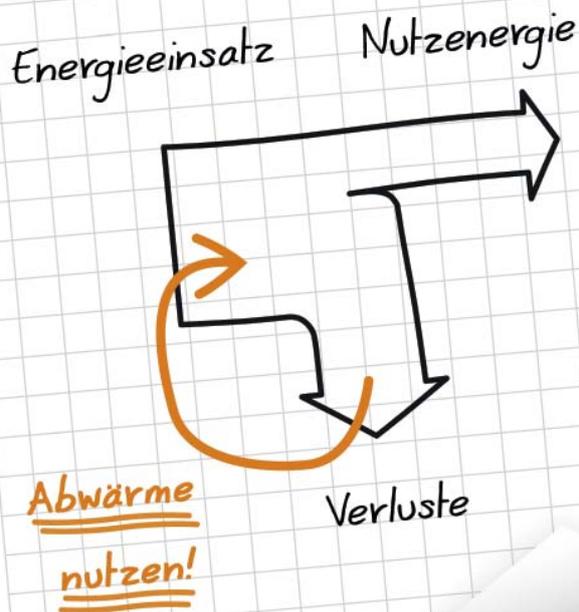
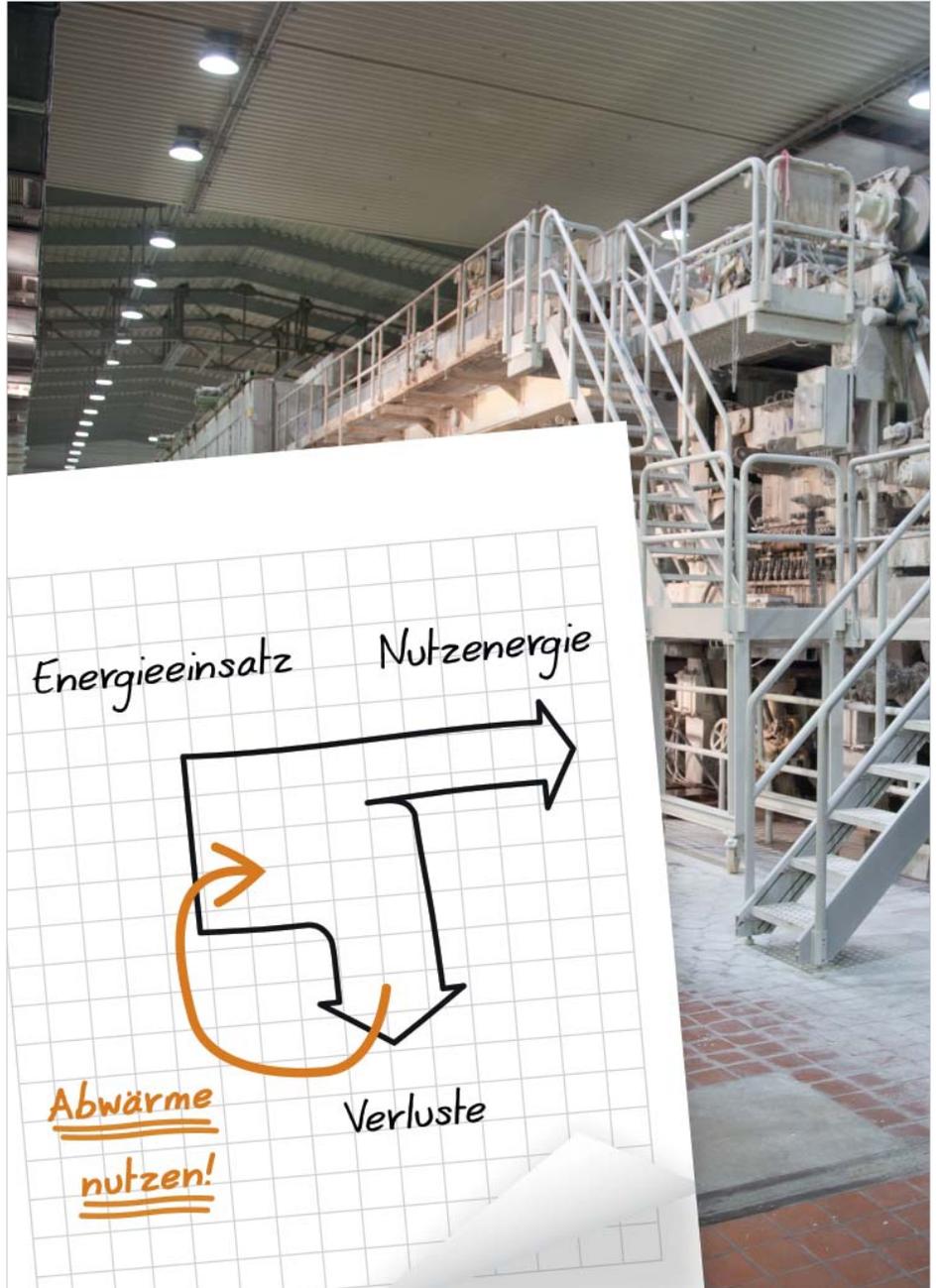


# Technologien der Abwärmennutzung



ENERGIEEFFIZIENZ  
IN UNTERNEHMEN

saena  
Sächsische  
Energieagentur GmbH



# Inhaltsverzeichnis

Seite	Inhalt
05	1. STEIGERUNG DER ENERGIEEFFIZIENZ DURCH ABWÄRMENUTZUNG
06	2. METHODIK DER ABWÄRMENUTZUNG
08	3. BRANCHENEINTEILUNG UND CHECKLISTE
08	3.1 Abwärmennutzung in unterschiedlichen Branchen
11	3.2 Checkliste zur Erstbewertung von Abwärmennutzungstechnologien
14	4. BEISPIELE FÜR DIE ABWÄRMENUTZUNG
14	4.1 Wäscherei
14	4.2 Bäckerei
15	4.3 Metallverarbeitender Betrieb
15	4.4 Thermische Veredelung von Glas
16	4.5 Serverraum
16	5. BEISPIELE ZUR WIRTSCHAFTLICHKEIT
17	5.1 Direkte Abwärmennutzung ohne/mit Speicher
18	5.2 Verbrennungsluftvorwärmung
18	5.3 Wärmepumpe
19	5.4 Absorptionskältemaschine
19	5.5 ORC-Anlage
20	6. TECHNOLOGIEN DER ABWÄRMENUTZUNG
20	6.1 Wärmetauscher
20	6.1.1 Rotationswärmetauscher
22	6.1.2 Wärmerohr-Wärmetauscher (Heatpipe)
22	6.1.3 Regenerative Wärmetauscher
23	6.1.4 Rippenrohrwärmetauscher
23	6.1.5 Spiralwärmetauscher
24	6.1.6 Lamellenwärmetauscher
24	6.1.7 Plattenwärmetauscher (PWT)
25	6.1.8 Rohrbündelwärmetauscher
25	6.1.9 Doppelrohrwärmetauscher
26	6.2 Wärmespeicher
28	6.2.1 Pufferspeicher
29	6.2.2 Kies-Wasser-Speicher
30	6.2.3 Luftdurchströmte Gesteinsspeicher – Schotterspeicher
31	6.2.4 Erdsonden-Wärmespeicher
32	6.2.5 Latentwärmespeicher
33	6.2.6 Sorptionsspeicher/thermochemische Speicher
34	6.2.7 Mobile Wärmespeicher
35	6.3 Verbrennungsluftvorwärmung
36	6.3.1 Rekuperator-Brenner
36	6.3.2 Regenerator-Brenner
37	6.4 Wärmepumpen und Kältemaschinen
38	6.4.1 Kompressionswärmepumpe
39	6.4.2 Absorptionswärmepumpe/-kältemaschinen
40	6.4.3 Adsorptionswärmepumpe/-kältemaschinen
41	6.5 Stromerzeugung
42	6.5.1 Wasserdampfturbine
42	6.5.2 ORC-Prozess
44	6.5.3 Stirlingmotor
46	7. FÖRDERUNG UND BERATUNG
47	8. IMPRESSUM



# 1. Steigerung der Energieeffizienz durch Abwärmenutzung

Energiebewusstes Handeln und Energieeffizienz ist im Umfeld steigender Energiepreise, eines breiten öffentlichen Umweltbewusstseins und ehrgeiziger Klimaziele kein Randthema mehr, sondern eine Notwendigkeit, der sich perspektivisch kein Unternehmen mehr entziehen kann.

Einerseits steigen die Erwartungen und Anforderungen an Unternehmen bezüglich eines verantwortungsvollen Energieeinsatzes seitens Gesellschaft und Politik, andererseits animieren steigende Energiekosten und technologische Fortschritte zum Nachdenken auch aus betriebswirtschaftlicher Sicht.

Parallel zur Optimierung des Energiebezugs stellt vor allem die **Energieeinsparung** das Handlungsfeld dar, von dem aus zahlreiche positive Effekte in jegliche Richtung des unternehmerischen Handelns generiert werden können. Vor dem Hintergrund weiterer zu erwartender Energiepreissteigerungen kann der Anteil der Energiekosten an der Gesamtkostenstruktur nur dann konstant gehalten oder gesenkt werden, wenn der Energieverbrauch durch geeignete Maßnahmen reduziert wird.

Bei der Vielzahl der zunehmend angewendeten Effizienztechnologien stellt die **Abwärmenutzung** eine gute – und häufig die günstigste – Möglichkeit dar, den Energiebedarf eines Unternehmens zu reduzieren. Abwärme fällt bei fast allen thermischen Prozessen an und lässt sich vielseitig nutzen. Im Facility-Bereich kann Abwärme je nach Menge und Temperaturniveau für die Beheizung von Gebäuden, zur Kühlung oder zur Nachverstromung angewendet werden. Im Verfahrensbereich kann sie zur energieeinsparenden Vorwärmung von Prozessmedien oder für die Beheizung ganzer Prozesse genutzt werden. Abwärme lässt sich gut speichern, für ihre Gewinnung stehen ausreichend erprobte Technologien zur Verfügung.

Hierbei zeigt die Erfahrung, dass sich je nach Modernisierungsstand des Unternehmens und seiner Produktionsanlagen viele Maßnahmen schon nach kurzer Zeit amortisieren. Betrachtet man die Maßnahmenumsetzung 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.

Der Umsetzung verfahrenstechnischer Energieeffizienzmaßnahmen sollte dabei stets eine kritische Auseinandersetzung mit dem Prozess und dem unternehmensbezogenen Energieeinsatz vorausgehen, wie es zum Beispiel bei einer qualifizierten Energieberatung üblich ist. Hieraus können sich neben der Energieeinsparung viele weitere positive Nebeneffekte ergeben, die die Leistungsfähigkeit eines Unternehmens erhöhen. Dazu gehören zum Beispiel eine Steigerung der Qualität, eine Stabilisierung des Prozesses oder eine Erhöhung der Anlagenkapazität, wodurch Kosten und eventuell auch Investitionen an anderer Stelle gespart werden können. Die Prüfung von Maß-

nahmen zur Abwärmenutzung und Steigerung der Energieeffizienz sollte daher in zeitlicher Folge stets vor betrieblichen Erweiterungsmaßnahmen durchgeführt werden.

Um dieses wichtige und chancenreiche Thema der Abwärmenutzung verstärkt in die Unternehmen zu tragen, hat die Sächsische Energieagentur - SAENA GmbH die vorliegende Broschüre und den **Abwärmeatlas** ([www.abwaermeatlas-sachsen.de](http://www.abwaermeatlas-sachsen.de)) erarbeitet. Neben einem Bewertungsschema zur Orientierung, Praxisbeispielen und beispielhaften Wirtschaftlichkeitsberechnungen werden in der Broschüre zahlreiche Technologien dargestellt, mit denen Abwärme gewonnen, gespeichert oder in andere Energieformen veredelt werden kann.

Die vorliegende Broschüre und der Abwärmeatlas werden ergänzt durch die „Technologierecherche Abwärmenutzung“, welche im Dezember 2010 durch die DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH Freiberg im Auftrag der Sächsischen Energieagentur - SAENA GmbH erstellt wurde und im Internet unter [www.abwaermeatlas-sachsen.de](http://www.abwaermeatlas-sachsen.de) abrufbar ist. Die Recherche enthält ein umfassendes Quellenverzeichnis, das weitere Quellen zu den spezifischen Themen dieser Broschüre aufführt.

## 2. Methodik der Abwärmenutzung

Abwärme fällt in nahezu allen industriellen Prozessen an. Immer dann, wenn aus einem Energieträger (Gas, Öl, Strom...) Nutzwärme gewonnen oder mechanische Arbeit verrichtet wird, treten Wärmeverluste auf.

Abwärme kann an bestimmte Medien gebunden sein oder diffus über eine Oberfläche durch Strahlung oder Konvektion an die Umgebung abgegeben werden.

Wird die Abwärme aus einem Prozess oder aus der Umgebung wieder zurückgewonnen, kann diese weiter verwendet werden. Dies wird häufig mit Wärmetauschern realisiert, die die Abwärme auf ein Transportmedium übertragen (z. B. Wasser, Thermoöl, Luft), welches die Wärme dann einer weiteren Verwendung zuführt. Diese direkte Nutzung von Abwärme ist oft die konstruktiv einfachste und kostengünstigste Variante. Häufig wird die Wärme auch erst zwischengespeichert, bevor sie weiter genutzt wird.

Bei der indirekten Abwärmenutzung wird das Temperaturniveau der Abwärme unter Einsatz weiterer Energie angehoben oder gesenkt (Kälte), oder die Abwärme wird in eine andere Energieform wie Strom umgewandelt.

Mittels Speicher kann die Wärme verschiedener Abwärmequellen zusammengeführt und direkte mit indirekter Abwärmenutzung kombiniert werden.

An Medien gebundene Abwärme ist häufig in großer Menge verfügbar und deutlich leichter als diffus anfallende Abwärme zu nutzen. Folgende Medien sind unter anderem als Träger von industrieller Abwärme möglich:

- Abgas,
- Abluft,
- Brüden,
- Dämpfe,
- Kühlwasser,
- Kühllöl oder
- Prozesswasser.

Wegen des besseren Wärmeübergangs an die Wärmeübertragerflächen ist dabei die Abwärmenutzung aus flüssigen Medien mit geringerem baulichen Aufwand möglich als die Abwärmenutzung von gasförmigen Medien.

Die Menge diffus anfallender Abwärme ist meist vergleichsweise gering und die Technik zur Nutzung aufwändiger. Dennoch gibt es Beispiele, die eine wirtschaftliche Nutzung von diffuser Abwärme belegen (z. B. Seite 16: Rückgewinnung der Abwärme aus Serverräumen).

Da die Abwärme sowohl wirtschaftlich als auch technisch effektiv genutzt werden sollte, ist bei der Umsetzung folgende Rangfolge zu beachten:

1. Verminderung des Auftretens von Abwärme durch geeignete Maßnahmen (Wärmedämmung, Prozess- bzw. Verfahrensoptimierung, Strömungsführung usw.)
2. Reintegration der Abwärme in den Prozess (Wärmerückgewinnung z. B. durch Verbrennungsluftvorwärmung oder Vorwärmung und/oder Trocknung der Ausgangsstoffe)
3. Betriebsinterne Verwendung der Abwärme auf einem möglichst hohen Temperaturniveau (Integration in andere Prozesse oder die Raumheizung/Warmwasserbereitung)
4. Transformation in andere Nutzenergieformen (elektrische Energie, Klima-Kälte)
5. Abgabe nicht intern nutzbarer Abwärme an Dritte (z. B. an benachbarte Unternehmen, zur Beheizung von Wohn- oder Geschäftsräumen, zur Wärmebedarfsdeckung von Sport- und Freizeitanlagen)

Natürlich ist die effiziente Verwendung von Abwärme in erster Linie von den Randbedingungen des betrachteten Unternehmens abhängig. Zunächst ist das Potenzial der vorhandenen Abwärmequellen zu identifizieren, das sich definiert durch:

- das Temperaturniveau,
- die verfügbare Energiemenge (bei ersatzweiser Angabe der thermischen Leistung im Abwärmemedium),
- das Medium der Abwärme (z. B. Abgas, Kühlwasser),
- die zeitliche Verfügbarkeit (kontinuierlich oder schwankend, saisonal, Anzahl der Volllaststunden pro Jahr) und
- die Verschmutzung des Abwärmemediums (Staub, Öl, giftige oder brennbare Substanzen, aggressive oder korrosive Bestandteile, Ruß, kondensierbare Dämpfe wie z. B. Teer oder Fett)

Während die Art des Mediums, der Verschmutzungsgrad und das Temperaturniveau der Abwärme relativ leicht bestimmbar sind, ist die ausreichend genaue Abschätzung der Abwärmeleistung ( $P_{AW}$ ) unter Umständen nicht immer einfach. Sie lässt sich nach folgender Gleichung bestimmen:

$$P_{AW} = \bar{c}_p \cdot \Delta T \cdot \dot{V}$$

Dabei bezeichnen  $\bar{c}_p$  die mittlere volumenspezifische Wärmekapazität,  $\Delta T$  die Temperaturdifferenz zwischen Abwärmemedium und Umgebung sowie  $\dot{V}$  den Volumenstrom der Abwärmequelle. Die mittlere volumenspezifische Wärmekapazität lässt sich einschlägiger Literatur entnehmen, der Volumenstrom kann zum Beispiel mit Hilfe von Massebilanzen oder Geschwindigkeitsmessungen bestimmt werden. Die Temperatur kann einfach gemessen werden.

