1	Wärmeübertrager	14
2.1.1	Rekuperatoren	15
2.1.2	Regeneratoren	20
2.2	Wärmespeicher	22
2.2.1	Sensible Wärmespeicher	24
2.2.2	Latentwärmespeicher	26
2.2.3	Sorptive Wärmespeicher	28
3	Indirekte Abwärmenutzung	31
3.1	Kreisprozesse	32
3.2	Wärmepumpen und Kältemaschinen	32
3.2.1	Kompressionswärmepumpe	15
3.2.2	Absorptionswärmepumpe und -kältemaschine	35
3.2.3	Adsorptionswärmepumpe und -kältemaschine	38
3.3	Stromerzeugung	40
3.3.1	Dampfkraftprozess	41
3.3.2	ORC-Prozess	43
3.3.3	Gasturbinenprozess	45
3.3.4	Stirlingmotor	47
4	Angebote rund um Abwärmenutzung	49
	Impressum	54

Einleitung

Ein Großteil des Energieverbrauchs der deutschen Industrie dient der Bereitstellung von Prozesswärme. Im Jahr 2012 benötigte die Erzeugung von Warmwasser und anderer Prozesswärme fast zwei Drittel der eingesetzten Energie und damit mehr als alle anderen Nutzungsformen zusammen. Vielfach werden solche und andere Statistiken herangezogen, um das Einsparpotenzial im Wärmebereich aufzuzeigen und damit dem Thema Abwärmenutzung in Energiepolitik und Unternehmensführung einen höheren Stellenwert zu geben.

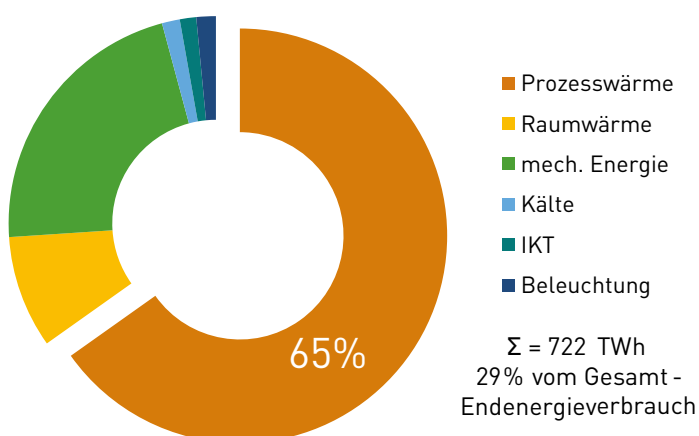


Abb. 1: Anteil der Prozesswärmeerzeugung am Endenergieverbrauch der Industrie Deutschlands. Neben der Industrie haben außerdem die Sektoren Haushalte (27%), Verkehr (29%) sowie Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (16%) Anteil am Endenergieverbrauch.

Die dabei suggerierten Gegebenheiten und Möglichkeiten – dass ein Großteil des Energieverbrauchs vermeintlich zurückgewonnen werden kann – finden Unternehmer im eigenen Betrieb jedoch kaum wieder. Dabei zeigen solche Zahlen vielmehr, dass die Energiekosten in der Produktion im Mittel stark von der Prozesswärmeerzeugung bestimmt werden, und dass Unternehmer gut beraten sind, sich frühzeitig dieses Kostenfaktors anzunehmen.

Zudem wird der Prozesswärmebedarf aktuell überwiegend durch fossile Energieträger gedeckt. Mit der Einhaltung von Klimaschutzzielen müssen diese durch erneuerbare Energien ersetzt werden. Die Bereitstellung von Prozesswärme wird langfristig also höhere Kosten verursachen. Wer frühzeitig damit beginnt, seine Produktion auf andere Energieträger umzustellen, gerät weniger in Zugzwang, sobald Energiekosten wieder steigen oder



die indirekten Kosten der Energieversorgung durch ordnungspolitische Klimaschutzmaßnahmen angehoben werden.

Abwärmenutzung ist nur ein Instrument, um die Effizienz in der Produktion zu erhöhen und damit Kosteneinsparungen zu erreichen. Nach organisatorischen Maßnahmen zum Verringern des Energiesatzes stellt sie oft die günstigste Möglichkeit dar, den Energiebedarf im Unternehmen durch Investition in Anlagentechnik zu reduzieren. 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.

Dabei zeigt die Erfahrung, 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, wurde durch die Sächsische Energieagentur – SAENA GmbH im Jahr 2012 eine erste Broschüre zur Abwärmenutzung erarbeitet, die mit dieser Neuauflage vollständig überarbeitet vorliegt. 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 Abwärmeatlas Sachsen (www.abwaermeatlas-sachsen.de) bietet ein Abwärme-Kataster, in dem sächsische Unternehmen ihre Abwärmequellen und -senken registrieren lassen können, um sie bei der Planung von Erweiterungen oder bei der Standortsuche über die Unternehmensgrenzen hinweg berücksichtigen und nutzbar machen zu können. Mit der Neuauflage der Broschüre wird außerdem ein Online-Katalog mit Best-Practice-Beispielen geschaffen, der ausgewählte Abwärmenutzungsvorhaben sächsischer Unternehmen vorstellt. Die Onlineversion ermöglicht es dem Nutzer, Anregungen in einer ganzen Reihe von Beispielen zu finden, die in einer Broschüre nicht hätten untergebracht werden können.



Abb. 2: Nutzung der Abwärme aus einem Blockheizkraftwerk mittels Plattenwärmeübertrager (S. 15) bei Frottana Textil GmbH & Co. KG in Großschönau (Lausitz)



1

Methodik

der Abwärmenutzung

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

1. Warum tritt Abwärme auf?

Abwärme fällt in nahezu allen industriellen Prozessen an. Immer dann, wenn ein Energieträger (z.B. Gas, Öl oder Strom) 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.

Vor Überlegungen zur Nutzung von Abwärme sollten immer erst Anstrengungen zur Vermeidung unternommen werden. Dabei wird folgende Reihenfolge empfohlen:

1. offensichtlichen Mehrverbrauch vermeiden – sinnvolles Abschalten, Vermeiden von Sicherheitszuschlägen
2. Nutzenergiebedarf senken – Wärmedämmung, Prozess- und Verfahrensoptimierung
3. Nutzungsgrad der Energie verbessern – Auslastung optimieren, Kopplungseffekte nutzen

Mit Beachtung der vorgenannten Punkte werden bestehende Abwärmequellen zunächst reduziert, bevor sie auf eine mögliche Energierückgewinnung untersucht werden. Auf diese Weise lassen sich erste Einsparungen bereits ohne oder zu nur geringen Kosten erzielen und die im Folgenden beschriebenen Technologien effektiv und auf sinnvoller Grundlage einsetzen.

2. Wie tritt Abwärme auf?

Abwärme ist an bestimmte Medien gebunden oder wird diffus an die Umgebung abgegeben.

Abwärmeträger können Abgase, Abluft, Dämpfe, Brüden, Thermostöle sowie Kühl- und Prozesswasser sein. Abwärme aus Trägermedien ist häufig in großer Menge verfügbar und kann mit Wärmeübertragern nutzbar gemacht werden. Wegen des besseren Wärmeübergangs ist dabei die Abwärme aus flüssigen Medien oftmals mit geringerem baulichen Aufwand nutzbar als die Abwärme aus gasförmigen Medien.

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).

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 Temperatur 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)

Kriterien für die Bewertung von Abwärmepotenzialen

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.

Eine erste Abschätzung kann mithilfe des Bewertungsschemas („Kriterien für die Bewertung“) vorgenommen werden. Stehen viele Abwärmequellen zur Verfügung, kann man anhand des Bewertungsschemas eine Prioritätenliste generieren. Die wirtschaftlich am besten erschließbaren Quellen lassen sich so als erstes prüfen. Manchmal findet man sie auch in benachbarten Betrieben.

4. Wohin mit der Abwärme?

Abwärmesenken finden sich in fast allen Unternehmen. Typischerweise kann Abwärme durch den Einsatz von **Wärmeübertragern** (Kap. 2.1) auf ähnlichem Temperaturniveau wiedereingesetzt werden. Diese direkte Nutzung von Abwärme ist häufig die konstruktiv einfachste und kostengünstigste Variante. Abwärme kann auch anders genutzt werden, als Luft, Wasser oder andere Prozessmedien zu erwärmen. Bei der indirekten Abwärmenutzung wird die Wärmeenergie der Abwärmequelle nicht unmittelbar wiedereingesetzt, sondern in andere Energieformen umgewandelt. Dabei kann Wärme bei höheren Temperaturen, Kälte oder mechanische Arbeit gewonnen werden. Typische Abwärmesenken, die in vielen Unternehmen existieren, lassen sich daher in drei Bereichen finden:



Wärme

1. **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.
2. **BETRIEBSINTERN: Integration in andere Prozesse auf einem möglichst hohen Temperaturniveau.** Besteht ein Bedarf an Prozesswärme mit hohem Temperaturniveau, sollte dieser primär als Senke für Hochtemperatur-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 unterbringen.
3. **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 kann sie in Produktionsprozessen benachbarter Unternehmen, zur Beheizung von Wohn- und Geschäftsräumen, von Sport- und Freizeitanlagen wie Schwimmbädern oder Energieversorgern zur Verfügung gestellt werden.

10 Methodik der Abwärmenutzung

Kälte

Häufig besteht ein Bedarf an Klimakälte, der mithilfe von thermisch angetriebenen **Kältemaschinen** (Kap. 3.2) gedeckt werden kann. Da diese Wärmesenke nur saisonal zur Verfügung steht, muss in der Heizperiode eine andere Wärmesenke für die Abwärme bzw. eine separate Kühlung verfügbar sein.

Vorteilhaft ist hingegen ein Kühlbedarf bei Produktionsprozessen, da die Wärme hier häufig über das ganze Jahr genutzt werden kann.

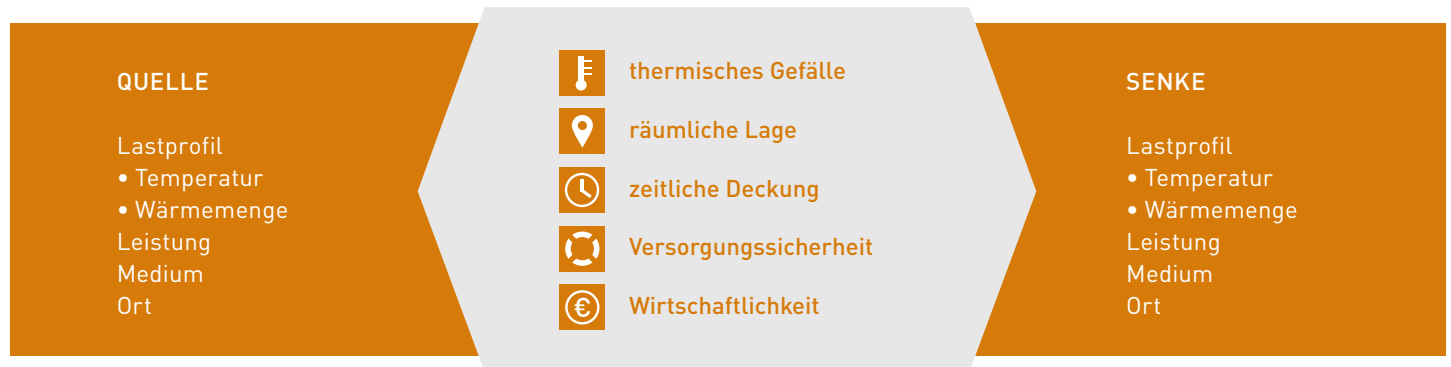
Strom

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. Häufig 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.

Treten Wärmbereitstellung 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 unterschiedlicher 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.

5. 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 verschiedenen 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. Häufig kann auf Senkenseite bereits eine Vorwärmung von Ausgangsstoffen Einsparungen bewirken, ohne die erforderliche Prozesstemperatur zu erreichen. Alternativ kann eine Wärmepumpe eingesetzt werden.
- Die thermische Leistung bzw. Wärmemenge der Wärmequelle sollte größer sein als der Bedarf der Wärmesenke. Andernfalls ist ein zusätzlicher Wärmeerzeuger erforderlich (z.B. Spitzenkessel). Ist bereits ein redundantes System vorhanden, kann es in Teillast betrieben werden, was dessen 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 dazu einander leicht angenähert werden. Bei Nutzung mehrerer Abwärmequellen sind deren Betriebszeiten zu staffeln. Andernfalls sind Speicher oder redundante Systeme vorzusehen.

Versorgungssicherheit

- Entsprechend der erforderlichen Versorgungssicherheit der Abwärmesenke sind redundante Anlagen zur Verfügung zu stellen. Während die Stromversorgung in der Regel über den Netzanschluss abgesichert ist, sind bei der Wärmelieferung an einen Nachbarbetrieb zusätzliche Anlagen 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.

Wirtschaftlichkeit

- Die Wirtschaftlichkeit wird bestimmt durch: Investitionskosten, Wartungs- und Betriebskosten, Erlöse durch die Abwärmenutzung (Einsparung an Energiekosten, Verkauf der Wärme usw.). Diese Kosten bzw. Erlöse sind den Kosten bei Weiterbetrieb der unveränderten Anlage gegenüber zu stellen. Dabei sollten veränderliche Faktoren wie der Energiepreis mit 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 Nutzungsdauern werden häufig Werte von über 10 % erreicht.
- Kann die erforderliche Investition nicht aus eigenen Mitteln erbracht werden, sollten Finanzierungsmodelle in Betracht gezogen werden: Investitionskosten lassen sich durch Fördermittel senken, Maßnahmen kann man durch Contracting auslagern, für das Ausbleiben der positiven finanziellen Effekte lassen sich Versicherungen abschließen (Kap. 4).

Weiteres

- Der Verschmutzungsgrad des Abwärmeträgers 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 wiedereinssetzen 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. Um die Abwärme 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 Abwärmenutzungsoptionen.

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 Abwärmenutzung 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 Vielfalt an Wärmeübertrager-Prinzipien und -Bauarten existieren verschiedene Einteilungen. In der Regel haben sie für die Nutzung von Abwärme wenig Mehrwert. Aus diesem Grund wird folgende einfache Einteilung nach den Wärmeübertragungsprinzipien vorgenommen:

 In **Rekuperatoren** sind die beiden Medien räumlich voneinander durch eine wärmeübertragende Fläche getrennt. Die Wärmeleistung eines Rekuperators kann aus der Beziehung berechnet werden:

$$\dot{Q} = k A \Delta T_m$$

Darin beschreibt k den sog. Wärmedurchgangskoeffizienten [$\text{kW}/(\text{m}^2\text{K})$] (umgangssprachlich auch k - oder U -Wert). Dieser hängt im Wesentlichen vom Wärmeübergang zwischen

Heizmedium und Wand sowie zwischen Wand und Kühlmedium ab. A [m^2] ist die innere wärmeübertragende Fläche und ΔT_m [K] die flächengemittelte Temperaturdifferenz zwischen Heiz- und Kühlmedium.

Rekuperatoren sind auch Bestandteil der meisten indirekten Nutzungstechnologien (Kap. 3).



Regeneratoren verfügen über eine thermische Speichermasse, die abwechselnd vom Heiz- und vom Kühlmedium durchströmt wird. Sie ähneln damit Wärmespeichern (Kap. 2.2), allerdings sind die Zykluszeiten wesentlich kürzer. Für eine kontinuierliche Arbeitsweise werden rotierende Speichermassen (bzw. umschaltende Anschlusskanäle) oder umlaufende Speichermedien verwendet. Dadurch lassen sich Regeneratoren zur direkten Abwärmenutzung einsetzen.