Nach der Bestimmung des Abwärmepotenzials werden im zweiten Schritt die Möglichkeiten der Abwärmenutzung geprüft. Dabei ist entsprechend der Prioritätenliste auf Seite 6 vorzugehen. Bei der beabsichtigten Wärmeübertragung zwischen dem Abwärmemedium (Wärmequelle) und dem Medium der Nutzerseite (Wärmesenke) müssen folgende einfache Zusammenhänge bestehen:

- Die Temperatur der Wärmequelle muss höher sein als die der Wärmesenke (Ausnahme: Verwendung von Wärmepumpen).
- Die Leistung der Wärmequelle sollte gleich oder etwas größer sein als die der Wärmesenke, andernfalls muss ein zusätzliches Wärmeerzeugungssystem vorgehalten werden.

- Die zeitliche Verfügbarkeit der Abwärme sollte dem Nutzungsprofil der geplanten Abwärmenutzungstechnologie entsprechen, andernfalls sind Speicher oder redundante Systeme vorzusehen.
- Der Verschmutzungsgrad darf der geplanten Nutzung nicht grundsätzlich entgegenstehen.
- Es muss genügend Bauraum für die Installation der notwendigen Technik zur Verfügung stehen.
- Gegebenenfalls sind Genehmigungen für die Errichtung und den Betrieb zusätzlicher Anlagen einzuholen.

Neben der technischen Machbarkeit ist die Wirtschaftlichkeit in der Regel die Voraussetzung für die tatsächliche Umsetzung dieser Maßnahmen. Diese wird maßgeblich von folgenden Faktoren beeinflusst:

- Höhe der Investitionskosten für die Abwärmenutzungstechnologie
- Höhe der Ausgaben für Wartung und Betrieb
- Erlöse durch die Abwärmenutzung (Einsparung an Energiekosten für Strom, Erdgas, Heizöl, Verkauf der Wärme usw.)

Gegebenenfalls können die Investitionskosten durch Inanspruchnahme von Fördermitteln gesenkt werden (siehe S. 46).

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.



Abb. 1: Hochtemperaturwärmepumpe thermeco2 HHS1000

### 3. Brancheneinteilung und Checkliste

#### 3.1 Abwärmenutzung in unterschiedlichen Branchen

Der Vielfalt an Technologien zur Nutzung von industrieller Abwärme steht eine noch größere Vielfalt an gewerblichen Abwärmequellen gegenüber. In diesem Kapitel soll eine erste Orientierung gegeben werden, in welchen Branchen die Abwärmenutzungstechnologien bevorzugt angewendet werden können und dem interessierten Leser Anregungen gegeben werden, Abwärmepotenziale unter die Lupe zu nehmen. Bei der Einschätzung hilft das Bewertungsschema (vgl. Tab. 2).

Die Technologien zur Nutzung der Abwärme können in folgende Gruppen eingeteilt werden:

- **direkte Nutzung der Wärme** durch einfache Wärmeübertragung und Zuführung zu einem anderen Wärmeverbraucher mit geringerem Temperaturniveau
  - prozessintern (Vorwärmung von Ausgangsstoffen, Werkzeugen oder der Verbrennungsluft usw.)
  - betriebsintern (entweder in anderen Prozessen oder zur Beheizung von Wohn- und Geschäftsräumen sowie zur Trinkwassererwärmung)
  - extern (durch Weitergabe an Dritte z. B. über Nahwärmenetze)
  
- **indirekte Nutzung der Wärme** mittels Wärmepumpen oder durch Umwandlung in eine andere Energieform
  - zur Bereitstellung von Wärme auf einem höheren Temperaturniveau unter Verwendung einer Wärmepumpe
  - zur Stromerzeugung z. B. in
    - ORC-Anlagen
    - Dampfturbinen
    - Stirlingmotoren
  - zur Kälteerzeugung z. B. in
    - Sorptionskältemaschinen

Auf eine weitere Unterteilung der Technologien, wie z. B. der Art der verwendeten Wärmetauscher, wird an dieser Stelle der Übersichtlichkeit halber verzichtet. Im Kapitel „Technologien der Abwärmenutzung“ werden zahlreiche Wärmetauscher und Speicher vorgestellt und erläutert.

Die Branchen sind entsprechend der NACE („Nomenclature statistique des Activités économiques dans la Communauté Européenne – Statistische Systematik der Wirtschaftszweige in der Europäischen Gemeinschaft“) grob aufgeschlüsselt. Die Energiewirtschaft und Branchen mit vernachlässigbarem Abwärmepotenzial werden nicht berücksichtigt. Dafür sind Branchen, die eine sehr große Bedeutung für die sächsische Wirtschaft oder ein hohes Abwärmepotenzial aufweisen, in Unterbranchen aufgegliedert.

Die Einsetzbarkeit der Technologien in den verschiedenen Branchen wird mit Hilfe eines Ampelsystems visualisiert. Tabelle 1 erläutert die Bedeutung der Farbsymbole.

Eine ausgedehnte Umsetzung der Technologie in der Branche ist möglich.	
Mit leichten Einschränkungen ist eine vielfältige Umsetzung der Technologie in der Branche möglich.	
Die Umsetzung der Technologie in der Branche ist nur eingeschränkt möglich.	
Die Technologie ist nur unter bestimmten Bedingungen geeignet.	
Die Technologie ist in der Branche derzeit nicht einsetzbar.	

**Tab. 1: Bewertung von Abwärmenutzungstechnologien**

Da für die potenzielle Anwendbarkeit der Technologien das Temperaturniveau der Abwärme entscheidend ist, sind die jeweiligen Branchen mit Angaben zum Temperaturniveau der Prozesswärme untersetzt.

Damit kann auch die Anwendbarkeit im spezifischen Fall abgeschätzt werden, da sich einzelne Betriebe innerhalb einer Branche zum Teil deutlich voneinander unterscheiden.

Branche	Temperaturniveau der Prozesswärme	Wärmenutzung				Stromerzeugung			Kälteerzeugung
		Prozessinterne Wärmenutzung (Verbrennungsluftvorwärmung, Vorwärmung von Prozesshilfsmitteln)	Betriebsinterne Wärmenutzung (für andere Prozesse mit geringeren Temperaturanforderungen oder Heizwecke)	Externe Wärmenutzung (Weitergabe an Dritte, z. B. in Wärmenetzen)	Wärmepumpen (Anheben des Temperaturniveaus, meist für Heizwecke)	ORC-Turbine	Dampfturbine	Stirlingmotor	Sorptionskältemaschinen
<b>Herstellung und Verarbeitung von Metallen</b>									
Stahlerzeugung und -verarbeitung	1.600 °C	●	●	●	●	●	●	▨	●
Nichteisenmetallurgie (z.B. Aluminium, Blei, Zink, Kupfer)	1.100 °C	●	●	●	●	●	▨	▨	●
Härtereien	1.050 °C	●	●	▨	▨	●	●	▨	▨
Galvanik-Oberflächenbehandlung (z.B. eloxieren, brünieren, phosphatisieren)	100 °C	▨	●	●	▨	●	●	●	●
Mineralverarbeitende Industrie (z.B. Sandtrocknungsanlagen, Zementwerke)	1.500 °C	▨	▨	▨	●	●	▨	●	▨
Maschinen- und Fahrzeugbau (z.B. Montage, Lackierung, Tiefziehen)	200 °C	▨	▨	▨	▨	▨	●	●	●
Chemische Industrie (z.B. Chemiewerke, Pestizidproduktion)	1.000 °C	▨	●	▨	▨	●	▨	●	▨
Erdöl- oder Erdgasgewinnung bzw. -verarbeitung (z.B. Raffinerien)	600 °C	▨	●	●	▨	●	▨	●	▨
Herstellung von Glas und Keramiken	1.800 °C	●	●	●	▨	●	▨	●	●
Pharmaindustrie	400 °C	●	▨	●	▨	●	▨	●	▨
Herstellung von Gummi- und Kunststoffwaren	300 °C	●	▨	●	●	●	▨	●	▨
Be- und Verarbeitung von Papier und Holz (z.B. Papierherstellung, Spanplattenherstellung)	200 °C	●	●	▨	▨	▨	●	●	●
Landwirtschaft und Viehhaltung	150 °C	▨	▨	●	●	●	●	●	●
Informations- und Datenverarbeitung (z.B. Serverräume)	60 °C	●	●	●	●	●	●	●	●
Elektrotechnik und Optik (z.B. Kabelhersteller, Linsen)	300 °C	▨	●	▨	▨	▨	●	●	●
Lebensmittelindustrie (z.B. Schlachthöfe, Molkereien, Brauereien)	200 °C	●	●	▨	▨	▨	●	●	●
Textilindustrie/Wäschereien (z.B. Waschen, Trocknen, Farbgebung)	100 °C	▨	●	●	●	●	●	●	●
Abwasserwirtschaft (z.B. Kläranlagen, Klärgasnutzung)	1.200 °C	▨	▨	▨	●	▨	●	▨	●
Abfallwirtschaft (z.B. Deponien, Müllverbrennungsanlagen)	1.150 °C	●	●	▨	●	▨	●	▨	▨

Tab. 2: Bewertungsschema Abwärmernutzungstechnologien in einzelnen Branchen des verarbeitenden Gewerbes

So sind in der Branche „Mineralverarbeitende Industrie“ sowohl Zementwerke mit hoher Prozesstemperatur als auch Steinbrüche ohne jegliches Abwärmepotenzial vertreten. Es ist also zu prüfen, ob überhaupt Prozesse mit dem entsprechenden Temperaturniveau im Unternehmen vorhanden sind. Es gibt Branchen und Technologien, die sehr viele grüne und grün-weiße Bewertungen aufweisen. Dort liegt ein breites nutzbares Abwärmepotenzial vor (Metallverarbeitung, Glas- und Keramikerstellung). Ebenso gibt es Technologien mit einem potenziell breiten Anwendungsfeld (wie z. B. Wärmepumpen oder betriebsinterne Wärmenutzung). Trotzdem kann die Auswahl geeigneter Technologien zur Nutzung von Abwärme nur anhand von Einzelfallbetrachtungen der jeweils verwendeten Herstellungsprozesse und -verfahren vorgenommen werden.

Unabhängig von der jeweiligen Branche hilft Abbildung 2 bei der Frage, welche Technologie der Abwärmenutzung für einen konkreten Fall in einem Unternehmen eingesetzt werden kann. Hier sind die Einsatzbereiche der am weitesten verbreiteten Abwärmenutzungstechnologien nach Anwendungstemperatur und Leistung aufgeführt. Mit Hilfe dieser beiden Kenngrößen kann eine erste Orientierung erfolgen, welche Möglichkeiten der Abwärmenutzung bestehen.

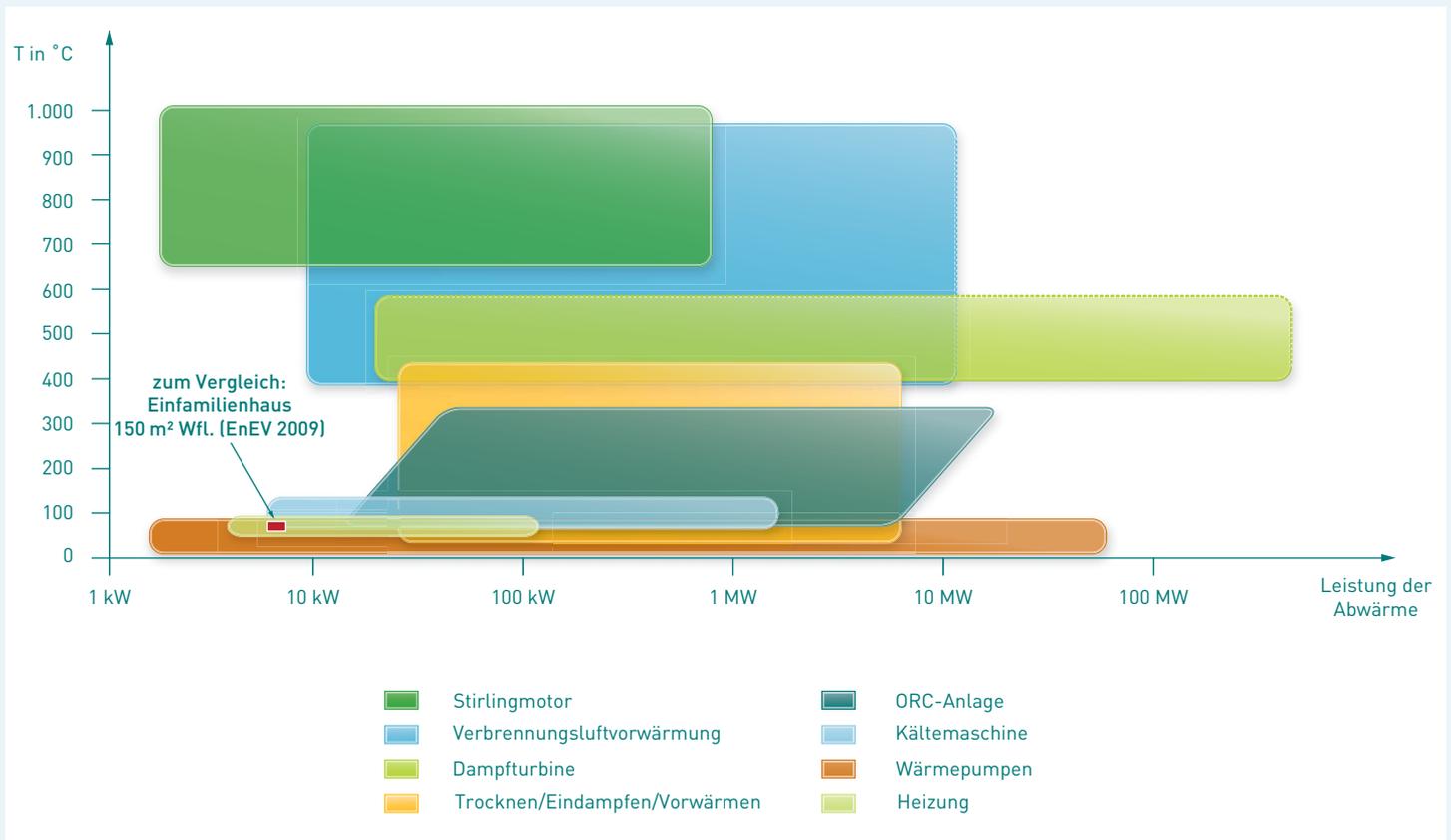


Abb. 2: Einordnung von ausgewählten Abwärmenutzungsoptionen

### 3.2 Checkliste zur Erstbewertung von Abwärmenutzungstechnologien

In diesem Kapitel wird eine Checkliste vorgestellt, die interessierten Unternehmen die selbständige Erstbewertung der möglichen Technologien zur Nutzung ihrer Abwärmepotenziale erleichtert. Die Checkliste dient als Einstieg und gibt eine Orientierung, sollte aber eine fachlich fundierte Beratung und Planung nicht ersetzen.

Die Checkliste enthält 12 Kriterien und orientiert sich an:

- technischen Merkmalen der Abwärmequelle,
- technischen Merkmalen der potenziellen Abwärmesenke sowie
- rechtlichen und wirtschaftlichen Fragen.

Zuerst erfolgt die Analyse des vorhandenen Abwärmepotenzials. Wenn dieses hinreichend genau bestimmt werden kann, können oft schon einige Nutzungsformen ausgeschlossen und andere favorisiert werden.

Im nächsten Schritt sollten potenzielle Nutzungsmöglichkeiten betrachtet werden. Dazu sind Fragen nach dem Energiebedarf zu beantworten. Darüberhinaus müssen auch Punkte wie der Verschmutzungsgrad des Abwärmemediums oder die zeitliche Konvergenz zwischen Abwärmequelle und Wärmesenke abgeklärt werden. Unter Umständen sind auch zusätzliche Maßnahmen notwendig, wie z. B. der Einbau von Filtern, Wärmespeichern oder Zusatzheizgeräten.

Rein technisch betrachtet sind häufig mehrere Nutzungsvarianten möglich, die jedoch nicht alle auch wirtschaftlich sind. Zum Beispiel sind Kälteerzeugungsanlagen auf Basis von Abwärmenutzung (Sorptionskälteanlagen) oft denkbar. Soll die Kälteanlage jedoch zur Klimatisierung von Büroräumen eingesetzt werden, sind die Jahresnutzungsstunden meist zu gering, um einen wirtschaftlichen Betrieb zu gewährleisten.

Da mit der Umsetzung einer Maßnahme zur Abwärmenutzung auch Kosten für Planung, Technik und Installation verbunden sind, muss schlussendlich jede Konzeptvariante hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit überprüft werden.

In diesem Rahmen sollte auch die Möglichkeit der Inanspruchnahme von Fördermitteln und die Art der Finanzierung betrachtet werden.

Sofern ein Unternehmen die Investition in eine Maßnahme nicht oder nicht komplett selbst übernehmen kann oder will, sollte Energiecontracting ins Auge gefasst werden. In der folgenden Tabelle 3 finden Sie die Checkliste zur Erstbewertung von Abwärmenutzungstechnologien.



Abb. 3: Latentwärmespeicher in Carboneras

Kriterien	Wärmenutzung				Stromerzeugung			Kälte- erzeugung
	Prozessinterne Wärmenutzung (Verbrennungsluftvorwärmung, Vorwärmung von Prozesshilfsmitteln)	Betriebsinterne Wärmenutzung (für andere Prozesse mit geringeren Temperaturanforderungen oder Heizzwecke)	Externe Wärmenutzung (Weitergabe an Dritte, z. B. in Wärmenetzen)	Wärmepumpen (Anheben des Temperaturniveaus, meist für Heizzwecke)	ORC-Turbine	Dampfturbine	Stirlingmotor	Sorptionskältemaschinen
<b>Technische Kriterien der Abwärmequelle</b>								
<b>1. Wie hoch ist das durchschnittliche Temperaturniveau des Abwärmemediums?</b>								
bis 50 °C	--	--	--	++	--	--	--	--
50 °C bis 150 °C	0	+	0	0	0	--	--	+
150 °C bis 500 °C	+	+	+	-	++	+	--	0
über 500 °C	++	+	+	--	+	++	+	0
<b>2. Wie hoch ist die durchschnittliche Leistung der Abwärmequelle?</b>								
bis 10 kW	-	-	--	0	--	--	-	-
10 kW bis 100 kW	+	+	-	++	0	0	+	+
100 kW bis 1 MW	++	++	+	+	+	+	+	+
1 MW bis 10 MW	++	+	++	0	++	++	--	0
über 10 MW	++	+	++	-	++	++	--	--
<b>3. Welchen Aggregatzustand weist das Abwärmemedium auf?</b>								
gasförmig	+	0	0	-	-	0	+	0
flüssig	+	+	+	+	+	+	+	+
<b>4. Ist das Abwärmemedium verschmutzt oder enthält störende Bestandteile? (z. B. Staub, Ruß, Fett, brennbare/giftige Bestandteile, Dämpfe)</b>								
→ wenn notwendig, geeignete Filter/Abscheider vorsehen								
<b>5. Fällt die Abwärme in der Regel durchgängig (kontinuierlich) an oder gibt es Schwankungen (diskontinuierlich)?</b>								
kontinuierlich	0	+	+	+	+	+	+	+
diskontinuierlich	0	-	-	-	-	-	-	-
<b>6. Wie oft steht die Abwärme zur Nutzung bereit? (Angabe in Stunden pro Jahr)</b>								
bis 2.000	+	-	--	-	--	--	--	-
2.000 bis 4.000	++	0	-	+	-	-	-	+
4.000 bis 6.000	++	+	0	++	+	+	+	++
über 6.000	++	++	++	++	++	++	++	++
<b>Technische Kriterien der Abwärmesenke</b>								
<b>7. Gibt es im Unternehmen einen Bedarf an Kälte, Wärme oder Strom?</b>								
Kälte	0	0	0	0	0	0	0	++
Wärme	++	++	++	++	0	0	0	0
Strom	0	0	0	0	++	++	++	0
<b>8. Wie oft wird die Nutzenergie (Kälte, Wärme oder Strom) benötigt? (Angabe in Stunden pro Jahr)</b>								
bis 1.000	0	0	--	-	--	--	--	--
1.000 bis 2.000	+	+	-	+	--	--	--	-
2.000 bis 4.000	++	++	++	++	0	+	-	+
über 4.000	++	++	++	++	++	++	+	++
<b>9. Ist die geforderte Nutzleistung größer als das Abwärmeangebot?</b>								
unerheblich		Zusatzheizung muss vorgehalten werden			unerheblich			Zusatzkühlung
<b>10. Besteht zeitliche Konvergenz zwischen Abwärmefall und Leistungsbedarf der Nutzungstechnologie?</b>								
oft gegeben		falls nicht, Einbindung von Wärmespeichern notwendig			unerheblich			Speicher einbinden
<b>Rechtliche und wirtschaftliche Kriterien</b>								
<b>11. Ist die Einholung von Genehmigungen (Behörden, zertifizierte Stellen) erforderlich?</b>								
Prüfen!								
<b>12. Ist die Investition in eine Abwärmenutzungstechnologie rentabel?</b>								
Prüfen!								
<b>13. Gibt es Möglichkeiten der Förderung durch die öffentliche Hand? (z. B. Investitionszuschüsse, zinsgünstige Darlehen)</b>								
Prüfen!								

Tab. 3: Checkliste zur Erstbewertung von Abwärmenutzungstechnologien

Das Bewertungsschema der links dargestellten Checkliste wurde in fünf Wertigkeiten aufgeteilt. Dabei reicht die Skala von „Doppelplus“ für eine sehr gute Eignung der Technologie für den konkreten Einsatzfall bis zum „Doppelminus“, das den Einsatz einer Technologie quasi ausschließt.

Die Verwendung dieser Checkliste (Tab. 3) lässt sich am besten an einem Beispiel verdeutlichen.

#### Beispiel für die Verwendung der Checkliste

Ein mittelständisches Unternehmen betreibt mehrere Server in einem Serverraum und verfügt aus einem Produktionsprozess für Kunststoffteile über eine Abwärmequelle. Der Serverraum hat einen gleichmäßig hohen Kühlbedarf. Außerdem benötigt die Firma für die Büroräume Heizenergie in der kalten Jahreszeit.

Die Analyse der Abwärmequelle ergibt folgendes Bild:

- Temperaturniveau der Abwärme: 70 °C (Niedertemperatur)
- Abwärmemedium: unverschmutztes Abgas
- Leistung der Abwärme: 20 kW
- Die Abwärme fällt kontinuierlich über das ganze Jahr an (> 6.000 h/a)

Die Analyse der Nutzungsmöglichkeiten kommt zu folgenden Ergebnissen:

- Es besteht ein Bedarf an Wärme und Kälte.
- prognostizierte Nutzung im Fall Kälte: > 4.000 h/a
- prognostizierte Nutzung im Fall Wärme: 1.000–2.000 h/a
- Abwärmeleistung ausreichend, zeitliche Konvergenz gegeben

Durch das relativ niedrige Niveau der Abwärme bedingt, wird in der Checkliste im Bereich „Temperaturniveau“ nur die betriebsinterne Wärmenutzung (hier für Heizzwecke) und die Kälteerzeugung über Sorptionskältemaschinen als positiv beurteilt. Deswegen werden im Folgenden nur noch diese beiden Technologien betrachtet.

++	Technologie ist sehr gut geeignet
+	in den meisten Fällen ist die Nutzung der Technologie möglich
o	unter bestimmten Umständen ist der Einsatz dieser Technologie möglich
-	kritischer Faktor, der Einsatz ist kaum möglich bzw. wird erschwert
--	Ausschlusskriterium, Einsatz unmöglich

Tab. 4: Bewertungsschema der Technologien / Kriterien zur Abwärmee-nutzung

In Bezug auf die Leistungsklasse können beide Technologien jeweils ein (+) verbuchen. Das Abwärmemedium (Abgas) beeinflusst die weitere Bewertung nicht. Da das Abwärmemedium frei von Verschmutzungen ist, müssen keine Filter oder dergleichen vorgesehen werden.

Der kontinuierliche Abwärmestrom ist für beide betrachteten Nutzungsvarianten Wärme und Kälte günstig. Die hohe Verfügbarkeit der Abwärme (> 6.000 h/a) ist ebenfalls positiv einzu-stufen.

Auf der Nutzungsseite kann Folgendes abgeleitet werden:

- Sowohl Wärme als auch Kälte werden benötigt.
- Die prognostizierten Jahresnutzungsstunden ermöglichen einen sinnvollen Betrieb.
- Voraussichtlich müssen weder Wärmespeicher noch zusätzliche Heiz- bzw. Kühlsysteme installiert werden (sofern die Verfügbarkeit der Abwärmequelle dauerhaft gegeben ist).
- Die Notwendigkeit einer Baugenehmigung ist zu prüfen. So benötigen Sorptionskälteanlagen eine Niedertemperaturwärmesenke, die oft im Freien als (Nass-)Kühler errichtet werden muss.
- Fördermöglichkeiten (siehe S. 46) sollten vor einer Investitionsentscheidung geprüft werden.

Die Wirtschaftlichkeit beider Technologien sollte anhand einer detaillierten Investitionsrechnung beurteilt werden.

Aus technischer Sicht sind beide Varianten für den betrachteten Fall empfehlenswert.

## 4. Beispiele für die Abwärmenutzung

Wie die Abwärmenutzung heute schon umgesetzt wird, zeigen die folgenden Beispiele aus unterschiedlichen Branchen. Sie sollen dazu anregen, im eigenen Unternehmen die wärmetechnischen Prozesse hinsichtlich einer etwaigen Abwärmenutzung zu überdenken. Die Beispiele zeigen hauptsächlich niedertemperaturige Thermoprozesse, wie sie in vielen sächsischen Unternehmen zu finden sind.

### Beispiel 1: Wäscherei

In der Wäscherei Klose aus Niederau wird durch einen Kondensat-Entspanner in der Dampfkesselanlage, durch Wärmetauscher in der Mangelabluft und im Abwasserstrom der Waschmaschinen die bisher ungenutzte Prozessabwärme wiedergewonnen. Die Wärme wird eingesetzt, um das Frischwasser für die Waschmaschinen von 6 °C im Winter bzw. 12 °C im Sommer auf 40 bis 50 °C vorzuheizen. Hieraus resultiert eine Energieeinsparung von jährlich 340 MWh und eine gesamtbetriebliche Energieeinsparung im Bereich Wärme von 15 %.

Die Investitionen für diese Maßnahmen beliefen sich auf rund 61.500 € und führen zu einer jährlichen Energiekosteneinsparung von 17.000 €, was einer Amortisationszeit von rund 3,5 Jahren entspricht. Die energetische Struktur der Wäscherei und die Maßnahmenempfehlungen wurden durch einen Sächsischen Gewerbeenergieberater erarbeitet. Ein Auszug ist in Abb. 5 dargestellt.

### Beispiel 2: Bäckerei

In der Backstube der Bäckerei Berndt in Eibau wurde die Warmwasserversorgung mit Hilfe der Wärmerückgewinnung aus dem Rauchgas der Backöfen realisiert. In den Abgasstrom der drei vorhandenen Backöfen (53 kW, 43 kW, 8 kW) wurden Wärmetauscher eingesetzt. Die damit gewonnene Energie

kann den Heiz- und Warmwasserbedarf des Gebäudes mit dem parallel betriebenen Café zu einem Großteil abdecken. Zusätzlich wird die Abwärme der Kühlanlagen zur Beladung des Speichers genutzt. Für Spitzenlasten wurde außerdem eine Luft-Wasser-Wärmepumpe installiert (siehe Abb. 4).

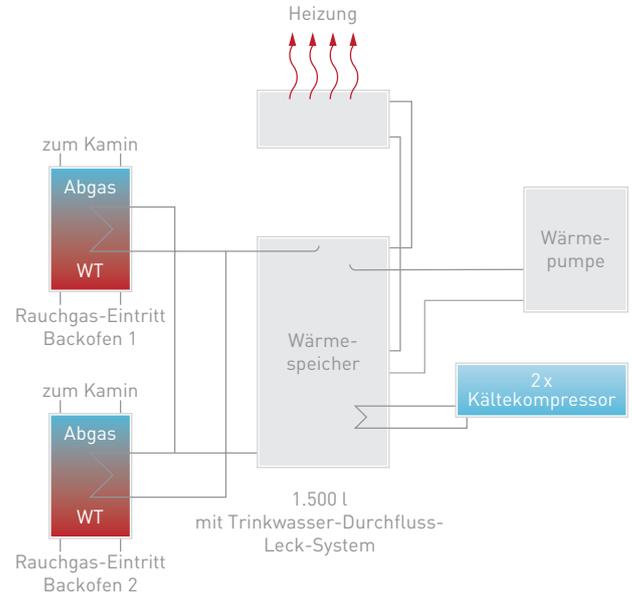
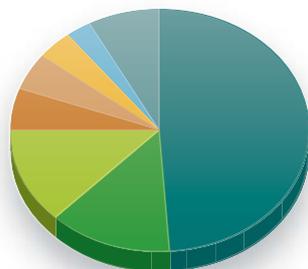


Abb. 4: Schema Wärmerückgewinnungssystem einer Bäckerei

Diese Maßnahmen ermöglichen eine Heizölersparnis von 6.000 l pro Jahr. Zum Zeitpunkt der Konzeptumsetzung (2010) betrug die Amortisationsdauer durch die eingesparten Heizkosten vier Jahre. Nach einer Preissteigerung des Heizöls um ca. 22 % (2011) verkürzt sich die Refinanzierungsdauer auf drei Jahre.

### Energieverbrauch Wärme der bewerteten Hauptverbraucher (Prozentangabe: Anteil am Gesamtwärmeverbrauch)



■	Dampferzeugung	49,2 %
■	Trockner 75 kg	13,3 %
■	Mangelstraße	12,8 %
■	Waschmaschine 130 kg	5,6 %
■	Trockner 27 kg	4,8 %
■	Kittelkabinett	4,1 %
■	Heizung	2,7 %
■	Sonstige	7,5 %
	<b>Summe</b>	<b>100 %</b>

Nr.	Maßnahmen	Energieart	Einsparpotenzial [%]	Einsparung [€/a]	Investition [€]	Investition/Einsparung [a]
1	Einbau eines Kondensat-Entspanners (KE) in Dampfkesselanlage, Wärmetauscher zur Abwärmenutzung von Mangelabluft u. Waschmaschinenabwasser, Nutzung Abwärme für Vorwärmung des Frischwassers	Wärme	30,00	17.000,00	61.500,00	3,62

Abb. 5: Auszug aus dem Sächsischen Gewerbeenergiepass der Wäscherei Klose: Analyse der Hauptverbraucher und Maßnahmenempfehlung

### Beispiel 3: Metallverarbeitender Betrieb

Wie bei den vorhergehenden Beispielen schon deutlich wurde, sollte bei verschiedenen Möglichkeiten der Abwärmenutzung ein betriebliches Gesamtkonzept erarbeitet werden. Der metallverarbeitende Betrieb Purkart Systemkomponenten in Großrückerswalde hat sich daher im Rahmen der Erstellung des Sächsischen Gewerbeenergiepasses ein solches Konzept erarbeiten lassen. In diesem Unternehmen wird sowohl direkt als auch indirekt Abwärme gewonnen und nutzbar gemacht. Nach Umsetzung der empfohlenen Maßnahmen wird durch Wärmetauscher am Einbrennofen, am Haftwassertrockner und den Kompressoren Wärme gewonnen. Weiterhin wurde in den Kühlkreislauf der Flachbettlaser eine Wärmepumpe integriert, welche einerseits das Kühlmittel von 35 °C auf 25 °C abkühlt und andererseits die entzogene Wärme einem neuen zentralen Wärmespeicher auf einem Temperaturniveau von 55–60 °C zur Verfügung stellt. Genutzt wird die Wärme unter anderem für die Beheizung von Phosphatierungs- und Entfettungsprozessen.

Insgesamt konnte über alle realisierten Maßnahmen eine Energieeinsparung bei den wärmetechnischen Prozessen von 9 % erreicht werden.

Die Investitionskosten der Gesamtmaßnahmen (Wärmerückgewinnung, Speicher und weitere Maßnahmen) beliefen sich auf ungefähr 570.000 €. Diesen Investitionen steht eine jährliche Energiekosteneinsparung von 104.000 € gegenüber, was einer Amortisationszeit von sechs Jahren oder bei einer angenommenen Energiepreissteigerung von 3 % jährlich einer Rendite von 18 % entspricht.



Abb. 6: Abwärmequelle Flachbett-Laser

### Indirekte Abwärmenutzung durch Wärmepumpe

Neben solchen komplexen Lösungen können aber auch einfache Systeme effektive Maßnahmen zur Abwärmenutzung sein. Speziell der Einsatz von Wärmepumpen bietet die Möglichkeit, auch diffuse Abwärme zu gewinnen, zum Beispiel aus Serverräumen oder aus Produktionsstätten mit thermischen Lasten. Thermische Lasten können z. B. Öfen oder eine Vielzahl an Bearbeitungsmaschinen (Drehmaschinen, Pressen, usw.) sein. Diese Wärme kann dann beispielsweise für das Heizungssystem in anderen Gebäudetrakten oder zur Warmwasserbereitung genutzt werden.

### Beispiel 4: Thermische Veredlung von Glas

Bei der Firma Thiele Glas Werk GmbH in Wermsdorf wurde die bestehende Gasheizung des glasveredelnden Betriebs durch eine moderne Luft-Wasser-Wärmepumpen-Anlage ersetzt. Diese nutzt die im Produktionsprozess anfallende Abwärme als Energiequelle für den Heizbetrieb des 1.100 m<sup>2</sup> großen Bürotrakts und für die Warmwasserversorgung. Dabei ist für beide Aufgaben jeweils eine separate Wärmepumpe vorgesehen. Für den Heizbetrieb ist die zuständige Wärmepumpe direkt neben einem Fertigungssofen positioniert. Durch Wärmestrahlung und austretende Heißgasströme erwärmt sich die Umgebungsluft im Bereich der Anlagen. Diese warme Luft gelangt direkt an die Luftansaugseite der Wärmepumpe. Die bis 30 °C warme Luft wird angesaugt und um ca. 10 K abgekühlt, bevor sie zurück in die Halle geblasen wird. Damit wird zum einen die Werkshalle gekühlt und entfeuchtet, zum anderen wird die Abwärme in anderen Gebäudeteilen sinnvoll zur Beheizung eingesetzt.