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

- Aggregatzustand von Abwärmemedium und Prozessmedium (flüssig/flüssig, gasförmig/flüssig, gasförmig/gasförmig)
- Phasenübergang (Verdampfung oder Kondensation eines der Medien)
- Druckniveau und Druckunterschied zwischen den Medien
- Verunreinigte Medien erfordern den Einsatz reinigbarer oder wenig für Verschmutzungen anfälliger Bauarten.
- 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.



Plattenwärmeübertrager

Plattenwärmeübertrager (kurz: PWÜ) sind aus mehreren parallelen Platten aufgebaut, zwischen denen sich Spalte befinden, durch die abwechselnd das Heiz- oder das Kühlmedium strömen. Das meist geringe Spaltmaß und die Profilierung der Platten erzeugen eine für die Wärmeübertragung günstige turbulente Strömung. Des Weiteren wird durch eine große Anzahl profilierter Platten die Wärmeübertragerfläche vergrößert, so dass bei geringer Baugröße eine hohe Wärmeleistung resultiert (hohe Leistungsdichte).

Plattenwärmeübertrager gibt es in verschiedenen Bauformen und aus unterschiedlichen Materialien. Die einzelnen Platten sind je nach Ausführung verlötet, verschweißt oder werden durch Spannschrauben zusammengehalten. Während die Ausführungen mit Spannschrauben zwecks Reinigung demontiert werden können, sind die stofflich gefügten Modelle nur für saubere Medien geeignet. Es gibt auch Mischbauformen mit Kassetten aus jeweils zwei verschweißten Platten, die mit Spannschrauben fixiert sind.

Bei den in den Abbildungen gezeigten Varianten sind die Anschlüsse der beiden Medien als Rohrstutzen ausgeführt.

Plattenwärmeübertrager sind durch die relativ aufwendigen Fügeverfahren (Dichtheit) kostenintensiv. Je nach Wahl des Werkstoffes und der Fügetechnologie können Temperaturen bis 750 °C realisiert werden. Beide Medien sollten nach Möglichkeit drucklos sein und über ein ähnliches Wärmeübergangsverhalten verfügen, bei der Kombination Gas/Gas gilt $k \approx 10 \dots 30 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, bei Flüssigkeiten $k \approx 200 \dots 1.500 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

Plattenwärmeübertrager

Leistungsbereich	bis 400 MW
Heiz-/Kühlmedium	flüssig/flüssig, gasförmig/gasförmig
Temperaturniveau	bis 750 °C
Sonstiges	niedrige Drücke, geringe Druckverluste
Kosten	< 10 €/kW

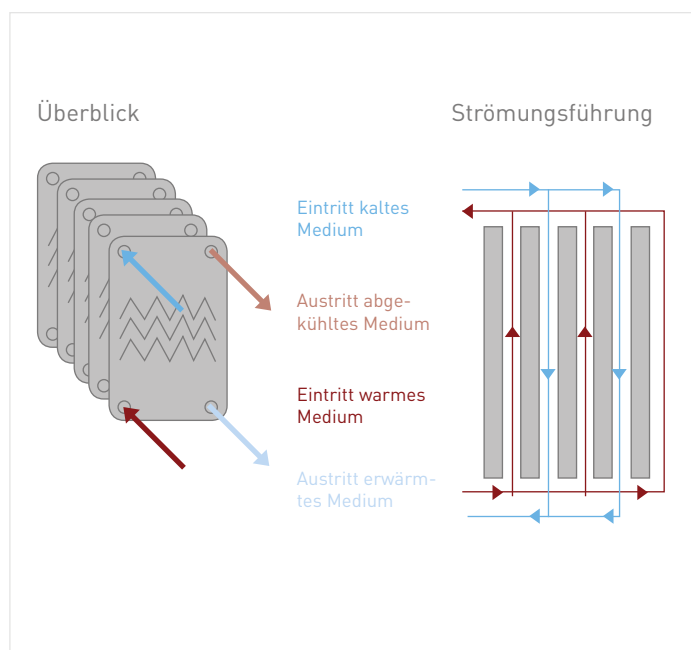


Abb. 3: Prinzip eines Plattenwärmeübertragers

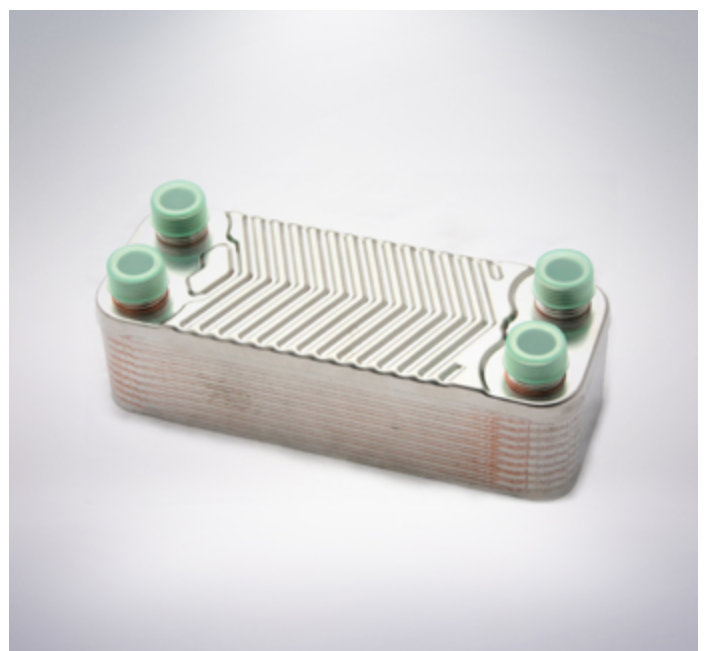


Abb. 4: Plattenwärmeübertrager mit Stutzen für Kühl- und Heizmedium

16 Direkte Abwärmenutzung



Rohrbündel- wärmeübertrager

Rohrbündelwärmeübertrager bestehen aus einer Vielzahl paralleler, meist dünnwandiger Rohre, auf die sich die Strömung des einen 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 paralleler Rohre mit Längen bis zu mehreren Metern aufgebaut sein, es lassen sich große Volumenströme realisieren. Das Medium in den Rohren wird dabei bei mehrflutigen Ausführungen durch Verteiler-Sammler umgelenkt. Alternativ kann jedes Einzelrohr eine Umlenkung erzeugen (U-Rohr-Wärmeübertrager, Abb. 6).

Rohrbündelwärmeübertrager werden vorzugsweise für flüssig/flüssig-Anwendungen (bei Wasser $k \approx 1.000 \dots 3.000 \text{ W/(m}^2\text{K)}$) 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 Rohrbündelwärmeübertrager in der Anschaffung meist teurer als andere Wärmeübertrager. Die Rohre lassen sich mit vertretbarem Aufwand sowohl innen als auch außen (durch „Ziehen“ des Rohrbündels) reinigen.

Rohrbündelwärmeübertrager

Leistungsbereich	bis 20 MW
Heiz-/Kühlmedium	flüssig/flüssig, Verdampfer
Temperaturniveau	bis 550 °C
Sonstiges	Hochdruckmedium im Rohr, moderate Druckverluste
Kosten	10 ... 150 €/kW

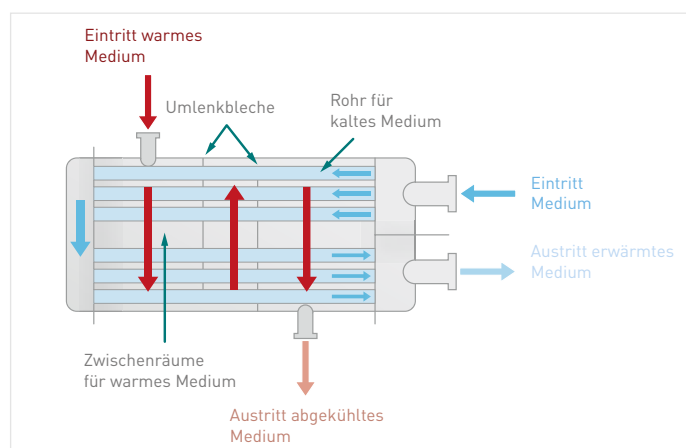


Abb. 5: Prinzip eines Rohrbündelwärmeübertragers

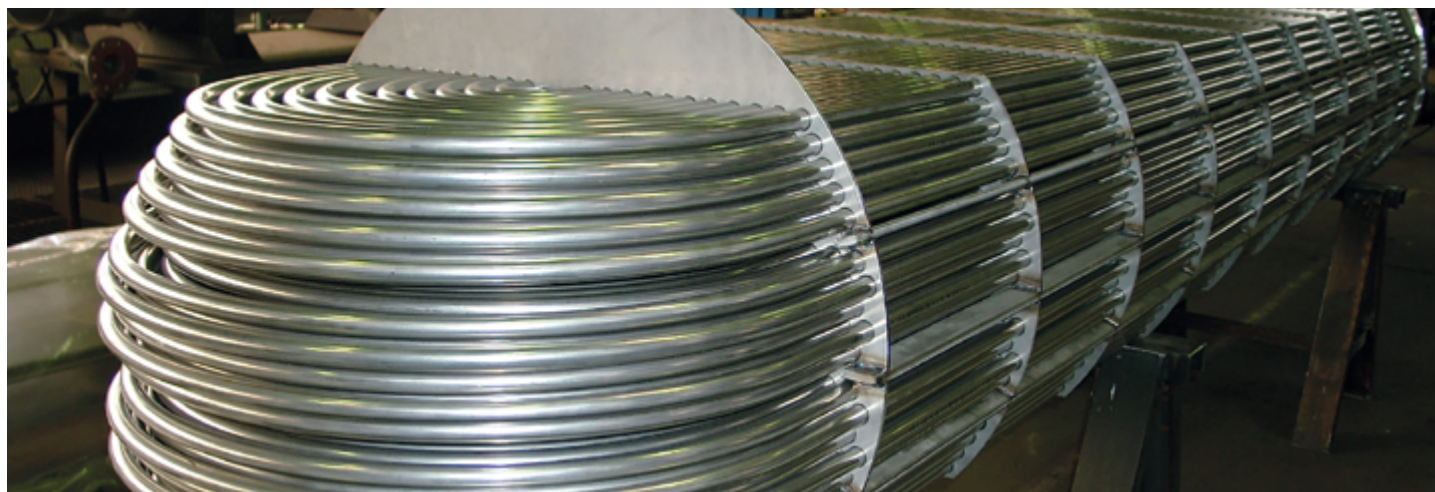


Abb. 6: Rohrbündelwärmeübertrager mit U-Rohren



Rippenrohr- wärmeübertrager

Rippenrohrwärmeübertrager 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.

Rippenrohrwärmeübertrager gibt es in verschiedenen Ausführungen, dabei können gerade Rippenrohre einzeln oder im Bündel (Heiz- bzw. Kühlregister) angeordnet werden. Alternativ sind Rippenrohre auch in U-Form oder als Spirale (Spiralrohrwärmeübertrager) verfügbar.

Eine Bauform, bei der die einzelnen Rippen das gesamte Rohrbündel als Bleche durchziehen, wird als **Lamellenwärmeübertrager** bezeichnet. Im Vergleich zu einzelnen Rippenrohren ist die Fertigung von Lamellenwärmeübertragern kostengünstiger. Die benötigten Lochraster für die Rohranordnung (fluchtend oder versetzt) werden in die Bleche gestanzt, die Stanzfalze legen den Lamellenabstand fest.

Eine Strukturierung der Bleche beim Stanzen dient der Erzeugung von Turbulenzen und verbessert den gaseitigen Wärmeübergang. Die Rohre werden durch das Lochraster des Lamellenpaketes geschoben, mechanisch (Dorn) oder hydraulisch (Öl) geweitet und so mit den Lamellen verpresst.

Lamellenwärmeübertrager werden für Gas/Flüssigkeit-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 Lamellenspalten sorgen für hohe Wärmeleistungen.

Vorzugsweise bestehen die Lamellen aus Aluminium, je nach Temperaturniveau und Anwendungsbereich kommen aber auch Kupfer, Stahl oder Edelstahl (bei korrosiven Gasen) zum Einsatz. Die Rohre können ebenfalls aus all diesen Werkstoffen gefertigt werden.

Die Lamellenblöcke sind durch die engen Lamellenabstände (teilweise unter 1 mm) sehr empfindlich gegenüber verschmutzten bzw. feuchten Gasen, da kondensierendes Wasser in den Lamellen gehalten wird (Kapillarkräfte), den Schmutz an der

Oberfläche anhaften lässt und bei Temperaturen unter 0 °C vereisen kann. Bei Kältemaschinenverdampfern werden z. B. einige Rohre durch elektrische Heizstäbe ersetzt, um ein regelmäßiges Abtauen zu ermöglichen.

Lamellenwärmeübertrager

Leistungsbereich	bis 1.000 MW
Heiz-/Kühlmedium	Außenseite Gas, im Rohr Flüssigkeit (auch mit Phasenwechsel)
Temperaturniveau	bis 300 °C
Sonstiges	niedrige Gasdrücke, variable Drücke im Rohr, gasseitig sehr schmutz- und feuchteempfindlich
Kosten	< 15 €/kW

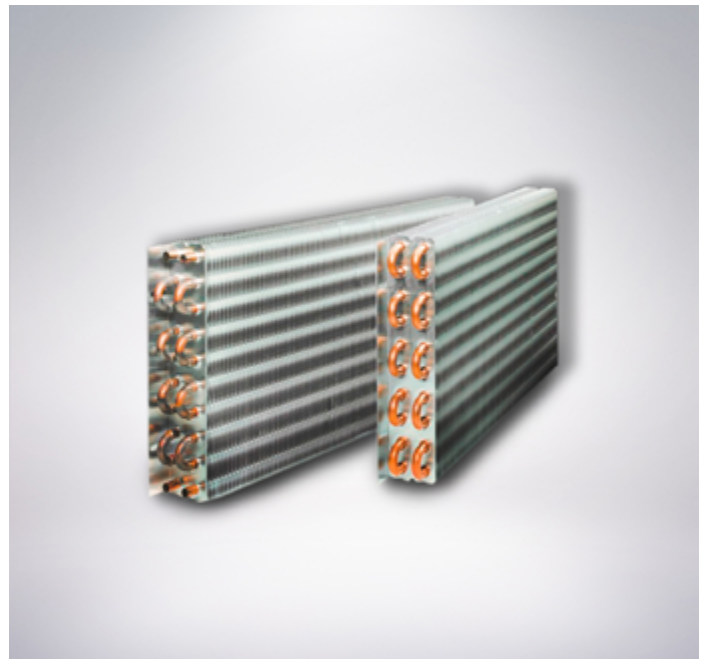


Abb. 7: Lamellenwärmeübertrager

18 Direkte Abwärmenutzung



Doppelrohr- wärmeübertrager

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 Abb. 8 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

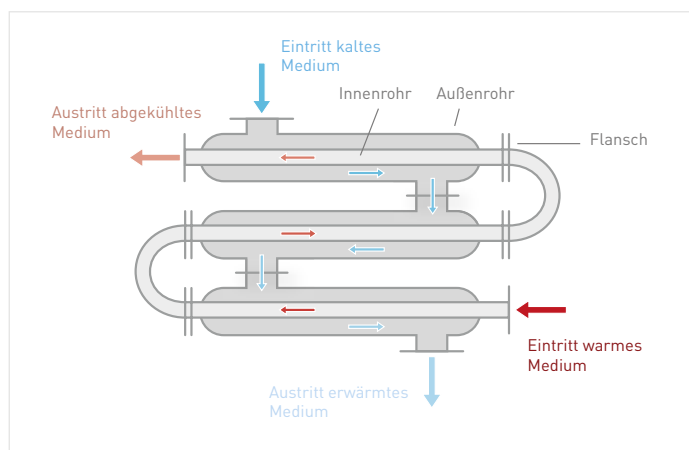


Abb. 8: Prinzipskizze eines Doppelrohrwärmeübertragers

Materialien werden Stahl, Kupfer, Kupfer-Nickel oder Messing eingesetzt. Die Kosten derartiger Wärmeübertrager sind moderat gegenüber anderen, der benötigte Bauraum ist relativ 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.