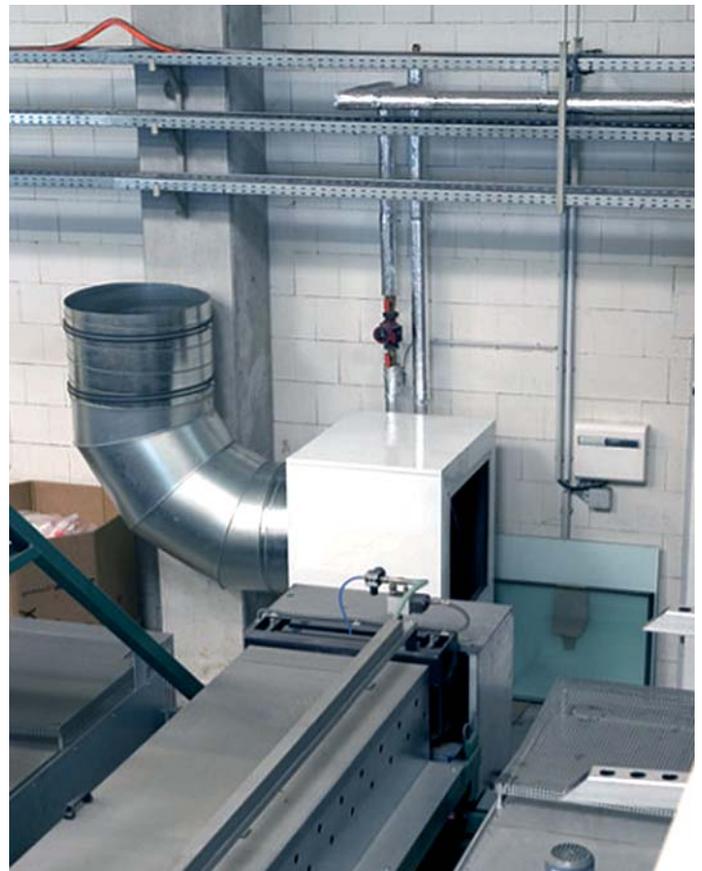


Abb. 7: Luft-Wasser-Wärmepumpe neben Industrieofen

Die Investitionskosten für die komplette Anlage betragen ca. 82.000 €, wobei auf die Wärmepumpen etwa 58.000 € entfielen. Zum einen rechnet sich das Projekt über den vermiedenen Gasverbrauch zu Heizzwecken, zum anderen kann künftig auf eine teure Investition in eine Klimaanlage verzichtet werden.

## 5. Beispiele zur Wirtschaftlichkeit

### Beispiel 5: Serverraum

Ein weiteres Beispiel ist der Einsatz einer Wärmepumpe im Rechenzentrum der Stadtreinigung Hamburg. Dort kann durch die Verwertung der Server-Abwärme der gesamte Warmwasserbedarf des Verwaltungsgebäudes sowie ein Teil des Heizbedarfs gedeckt werden.

Der kontinuierlich abzuführende Wärmestrom der Rechen-technik (35 kW) wurde vor der Modernisierung komplett an die Umgebungsluft abgegeben und die notwendige Wärme zur Warmwasseraufbereitung aus dem Fernwärmenetz bezogen. Nun können durch den energieeffizienteren Betrieb erhebliche Mengen Energie eingespart werden. Die Wärmepumpe erwärmt mit einer Heizleistung von 48 kW einen Pufferspeicher, der das Heißwasser zwischenspeichert und als Lastausgleich für Spitzenzeiten dient.

Durch die Größe des Pufferspeichers (30 m<sup>3</sup>) ist es möglich, mit der relativ kleinen Leistung der kontinuierlich laufenden Wärmepumpe (48 kW) die Wärme für eine große punktuelle Spitzenlast (1.360 kW) während der Duschzeiten bereitzustellen. Dafür müsste ansonsten ein größerer Wärmeerzeuger mit geringer Auslastung bereitstehen.

Die Investitionskosten der kompletten Anlage betragen 55.000 €, davon wurden 25.000 € für die Wärmepumpe mit Zubehör und 30.000 € für den Pufferspeicher ausgegeben. Der Fernwärmebezug wird hier um bis zu 500.000 kWh pro Jahr gemindert, die Amortisation beträgt 3 bis 4 Jahre.



Abb. 8: Wärmespeicher und Wärmepumpe

Häufigstes Entscheidungskriterium bei Investitionen in Effizienz- bzw. Abwärmenutzungstechnologien ist die Wirtschaftlichkeit.

Die betriebswirtschaftliche Bewertung einer Maßnahme kann dabei nach unterschiedlichen Gesichtspunkten erfolgen. Ein häufig angewandtes Bewertungskriterium ist die Amortisationszeit. Oft liegen die Anforderungen der Industrie an die Amortisation im Produktionsbereich bei 1 bis 2 Jahren. Dem gegenüber steht die sehr lange Nutzungsdauer der Abwärmetechnologien von 15 bis 20 Jahren. Da die Abwärmenutzung oft eine vom jeweiligen Produkt unabhängige Investition ist (dies ist z. B. der Fall, wenn die Abwärme für die Beheizung von Gebäuden verwendet wird), kann sie aus betriebswirtschaftlicher Sicht auch dem Infrastrukturbereich (Facilitymanagement) zugeordnet werden. Dies kann mitunter dann interessant sein, wenn das Management hier auch längere Amortisationszeiten akzeptiert.

Dennoch ist als Kriterium für eine Bewertung der betriebswirtschaftlichen Sinnhaftigkeit einer Abwärmenutzung die Betrachtung des Kapitalwertes bzw. der internen Verzinsung oft geeigneter als die Amortisationszeit. Parallel dazu kann die Rendite als Kriterium betrachtet werden. Die nachfolgend angeführten Wirtschaftlichkeitsrechnungen sollen eine Orientierung für die finanziellen Möglichkeiten verschiedener Abwärme-Nutzungstechnologien geben. Sie sind nicht allgemeingültig, d. h. jeder Technologieeinsatz muss einzeln für seine speziellen Rahmenbedingungen betrachtet werden.

Die Berechnungen erfolgten mit der Annuitätenmethode und orientieren sich hinsichtlich Randbedingungen und Berechnungsweg an der VDI Richtlinie 2067. Die Annuitätenmethode ist eine dynamische Investitionsrechnung, bei der Einzahlungs- und Auszahlungsbarwerte in gleiche Jahresbeträge (Annuitäten) über einen festgelegten Betrachtungszeitraum umgerechnet werden (vgl. Definition im Wirtschaftslexikon<sup>24</sup>). Lohnend ist eine Investition dann, wenn beim gegebenen Kalkulationszinsfuß ein durchschnittliches jährliches Ergebnis entsteht, welches größer oder gleich Null ist. Mehr Hinweise zur Berechnung und zu den Zwischenergebnissen können auf den Internetseiten zum Abwärmeatlas Sachsen nachgelesen werden ([www.abwaermeatlas-sachsen.de](http://www.abwaermeatlas-sachsen.de)).

Als Ergebnis der folgenden Beispielrechnungen wird die durchschnittliche Annuität über den Betrachtungszeitraum von 15 Jahren und die durchschnittliche Rendite (berechnet über die Methode des internen Zinssatzes) angegeben. Es gelten folgende Annahmen:

Kalkulatorischer Zinssatz:	6 %
Verbrauchskostenpauschale	0,5–1 %
Instandsetzungspauschale	1–3 %
Betriebskostenpauschale	2 %
Strom-/Gaspreis	15,8 / 4,95 Cent/kWh
Preissteigerung für Zahlungen, gebunden an:	
Kapital/Verbrauch/Betrieb	2,7 % / 3,0 % / 3,3 %

Tab. 5: Ausgangsvariablen für Beispielrechnungen

### Beispiel 1: Direkte Abwärmenutzung ohne/mit Speicher

In einem thermischen Prozess entsteht Abwärme mit einer Leistung von 100 kW. Diese wird mittels eines Wärmetauschers (Wirkungsgrad 80 %) zurückgewonnen und der Heizungsanlage zugeführt. Bei 1.000 h/a unter Vollast reduziert die Wärmerückgewinnungsanlage den Erdgasverbrauch der Heizung um 80.000 kWh/a (rund 8.000 m<sup>3</sup>/a).

Für die Investitionskosten für Wärmetauscher, Rohrleitung, Pumpen usw. werden 12.000 € angenommen, die Installationskosten werden mit 30 % dieser Summe abgeschätzt. Den Investitions- und Wartungskosten wurden die gesparten Kosten für Erdgas gegenübergestellt und nach der oben genannten Annuitätenmethode die durchschnittliche Gesamtannuität über einen Zeitraum von 15 Jahren sowie die Rendite berechnet.

Danach trägt die Abwärmenutzung über den Betrachtungszeitraum mit durchschnittlich 2.900 €/a positiv zum Betriebsergebnis bei. Die durchschnittliche Rendite beträgt 25,1 %.

Als Variantenvergleich wird betrachtet, wie der Einbau eines Wärmespeichers die Wirtschaftlichkeit der Anlage beeinflusst. Durch die Speicherwirkung verlängert sich bei diesem Beispiel die angenommene Volllaststundenzahl der Anlage auf 1.800 h/a, wodurch weitere 6.400 m<sup>3</sup>/a an Erdgas eingespart werden können. Die zusätzlichen Investitionskosten für den Speicher werden mit 10.000 € veranschlagt, entsprechend erhöhen sich auch die Installationskosten, Pauschalen und Zahlungen. Tabelle 6 vergleicht das Ergebnis mit und ohne Speicher.

Wärmepumpe		Speicher	
		ohne	mit
Thermische Leistung	kW	80	80
Investitionskosten (Anlage + Installation)	€	16.000	28.000
Volllaststunden	h/a	1.000	1.800
Minderung des Erdgasverbrauchs	m <sup>3</sup> /a	8.000	14.400
Kosteneinsparung Erdgas	€/a	3.960	7.128
Betrachtungszeitraum	a	15	15
durchschnittliche Annuität	€/a	2.900	5.150
Rendite	%	25	24,6
Kumulierter Erlös	€	48.000	88.000

Tab. 6: Wärmepumpe ohne/mit Wärmespeicher Beispielrechnung

Die Rendite liegt mit Speicher bei 24,6 % auf fast gleichem Niveau wie bei der Variante ohne Speicher. Durch die Integration des Speichers erhöht sich der durchschnittliche Gewinn über die Betriebszeit auf 5.150 €/a. Der kumulierte Erlös nach 15 Jahren ist entsprechend der höheren Investitionssumme ebenfalls höher und liegt im Bereich von 88.000 €.

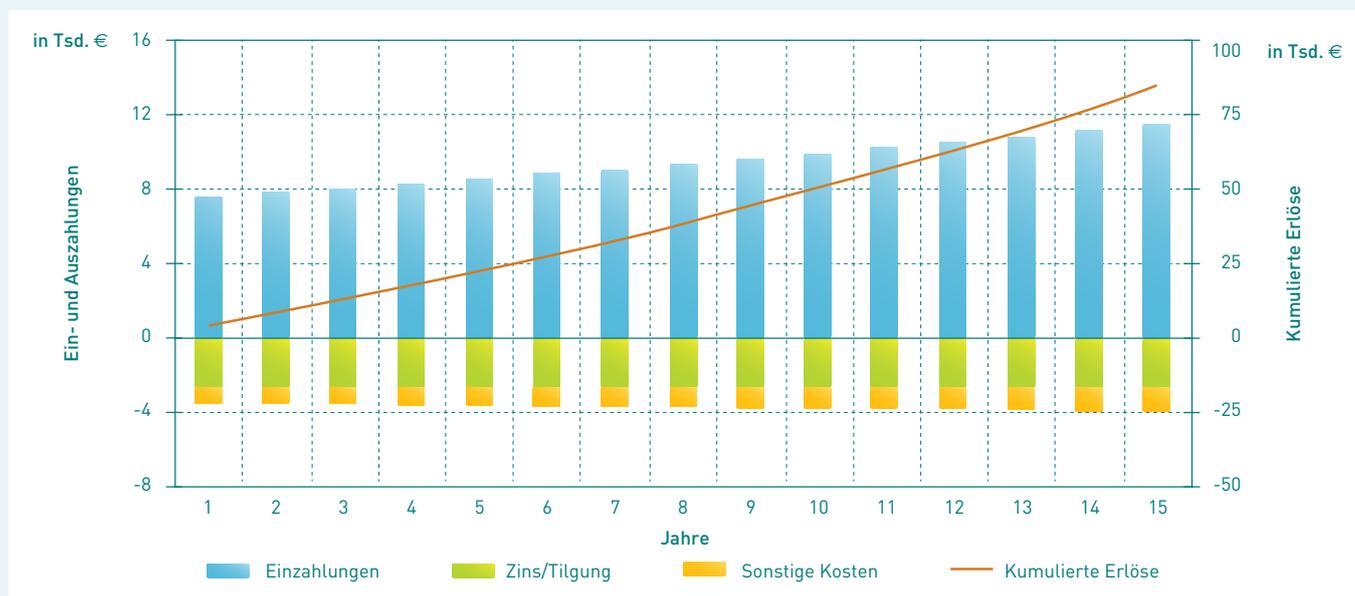


Abb. 9: Beispielrechnung Wirtschaftlichkeit: Einzahlungen, Kosten und kumulierter Erlös für eine direkte Wärmenutzung mit Wärmespeicher

## Beispiel 2: Verbrennungsluftvorwärmung

Folgende Beispielrechnung verdeutlicht, dass durch die Verbrennungsluftvorwärmung höchste Energiespareffekte erzielt werden können. Durch den Einbau eines Wärmetauschers soll bei einem Erdgasbrenner die Abgastemperatur von 1.200 °C um 350 K reduziert und mit der gewonnenen Wärme die Verbrennungsluft vorgewärmt werden. Da durch den Brenner nicht mehr so viel Verbrennungsluft aufgeheizt werden muss, sinkt dessen Erdgasbedarf um ca. 25 %. Es wird von 1.500 h/a unter Volllast ausgegangen, so dass etwa 37.500 m<sup>3</sup>/a Erdgas eingespart werden können.

Die Materialkosten für den Wärmetauscher werden mit 30.000 € veranschlagt, die Installationskosten mit 30 % der Materialkosten, so dass die Gesamtinvestition 39.000 € beträgt.

Die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnung sind in untenstehender Tabelle zusammen mit den Ausgangsparametern dargestellt.

Aus der Differenz der Einsparungen zu den Investitionskosten und notwendigen Ausgaben ergibt sich über den Betrachtungszeitraum eine durchschnittliche jährliche Annuität von 16.628 € und damit eine Rendite von 47 %. Der kumulierte Erlös über 15 Jahre würde sich in diesem Beispiel auf etwa 270.000 € belaufen.

Verbrennungsluftvorwärmung		
Brennerleistung	kW	1.000
Energieeinsparung	%	25
Investitionskosten (Material + Installation)	€	39.000
Volllaststunden	h/a	1.500
Minderung des Erdgasverbrauchs	m <sup>3</sup> /a	37.500
Kosteneinsparung Erdgas	€/a	18.563
Betrachtungszeitraum	a	15
durchschnittliche Annuität	€/a	16.628
Rendite	%	47
Kumulierter Erlös	€	270.000

Tab. 7: Verbrennungsluftvorwärmung Beispielrechnung

## Beispiel 3: Wärmepumpe

Ein Kühlkreislauf stellt eine thermische Leistung von 45 kW auf einem niedrigen Temperaturniveau zur Verfügung. Diese Energie soll mit einer Wärmepumpe einem Heizprozess auf einem höheren Temperaturniveau zur Verfügung gestellt werden. Bei einer Leistungszahl von 4 benötigt die Wärmepumpe 15 kW elektrische Energie und erzeugt damit 60 kW Wärme. Bei einer Volllaststundenzahl von 3.500 h/a Volllaststunden pro Jahr werden damit 210.000 kWh/a Wärme erzeugt, was in etwa einer Einsparung von 21.000 m<sup>3</sup>/a Erdgas entspricht.

Neben den Kosten für Investition und Unterhalt der Anlage müssen für die Überschussberechnung in diesem Fall noch die Stromkosten für den Betrieb der Anlage von den Einnahmen, d. h. von den gesparten Ausgaben für Erdgas, abgezogen werden.

Vorteilhaft für den wirtschaftlichen Betrieb der Wärmepumpe ist dabei ein günstiger Wärmepumpen-Stromtarif von 8,71 Cent/kWh.

Der Rechnung werden Materialkosten von 24.000 € und Installationskosten von 4.800 € (20 % der Materialkosten), in Summe also 28.800 €, zugrunde gelegt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8 dargestellt. Die Anschaffung der Wärmepumpe erwirtschaftet eine zweistellige sichere Rendite von 14,8 %. Ausgehend davon, dass Wärmequelle und Wärmebedarf die nächsten 15 Jahre vorhanden sind, wäre bei diesem Beispiel die Investition in die Wärmepumpe als sichere Geldanlage vielen Kapitalmarktprodukten überlegen.

Wärmepumpe		
Thermische Leistung	kW	60
Leistungszahl		4
Strombedarf	kW	15
Investitionskosten	€	28.800
Volllaststunden	h/a	3.500
Minderung des Erdgasverbrauchs	m <sup>3</sup> /a	21.000
Kosteneinsparung Erdgas	€/a	10.395
Betrachtungszeitraum	a	15
durchschnittliche Annuität	€/a	2.131
Rendite	%	15
Kumulierter Erlös	€	35.000

Tab. 8: Wärmepumpe Beispielrechnung

#### Beispiel 4: Absorptionskältemaschine

Als Beispiel für den Einsatz einer Absorptionskältemaschine wird ein Kühlhaus mit einem Volumen von 1.500 m<sup>3</sup> betrachtet. Hierfür wird eine Kältebedarfsleistung von 15 kW veranschlagt, die 3.000 h jährlich zu erbringen ist. Die Absorptionskältemaschine besitzt eine Leistungszahl von 0,71 und fordert demzufolge eine thermische Leistung von 21 kW, die auf einem Temperaturniveau von ca. 60 °C zugeführt werden muss. Es wird angenommen, dass die thermische Leistung kostenlos aus einem Prozessabwasserstrom entnommen werden kann.