Doppelrohrwärmeübertrager

Leistungsbereich	bis 3.500 kW
Heiz-/Kühlmedium	flüssig/flüssig, (auch als Verdampfer/ Kondensator)
Temperaturniveau	bis 150 °C
Sonstiges	verschmutzte Flüssigkeiten im Innenrohr, relativ großer Bauraum



Abb. 9: Doppelrohrwärmeübertrager



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 Wärmeübertragungsfläche 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.

Spiralwärmeübertrager

Leistungsbereich	bis 800 kW
Heiz-/Kühlmedium	flüssig/flüssig, gasförmig/gasförmig
Temperaturniveau	bis 700 °C
Sonstiges	Medien bei gleichem Druck

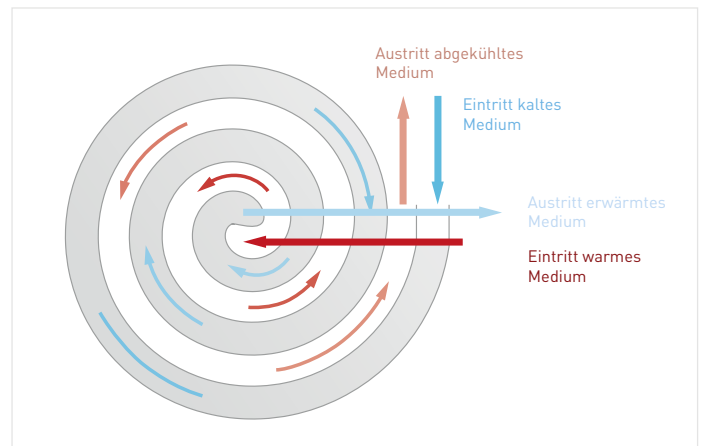


Abb. 10: Prinzip eines Spiralwärmeübertragers



Abb. 11: Spiralwärmeübertrager

20 Direkte Abwärmenutzung



Rotations- wärmeübertrager

In einem Rotationswärmeübertrager (Wärmerad) rotiert eine zylindrische Speichermasse innerhalb zweier Strömungskanäle, wie in Abb. 13 zu sehen ist. Die Speichermasse nimmt dabei während einer halben Umdrehung Wärme vom Abwärmeträger auf und gibt sie während der anderen halben Umdrehung an das zu erwärmende Prozessmedium ab.

Rotationswärmeübertrager sind in Gasströmungen selbst bei geringen Temperaturunterschieden effizient einsetzbar. Als Speichermasse dienen Metall-Lamellenstrukturen (glatt oder strukturiert) oder durchströmte Schüttungen aus kleinen kugelförmigen Speicherelementen. Da die Speichermasse flüssige Rückstände wegen der Benetzung mit in den anderen Strömungskanal transportieren würde, eignen sich Rotationswärmeübertrager nur für Gas/Gas-Anwendungen. Für verschmutzte Gase sind sie ebenfalls ungeeignet.

Der Effekt, dass sich Abwärmeträger und Prozessmedium vermischen, kann zwar durch besondere Konstruktionen („Spülzone“ oder „Spülkammer“) verringert werden. Eine Mitrotation

(Spaltluft, Leckluft) lässt sich jedoch nicht gänzlich vermeiden. Dies ist insbesondere bei prozessübergreifender Anwendung zu beachten, wo das Prozessmedium verunreinigt würde. Korrosive Gase sind nur mit Beschichtungen handhabbar. Sorptive Beschichtungen ermöglichen es, die Gasfeuchte zu übertragen. Dies wird zur Befeuchtung der Zuluft bei Anwendung in der Klimatisierung genutzt.

Rotationswärmeübertrager gibt es in unterschiedlichen Größen mit Durchmessern von 400 bis 3.000 mm. Die Bautiefe ist im Gegensatz zum Durchmesser gering. Zur Anwendung kommt der Rotationswärmeübertrager hauptsächlich in der Lüftungs-, Klima-, Prozessluft- oder Kraftwerkstechnik als Frischluftvorwärmer mit Hilfe von Abgas- oder Abluftwärme.

Rotationswärmeübertrager

Leistungsbereich	bis 1.600 kW
Heiz-/Kühlmedium	gasförmig/gasförmig
Temperaturniveau	bis 650 °C
Sonstiges	keine verschmutzten Ströme

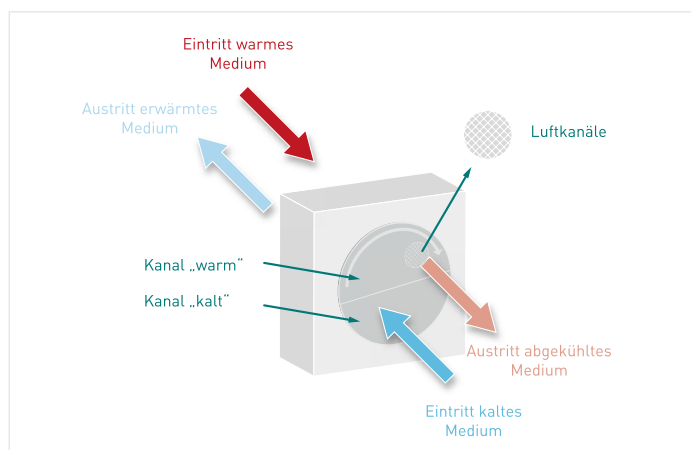


Abb. 12: Prinzip eines Rotationswärmeübertragers

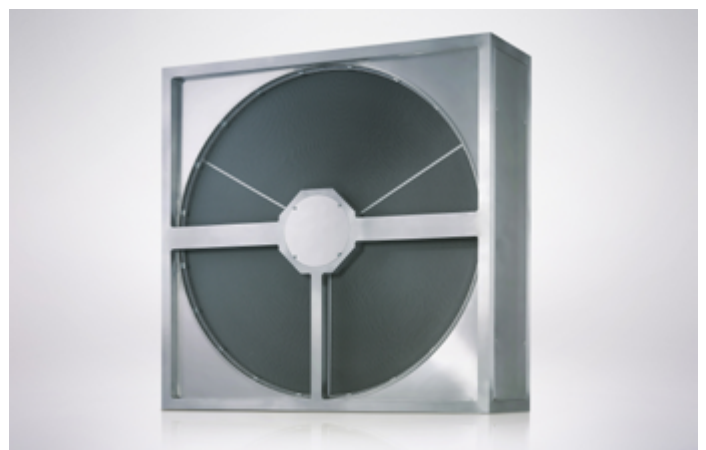


Abb. 13: Rotationswärmeübertrager



Wärmerohr- wärmeübertrager

Wärmerohrwärmeübertrager werden als Gas/Gas-Wärmeübertrager 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 Wärmeübertragers angepasst ist. Damit arbeiten Wärmerohrwärmeübertrager 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.



Abb. 14: Wärmerohrwärmeübertrager

Wärmerohrdurchmesser beginnen bei wenigen Millimetern und reichen bis in den Zentimeterbereich.

Mit Hilfe außen berippter Wärmerohre können große Wärmeströme zwischen zwei Gasströmungen transportiert werden, da beide Gasströme die große Rippenoberfläche nutzen. Schmutz aus den Gasströmen kann sich zwischen den Rippen festsetzen und die Wärmeleistung extrem mindern.

Wärmerohrwärmeübertrager

Leistungsbereich	bis 3 kW (je Wärmerohr)
Heiz-/Kühlmedium	gasförmig/gasförmig
Temperaturniveau	bis 650 °C
Sonstiges	nur in eingegrenztem Temperaturbereich arbeitsfähig, schmutz- und feuchteempfindlich

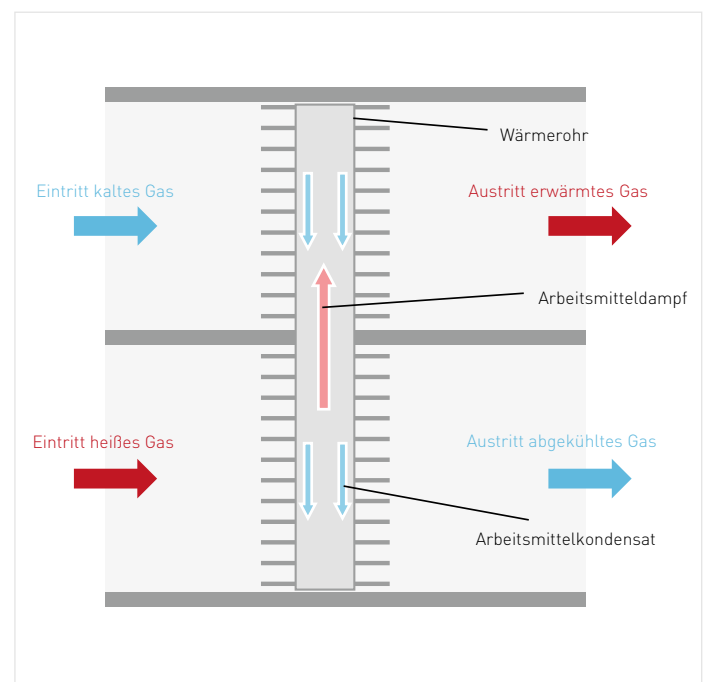


Abb. 15: Prinzip eines Wärmerohrwärmeübertragers

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.

Auf Grundlage des Speicherprinzips wird zwischen verschiedenen Arten von Energiespeichern unterschieden:

- **Sensible Wärmespeicher:** Die Energie wird in Form von sensibler Wärme durch eine Temperaturänderung des flüssigen oder festen Speichermediums gespeichert. Die Speicherkapazität hängt dabei von der Wärmekapazität des Speichermediums und der verfügbaren Temperaturdifferenz ab.
- **Latente Wärmespeicher:** Die Energie wird in Form von latenter Wärme beim Phasenwechsel des Speichermaterials 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.

Mit Abb. 16 können diese Speicher hinsichtlich ihrer Speicherdichte – der in einem bestimmten Volumen speicherbaren thermischen Energie – verglichen werden. Mit steigender Speicherdichte steigt die Komplexität des Speichersystems, was einen höheren technischen Aufwand und höhere Kosten zur Folge hat. 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.

Speicher können hinsichtlich der Speicherdauer unterschieden werden. Bei der Kurzzeitspeicherung wird thermische Energie über wenige Minuten bis Tage gespeichert, bei der Langzeitspeicherung sind Zeiträume über mehrere Monate möglich (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.

Weiterhin kann bezüglich des Temperaturniveaus zwischen Wärme- (oberhalb) und Kältespeicherung (unterhalb der Umgebungstemperatur) unterschieden werden. Kältespeicher können in Kombination mit thermisch getriebenen Sorptionskälteanlagen (Seite 35) eine sinnvolle Nutzung von Abwärme ermöglichen.

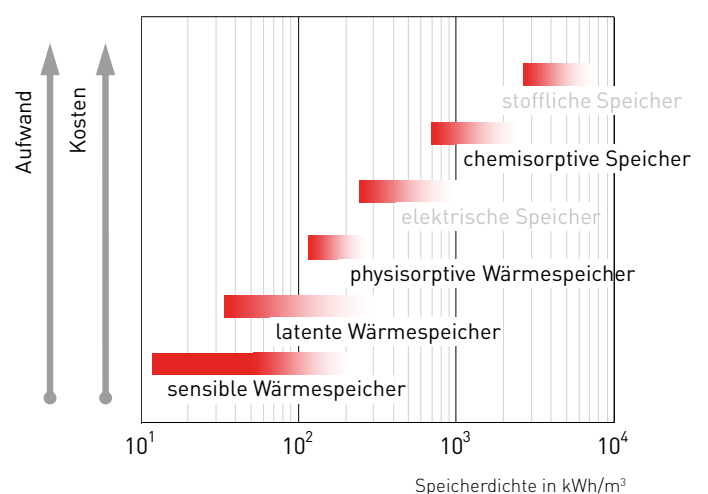


Abb. 16: Energiespeicherdichte verschiedener Arten von Wärmespeichern bei begrenzter Temperaturdifferenz. Zum Vergleich sind stoffliche Speicher (flüssige Brennstoffe) und elektrische Speicher (Batterien) angegeben.

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

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.



Abb. 17: Speicherprinzipien sind auch kombiniert einsetzbar: 150-l-Warmwasserspeicher (sensibel) mit innenliegendem Wärmeübertrager (Thermobatterie L-O-T), erweitert um 2-kWh-Latentwärmespeicher auf Natriumacetat-Basis in der Behälterwand (entspricht weiteren 50 Litern Wasser).

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.

24 Direkte Abwärmenutzung



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 Abb. 19. Es kann zwischen festen und flüssigen Materialien unterschieden werden. Gasförmige Stoffe werden aufgrund ihrer geringen Speicherdichte nicht verwendet. Prinzipiell sind Kombinationen verschiedener Speichermedien möglich.

Sensible Wärmespeicher	
Temperatur	bis über 1.000 °C
Speicherkapazität	bis >100 MWh
Größe	bis >10.000 m ³
Leistung	>100 MW
Energiespeicherdichte	bis 100 kWh/m ³

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 kWh/(m³K)). 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).

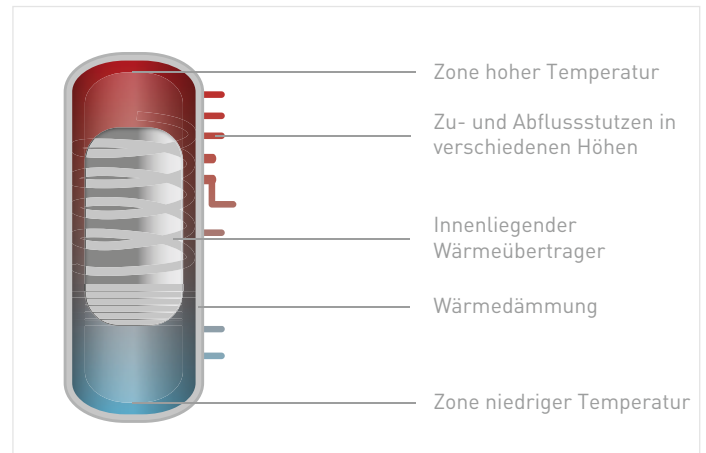


Abb. 18: Prinzipaufbau eines Warmwasserspeichers mit innenliegendem Wärmeübertrager

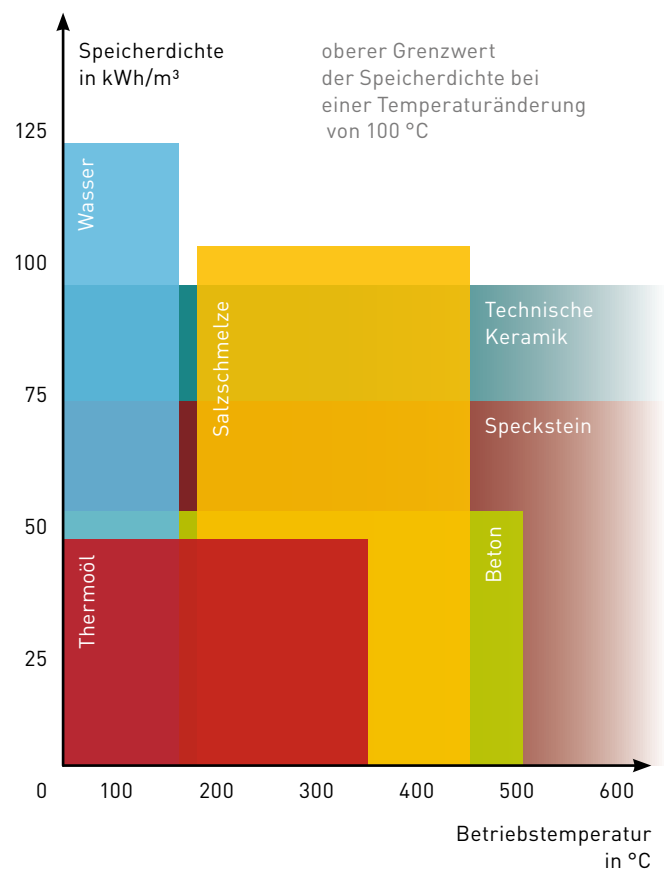


Abb. 19: Speichermedien für sensible Wärmespeicher

Wasserspeicher werden als Mengenspeicher (Temperatur im Speichervolumen konstant) oder Schichtenspeicher ausgeführt. Bei letzteren tritt eine schwerkraftbedingte Temperaturschichtung im Speichermedium auf. Der Vorteil besteht darin, dass verschiedene Abwärmequellen und -senken mit dem Speicher gekoppelt werden können, indem sie entsprechend ihres Temperaturniveaus auf verschiedenen Höhen Wärme ein- und ausspeisen. Zur Anpassung zeitgleich auftretender unterschiedlicher Be- und Entladeleistungen werden Pufferspeicher verwendet.

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

Soll eine Vermischung von Abwärmeträger (z.B. Abwasser) und Nutzwärmeträger (meist Wasser) vermieden werden, kommen innenliegende Wärmeübertrager zum Einsatz. Alternativ kann dem Speicher auch ein Wärmeübertrager vorgeschaltet sein.

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 $0,75 \text{ kWh}/(\text{m}^3\text{K})$). Gegenüber flüssigen Speichern ist kein Auslaufen des Behälters möglich. Allerdings sind geeignete konstruktive Maßnahmen zur Verbesserung der Wärmeübertragung zwischen Wärmeträger und Speichermedium notwendig. Feste Speichermedien decken einen großen Temperaturbereich ab. Keramiken können bspw. bis über 1.000 °C eingesetzt werden. Feste sensible Speichermedien sind wie auch die flüssigen meist sehr zyklen- und langzeitstabil.

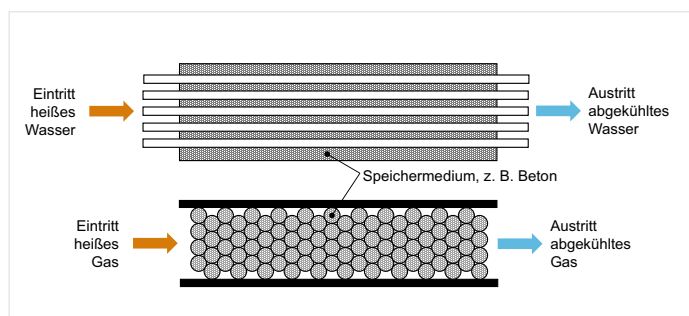


Abb. 20: Möglichkeiten des Aufbaus eines sensiblen Wärmespeichers mit festem Speichermedium. Dargestellt ist der Beladevorgang.



Abb. 21: Modularer Wärmespeicher mit Beton als Speichermedium

Wärmespeicher mit festen sensiblen Speichermedien eignen sich sowohl für flüssige als auch gasförmige Abwärmeträger. Dabei wird ein flüssiger Wärmeträger typischerweise in Rohren durch die Speichermasse transportiert (siehe Abb. 20 oben), gasförmige Wärmeträger strömen durch eine Schüttung aus einzelnen Speicherelementen (siehe unten). Alternativ können auch Zylinder oder Platten vom Gas umströmt werden.

Im privaten Bereich wird dieses Speicherprinzip bereits seit Jahrhunderten in Kachel- und Nachtspeicheröfen angewendet, in der Industrie in Form sog. Winderhitzer zur Verbrennungsluftvorwärmung („Heißwind“) in der Stahlerzeugung. Dabei dient eine Gesteinsschüttung als Speichermedium, die beim Beladen von heißem Abgas durchströmt wird. Beim Entladen wird Umgebungsluft vorgewärmt und als Verbrennungsluft dem Hochofenprozess zugeführt. Sogenannte Kiesbettspeicher werden wasser- oder luftdurchströmt häufig als saisonale Speicher genutzt. Im kleinen Maßstab werden feste sensible Speichermedien auch passiv genutzt. Dabei liegen sie nicht als separater Speicher vor, sondern sind direkt in die Anlagen integriert, bspw. als keramische Elemente in Brennkammern.

Aktuelle Entwicklungsarbeiten im großtechnischen Maßstab befassen sich vor allem mit der Nutzung von Beton als Speichermedium zur Wärmeauskopplung aus Abgasen oder zur Speicherung von Kompressionswärme bei der sog. adiabaten Druckluftspeicherung.

26 Direkte Abwärmenutzung



Latentwärmespeicher

Bei dieser Speicherart wird die Wärme genutzt, welche bei der Aggregatzustandsänderung des Materials aufgenommen oder abgegeben wird. Das Speichermedium von Latentwärmespeichern wird daher als Phasenwechselmaterial (PCM, engl. Phase Change Material) bezeichnet. Im Bereich des Phasenwechsels kann viel Energie aufgenommen und abgegeben werden, wie Abb. 22 zeigt. Beim Entladen fällt damit Wärme auf konstantem Temperaturniveau an.

Als Speichermedium stehen verschiedene Materialgruppen zur Verfügung, die in Abb. 24 mit Schmelztemperatur und volumenbezogener Schmelzwärme dargestellt sind. Mit zunehmender Schmelztemperatur steigt die Schmelzenthalpie und damit die Energiespeicherdichte.

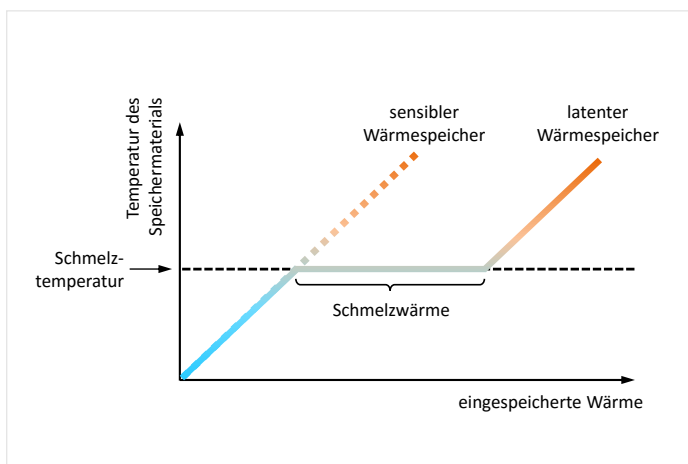


Abb. 22: Vergleich der Speicherkapazität eines sensiblen und eines latenten Wärmespeichers. Bei latenten Speichermedien findet der Wärmeübergang innerhalb kleiner Temperaturdifferenzen statt. Zusätzlich zur Latentwärme wird auch die sensible Wärme des Speichermediums genutzt. Allerdings macht sie nur einen Bruchteil der nutzbaren Wärme aus.

Für die industrielle Abwärmenutzung sind derzeit folgende PCM von Bedeutung:

- **Paraffine** sind organische Verbindungen und für den Temperaturbereich von 6 bis etwa 80 °C marktfähig. Sie weisen niedrige Speicherdichten auf, sind relativ teuer und brennbar, jedoch ungiftig, nicht korrosiv, zyklusstabil und damit gut handhabbar.
- **Salzhhydrate** sind Gemische aus einem Salz (häufig Natriumacetat) und Wasser und für Temperaturen von Raumtemperatur bis etwa 80 °C marktfähig. Salzhhydrate besitzen gegenüber Paraffinen deutlich höhere Speicherdichten bei geringen Kosten. Sie sind allerdings extrem korrosiv gegenüber Metallen, nur mäßig zyklusstabil und neigen beim Entladen zum Unterkühlen, wodurch von der sonst konstanten Entladetemperatur abgewichen wird.
- **Nitratsalze und -mischungen** können von etwa 130 bis etwa 400 °C eingesetzt werden und sind daher zur Prozesswärmespeicherung gut geeignet. Sie verfügen über hohe Speicherdichten, sind preiswert und zyklusstabil. Die Korrosivität gegenüber Metallen ist jedoch hoch.
- **Wasser und Wasser-Salz-Lösungen** als Speichermedien in Eisspeichern bieten sich nur für die Speicherung von Kälte bei 0 °C oder darunter an. Dies kann jedoch auch im Zusammenhang mit Abwärme interessant sein: Bei der Kälteerzeugung aus Abwärme (S. 35 ff.) kann es sinnvoller sein, ein zeitlich ungünstiges Abwärmeangebot zunächst zur Kälteerzeugung zu nutzen und die Kälte zu speichern, da die Standverluste dadurch geringer ausfallen als beim Speichern der Abwärme.

Latente Wärmespeicher

Temperatur	unter 0 bis über 400 °C
Speicherkapazität	demonstriert bis 2,5 MWh
Größe	demonstriert bis 17 m ³
Energiespeicherdichte	demonstriert bis 150 kWh/m ³
Kosten	10 ... 50 €/kWh

Unter Zyklusstabilität eines PCM versteht man die Beständigkeit bei Be- und Entladung eines Speichers. Je zyklusstabiler der Speicher, desto höher ist die Anzahl der realisierbaren Speicherzyklen (je einmal Be- und Entladen) bei nahezu gleichbleibender Speicherkapazität. Die Zyklusstabilität ist damit eine entscheidende Größe für die Wirtschaftlichkeit eines Latentwärmespeichers. Bei Paraffinen konnten bereits über 10.000 Ladezyklen nachgewiesen werden. Salzhydrate neigen zum Entmischen und sind daher weniger zyklusstabil, Nitratsalze stehen diesbezüglich im Fokus aktueller Untersuchungen.

Im kleinen Maßstab werden Latentwärmespeicher bereits in vielen Anwendungen eingesetzt und sind kommerziell verfügbar. Ein typisches Beispiel sind Kältespeicher auf Basis von Wasser/Eis. Für die großtechnische Anwendung ist dieser Speichertyp noch Gegenstand von Forschung und Entwicklung. Eine praxisnahe Erprobung wird bspw. in Kombination mit Industrieprozessen und solarthermischen Anwendungen durchgeführt.

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 Sattedampf. 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 herabsetzt.

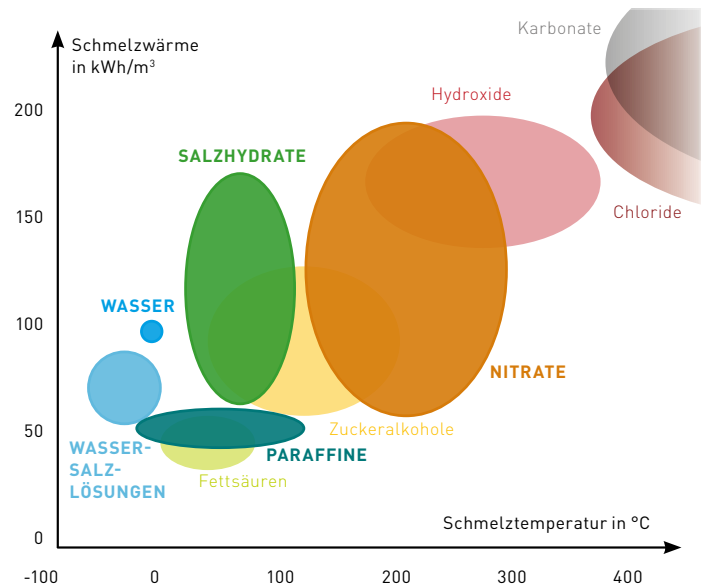


Abb. 24: Anwendungsbereich [Temperatur] und Speicherdichte [Schmelzwärme] unterschiedlicher Materialien für Latentwärmespeicher: Für Wasser, Wasser-Salz-Lösungen, Salzhydrate, Paraffine und Nitrate existieren kommerzielle Lösungen oder vielversprechende Pilotprojekte. Alle anderen Stoffe sind als Speichermaterialien in der Entwicklung. Mit Karbonaten und Chloriden ließen sich noch höhere Speicherdichten und Temperaturen (bis $>700^{\circ}\text{C}$) erreichen (Quelle: nach ZAE Bayern).



Abb. 23: Ruths-Speicher einschließlich peripherer Anlagentechnik (ATTSU AV, Drücke bis 16 bar)



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.

Physisorption (Ad- & Absorption)

Sorptionsspeicher arbeiten mit zwei Medien, einem Arbeits- und einem Speichermedium.

Bei den **Adsorptionsspeichern** liegt das Speichermedium als fester mikroporöser Stoff vor. 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.

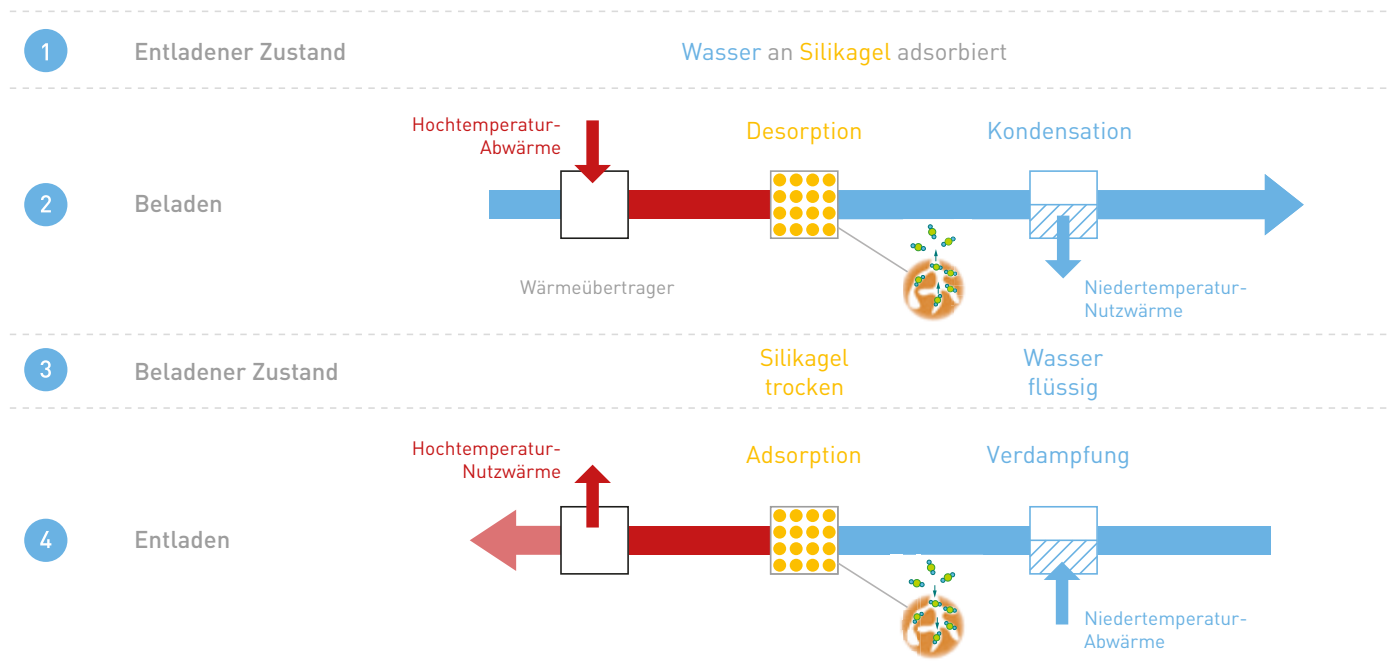


Abb. 25: Funktionsprinzip physisorptiver Speicher

Sorptive Wärmespeicher

Temperatur	bis über 1.000 °C
Speicherkapazität	demonstriert bis 4,5 MWh
Größe	demonstriert bis 50 m ³
Leistung	demonstriert bis 0,25 MW
Energiespeicherdichte	demonstriert bis 185 kWh/m ³
Kosten	8 ... 100 €/kWh

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.