Als Alternative zu dieser Anlage wird vergleichend eine strombetriebene Kompressionskältemaschine aufgeführt. Der eingesparte Strom wird als Gewinn bei der Absorptionskältemaschine verbucht.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 9 dargestellt. Mit einer Rendite von 16 % ist der betriebsinterne Einsatz der Absorptionskältemaschine durchaus lohnenswert, wenn Abwärme an entsprechender Stelle kostenlos zur Verfügung steht. Der Vorteil der Unabhängigkeit von Strompreisschwankungen und die damit verbundene bessere Planungssicherheit wird durch diese Rechnung nicht herausgestellt, sollte aber bei der Entscheidung zum Einsatz dieser Technologie ebenfalls berücksichtigt werden.

Absorptionskältemaschine		
Abwärme	kW	21
COP der Absorptionskältemaschine		0,71
Kälteleistung	kW	15
COP der Kompressionskältemaschine		3
Elektrische Leistung Kompressor	kW	5
Investitionskosten (Material + Installation)	€	11.630
Volllaststunden	h/a	3.000
Kosteneinsparung des Stromverbrauchs	kWh/a	15.000
Einsparung Strom	€/a	2.354
Betrachtungszeitraum	a	15
durchschnittliche Annuität	€/a	1.001
Rendite	%	16
Kumulierter Erlös	€	17.000

Tab. 9: Absorptionskältemaschine Beispielrechnung

#### Beispiel 5: ORC-Anlage

In diesem Beispiel wird die Anwendung einer ORC-Anlage zur Stromgewinnung aus einer Abwärmequelle mit einer Temperatur von 140 °C und einer thermischen Leistung von 500 kW untersucht. Der elektrische Wirkungsgrad der Anlage beträgt 10 %, die produzierte elektrische Leistung damit 50 kW. Es wird eine Volllaststundenzahl von 6.000 h/a pro Jahr zugrunde gelegt.

Die Investitionskosten für die Anlage liegen mit einem spezifischen Preis von 3.000 €/kW<sub>el</sub> (für kleine Anlagen) bei 180.000 € inklusive Installationskosten (20 %).

Da von einer betriebsinternen Stromnutzung ausgegangen wird, kann zur Berechnung der Ersparnis der eigene Stromtarif (hier 15,8 Cent/kWh) herangezogen werden.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 10 dargestellt. Die durchschnittliche Rendite liegt mit 13 % im zweistelligen Bereich.

Dabei ist zu prüfen, ob zusätzliche Kostenvorteile generiert werden können. Zum Beispiel, ob mit einem Speicher und einem Lastmanagementsystem die Stromerzeugung so gestaltet werden kann, dass Lastspitzen wegfallen und so zusätzliche Kostenvorteile, z. B. beim Leistungspreis oder bei der Netzegebühr, erzielt werden können.

ORC-Anlage		
Abwärmeleistung (thermisch)	kW	500
Wirkungsgrad		0,10
erzeugte elektrische Leistung	kW	50
Investitionskosten (Material + Installation)	€	180.000
Volllaststunden	h/a	6.000
Eigennutzung Strom	kWh/a	300.000
Ertrag Strom	€/a	47.370
Betrachtungszeitraum	a	15
durchschnittliche Annuität	€/a	29.478
Rendite	%	13
Kumulierter Erlös	€	170.000

Tab. 10: ORC-Anlage Beispielrechnung

## 6. Technologien der Abwärmenutzung

Nach der Nennung von Einsatzgebieten, Beispielen und möglichen Renditen der Abwärmenutzung werden im Folgenden die Technologien für die Gewinnung, Speicherung und Umwandlung der Abwärme dargestellt und erklärt. Diese Auflistung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Vielmehr soll sie einen Überblick über den heutigen Stand der Technik geben und dazu anregen, zu prüfen, ob im eigenen Unternehmen die Nutzung von Abwärme möglich ist.

### 6.1 Wärmetauscher

Wärmeübertrager, im allgemeinen Sprachgebrauch und im Folgenden Wärmetauscher genannt, haben die Aufgabe, Wärme von einem warmen Medium auf ein kälteres zu übertragen. Dabei werden beide Medien an einer Wärmeübertragungsfläche vorbeigeleitet, auf die und von der die Wärme übertragen wird.

Der übertragene Wärmestrom  $\dot{Q}$  kann dabei wie folgt beschrieben werden:

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta\theta \quad \Delta\theta = \frac{\Delta T_{Ein} - \Delta T_{Aus}}{\ln(\Delta T_{Ein} / \Delta T_{Aus})}$$

Damit beeinflussen den Wärmeübergang in einem Wärmetauscher der Wärmedurchgangskoeffizient  $k [W/m^2K]$ , die Wärmetauscherfläche  $A [m^2]$  und die mittlere Temperaturdifferenz  $\Delta\theta [K]$ , welche durch die Temperaturdifferenzen der Wärmeströme an Ein- und Austrittsseite ( $\Delta T_{Ein}, \Delta T_{Aus}$ ) bestimmt wird.

Der Wärmedurchgangskoeffizient  $k$  ist abhängig von der Dicke und der Wärmeleitfähigkeit des trennenden Materials. Weiterhin wird er beeinflusst vom Wärmeübergang des Mediums an die Fläche, d. h. also von den wärmetechnischen Eigenschaften des Mediums (Wärmeleitung, -kapazität, Dichte) sowie vom Turbulenzgrad der Strömung, der Strömungsgeschwindigkeit und weiteren geometrischen Parametern.

Bauform und Größe des Wärmetauschers bestimmen die Übertragerfläche. Mit Zunahme der Fläche steigt der Wärmestrom und damit der Wirkungsgrad des Wärmetauschers. Allerdings steigen damit auch der Materialeinsatz und die Kosten für den Wärmetauscher.

Auf die Temperaturdifferenz kann konstruktiv durch die Strömungsführung (Gegenstrom/Gleichstrom) Einfluss genommen werden.

Entsprechend dieser Vielzahl an Einflussparametern haben sich vielfältige Formen der Wärmetauscher entwickelt, von denen einige im folgenden dargestellt werden.

#### 6.1.1 Rotationswärmetauscher

Durch die Rotation eines Regenerators ermöglicht der Rotationswärmetauscher die Wärmeübertragung zwischen zwei parallel zueinander laufenden Luftströmungen. Dabei wird die Wärme des einen Luftstroms im Regenerator zwischengespeichert und nach einer halben Drehung auf den anderen Luftstrom übertragen. Der Rotor wird meist aus dünnen Folien gefertigt, die abwechselnd glatt und wellenförmig (wie Wellpappe) angeordnet sind und die Speichermasse bilden. Die Kanäle sind meist zwischen 1,4 und 2,5 mm groß. Durch den Wechsel der Luftströmungen kommt es im Rotor zu einem Selbstreinigungseffekt.



Rotationswärmetauscher gibt es in unterschiedlichen Größen mit Durchmessern von 400 bis 3.000 mm. Die Bautiefe ist im Gegensatz zum Durchmesser relativ klein und bewegt sich im Bereich von 100 bis 250 mm, selten auch bis 500 mm. Der Rotationswärmetauscher ist sehr effizient und kann selbst bei sehr geringen Temperaturunterschieden eingesetzt werden. Die Lebensdauer ist jedoch im Vergleich zu anderen Wärmetauschern aufgrund von Verschleißerscheinungen im Rotor geringer. Zur Anwendung kommt der Rotationswärmetauscher hauptsächlich in der Lüftungs- und Klimatechnik, der Prozesslufttechnik oder beim Betrieb von Trockenöfen.

Abbildung 10 zeigt den schematischen Aufbau eines Rotationswärmetauschers.

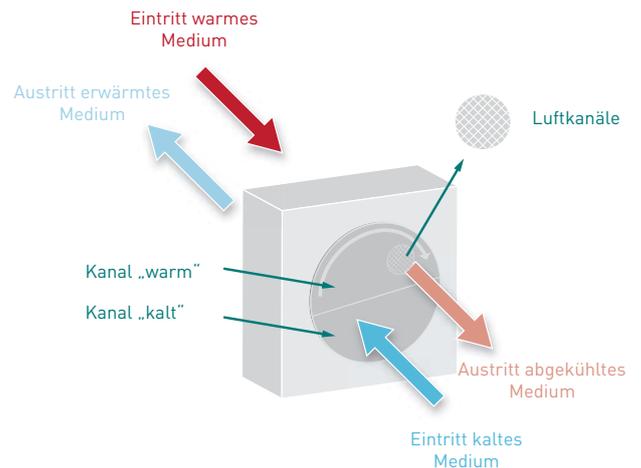
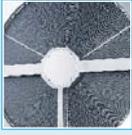


Abb. 10: Prinzip Rotationswärmetauscher

Technologie	Anwendung	Leistungsklasse (thermisch)	Anwendungstemperatur	
Rotationswärmetauscher	Gas/Gas	bis 1.600 kW	bis 300 °C (650 °C im Hochtemperaturbereich)	
Wärmerohr-Wärmetauscher	Gas/Gas	3 W–3 kW (je Rohr)	bis 700 °C	
Winderhitzer (Cowper)	Gas/Gas	< 140 MW	bis 1.300 °C	
Rippenrohrwärmetauscher	Gas/flüssig	5–1.000 kW	bis 400 °C	
Spiralwärmetauscher	Flüssig/flüssig Gas/flüssig	20–800 kW	-100–450 °C	
Lamellenwärmetauscher	Gas/flüssig	1–900 kW	bis 900 °C	
Plattenwärmetauscher	flüssig/flüssig	2–400.000 kW	bis 150 °C (900 °C bei geschweißten Rohrplattenwärmetauschern)	
Rohrbündelwärmetauscher	flüssig/flüssig	2–20.000 kW	bis 300 °C	
Doppelrohrwärmetauscher (Mantelrohrwärmetauscher)	Flüssig/Flüssig	1–3.500 kW	bis 200 °C	

Tab. 11: Übersicht Wärmetauscher (Abb. 11–19)

### 6.1.2 Wärmerohr-Wärmetauscher (Heatpipe)

Bei Wärmerohr-Wärmetauschern wird die Wärme durch evakuierte Rippenrohre übertragen, in denen eine Flüssigkeit (meistens Kältemittel) verdampft und sich im gegenüberliegenden Teil des Rohres wieder verflüssigt. Beim Verdampfungsvorgang wird Wärme durch die Übertragerflüssigkeit aufgenommen. Der Dampf steigt in dem Wärmerohr auf, welches stets mit einer Neigung versehen ist, und kondensiert unter Wärmeabgabe im oberen Bereich des Wärmerohrs. Damit hat das Wärmerohr eine definierte Mindestanwendungstemperatur im Verdampfungsbereich und eine Maximaltemperatur im Kondensationsbereich. Entsprechend des Einsatzbereichs wird der Wärmerohr-Wärmetauscher mit einem passenden Kondensationsmittel befüllt.



Durch dieses Funktionsprinzip können mit verhältnismäßig kleinen Querschnittsflächen relativ große Mengen Wärme transportiert werden. Der Durchmesser eines Wärmerohrs kann von wenigen Millimetern bis hin zu 1 m aufweisen.

Zur Umwälzung des Transportmediums benötigen Wärmerohre keine zusätzliche Hilfsenergie wie z. B. eine Umwälzpumpe. Dadurch minimieren sich Wartungsaufwand und Betriebskosten.

Aufgrund seiner einfachen Bauart ist der Wärmerohr-Wärmetauscher speziell auch für kleine Anwendungen geeignet.

Die Investitionskosten für Wärmerohr-Wärmetauscher sind bei Serienfertigung der Bauelemente relativ gering.

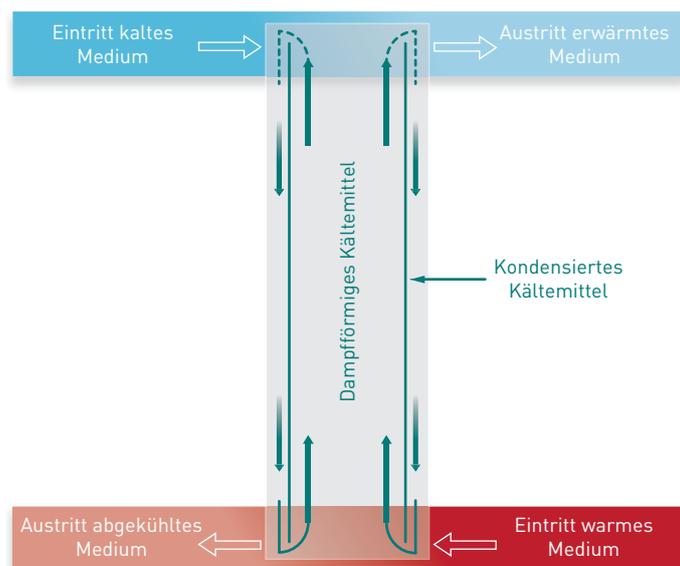
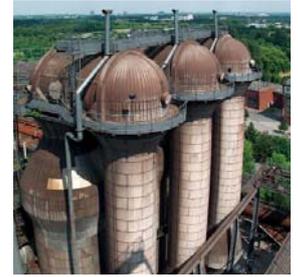


Abb. 20: Funktionsprinzip Wärmerohr-Wärmetauscher

### 6.1.3 Regenerative Wärmetauscher

Regenerative Wärmetauscher werden meist zur Bereitstellung von Heißluft oder zur Luftvorwärmung bei Hochtemperaturprozessen eingesetzt. Der Regenerator mit ortsfester Speichermasse besteht aus einem Speicherraum, welcher meist mit feuerbeständigen Steinen gefüllt ist.



Wenn heißes Gas durch die Gesteinsfüllung strömt, gibt es seine Wärme an die Speichermasse des Wärmetauschers ab und erwärmt diese. Wenn der Speicher erwärmt ist, wird die Strömungsrichtung gewechselt, kaltes Gas durchströmt den Regenerator und erwärmt sich an der heißen Speichermasse.

Um einen kontinuierlichen Betrieb zu gewährleisten, sind mindestens zwei Regeneratoren notwendig, welche abwechselnd von heißen und kalten Gasen durchströmt werden.

Regenerative Wärmetauschersysteme werden vorwiegend bei größeren Thermoprozessanlagen mit sehr hohen Abgastemperaturen verwendet. Bei Glaswannen werden regenerative Wärmetauscher zur Verbrennungsluftvorwärmung eingesetzt und sind den Brennern direkt vorgeschaltet. Als weiteres Beispiel sei auch der Winderhitzer (Cowper) aufgeführt, der im Hochofenprozess Anwendung findet. Bei diesem Sonderfall ist das Speichersteine-Wärmetauscher-System noch mit einer Gichtgasverbrennung kombiniert.

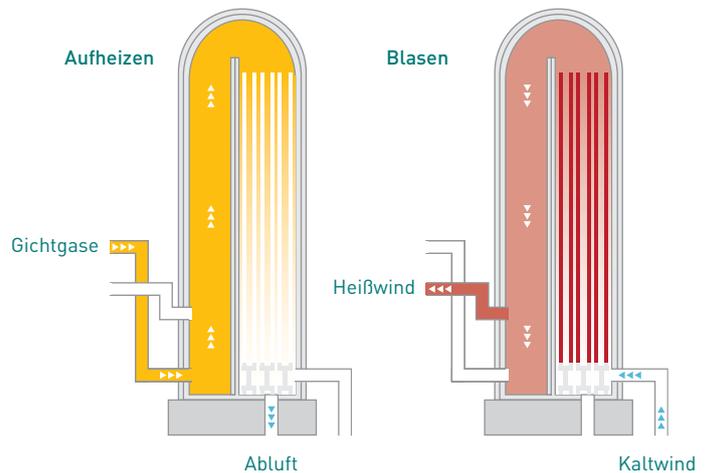


Abb. 21: Schema Winderhitzer

Die Winderhitzer gehören zu den größten der betrachteten Wärmetauscher. Sie können eine Höhe von ca. 40 bis 50 m und einen Durchmesser von bis zu 10 m besitzen.

### 6.1.4 Rippenrohrwärmetauscher

Der Rippenrohrwärmetauscher wird häufig bei der Wärmeübertragung von gasförmigem zu flüssigem Medium (oder umgekehrt) eingesetzt. Dieser Wärmetauscher besteht meist aus einer Kombination von mehreren Rohren mit daran befestigten Rippen bzw. Lamellen. Durch die Lamellen auf den Rohren wird die Oberfläche des Wärmetauschers signifikant erhöht. Damit wird der schlechtere Wärmeübergang des gasförmigen Mediums ausgeglichen, wodurch der Wärmetauscher einen deutlich besseren Wirkungsgrad erreicht.



Rippenrohrwärmetauscher gibt es in den verschiedensten Ausführungen. Sie können sowohl sehr einfach ausgeführt (gerades Rippenrohr), als auch komplex gebogen oder in engerebeneinander liegender Anordnung als Heiz- und Kühlregister aufgebaut sein.