Abb. 25 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 trockener Luftstrom durch die Schüttung geleitet **2**. Dazu kann die Luft in einem Wärmeübertrager durch Abwärme im Temperaturbereich von 100 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 freiwerdende 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.



Abb. 26: Mobiler Adsorptions-Wärmespeicher

Bei den **Absorptionsspeichern** ist das Speichermedium eine Flüssigkeit, in der sich die gasförmige Komponente löst. Als Stoffsystem kommen vorzugsweise wässrige Salzlösungen (z.B. Lithiumbromid-Lösung) und Wasserdampf zum Einsatz.

Beim Beladen wird Wasserdampf aus der wässrigen Salzlösung mit Hilfe von Abwärme ausgetrieben (verdampft), sodass die Salzlösung aufkonzentriert wird. Wie bei Adsorptionsspeichern kann der ausgetriebene Wasserdampf in einem nachgeschalteten Schritt kondensiert und die Wärme auf niedrigem Temperaturniveau weiter verwendet werden. Beim Entladen wird Wasserdampf in der Salzlösung absorbiert. Dabei wird Wärme frei, die als Nutzwärme verwendet wird. Das Temperaturniveau ist deutlich geringer als bei Adsorptionsspeichern (kleiner 120 °C).

Chemisorption

Wärmespeicher auf Basis einer umkehrbaren chemischen Reaktion werden auch als thermochemische Speicher bezeichnet. Es handelt sich um eine Reaktion zwischen einem Gas und einem Feststoff. Das Reaktionsprodukt beider Stoffe wird beim Beladen unter Wärmezufuhr aufgespalten. In diesem Zustand liegen beide Komponenten separat vor und können nahezu verlustfrei und beliebig lang gelagert werden. Zum Entladen des Speichers reagieren Gas und Feststoff in einer chemischen Reaktion unter Wärmefreisetzung wieder zur chemischen Ausgangsverbindung.

Chemisorptive Speicher sind bisher ausschließlich Inhalt von Forschung und Entwicklung. Eine großtechnische Umsetzung oder Marktverfügbarkeit ist bisher nicht bekannt.



3

Indirekte Abwärmennutzung

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 Kreisprozesse

Die Grundlage der indirekten Nutzungstechnologien sind thermodynamische Kreisprozesse. Ein Kreisprozess besteht aus vier nacheinander ablaufenden Teilprozessen, in denen ein Arbeitsmittel Wärme oder mechanische Arbeit abgibt oder aufnimmt.

Je nach Richtung des Prozessverlaufes unterscheidet man Links- und Rechtsprozesse. Bei Linksprozessen wird Arbeit am Arbeitsmittel verrichtet und Wärme abgeführt (Wärmepumpen, Kältemaschinen), bei Rechtsprozessen wird Wärme zugeführt und Arbeit vom Arbeitsmittel verrichtet (Dampf- und Gasturbinen). Die Bezeichnung rührt daher, dass man Kreisprozesse in Diagrammen darstellt und die thermodynamischen Zustände des Arbeitsmittels nacheinander im Uhrzeigersinn (Rechtsprozess) oder entgegen dem Uhrzeigersinn (Linksprozess) durchlaufen werden.

Aus der Nutzung von Kreisprozessen ergeben sich zwei Merkmale, welche für jede hier vorgestellte Technologie gelten:

- Eine Anlage zur indirekten Nutzung von Abwärme umfasst häufig Pumpen oder Verdichter. Sie dienen dazu, den

Kreisprozess durch Umwälzen des Arbeitsmittels aufrecht zu erhalten. Aus thermodynamischen Gründen sind dabei häufig große Druckunterschiede zu überwinden. Die Aggregate sind demzufolge recht leistungsstark.

- Da Wärme sowohl zu- auch als abgeführt werden muss, sind mindestens zwei Wärmeübertrager notwendig (Kap. 2.1). Einer der Wärmeübertrager ist dabei für die Nutzung der Abwärme zuständig und entsprechend dem Abwärmeträger auszuwählen (S. 14). Ein weiterer Wärmeübertrager dient der Wärmeabgabe. Je nach Technologie handelt es sich dabei um Nutzwärme (Wärmepumpe) oder wiederum um Abwärme (Kältemaschinen, Prozesse zur Stromerzeugung).

Wie man erkennen kann, ist die indirekte Nutzung von Abwärme stets mit größerem technischem Aufwand verbunden als deren direkte Nutzung. Damit gehen höhere Investitions-, Wartungs- und Betriebskosten einher. Sofern eine solche Wahl im Betrieb besteht, sollte die direkte Nutzung von Abwärme demnach immer Vorrang vor der indirekten Nutzung haben.

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.

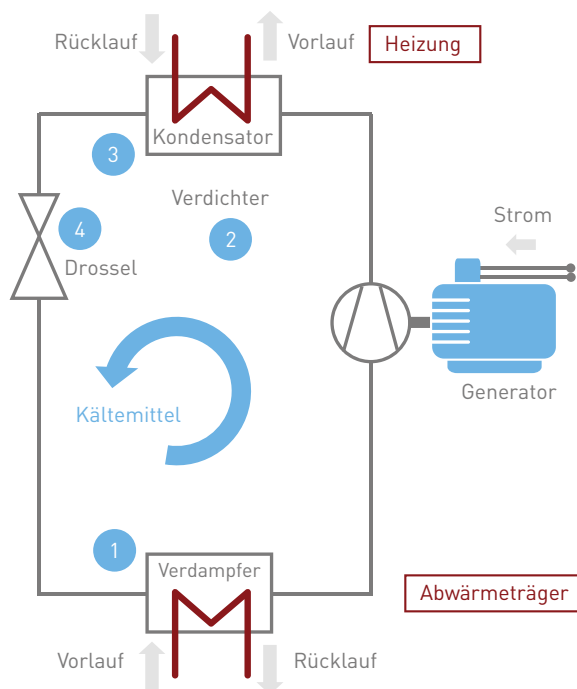
Bei Ab- bzw. Adsorptionswärmepumpen kann die wertvolle Verdichterarbeit weitgehend durch Zufuhr von Abwärme oder Verwendung eines Brennstoffes (Gaswärmepumpe) ersetzt werden, man spricht von einem „thermischen Verdichter“. Ab- bzw. Adsorptionskältemaschinen können auf diese Weise mithilfe von Abwärme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



Kompressionswärmepumpe

Kompressionswärmepumpen sind die am weitesten verbreiteten Wärmepumpen. Sie sind relativ einfach aufgebaut und in einem weiten Leistungsbereich am Markt verfügbar.

Abb. 27 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.



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

Abb. 27: Schematische Darstellung einer Kompressionswärmepumpe

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 Verdampferniveau 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.



Abb. 28: Für Abwärmenutzung aus Kühlwasser geeignete Wärmepumpe (Wasser-Wasser-Wärmepumpe 61WG von Carrier, Heizleistung 29 bis 117 kW). Sichtbar sind Verdichter, Umwälzpumpe sowie Verdampfer und Verflüssiger, ausgeführt als Plattenwärmeübertrager.

34 Indirekte Abwärmenutzung

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 $\epsilon = 4$ bedeutet, dass aus 1 kWh elektrischer Verdichterarbeit 4 kWh Heizwärme erzeugt und dabei der Abwärmequelle $(4 - 1) \text{ kWh} = 3 \text{ kWh}$ 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 4 Cent erzeugen, wenn der Strompreis 16 Cent/kWh beträgt. Wenn die Kosten alternativ erzeugter Wärme (Gaskessel) höher liegen, dann ist die Wärmepumpe wirtschaftlich (ohne Invest- und sonstige Betriebskosten).

Wird der Strom für die Wärmepumpe regenerativ erzeugt, z. B. aus Photovoltaik, dann kann damit CO₂-neutral geheizt werden. Die Leistungszahl einer Kompressionswärmepumpe steigt mit sinkender Temperaturdifferenz zwischen Abwärmequelle und

Kompressionswärmepumpe

Leistungsbereich	15 kW bis 20 MW
Spezifische Investkosten	150... 1.500 €/kW _{th}
Abwärmeträger	Luft, Flüssigkeit
Abwärmetemperaturniveau	bis 50 °C
Leistungszahl	3,0 ... 5,0

Heizung. Die Nutzung industrieller Abwärme zum Heizen kann deshalb eine bevorzugte Anwendung für Kompressionswärmepumpen sein (gegenüber Umweltwärme).

Standardmäßige Wärmepumpen erreichen eine Temperaturerhebung um ca. 40 bis 50 K und erreichen dabei Heizwasser-Vorlauftemperaturen bis 65 °C. Für höhere Temperaturen müssten spezielle Kältemittel eingesetzt und höhere Druckverhältnisse gefahren werden, dies steigert die Kosten des Wärmepumpenbetriebes.



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 (siehe Abb. 29). Die restlichen Komponenten des Kreislaufes (Verdampfer, Verflüssiger, Kältemittel-Expansionsventil) entsprechen denen der Kompressionsanlagen.

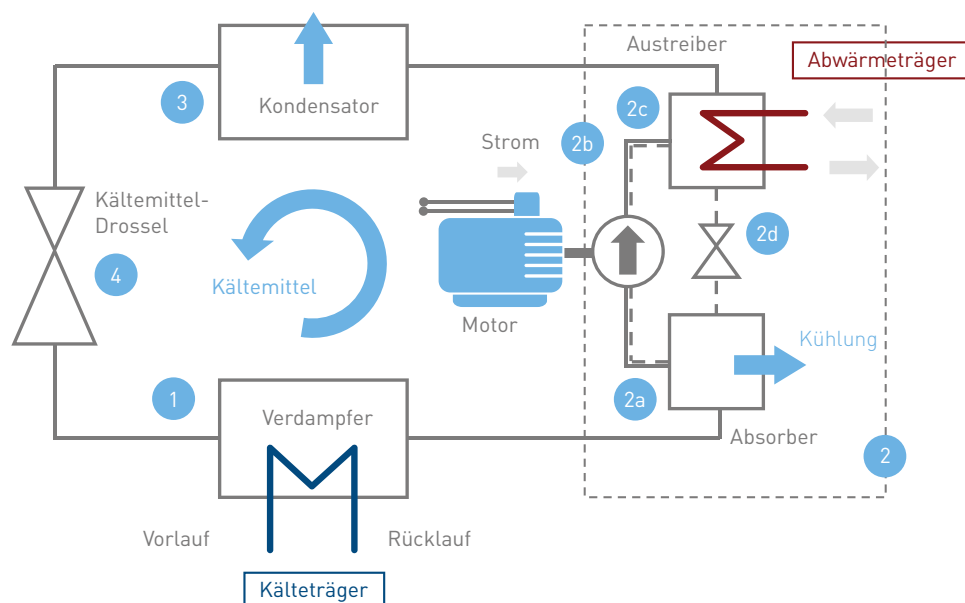
Der Vorteil dieser Technologie besteht darin, dass der Anteil an mechanischer Antriebsleistung, der elektrisch zugeführt werden muss, gering ist. Ein Großteil der Antriebsleistung kann auf thermischem Weg aus Abwärme anderer Prozesse bereitgestellt werden. Abb. 29 zeigt den Prozess schematisch am Beispiel einer Absorptionskältemaschine.

Im Verdampfer **1** wird das Kältemittel bei niedrigem Druck verdampft, die dazu erforderliche Wärme wird einem Kälteträger entzogen (z. B. Kaltwasser zur Klimatisierung). Der Kälte-

mitteldampf 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.

Durch Zufuhr von Abwärme verdampft das Kältemittel aus der Lösung (Austreiben, Desorbieren) und kondensiert letztlich im Verflüssiger **3**, der ebenfalls gekühlt werden muss. Danach erfolgt die Entspannung im Kältemittel-Expansionsventil **4**. Die kältemittelarme Lösung wird in der Lösungsmitteldrossel **2d** entspannt und erneut dem Absorber zugeführt.

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 Abwärmenutzung 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

Abb. 29: Prinzip einer Absorptions-Kältemaschine

36 Indirekte Abwärmenutzung

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 sog. Wärmeverhältnis 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 Kälteträger und Kondensator-Kühlmittel können mehrstufige Anlagen eingesetzt werden.

Die Austreibertemperatur liegt immer über der des Kondensators. Da bei **Absorptionswärmepumpen** die Kondensatorabwärme genutzt werden soll – z. B. zur Heizwassererzeugung bis 65 °C, siehe Abb. 31 – 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.



Abb. 30: 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, $\zeta=0,75$).

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

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

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

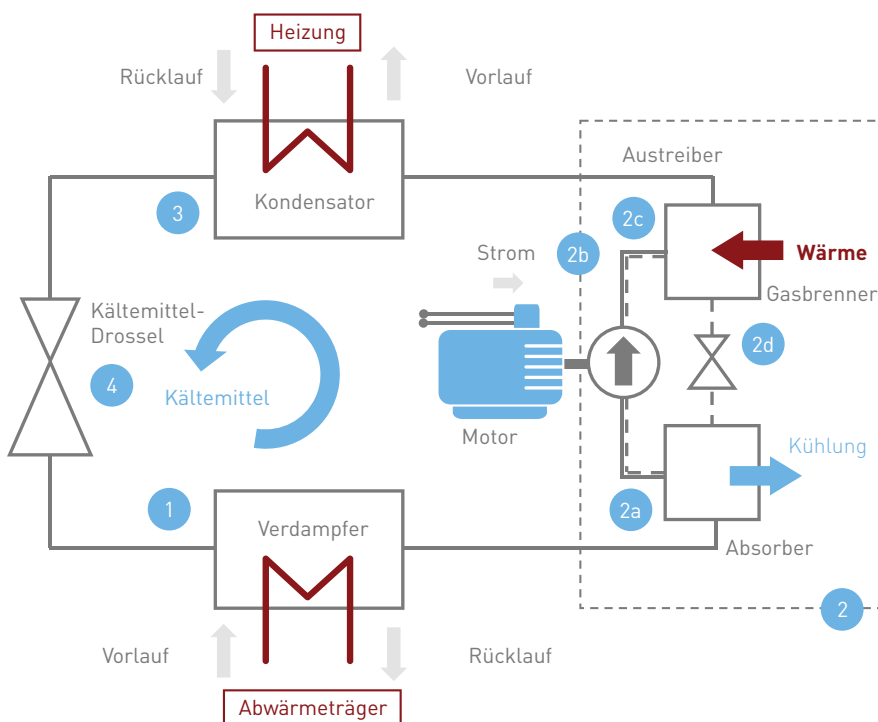
Die Heizzahlen sind größer eins (im Bereich um 1,5).

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

Abb. 31: Prinzip einer direkt befeuerten Absorptionswärmepumpe



Adsorptionswärmepumpe / -kältemaschine

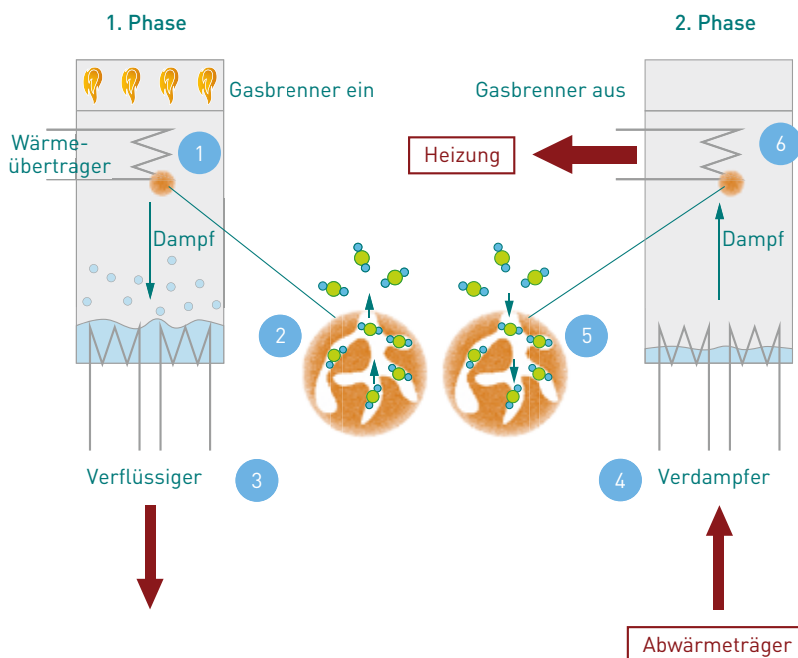
Alternativ zur Absorption (Lösen eines Gases in einer Flüssigkeit) kann in thermischen Verdichtern auch der physikalische Effekt der Adsorption (Anlagern eines Gases an eine Festkörperoberfläche) genutzt werden. Die Umkehrung beider Effekte wird Desorption genannt.