Rippenrohrwärmetauscher sind in der Anschaffung und Wartung relativ preiswert und haben eine lange Lebensdauer.

Wie bei allen wasserdurchflossenen Wärmetauschern müssen bei kalkhaltigem Wasser Maßnahmen gegen eine Verkalkung der Rohre ergriffen werden.

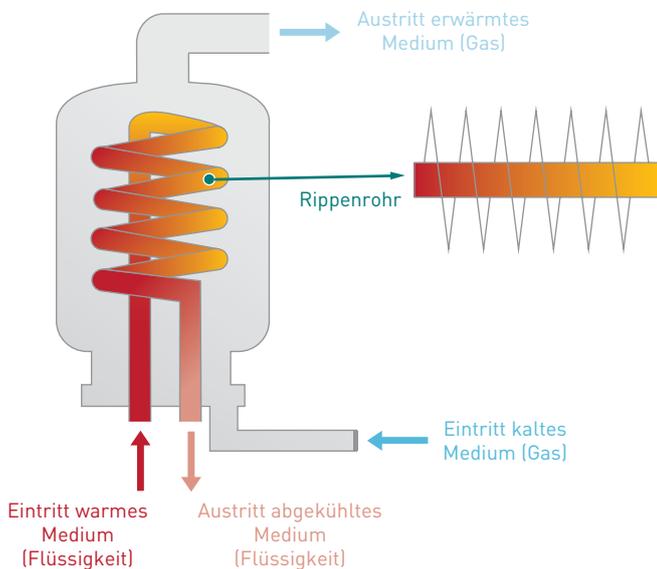


Abb. 22: Schema Rippenrohrwärmetauscher

### 6.1.5 Spiralwärmetauscher

Spiralwärmetauscher bestehen aus einem spiralförmig um einen Kern gewickelten Blech. Dadurch entstehen zwei, durch dieses Blech getrennte Strömungskanäle. Durch stirnseitige Platten wird der Wärmetauscher abgeschlossen. Das Medium wird durch die Stirnseiten und Öffnungen am Ende der Spirale zugeführt. Abbildung 23 zeigt den Aufbau. Durch viele Wicklungen wird eine hohe thermische Länge erzeugt, was eine gute Wärmeübertragung gewährleistet. Zusätzlich entsteht durch die Krümmung der Kanäle ein turbulentes Strömungsprofil, wodurch der Wärmeübergang noch verbessert wird.



Weiterhin kommt es durch dieses turbulente Strömungsprofil sowie durch die einfache Strömungsführung ohne Umlenkungen und Reduzierungen kaum zu Verschmutzungen der Wärmeübertragerflächen, so dass der Spiralwärmetauscher häufig bei schmutzbelasteten Medien und Suspensionen eingesetzt wird. Wenn sich eine Stirnseite öffnen lässt, ist überdies die Reinigung sehr einfach. Grundsätzlich können sowohl flüssige als auch gasförmige Medien eingesetzt werden.

Aufgrund der schwierig zu realisierenden Abdichtung an den Stirnseiten sollte der Spiralwärmetauscher nur eingesetzt werden, wenn das Druckniveau der Wärmeträgermedien gleich ist.

Die Kanalgeometrien des Spiralwärmetauschers können der Anwendung entsprechend gestaltet werden. Im Allgemeinen sind die Kanäle 5–70 mm hoch und 50–2.000 mm tief.

Die einfache Bauform in Verbindung mit geringen Wartungskosten macht Spiralwärmetauscher vergleichsweise günstig.

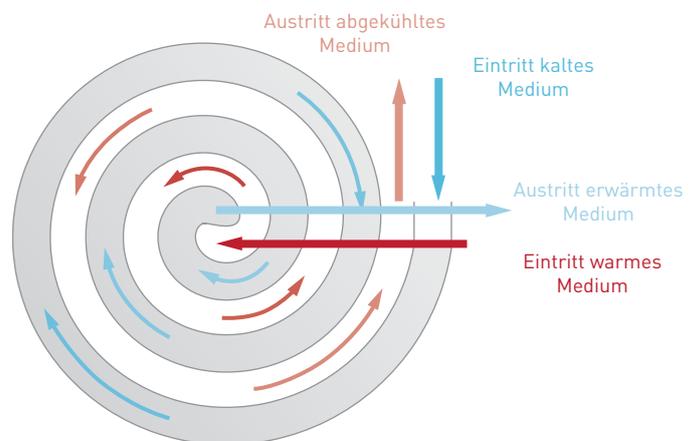
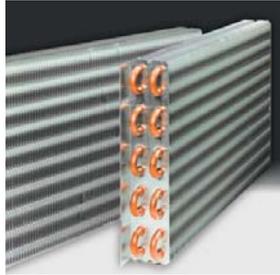


Abb. 23: Schema Spiralwärmetauscher

### 6.1.6 Lamellenwärmetauscher

Der Lamellenwärmetauscher besteht aus zahlreichen Lamellen, die mittels Pressung an Rohre gebunden sind. Üblicherweise wird der Lamellenwärmetauscher für flüssig/gasförmig-Anwendungen eingesetzt, wobei die Flüssigkeit durch die Rohre fließt und das Gas zwischen den Lamellen strömt. Durch den geringen Abstand der Lamellen mit dem daraus resultierenden Wärmeübergang und der großen Fläche lassen sich gute Wirkungsgrade erzielen. Durch einen schichtweisen Aufbau lassen sich Lamellenwärmetauscher leicht an spezifische Anwendungsfälle mit Gasvolumenströmen von bis zu einer Million Kubikmeter pro Stunde anpassen.



Als Materialien können je nach Temperatur und Anwendungsbereich Aluminium, Kupfer, verzinkter Stahl oder Edelstahl zum Einsatz kommen.

Wird ein Lamellenwärmetauscher aus mehreren Modulen aufgebaut, spricht man auch vom Schichtwärmetauscher. Da jede Schicht einzeln funktionsfähig ist, kann der Wärmetauscher zerlegt geliefert oder schichtweise abgesperrt, entleert oder luftseitig abgeschottet werden. Das Einsatzgebiet dieses Wärmetauschers reicht von der Klimatechnik über Automobilanwendungen bis zum Einsatz in der industriellen Produktion.

Die Bauform ist vergleichsweise kompakt und aufgrund hoher Fertigungszahlen ist auch die Anschaffung häufig günstig.

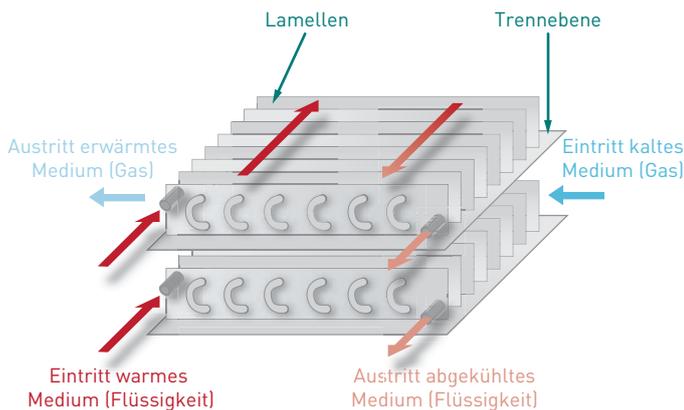


Abb. 24: Schema Gegenstrom-Schichtwärmetauscher

### 6.1.7 Plattenwärmetauscher (PWT)

Plattenwärmetauscher sind aus mehreren Platten aufgebaut, zwischen denen sich je ein Spalt befindet, durch den die Wärmeträgermedien strömen. Das geringe Spaltmaß und die Profilierung der Platten erzeugen ein für die Wärmeübertragung günstiges turbulentes Strömungsprofil, welches Schmutzablagerungen verhindert.



Weiterhin wird die Wärmeübertragerfläche durch die Profilierung der Platten und eine hohe Plattenanzahl vergrößert, so dass mit diesem Wärmetauscher sehr gute Wirkungsgrade bei einer geringen Baugröße erreicht werden können.

Plattenwärmetauscher (PWT) gibt es in verschiedensten Bauformen und Materialien. Die Platten sind je nach Ausführung verlötet oder verschweißt oder werden durch Spannschrauben zusammengehalten. Während die Anwendung mit Spannschrauben demontiert und gereinigt werden kann, sind die verlöteten Modelle nur für schmutzfreie Medien geeignet. Es gibt auch Mischformen mit Kassetten aus jeweils zwei verschweißten Platten, die mit Spannschrauben fixiert sind.

Plattenwärmetauscher weisen in Bezug auf ihre geringe Größe eine sehr hohe Wärmestromdichte auf. Sie sind mitunter sehr preisgünstig, wenn sie in großen Mengen produziert werden.

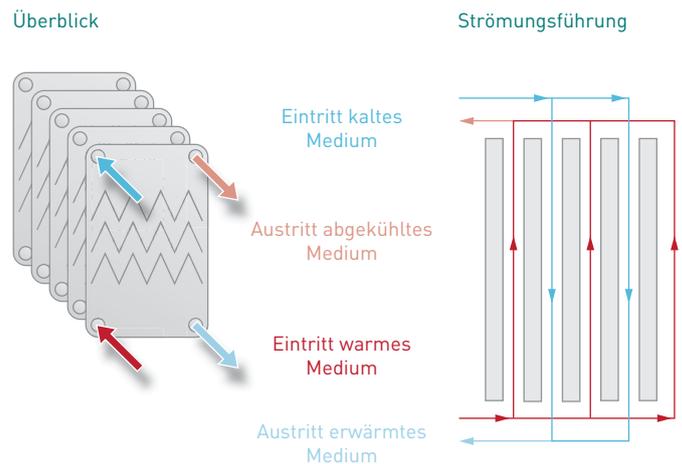


Abb. 25: Schema Plattenwärmetauscher; Überblick und Strömungsführung

### 6.1.8 Rohrbündelwärmetauscher

Der Rohrbündel-Wärmetauscher besteht aus einer Vielzahl meist dünner Rohre, auf welche sich die Strömung des Wärmeträgermediums aufteilt. Um den Wärmeübergang zu erhöhen, können diese Rohre zwecks Oberflächenvergrößerung auch mit Rippen versehen sein. Die Rohre sind meist zu Rohrbündeln zusammengefasst und werden durch einen Behälter geführt, welcher vom zweiten Wärmeträgermedium durchströmt wird. Umlenkbleche sorgen für eine gleichmäßige Durchströmung, verlängern dabei den Strömungsweg und erhöhen damit die Wärmeübertragung.



### 6.1.9 Doppelrohrwärmetauscher

Der Doppelrohrwärmetauscher besteht aus zwei koaxial angeordneten Rohren, die sowohl innen wie außen berippt sein können, um die wärmeübertragende Fläche zu vergrößern. Ein Wärmeträgermedium wird durch den Ringspalt zwischen Innen- und Außenrohr geführt, das andere fließt durch das Innenrohr. Die äußeren Rohre sind an den Enden zur Bildung eines Strömungskanals miteinander verbunden. Die Medien fließen im Gleich- oder Gegenstrom zueinander. In Abbildung 27 ist die Betriebsweise im Gegenstrom dargestellt.

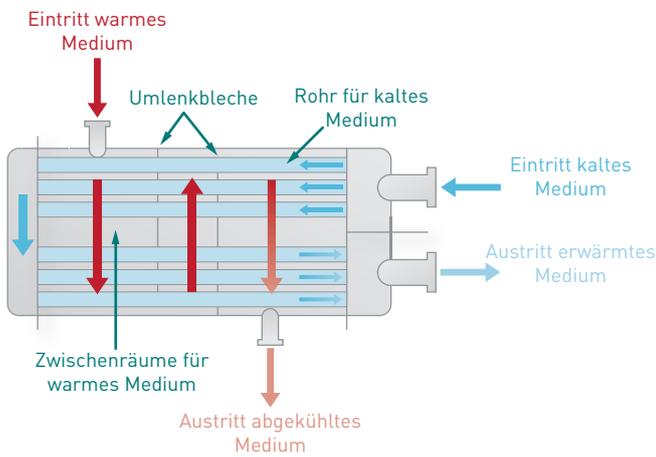


Abb. 26: Schema Rohrbündelwärmetauscher

Rohrbündelwärmetauscher haben vor allem bei flüssig/flüssig-Anwendungen eine sehr gute Wärmeübertragung, können aber auch für gasförmige Medien eingesetzt werden. Aufgrund ihrer Bauform können sie sehr druckfest ausgeführt werden. Ein häufiger Einsatzzweck ist die Verdampfung bei Kälte- und Dampfanwendungen. Sie eignen sich besonders für große Baugrößen mit hohen Durchsatzmengen.

Durch den komplexen Aufbau mit den zahlreichen verschweißten Rohren sind Rohrbündel-Wärmetauscher in der Anschaffung meist teurer als beispielsweise Plattenwärmetauscher und auch die Wartung und Reinigung gestaltet sich schwieriger. Demgegenüber steht positiv die hohe Durchsatzmenge und die Eignung für hohe Drücke.

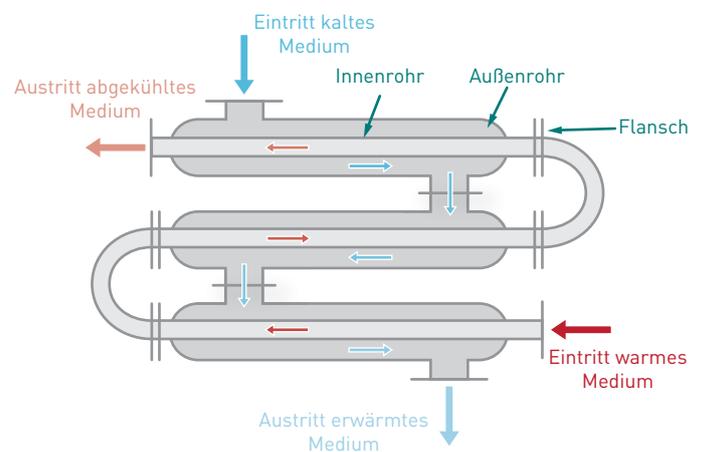


Abb. 27: Schema Doppelrohrwärmetauscher

Die Rohrdurchmesser von Doppelrohrwärmetauschern können von wenigen mm bis zu ca. 1 m reichen. Als Materialien werden Stahl, Kupfer, Kupfer-Nickel oder Messing (Rohre) eingesetzt. Aufgrund der einfachen Bauweise sind die Kosten eines Doppelrohrwärmetauschers im Verhältnis zu anderen Wärmetauschern gering. Die Baugröße ist dafür relativ platz-einnehmend.

Am häufigsten werden Doppelrohrwärmetauscher in der Kältetechnik als Verflüssiger (Kondensator) eingesetzt.

## 6.2 Wärmespeicher

Wird Wärme zeitlich versetzt zum Wärmebedarf erzeugt, ist der Einsatz von Wärmespeichern notwendig.

Während für die Abwärmenutzung in betriebsinternen Prozessen die notwendige Speicherzeit meist nur Stunden oder Tage beträgt, ist es vor allem für die Gebäudebeheizung interessant, große Speicher zu nutzen, die den Energiebedarf einiger Tage bis Wochen oder sogar Monate zur Verfügung stellen können.

Entsprechend der Art, wie die Wärme gespeichert wird, unterscheidet man zwischen drei Typen von Wärmespeichern:

- Sensible Speicher ändern beim Be- und Entladen ihre fühlbare Temperatur. Hier ist die Speicherkapazität abhängig von der Wärmekapazität und Masse des Speichermediums sowie von der nutzbaren Temperaturdifferenz.
- Latentwärmespeicher ändern zur Wärmespeicherung den Aggregatzustand des Speicherstoffs. Damit ist die Speicherkapazität von der notwendigen Energie zur Zustandsänderung abhängig.
- Bei thermochemischen Speichern wird die volumenspezifische Speicherkapazität von endo- und exothermen chemischen Reaktionen des Speichermediums bestimmt.



Abb. 28: Latentwärmespeicher in Almería

Wie effektiv ein Speicher eingesetzt werden kann, hängt neben seiner Be- und Entladungsgeschwindigkeit vor allem von seiner Größe, der volumenbezogenen Speicherkapazität und den Wärmeverlusten ab.

Die Wärmeverluste entstehen durch Wärmeabgabe der Oberfläche des Wärmespeichers an die kühlere Umgebung. Sie sind abhängig von der Wärmedämmung des Speichers (Wärmedurchgangskoeffizient und Schichtdicke der Dämmung), der Temperaturdifferenz zwischen Speicher und Umgebung sowie der Oberfläche des Speichers. Daher werden Wärmespeicher idealerweise mit einer sehr guten Wärmedämmung versehen und weisen ein kleines Oberflächen-Volumen-Verhältnis auf.

Die Kosteneffizienz wird weiterhin beeinflusst durch die Speicherdauer, die Speichergröße sowie die Anzahl der Nutzungszyklen.