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.

Im Folgenden werden die Abläufe in einer **Adsorptionswärmepumpe** anhand Abb. 33 kurz beschrieben.

Zu Beginn der ersten Phase (Desorptionsphase) ist die Oberfläche des Adsorptionsmittels mit Molekülen des Kältemittels besetzt. Das Adsorptionsmittel ist dabei gut wärmeleitend auf einem Wärmeübertrager angebracht. Durch einen Brenner wird dem Adsorptionsmittel Wärme zugeführt **1** und die Gasmoleküle werden von der Oberfläche gelöst (Trocknen bzw. Ausheizen des Adsorbers) **2**.



WÄRMEPUMPENPROZESS NACH ADSORPTIONSPRINZIP

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

Abb. 32: Prinzip einer direkt befeuerten Adsorptionswärmepumpe

Adsorptionswärmepumpe

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

Adsorptionskältemaschine

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

Der Kältemitteldampf strömt zum Kondensator **3** und wird dort verflüssigt, die dabei freiwerdende 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 das Kondensat durch Zufuhr von Niedertemperaturabwärme wieder verdampft **4**. Der Kältemitteldampf strömt zum Adsorptionsmittel und lagert sich an dessen Oberfläche an **5**. Die dabei freiwerdende Hochtemperaturwärme wird über den Wärmeübertrager **6** abgeführt und genutzt. Wenn das Adsorptionsmittel komplett benetzt ist, endet der Zyklus.



Abb. 33: Adsorptionskältemaschine auf Silikagel-Basis (eCoo Industry von SorTech), betrieben mit Heißwasser zwischen 50 und 90 °C, bis 48 kW Kälteleistung (8 bis 21 °C, $\zeta = 0,65$)

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.

Während Silikagel bei Temperaturen unter 100 °C arbeitet, lassen sich mit Zeolithen Temperaturen bis 300 °C erreichen (z. B. Prozesswärme für Trocknungsprozesse), dies ist mit anderen Wärmepumpen nicht möglich.

Adsorptionskältemaschinen arbeiten nach dem gleichen Prinzip wie Adsorptionswärmepumpen. Das Temperaturniveau der Abwärme muss so hoch sein, dass sie für das Ausheizen des Adsorptionsmittels **1** genutzt werden kann. Die bei der Verflüssigung **3** entstehende Wärme auf niedrigem Temperaturniveau wird meist über einen Kühler abgeführt. Der Verdampfungsprozess **4** findet bei starken Unterdrücken statt, so dass damit Kälte erzeugt werden kann.

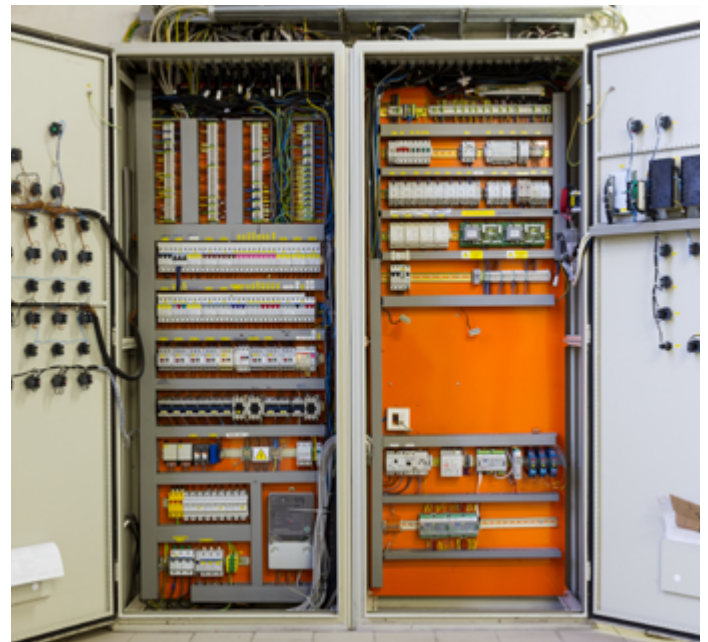
3.3 Stromerzeugung

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 unteren 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

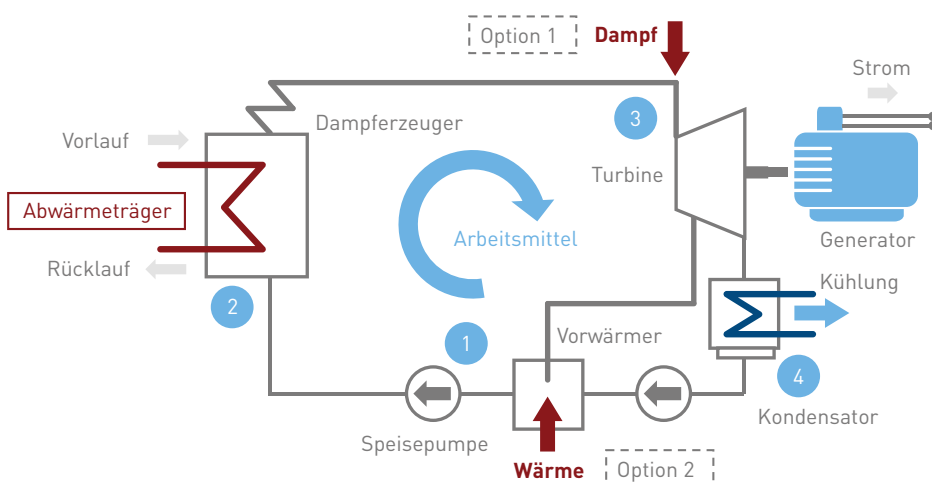
Beim Dampfkraftprozess wird die Abwärme an einen Kreisprozess übertragen, in dem Wasser und Wasserdampf als Arbeitsmittel genutzt werden, um eine Turbine anzutreiben (Abb. 34). Der Prozess kommt auch in konventionellen Wärmekraftwerken zum Einsatz.

Die Speisepumpe **1** erhöht den Druck des vorgewärmten, flüssigen Wassers auf den sog. Frischdampfdruck. Danach wird das Wasser im Dampferzeuger **2** bis zur Siedetemperatur erwärmt, vollständig verdampft und bis zur Frischdampf Temperatur überhitzt. In der Turbine **3** expandiert der Dampf, wobei die mechanische Arbeit an der Turbinenwelle zur Stromerzeugung durch einen Generator genutzt wird oder eine Arbeitsmaschine direkt antreibt. Statt der Turbine kann auch eine Kolbenexpansionsmaschine eingesetzt werden. Der entspannte Dampf wird im Kondensator **4** vollständig kondensiert und zur Speisepumpe transportiert.

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 (Option 1). Dazu muss der Dampf allerdings eine für die Turbine ausreichende Qualität aufweisen. Stehen Restdampf-mengen auf mehreren Druckstufen zur Verfügung, können sie in einer Turbine mit sogenannten Einspeisungen in den Prozess integriert werden (nicht dargestellt).

Eine weitere Option besteht darin, die Abwärme in die Vorwärm-säule eines bestehenden Dampfkraftprozesses einzukoppeln (Option 2). Damit sinkt die Dampferzeugerleistung, die z. B. aus Brennstoff bereitgestellt wird. Abwärme in Form von qualitativ



DAMPFKRAFTPROZESS MIT DAMPFTURBINE

- 1** Druckerhöhung auf Frischdampfdruck
- 2** Abwärmennutzung zur Verdampfung des Arbeitsmittels mittels Wasser
- 3** Entspannung des Dampfes in der Turbine zur Stromerzeugung
- 4** Kondensation des entspannten Dampfes

Abb. 34: Schaltbild eines Dampfkraftprozesses

42 Indirekte Abwärmenutzung

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 Frischdampftemperatur, 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 Turbinenaustritt 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.

Für Kraftwerke werden Kondensationsturbinen bis zu einer elektrischen Leistung von 1.700 MW gebaut. 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 (S. 27). 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 Dampfmengen 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.

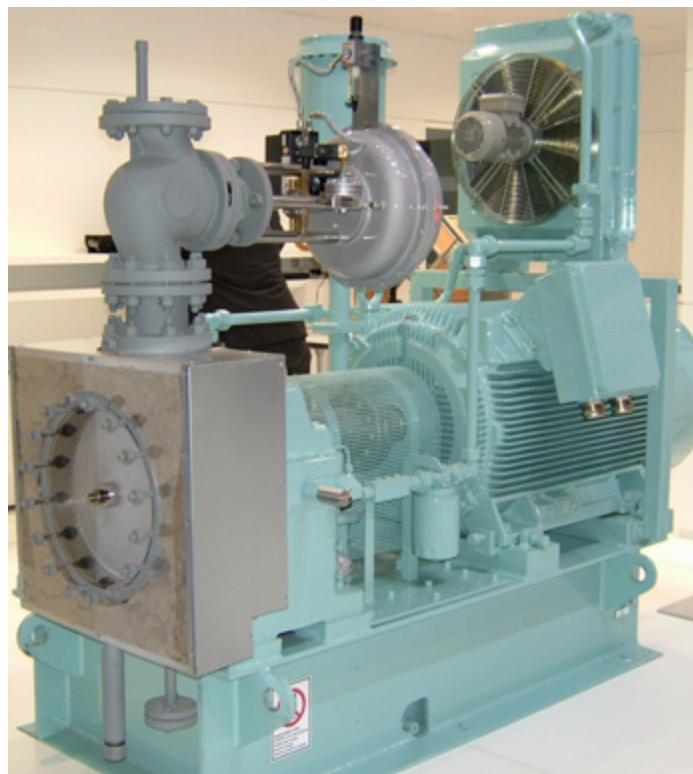


Abb. 35: Einstufige Kompakt-Dampfturbine (SST-040 von Siemens, für trockenen Sattdampf bis 400 °C, 75 bis 300 kW), abdampfseitig geöffnet, mit Eintrittsventil, Ölkühler und Generator.

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.

Dampfkraftprozesse

Leistungsbereich (el.)	ab 20 kW
Spezifische Investkosten	bis 5.000 €/kW _{el}
Abwärmeträger	Flüssigkeit, Dampf, Gas
Abwärmetemperaturniveau	ab 150 °C
Wirkungsgrad	ab 10 %



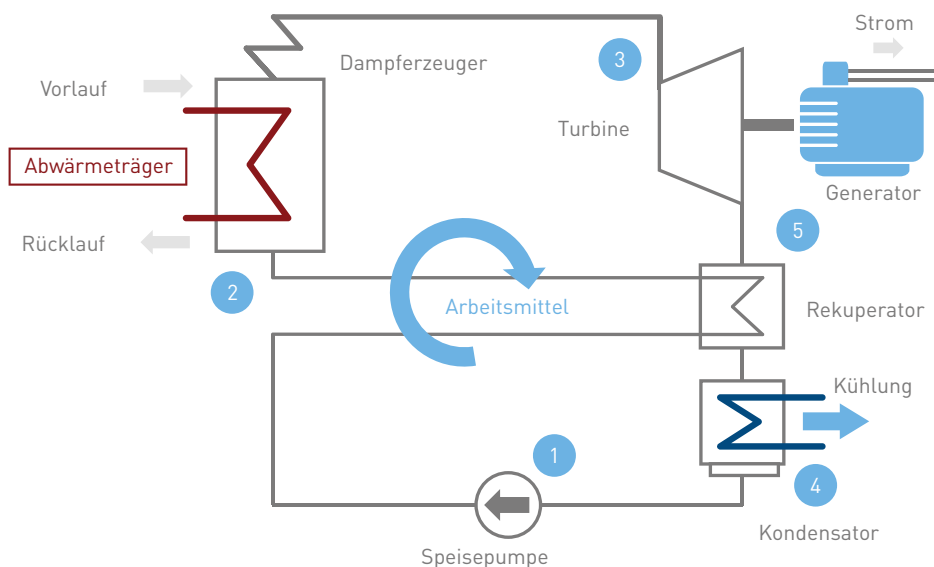
ORC-Prozess

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 (5) zur inneren Wärmeübertragung aufweisen, wie im Schema (Abb. 36) 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.

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



DAMPFKRAFTPROZESS MIT ORC-TURBINE

- 1 Druckerhöhung auf Frischdampfdruck
- 2 Abwärmegenutzung 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

Abb. 36: Schaltbild eines ORC-Prozesses

44 Indirekte Abwärmenutzung



Abb. 37: ORC-Anlage [70 kW elektrisch, von Dürr Cyplan] zur Nutzung der Abgaswärme eines Biogas-Blockheizkraftwerks.

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 Treibhauspotentials 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 kann zukünftig der Kalina-Prozess sein, 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.

ORC-Prozesse

Leistungsbereich (el.)	30 kW ... 3 MW
Spezifische Investkosten	3.000 ... 7.500 €/kW _{el}
Abwärmeträger	Flüssigkeit, Dampf, Gas
Abwärmetemperaturniveau	ab 110 °C
Wirkungsgrad	5 ... 15 %



Gasturbinenprozess

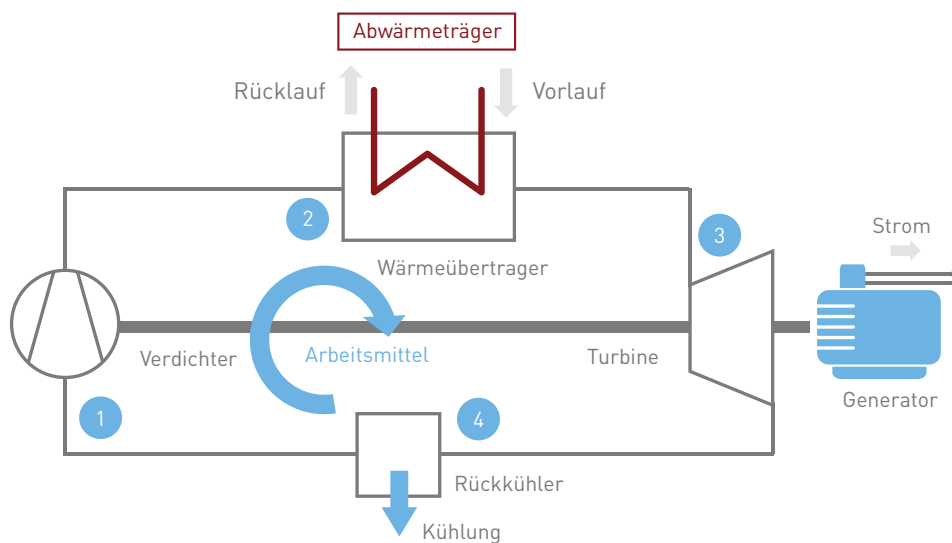
Der grundsätzliche Vorteil einer Gasturbine zur Nutzung von Abwärme besteht darin, dass diese sehr kompakt aufgebaut und in variablen Leistungsklassen verfügbar sind (beginnend bei Mikro-Gasturbinen bis in den MW-Bereich). Die Einkopplung der Abwärme in den Gasturbinenprozess kann je nach Temperaturniveau und Art des Wärmeträgers sehr flexibel gestaltet werden.

Das Arbeitsmedium befindet sich während aller Teilprozesse des rechtsläufigen Joule-Prozesses im gasförmigen Zustand. Abb. 38 zeigt einen geschlossenen Gasturbinenprozess. Das Arbeitsmedium (Luft) wird vom Verdichter **1** angesaugt und auf den Maximaldruck komprimiert. Der Verdichter bezieht seine Antriebsleistung von der Turbine über eine gemeinsame Welle.

In einem Wärmeübertrager **2** wird die Luft auf Maximaltemperatur erwärmt (typischer Weise über 1.200 °C), z. B. durch einen Hochtemperatur-Abwärmeträger. Der Wärmeübertrager nimmt meist mehr Bauraum ein als das Gasturbinenmodul und wird auf dieses aufgesetzt. Die Bauart richtet sich nach der Art des Abwärmeträgers.



Abb. 39: Gasturbine (Kawasaki GPB80), 8 MW elektrische Leistung, mit Brennkammer für offenen Prozess



GESCHLOSSENER GASTURBINENPROZESS

- 1 Verdichtung der Luft auf Maximaldruck
- 2 Abwärmenutzung zur Temperaturerhöhung der Luft
- 3 Entspannung der Luft in der Turbine zur Stromerzeugung
- 4 Rückkühlung und Auskopplung der Wärme zu Heizzwecken

Abb. 38: Schaltbild eines Gasturbinenprozesses [geschlossen]

46 Indirekte Abwärmenutzung

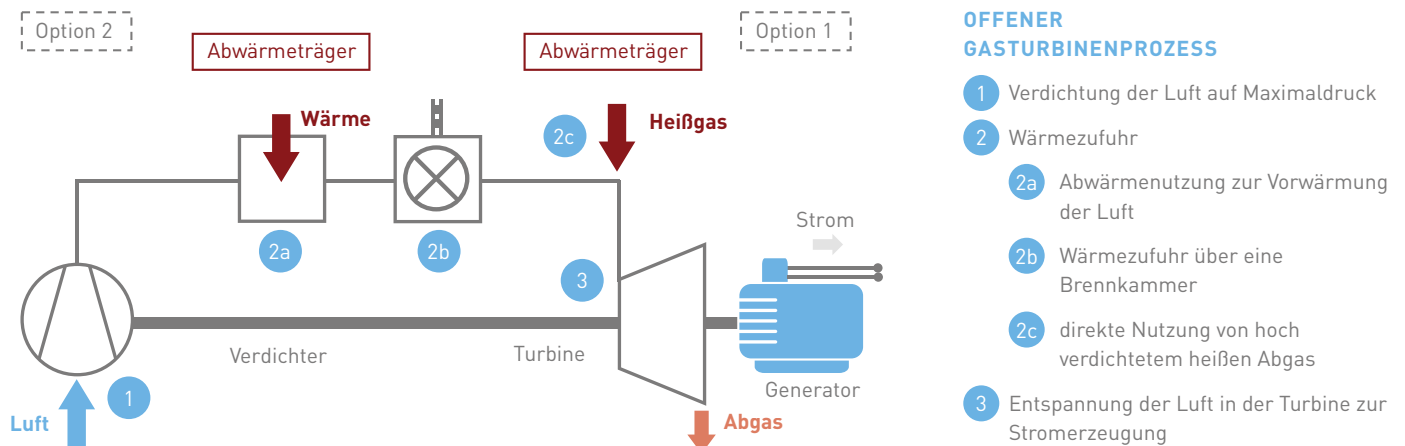


Abb. 40: Schaltbild eines Gasturbinenprozesses (offen)

In der Turbine (3) erfolgt die Entspannung auf den Minimaldruck, die mechanische Nettoleistung der Turbine wird im Generator in elektrische Leistung umgewandelt. Vor der erneuten Verdichtung muss das Arbeitsmittel rückgekühlt (4) werden, die dabei ausgekoppelte Wärme kann weiter genutzt werden (Kraft-Wärme-Kopplung).

Bei offenen Gasturbinenprozessen, wie in Abb. 40 gezeigt, saugt der Verdichter Luft aus der Umgebung an, aus der Turbine strömt das Arbeitsmittel wieder in die Umgebung zurück. Die beim geschlossenen Prozess notwendige Rückkühlung entfällt. Um den Systemwirkungsgrad zu erhöhen, kann die Abwärme dennoch zum Heizen (Kraft-Wärme-Kopplung) oder im nachgeschalteten Abhitzeessel einer Dampfkraftanlage (Gas- und Dampfturbinenanlage) genutzt werden. Im offenen Prozess werden nicht so hohe Systemdrücke wie im geschlossenen erreicht. Die Bauweise ist weniger kompakt.

Für die Einkopplung von Abwärme in einen offenen Gasturbinenprozess gibt es folgende Optionen:

- Fällt in einem Unternehmen ein hoch verdichtetes, heißes Abgas an, so kann dieses direkt in einer Gasturbine entspannt werden (Option 1). Das Abgas muss hinsichtlich Zusammensetzung, Feuchtegehalt und Verschmutzung mit der Turbine kompatibel sein.

- Verfügt ein potenzieller Abwärmeträger über keine ausreichend hohe Temperatur, so kann die Abwärme in einer Gasturbine mit Brennkammer genutzt werden. Die Abwärme wird in die komprimierte Luft eingekoppelt. Durch diese Vorwärmung kann Brennstoff eingespart werden (Option 2). Dazu sind jedoch noch Abwärm Temperaturen über 300 °C erforderlich.
- Fällt Abwärme in Form eines komprimierten, heißen und ausreichend sauerstoffhaltigen Gases an, kann dieses als Sauerstoffträger in der Brennkammer verwendet werden (ohne Verdichter, nicht im Bild dargestellt).

Gasturbinen-Prozesse

Leistungsbereich (el.)	30 kW bis 300 MW
Spezifische Investkosten	400 ... 1.750 €/kW _{el}
Abwärmeträger	Abgas
Abwärmtemperaturniveau	600 ... 1.500 °C
Wirkungsgrad	25 ... 40 %



Stirlingmotor

Auch der **Stirlingmotor** ist eine Wärmekraftmaschine und arbeitet nach einem Kreisprozess bestehend aus vier Teilprozessen.

Das gasförmige Arbeitsmittel befindet sich in einem geschlossenen System, die zugeführte Abwärme aus einem industriellen Prozess muss durch Wärmeleitung über die Zylinderwand von außen zugeführt werden (Heißgasmotor).

Prinzipiell verfügt der Stirlingmotor über zwei bewegliche Kolben, wobei der Arbeitskolben die Kompression des Arbeitsmittels erledigt sowie die Expansion in mechanische Arbeit umwandelt und der Verdrängerkolben für die Verschiebung des Gases zwischen Heiz- und Kühlzone verantwortlich ist. Beide sind um 90° phasenverschoben über Pleuelstangen an einem Schwungrad befestigt.

Zunächst wird das Gas durch Verschieben des Arbeitskolbens komprimiert **1**, die dafür notwendige Arbeit wird vom Schwungrad bereitgestellt. Die entstehende Kompressionswärme wird an die Umgebung abgegeben. Danach bewegt sich der Verdrängerkolben nach unten **2**, das Arbeitsmittel strömt von der Kühlzone durch den Regenerator in die Heizzone und wird dort durch Wärmezufuhr von außen weiter erwärmt.

Infolge der Wärmezufuhr expandiert das Arbeitsmittel **3** und verrichtet über den Arbeitskolben mechanische Arbeit am

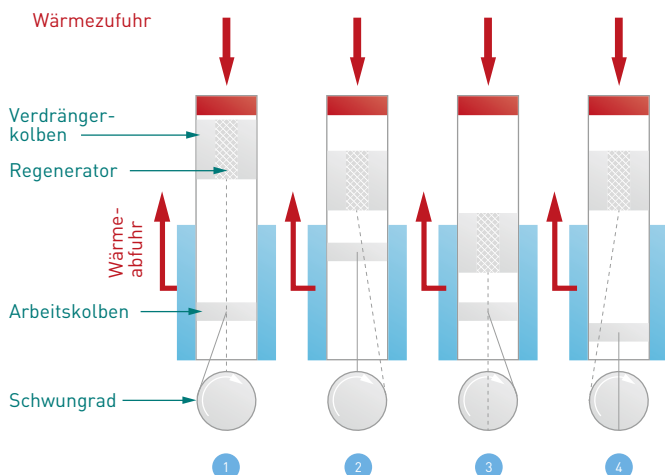


Abb. 41: Prinzip des Stirlingmotors

Schwungrad. Der Verdrängerkolben schiebt das Gas dann von der Heiz- in die Kühlzone **4**, dabei wird der Regenerator mit Wärme geladen. In der Kühlzone kühlt das Gas weiter ab. Danach beginnt der Zyklus von vorn.

Theoretisch erreicht der Stirlingmotor bei Einsatz eines Regenerators (sog. innere Regeneration) den thermischen Wirkungsgrad des Carnot-Prozesses, praktisch sind die Wirkungsgrade jedoch niedriger.

Der Stirlingmotor ist leise und hat ein hohes Drehmoment bei geringen Drehzahlen. Ein großer Vorteil besteht in der flexiblen Wärmezufuhr von außen, woraus sich vielfältige Anwendungsmöglichkeiten im Bereich der Abwärmenutzung ergeben.

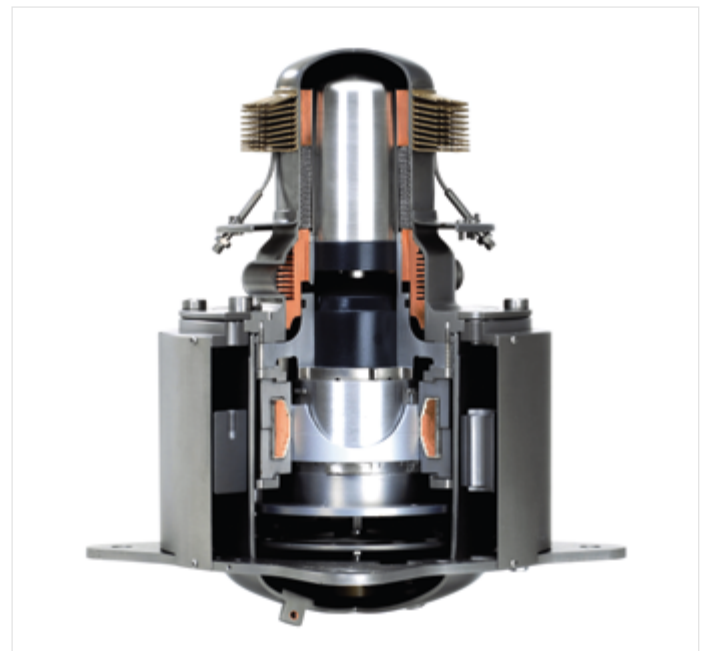


Abb. 42: Schnittdarstellung eines Stirlingmotors mit 1 kW elektrischer Leistung (3,6 bis 5,3 kW thermisch)

Stirlingmotor

Leistungsbereich (el.)	bis 250 kW
Spezifische Investkosten	1.400 ... 1.700 €/kW _{el}
Abwärmeträger	Abgas
Abwärmetemperaturniveau	650 ... 1.100 °C
Wirkungsgrad	10 ... 16 %

4

Angebote rund um Abwärmenutzung

Finanzierung

Zuschüsse und Förderkredite

Bund und Länder bieten verschiedene Förderprogramme für Abwärmenutzungsmaßnahmen in Industrie und Gewerbe an.

Allgemein gilt:

- Je nach Programm kann es sein, dass ein geplantes Vorhaben zwar nicht namentlich genannt ist, aber einem der Fördergegenstände zugeordnet werden kann (z.B. „Optimierung von Produktionsprozessen“). Der Antragsteller sollte bei der Fördermittelrecherche also Richtlinien und zugehörige Merkblätter aufmerksam lesen und im Zweifelsfall bei der Bewilligungsstelle 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 dieselbe Förderung abgedeckt werden. Alternativ können separate Förderprogramme in Anspruch genommen werden.
- Anträge müssen grundsätzlich vor Beginn des Vorhabens gestellt werden.

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

www.saena.de/fördermittelratgeber

Alternative Finanzierung

Crowdfunding ist eine relativ junge 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 eines Crowdfunding-Projekts 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.

Plattformen, die sich bereits für Energieeffizienzmaßnahmen anbieten, sind zu finden unter

www.bundesverband-crowdfunding.de/mitglieder/

Weitere

Es existieren weitere Möglichkeiten, Abwärmenutzungsvorhaben zu finanzieren. Infrage kommen Optionen, die allgemein bei der Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen genutzt werden: Leasing, Einspar-Contracting, Beteiligungsmodelle oder Genossenschaften. Für die Abwärmenutzung über die Unternehmensgrenze hinweg kann das Wärmeliefer-Contracting eine Option sein.

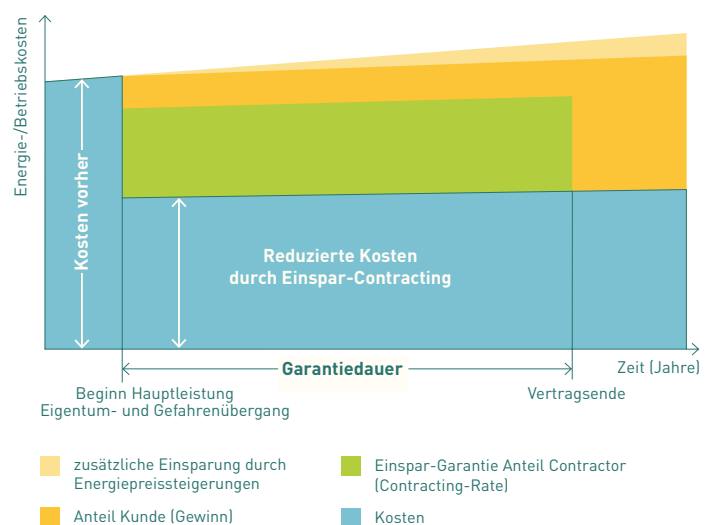


Abb. 43: Kostenstruktur beim Einspar-Contracting

Besichern und Versichern

Ist das Risiko einer Abwärmenutzungsmaßnahme zu hoch für die Finanzierung durch einen Kredit, können Ausfallbürgschaften unterstützend wirken. Mit Bürgschaften wird ein konkretes Kreditverhältnis zwischen der (Haus-)Bank und dem Kreditnehmer besichert. Dieser wird nicht von seiner Verpflichtung entbunden, den Kredit zurückzuzahlen. Das Risiko wird aber auf eine Bürgschaftsbank übertragen, die nur im Falle ausbleibender Einsparungen für den Kreditnehmer zahlt. Der Kreditnehmer erhält dadurch Zugang zu Bankkrediten, die er ohne Bürgschaft nicht bekäme. Genauere Informationen sind über die finanzierenden Banken zu erhalten.

Die Bürgschaftsbanken der Länder bieten Bürgschaften explizit auch für beide Contractingpartner eines Energiespar-Contracting-Vorhabens an.

Für Energieeffizienzprojekte werden spezielle Versicherungen angeboten. Sie gehen i.d.R. über Sachversicherungen gegen Anlagenschäden oder Betriebsausfälle hinaus. So können Anbieter von Energieeffizienzlösungen seit einiger Zeit das Einsparpotenzial ihrer Projekte absichern. Fällt die zugesagte Energieeinsparung geringer aus, erhält das betroffene Unternehmen eine Ausgleichszahlung, aus der z. B. Ersatzleistungen finanziert werden können.