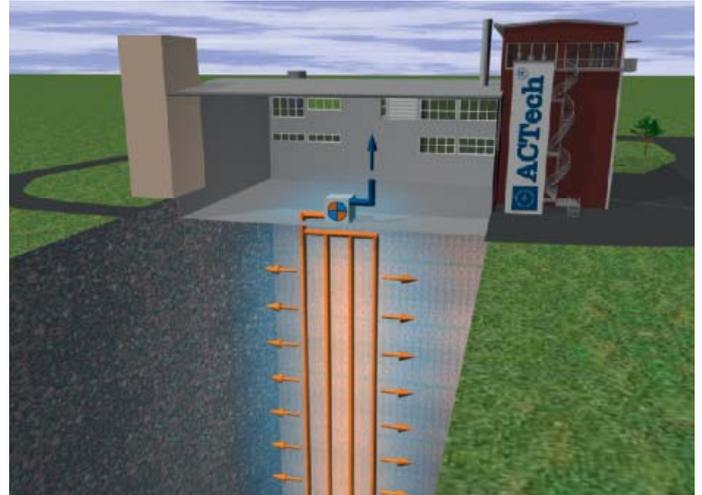


Abb. 29: Sensible Speicher: Erdsondenspeicher

Für die Auslegung eines Wärmespeichers sind neben der benötigten zu speichernden Energiemenge und Beladungsgeschwindigkeit als grundlegende Eigenschaften in der Praxis häufig auch die örtlichen Gegebenheiten und die Wirtschaftlichkeit des Speichers von Interesse.

Die nachfolgende Übersicht stellt die verschiedenen Technologien zur Wärmespeicherung dar. Es wird unter anderem auf die üblichen Größen der Speicher sowie die maximalen Speichertemperaturen hingewiesen. Weiterhin wird die Energiespeicherdichte angeführt, welche die Menge an Wärme angibt, die pro Volumeneinheit gespeichert werden kann.

Neben bewährten Wärmespeichertechnologien werden auch neue Technologien vorgestellt, welche sich teilweise noch in der Erprobung befinden.



Abb. 30: Thermochemische Speicher

Technologie	Größe	Temperatur-niveau	Energie-speicher-dichte	Kosten	
Pufferspeicher (Warm- bzw. Heiß- wasserspeicher)	0,1–6.000 m <sup>3</sup>	bis 95 °C  (Warmwasser)	90 kWh/m <sup>3</sup>	0,5–7 €/kWh	
Kies- bzw. Erdreich- Wasser-Speicher	1.000–8.000 m <sup>3</sup>	bis 90 °C	52 kWh/m <sup>3</sup>	1,4–6 €/kWh	
Schotterspeicher	100–1.000 m <sup>3</sup>	bis 90 °C	52 kWh/m <sup>3</sup>	1,4–6 €/kWh	
Erdsonden- Wärmespeicher	> 50.000 m <sup>3</sup>	bis 80 °C	30 kWh/m <sup>3</sup>	0,7–2 €/kWh	
Latentwärmespeicher	1–100 m <sup>3</sup>	bis 150 °C, Sonderfälle höher	(Ziel:) 200 kWh/m <sup>3</sup>	100–200 €/kWh	
Sorptionsspeicher (noch nicht am Markt verfügbar)	derzeit bis 7 m <sup>3</sup>	200 °C, von Sorptionssstoff abhängig	270–450 kWh/m <sup>3</sup>	50–100 €/kWh	

Tab. 12: Übersicht Wärmespeicher (Abb. 31–36)

## 6.2.1 Pufferspeicher

Als typischer Wärmespeicher zur Bereitstellung von Wärme bis 100 °C gilt der Pufferspeicher. Er gehört zur Gruppe der sensiblen Speicher, ist kostengünstig und vielseitig einsetzbar. Kleinere Ausführungen sind oft in Heizsystemen von Ein- und Mehrfamilienhäusern zu finden, insbesondere um Solarenergie einzubinden.



Der Pufferspeicher ist ein wärmeisoliertes Behälter, in dem sich eine Speicherflüssigkeit befindet, welche durch Änderung ihrer Temperatur Wärme (oder auch Kälte) speichert.

Bei den häufigsten Anwendungen des Pufferspeichers ist das Speichermedium Wasser, welches aufgrund seiner hohen Wärmekapazität viel Energie aufnehmen und speichern kann. Daher wird der Pufferspeicher üblicherweise für Temperaturen bis 95 °C verwendet, kann aber auch unter Druck oder mit Thermoöl befüllt bei höheren Temperaturen eingesetzt werden.

Soll eine Vermischung von be- und entladender Flüssigkeit vermieden werden, kommen Pufferspeicher mit innenliegenden Wärmetauschern (meist in Form von Heizschlangen ausgeführt) zum Einsatz. Alternativ kann dem Pufferspeicher auch ein Wärmetauscher vorgeschaltet sein.

Wenn verschiedene Abwärmeströme in einem Speicher gesammelt werden sollen oder die Temperatur des Abwärmeflusses schwankt, kommen Schichtenspeicher mit mehreren Zu- und Abflusstutzen zum Einsatz. In diesen Speichern wird eine Temperaturschichtung erzeugt, bei der sich die heißeste Zone oben und die kälteste Zone unten im Speicher befindet. Durch eine differenzierte und temperaturabhängige Be- und Entladung des Speichers werden die Wärmeströme dem Speicher in der Höhe entsprechend ihrer Temperatur zugeführt. Ein Vermischen von kalten und heißen Strömen wird damit vermieden. Natürlich findet dennoch ein Wärmeaustausch zwischen heißem und warmem Bereich durch Wärmeleitung statt, der jedoch auf die beabsichtigte Temperaturschichtung einen vernachlässigbar kleinen Einfluss hat.

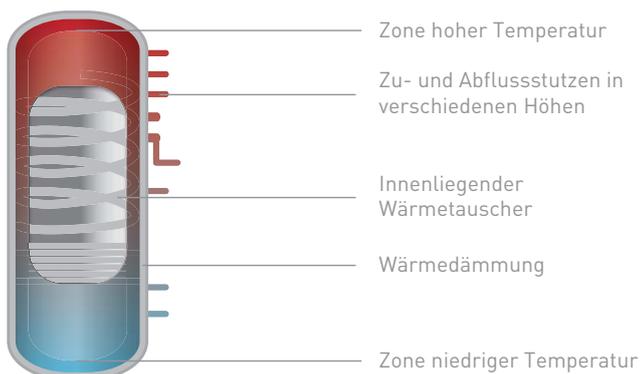


Abb. 37: Schematische Darstellung eines Schichtenspeichers

Zur kurzzeitigen Speicherung von Abwärme werden Pufferspeicher mit Größen von 100 l bis einigen Kubikmetern eingesetzt. Dabei handelt es sich meist um Stahlbehälter. Alternativ werden neuerdings auch Lösungen aus glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK) angeboten.

### Langzeitspeicherung

Die Langzeitspeicherung von Wärme über Monate hinweg für den Heizungsbedarf im Winter erfordert große Speicher mit einem guten Oberflächen-Volumen-Verhältnis. Weiterhin sind eine sehr gute (d. h. auch teure) Wärmedämmung vorzusehen und Verluste einzukalkulieren. Bislang stehen für diese Anwendung schon Warmwasserwärmespeicher mit einem Volumen von bis zu 8.000 m<sup>3</sup> zur Verfügung.

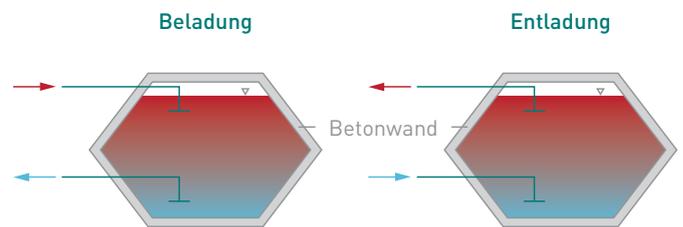


Abb. 38: Funktionsweise Heißwasserspeicher

Wurden die Behälterwandungen in der Vergangenheit aus Blechen zusammengeschweißt, kommen heute zunehmend auch Behälter aus wasserdichtem Stahlbeton zum Einsatz.

Abbildung 39 zeigt beispielhaft den Heißwasserspeicher der Nahwärmeversorgung in München, welcher ein Volumen von 6.000 m<sup>3</sup> hat und mit Unterstützung durch eine 2.900 m<sup>2</sup>-Solarthermieanlage mehrere hundert Wohneinheiten mit Wärme versorgt.



Abb. 39: Heißwasserspeicher in München

### Kältespeicherung

Neben der Speicherung von Wärme können Pufferspeicher auch zur Kältespeicherung eingesetzt werden. In diesem Fall kann je nach Einsatztemperatur Wasser, ein Wasser/Frostschutz-Gemisch oder Kältemittel als Speichermedium zum Einsatz kommen.

## 6.2.2 Kies-Wasser-Speicher

Kies-Wasser-Speicher werden bislang hauptsächlich zur Langzeitspeicherung von Solarwärme zur Heizungsunterstützung von Gebäudekomplexen eingesetzt oder als Zwischenspeicher in Nahwärmenetzen integriert. Sie gehören zur Gruppe der sensiblen Speicher und sind auch gut für die Speicherung von Abwärme geeignet.



Für den Bau wird eine Grube ausgehoben, welche mit einem Kies-Wassergemisch befüllt wird. Dieses Kies-Wassergemisch dient als Speichermedium, wobei der Kiesanteil etwa 60–70 % beträgt. Aufgrund der Grubenbauweise und der Möglichkeit, das Speichermedium statisch belasten zu können, kann die wasserdichtende Hülle des Speichers relativ einfach mittels Kunststoffolie oder wasserdichtem Beton ausgeführt und auch der Platz über dem Speicher wieder natürlich genutzt werden. So können oberhalb des Speichers ohne Probleme beispielsweise Straßen oder Parkplätze errichtet werden.

Besonders in Gebieten mit großen natürlichen Kiesvorkommen ist die Verwendung von Kies eine kostengünstige Variante, es können aber auch andere Gesteinsmaterialien eingesetzt werden.

Kies-Wasser-Speicher eignen sich für Speichertemperaturen bis 90 °C. Da Kies bzw. Gestein eine niedrigere Wärmekapazität besitzt als Wasser, muss der Speicher ein etwa 1,3- bis 2-mal höheres Volumen als ein Heißwasserspeicher aufweisen, um die gleiche Wärmemenge speichern zu können.

Bislang realisierte Anlagen liegen in der Größenordnung von 1.000 bis 8.000 m<sup>3</sup>. Die Speicherleistung ist dabei vom Kiesanteil im Füllmaterial abhängig.

Bei der Be- und Entladung des Speichers wird zwischen zwei Varianten unterschieden: Dem direkten und dem indirekten Wärmeeintrag.

- Bei der direkten Beladung wird das Wasser getauscht, wobei ähnlich wie bei dem Pufferspeicher auf eine gute Schichtung geachtet werden muss, damit sich das kältere Wasser nicht mit dem wärmeren mischt.
- Häufiger wird die indirekte Methode bevorzugt. Hier werden Kunststoff-Rohrschlangen in das Kiesbett eingebracht, welche als Wärmetauscher fungieren (Abbildung 40 und 41).



Abb. 40: Im Bau befindlicher Kies-Wasser-Speicher mit Kunststoff-Wärmeübertragungsrohren

Eine Aussage zur Wirtschaftlichkeit lässt sich erst nach genauer Betrachtung des Einzelfalls treffen, da die Betriebsparameter einen wesentlichen Einfluss haben.

Der Kies-Wasser-Speicher ist eine relativ neue Entwicklung und wurde bisher in verschiedenen Pilotprojekten bei realen Betriebsbedingungen erfolgreich eingesetzt

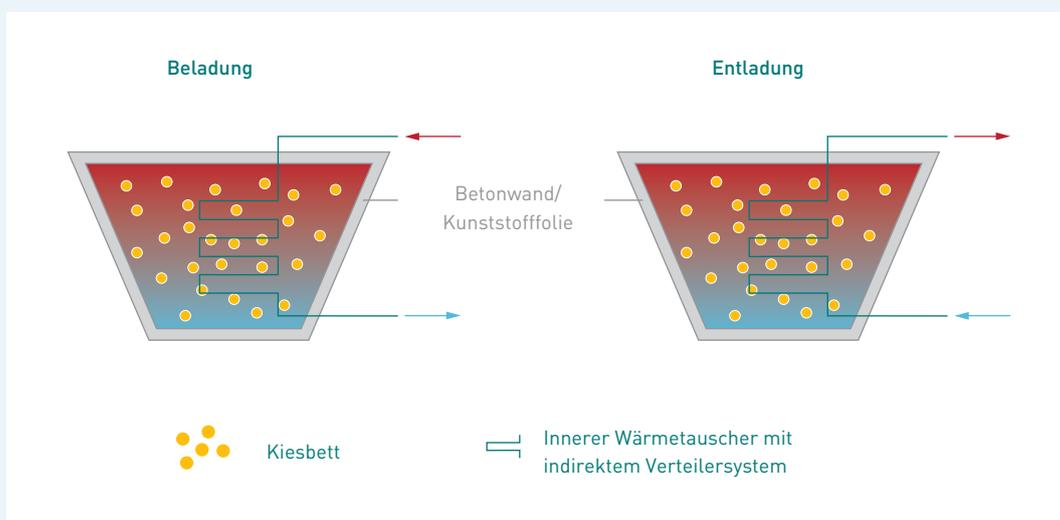


Abb. 41: Funktionsweise Kies-Wasser-Speicher

### 6.2.3 Luftdurchströmte Gesteinsspeicher – Schotterspeicher

Der Schotterspeicher ist eine dem Kies-Wasser-Speicher verwandte Technologie, welche nach dem gleichen Prinzip arbeitet wie die regenerativen Wärmetauscher. Hauptsächlich wird er als Unterstützung für die Gebäudeheizung bzw. Klimatisierung eingesetzt. Das Wärmespeichermaterial ist dabei die Gesteinsschüttung. Diese wird wechselweise von Luft durchströmt, die während der Speicherdurchströmung entweder Wärme aufnimmt oder abgibt.



Der Schotterspeicher ist in Form eines Quaders aufgebaut, wobei an den Stirnseiten jeweils Luftverteilersysteme installiert sind, in welche die Luft ein- bzw. austritt. Als Speichermaterial wird relativ grober Schotter verwendet (Korngrößen 45–150 mm), sodass der Druckabfall der durchströmenden Luft nicht zu groß ist. Der schematische Aufbau ist in Abbildung 42 dargestellt.

Im Sommer wird warme Außenluft durch den unterirdisch angelegten Schotterspeicher geführt, wodurch diese ihre Wärme und Feuchtigkeit an das noch relativ kalte Gestein abgibt. Somit kann die abgekühlte und entfeuchtete Außenluft für die Klimatisierung eines Gebäudes verwendet werden. Zur Regeneration des Speichers kann die kühlere Nachtluft den Speicher wieder herunterkühlen.

Im Winter durchströmt nachts die kalte Umgebungsluft den Speicher und erwärmt sich dadurch bis auf das Temperaturniveau des Schotters. Anschließend kann die vorgewärmte Luft in einem Klimagerät bis auf die gewünschte Heiztemperatur erhöht werden. Zur Regeneration des Speichers wird tagsüber die Abluft durch den Speicher gedrückt, sodass sich dieser wieder etwas erwärmt.

Durch den Einsatz dieses Speichers können im Sommer bis zu 90 % der notwendigen Kältemenge und im Winter bis zu 15 % an Heizenergie eingespart werden.



Abb. 43: Schotterspeicher im Bau

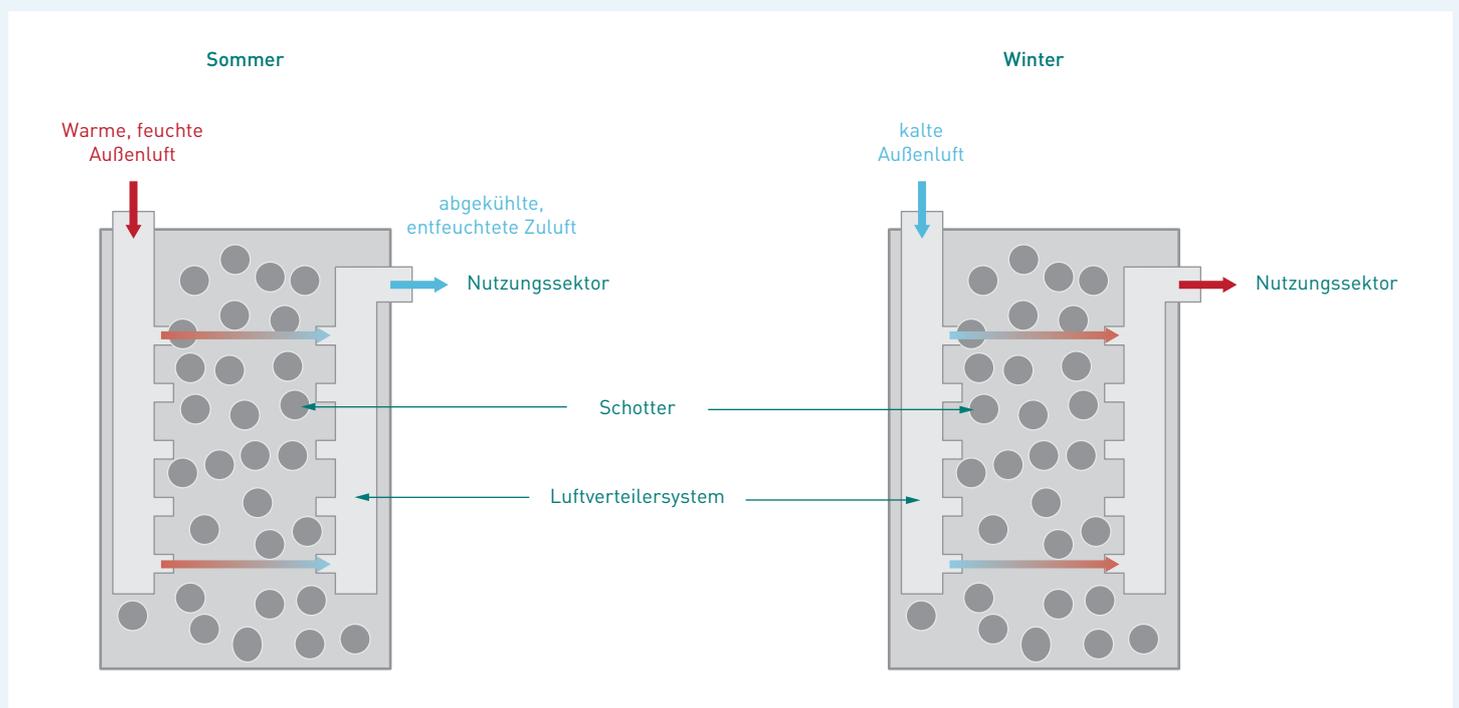


Abb. 42: Schema Schotterspeicher

## 6.2.4 Erdsonden-Wärmespeicher

Erdsonden-Wärmespeicher gehören zu den Großspeichern. Die Technologie ist von der herkömmlichen Erdsonden-Wärmepumpentechnik abgeleitet, bei der schon seit langem Bohrlöcher als Wärmequelle genutzt werden.