SAENA-Angebote

Initial- und Förderberatung

Die SAENA berät kostenfrei zu Abwärmenutzung und zu Förderprogrammen und begleitet Unternehmen bei der Vorbereitung von Energieeffizienzmaßnahmen bis zur Beantragung von Fördermitteln bei der Sächsischen Aufbaubank – Förderbank – (SAB).

Abwärmeatlas Sachsen

Der Abwärmeatlas Sachsen ist eine Informationsplattform, mit der die Abwärmenutzung zwischen Unternehmen erleichtert werden soll. Unternehmen können in einer Karte Standort und weitere Informationen über ihre Abwärmequellen veröffentlichen, um damit Nachbarunternehmen über ungenutzte Potenziale aufmerksam zu machen.

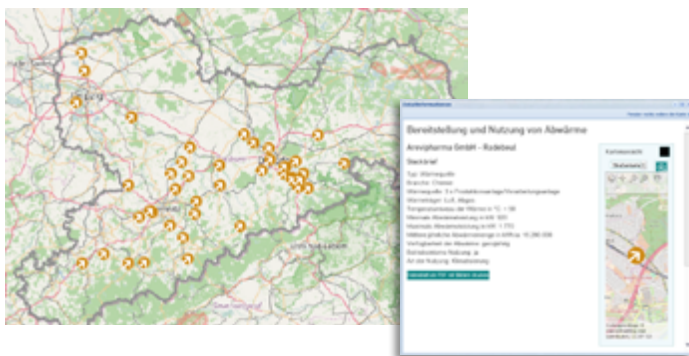


Abb. 44: Zu jeder Abwärmequelle lassen sich Detailinformationen einblenden.

www.abwaermeatlas-sachsen.de

Sächsischer Gewerbeenergiepass



Der Sächsische Gewerbeenergiepass (kurz: SäGEP) ist ein Zertifikat des Freistaates Sachsen und bescheinigt dem innehabenden Unternehmen ein vorausschauendes Energiemanagement. Das Instrument wird seit 2008 durch die Sächsische Energieagentur kontinuierlich weiterentwickelt und integriert inzwischen auch einschlägige Normen, wie z. B. die DIN ISO 50001 für Energiemanagementsysteme oder die DIN EN 16247-1 für Energieaudits. Mit einer eigens dafür entwickelten Software wird die vollständige energetische Betriebsstruktur des Unternehmens im IST-Zustand abgebildet, d. h. alle Energieströme werden erfasst und Verluste transparent gemacht. Der SäGEP findet aktuell z. B. bei der Erstattung des Spitzensteuerausgleichs für das produzierende Gewerbe sowie bei Investitionsförderungen im Energiebereich Anwendung.

Durch die SAENA geprüfte und zertifizierte Sächsische Gewerbeenergieberater (kurz: SäGEP-Berater) ermitteln die Effizienzpotenziale im Unternehmen und beschreiben die hierfür erforderlichen Maßnahmen. Die Zertifizierung und Listung der SäGEP-Berater erfolgt personenbezogen über eine fachliche Eignungsprüfung von einem ausgewählten Gremium. Ihm gehören an:

- Je ein Vertreter der sächsischen Industrie- und Handelskammern sowie Handwerkskammern (Fachprüfer, Beisitzer)
- Mindestens ein Vertreter der sächsischen Hochschulen (Fachprüfer)
- Ein Vertreter der Sächsischen Energieagentur (Vorsitz)

Wiederholungsprüfungen sind nicht notwendig, soweit der Berater regelmäßig einschlägige Referenzen nachweisen kann und an den von der SAENA angebotenen Weiterbildungsveranstaltungen teilnimmt. In dieser Form kann das SäGEP-Zertifikat die nötige Qualität der Beratungsleistung nachhaltig gewährleisten.

Weitere Informationen zum Sächsischen Gewerbeenergiepass und dem SäGEP-Beraternetzwerk unter

www.saena.de/sagep

Einführung eines EnMS

Ein Energiemanagementsystem (EnMS) ist in der heutigen Zeit nicht mehr nur eine unternehmerische Option, sondern Bestandteil eines gut organisierten Unternehmens. Die internationale Norm für Energiemanagementsysteme (DIN EN ISO 50001) beschreibt die Struktur der Anwendung des EnMS in einem Unternehmen. Aufgabe dieser Norm ist es, Unternehmen in die Lage zu versetzen, die Systeme und Prozesse aufzubauen, welche zur Verbesserung der energiebezogenen Leistungen, einschließlich Energieeffizienz und -nutzung erforderlich sind. Allerdings sind die in der ISO enthaltenen Forderungen für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) oft nur mit sehr hohem Zeit- und Personalaufwand umsetzbar.

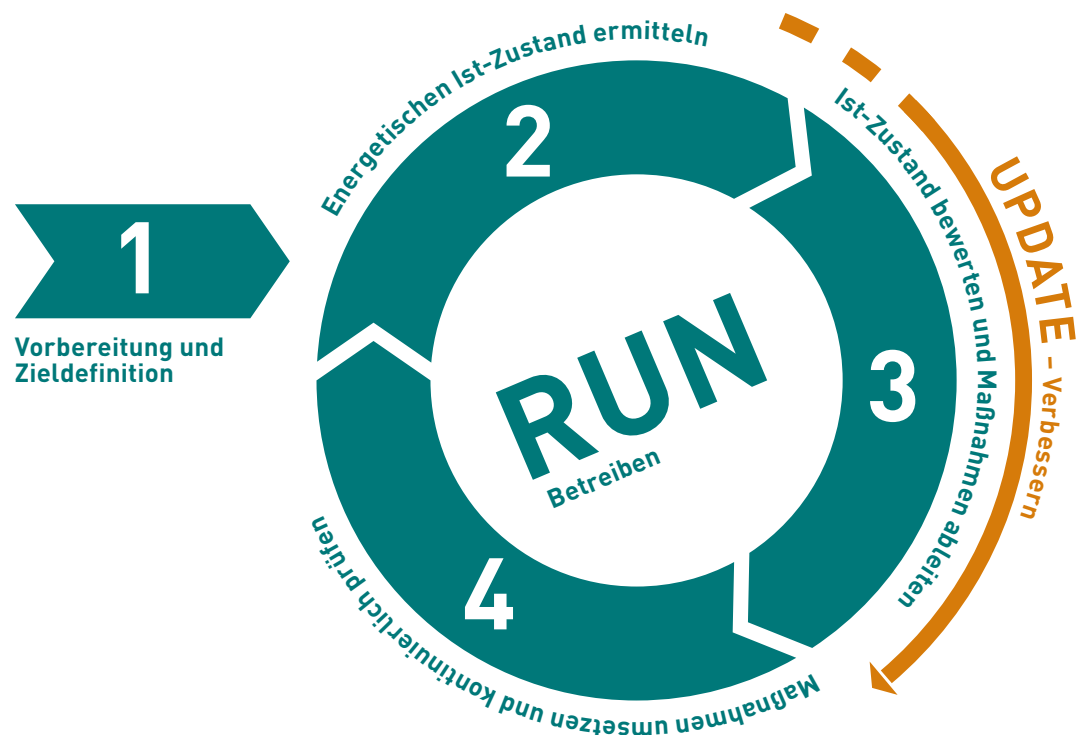
Die Sächsische Energieagentur sammelte viele wertvolle praktische Erfahrungen im Rahmen des Pilotprojekts „Energiemanagement in KMU“, das fachlich durch das Institut für Energiemanagement der Hochschule Mittweida begleitet wurde. Als Praxispartner engagierten sich dabei insgesamt 14 sächsische Firmen aus dem produzierenden Gewerbe. Das Projekt diente der Entwicklung einer praktischen Handlungshilfe für Unternehmen in Sachsen, die inhaltlich die Anpassung der DIN EN ISO 50001 an die speziellen Anforderungen von kleinen und mittleren Unternehmen zum Ziel hatte: Während die Norm beschreibt, „was“

für den Erhalt einer Zertifizierung erforderlich ist, fokussiert die Handlungshilfe speziell auf die Bedürfnisse eher kleinerer Unternehmen. Dabei legt sie besonderen Wert auf die praktikable Umsetzung, also auf das „Wie“.

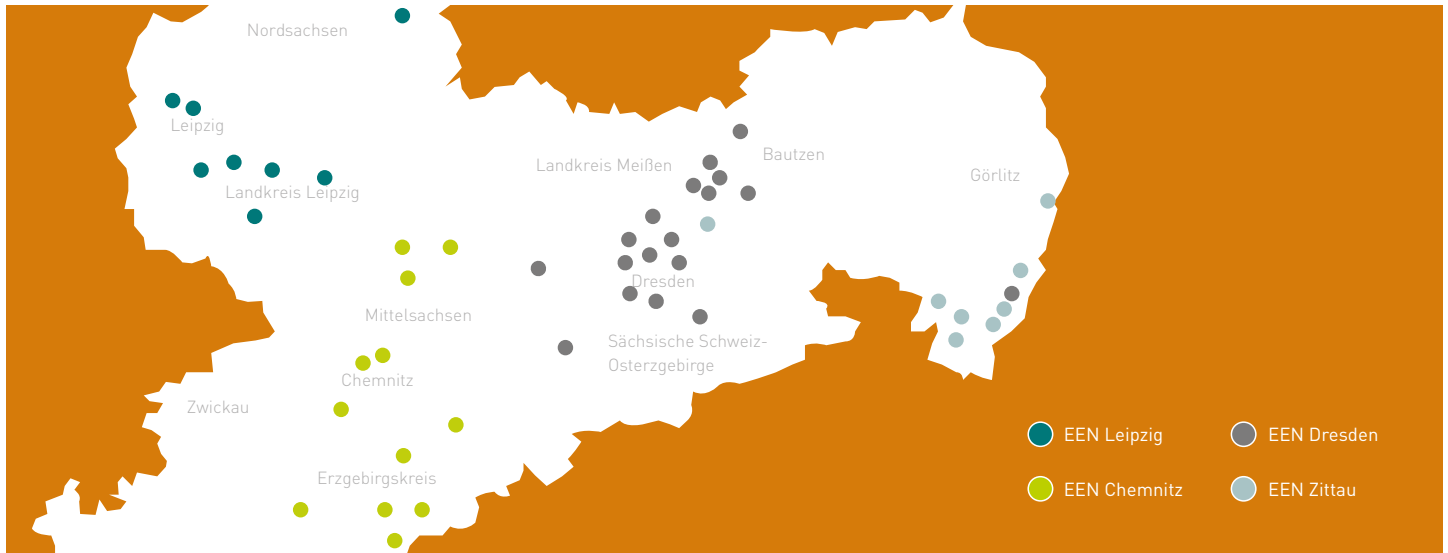
Im Wesentlichen sind nur 4 Stationen zu durchlaufen:

1. Die Einführung des Energiemanagements ist vorzubereiten, in dem dafür Ziele definiert werden.
2. Der energetische Ist-Zustand wird anhand von Abrechnungen, Anlagendokumentationen und Verbrauchsmessungen ermittelt.
3. Dieser Zustand wird bewertet und es werden passende Maßnahmen abgeleitet.
4. Effizienzmaßnahmen werden umgesetzt und kontinuierlich überprüft.

Um den Energieeinsatz im Unternehmen im Blick zu behalten, sind die Punkte 1–4 regelmäßig zu durchlaufen (RUN – Betreiben: Wie halte ich das Energiemanagement am Leben?). Eine dauerhafte Verbesserung der Energieeffizienz im Unternehmen ist nur dann möglich, wenn die umgesetzten Maßnahmen und Managementstrukturen stets kontrolliert und angepasst werden (UPDATE – Verbessern: Wie gehe ich mit Abweichungen um?).



Energieeffizienz-Netzwerke



Energieeffizienzpotenziale im Geschäftsalltag zu erkennen und auch nutzbar zu machen, stellt oftmals eine große Herausforderung dar. Was liegt da näher, sich aus diesem Alltag herausnehmen zu lassen, um ab und zu mal über den Tellerrand schauen zu können? SAENA kommt den Unternehmen hier entgegen und bietet eine ideelle und finanzielle Unterstützung zur Gründung von Energieeffizienz-Netzwerken (EEN) an. Im Kern geht es darum, sich mit Gleichgesinnten über energetische Einsparpotenziale zu beraten. Regelmäßige Workshops in ungezwungener Atmosphäre garantieren einen aufgeschlossenen Erfahrungsaustausch. Geleitet werden diese Treffen direkt vor Ort in den Betriebsstätten der Teilnehmer von einem durch SAENA beauftragten Expertenteam bestehend aus einem professionellen Moderator und einem Energieeffizienz-Experten. Beide sind für Inhalt und Qualität der Workshops sowie für die fachliche Betreuung der Unternehmen verantwortlich. Die Teilnehmer gestalten Inhalte und Zielstellungen aktiv mit, indem Sie Themenvorschläge, eigenes Wissen und Wünsche einbringen. Individuelle Ziele, wie eine Auditierung oder die Rückerstattung des Spitzenausgleichs, können somit berücksichtigt werden.

Bei der Gründung sächsischer EEN kooperiert SAENA eng mit den sächsischen Industrie- und Handelskammern und den Handwerkskammern. 2016 konnten bereits 4 Netzwerke in den Regionen Chemnitz, Dresden, Leipzig und Zittau gestartet werden. Dass die Teilnehmer aus unterschiedlichen Branchen kommen, ist Teil des offenen Konzepts. Die Firmen nehmen die „Hilfe zur Selbsthilfe“ gerne an und zeigen sich interessiert an den branchenübergreifenden Dialogen, denn alle verbindet das gemeinsame Ziel zur Energieeinsparung und Effizienzsteigerung.

Sächsisches Netzwerkkonzept

- Teilnehmerzahl: 10–15, branchenübergreifend in jeder Unternehmensgröße
- Anzahl Netzwerktreffen: 4 pro Jahr, jeweils ca. 5 Stunden zu Gast bei einem Teilnehmer
- Inhalte: Vorträge wechselnder Experten, moderierter und offener Erfahrungsaustausch, Betriebsrundgang beim Gastgeber
- Dauer: mind. 2 Jahre
- Finanzierung mit Unterstützung durch den Freistaat Sachsen
- Teilnahmegebühren: 800 € (netto) für Unternehmen mit einer Mitarbeiterzahl bis 250, 1.600 € (netto) für großkonzerngebundene Unternehmen



Ansprechpartner und weitere Informationen erhalten Sie unter www.saena.de/een



Impressum

Auflage

2. Auflage, Dezember 2016

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

Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM, Dresden
Geschäftsfeld Energie und Thermisches Management
Prof. Dr.-Ing. Jens Meinert

Redaktion der 1. Auflage (2012)

Sächsische Energieagentur – SAENA GmbH
Therm-Process-Consulting, Dr.-Ing. Jens Strack
DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH, Fachgebiet Gasanwendung

Gestaltung & Satz

Mai & März GmbH

Bildnachweis

Titel: Rainer Weisflog, S. 4 rechts: depositphotos, Abb. 2: Rainer Weisflog, Abb. 4: Fa. Gondzik, Abb. 6: AEL Apparatebau GmbH Leisnig, Abb. 7: Wieland-Werke AG, Abb. 9: Penke, Reineward & Co. GmbH, Abb. 11: Alfa Laval, Abb. 13: Klingenburg GmbH, Abb. 15: Howatherm Klimatechnik GmbH, Abb. 17: H. M. Heizkörper GmbH & Co. KG, Abb. 21: DLR, CC-BY 3.0, Abb. 23: ATTSU, Abb. 26: MVA Hamm Betreiber-GmbH, Abb. 28: Carrier / UTC Climate, Controls & Security, Abb. 30: EAW Energieanlagenbau GmbH, Abb. 33: SorTech AG, S. 40 rechts: canstockphoto / xtrex, Abb. 34: www.siemens.com/presse, Abb. 37: Dürr, Abb. 39: Kawasaki, Abb. 42: Viessmann Werke, S. 53: SAENA