Der Erdsonden-Wärmespeicher besteht aus zahlreichen Erdsonden, welche als Sondenfeld zusammengefasst sind und Wärme im natürlichen Untergrund speichern.

Die Erdsonden bestehen aus Bohrungen, in denen sich U-förmige Kunststoffrohre und ein Verfüllmaterial befinden. Die Tiefe der Bohrungen reicht üblicherweise von 20 bis 100 m, der Abstand liegt zwischen 1,5 und 3 m. Durch die Sonden zirkuliert ein Wasser-Glykolgemisch, welches seine Wärme zuerst an das Verfüllmaterial der Bohrungen und dann an das umgebende Erdreich abgibt. Theoretisch können Erdsonden-Wärmespeicher bis auf 80 °C erwärmt werden.

Durch eine hohe Anzahl an Sonden kann zwischen diesen ein hohes Speichervolumen genutzt werden. Da zwischen den Sonden kein Temperaturgefälle besteht, treten innerhalb des Sondenfeldes auch keine Wärmeverluste auf. Nach außen sind die Wärmeverluste ebenfalls sehr gering, da das speicherumgebende Erdreich quasi wie eine unendlich dicke Dämmschicht wirkt. Dennoch ist in den meisten Fällen eine wirtschaftliche Nutzung erst ab 50.000 m<sup>3</sup> Speichervolumen gegeben.

Mit dem Erdsonden-Wärmespeicher lässt sich Wärme über Wochen und Monate im Untergrund speichern. Die speicherbare Wärmemenge wird von der Größe des Sondenfeldes

sowie von der Wärmekapazität des Untergrunds bestimmt. Das benötigte Volumen ist im Vergleich zu Heißwasserspeichern aufgrund der geringeren Wärmekapazität des Erdreichs um den Faktor 3 bis 5 größer.

Abbildung 44 zeigt das Nutzungsschema eines Erdsonden-Wärmespeichers für die Klimatisierung eines Gebäudes.

Bei der Entladung werden die Erdsonden mit kühlerem Wasser beschickt und entnehmen dabei der Umgebung die gespeicherte Wärme. Die Be- und Entlade-Geschwindigkeit wird dabei durch die Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds und den Sondenabstand beeinflusst. Die Zugriffszeiten sind länger als bei den vorgenannten Speichern. Die Erdwärmesonden-Technologie wird besonders in dichten, wassergesättigten Ton- und Gesteinsschichten mit geringer Grundwasserbewegung angewandt, da hier die Wärmekapazität des Untergrundes besonders hoch ist.

Die häufigste Anwendung finden diese Speicher in Kombination mit solarthermischen Anlagen. Besonders im Sommer können die Überschüsse in den Erdsonden-Speicher eingespeist und bei Bedarf abgerufen werden. Dabei empfiehlt sich häufig der Einsatz einer Wärmepumpe. Aber auch Abwärme aus industriellen Prozessen kann mit diesem Speicher im großen Maßstab genutzt werden.

Derzeit werden einige Pilotanlagen betrieben, welche erste positive Erfahrungen liefern. Da die Auslegung eines Speichers von den geologischen Gegebenheiten abhängig ist, müssen Erdsonden-Wärmespeicher anwendungsspezifisch geplant werden. Die Investitionskosten eines Erdsonden-Speichers werden stark von den Bohrkosten bestimmt. Daher ist der Erdsonden-Speicher in gut bohrfähigen Untergründen besonders wirtschaftlich.

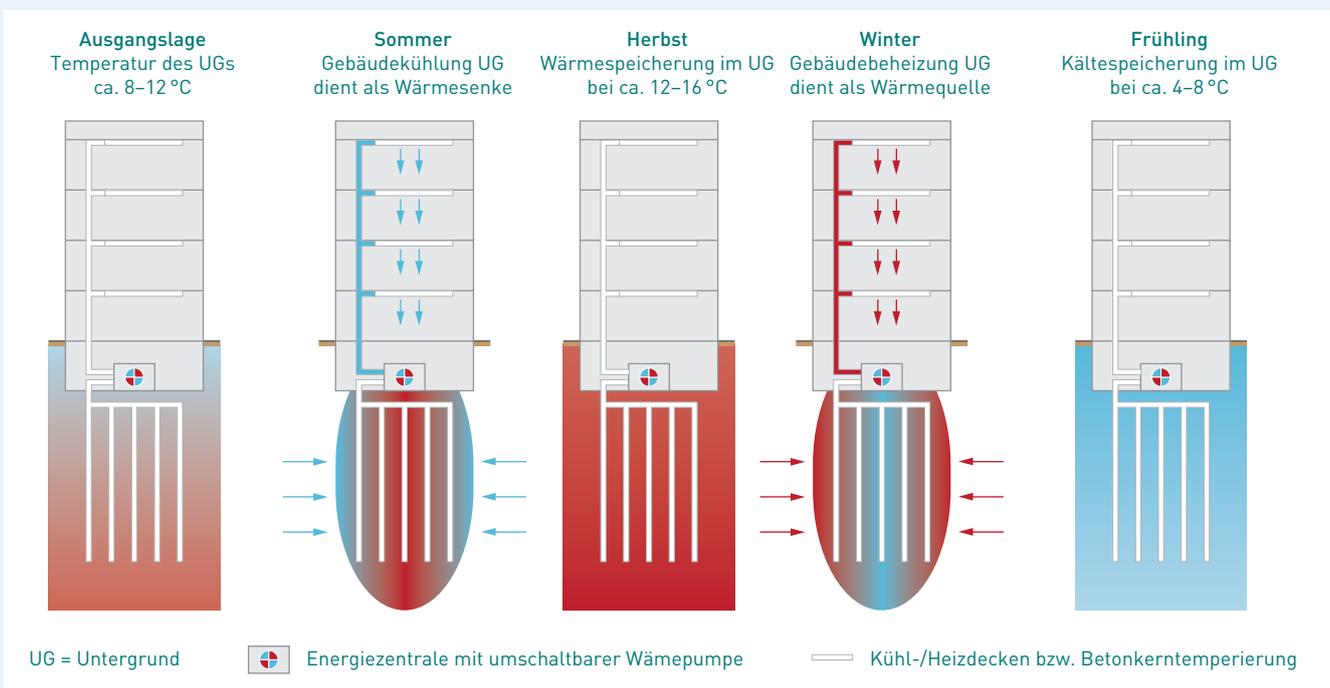


Abb. 44: Erdsonden-Wärmespeicher: das Bürogebäude „entory home“ in Ettlingen

## 6.2.5 Latentwärmespeicher

In Latentwärmespeichern werden spezielle Phasenwechselmaterialien (PCM, engl. Phase Change Material) als Speichermedium eingesetzt. Diese Stoffe, meist Salze oder Paraffine, nutzen die Enthalpie reversibler thermodynamischer Zustandsänderungen für die Speicherung der Wärme. Die an die Phasenwechselmaterialien übertragene thermische Energie führt nicht zu einer Temperaturänderung, sondern zur Änderung des Aggregatzustandes. Meist wird hierfür der Phasenübergang fest-flüssig genutzt.

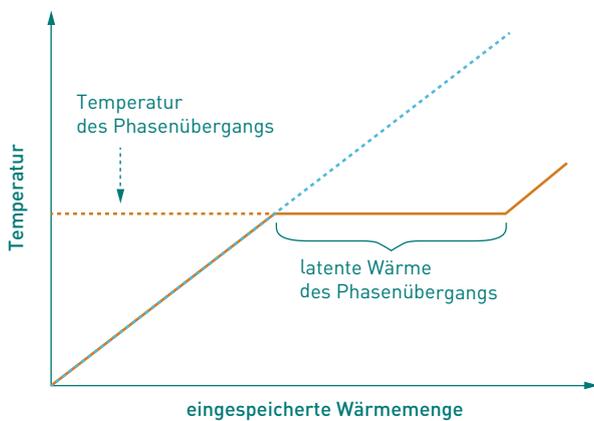
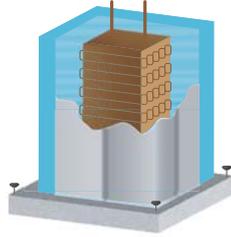


Abb. 45: Phasenübergang beim Latentwärmespeicher

Wenn der Wärmespeicher aufgeladen wird, muss Wärme oberhalb der Phasenwechseltemperatur durch einen in den Speicher integrierten, innenliegenden Wärmetauscher zugeführt werden. Die Energie wird durch den Wechsel des Aggregatzustandes von fest zu flüssig aufgenommen. Die Temperatur im Speicher bleibt bis zur vollständigen Phasenumwandlung weitgehend konstant, d. h. der Phasenwechsel verläuft annähernd isotherm. Beim Entladen wird dann Wärme leicht unterhalb dieser Temperatur bereitgestellt. Damit ergeben sich zwei wesentliche Vorteile:

- Durch geringe Temperaturänderung lassen sich verhältnismäßig große Wärmemengen speichern und somit hohe Leistungsdichten erzielen.
- Unabhängig von schwankenden Beladungstemperaturen erfolgt die Wärmeabgabe annähernd bei konstanter Temperatur.

Mit der Wahl des Speichermediums wird auch die Temperatur des Phasenwechsels festgelegt. Damit ist es möglich, durch die Wahl des Speicherstoffs den Wärmespeicher speziell auf einen bestimmten Anwendungsfall abzustimmen. Derzeit sind über 50 organische und anorganische Latentwärmespeichermaterialien im Temperaturbereich von  $-30\text{ °C}$  bis  $1.000\text{ °C}$  verfügbar. Für die Speicherung im Bereich  $5\text{ °C}$  bis  $150\text{ °C}$  werden vorwiegend Paraffine, Salzhydrate und eutektische Mischungen von Salzhydraten eingesetzt. Bei höheren Temperaturen wird auf (Erd-)Alkalisalze oder Gashydrate zurückgegriffen.

In Abhängigkeit vom Phasenwechselmaterial muss die Speicherkonstruktion und der innenliegende Wärmetauscher so ausgelegt sein, dass der Be- und Entladezyklus mit der erforderlichen Geschwindigkeit realisiert werden, keine Korrosionserscheinungen auftreten und der Speicher gegebenenfalls auch wieder entleert werden kann.

Im kleinen Maßstab werden Latentwärmespeicher bereits in vielen Anwendungen eingesetzt und sind kommerziell verfügbar. Für die großtechnische Anwendung ist dieser Speichertyp noch Gegenstand von Forschung und Entwicklung. Eine praxisnahe Erprobung wird vor allem in Kombination mit Solarkollektoren durchgeführt.

Die Wechselbeständigkeit der PCMs wird immer wieder als Schwachstelle dieser Technologie benannt. Bisher konnte in Laborversuchen eine Beständigkeit einiger PCMs von über 500 Lade- bzw. Entladezyklen nachgewiesen werden, was bei einem täglichen Be- und Entladeprozess einer Standzeit von 1,3 Jahren entsprechen würde. Bei der Wirtschaftlichkeitsberechnung von Latentwärmespeichern müssen daher die Standzeit und die Kosten für den Austausch des Speichermediums berücksichtigt werden.

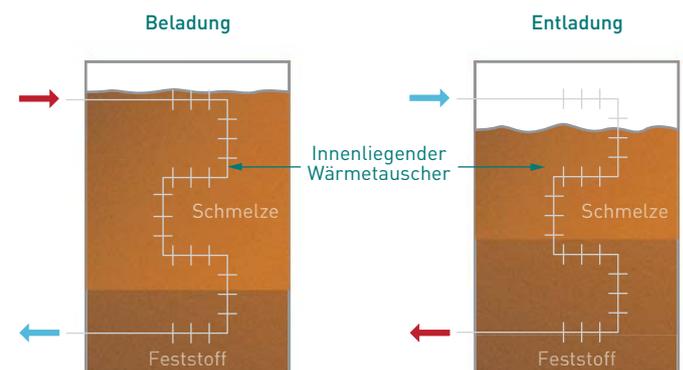
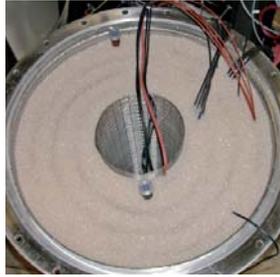


Abb. 46: Schema Latentwärmespeicher

## 6.2.6 Sorptionsspeicher/thermochemische Speicher

In thermochemischen Speichern oder Sorptionsspeichern wird die Energie in Form einer reversiblen Reaktion gespeichert. Sie besitzen 4- bis 5-mal höhere Energiespeicherdichten als konventionelle Heißwasserspeicher und sind während der Speicherzeit wärmeverlustrfrei. Damit eröffnet sich dem Sorptionsspeicher ein weites Anwendungs- und Entwicklungspotenzial für bisher übliche Anwendungen als auch für zahlreiche neue Einsatzmöglichkeiten.



Die Entwicklung dieses Speichertyps ist derzeit noch nicht abgeschlossen und es sind noch keine Sorptionsspeicher auf dem Markt verfügbar.

Sorptionsspeicher arbeiten mit zwei Medien, einem Arbeits- und einem Speichermedium. Je nachdem, ob der Speicher für das Speicherprinzip der Ad-Sorption oder Ab-Sorption aufgebaut ist, kommen dabei unterschiedliche Stoffe zum Einsatz.

### Adsorptionsspeicher

Bei den Adsorptionsspeichern liegt das Speichermedium als fester, mikro-poröser Stoff vor und besitzt aufgrund dieser Struktur eine sehr große Oberfläche. An dieser Oberfläche können verhältnismäßig große Mengen des Arbeitsmediums Wasserdampf angelagert (adsorbiert) werden. Bei der Anlagerung des gasförmig vorliegenden Wassers ändert sich in Folge der Anlagerung der Aggregatzustand des Wassers von gasförmig zu flüssig. Dabei wird 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.

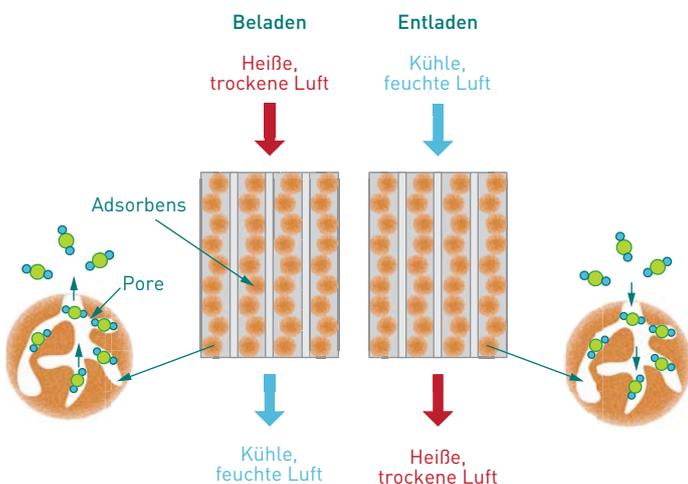


Abb. 47: linke Seite: Beladen des Speichers durch Abspaltung der Wassermoleküle aus dem Adsorbens; rechte Seite: Entladung durch Anlagerung der Wassermoleküle

In Adsorptionsspeichern werden hauptsächlich Zeolithe und Silikagel als Arbeitsmittel eingesetzt. Diese chemischen Verbindungen sind durch ihre große Oberfläche in der Lage, bis zu 30 % ihres trockenen Eigengewichts an Wasser auf ihrer Oberfläche zu adsorbieren. Auch Metallhydride sind für diesen Einsatz geeignet.

### Speicherzyklus

Im entladenen Zustand ist an der porösen Oberfläche des Speichermediums Wasser angelagert. Dieses wird beim Beladen, d. h. durch die Zufuhr von Wärme abgespalten und verdampft. Hierzu wird trockene Luft auf einem hohen Temperaturniveau benötigt (100–300 °C), welche durch das Festbett des Adsorbens strömt. Durch das Verdunsten des an dessen Oberfläche gebundenen Wassers kühlt sich die Luft ab und nimmt den ausgetriebenen Wasserdampf auf. Beim Austritt besitzt sie noch eine Temperatur von 40–60 °C und eine relative Luftfeuchte von bis zu 90 %. Der in der Luft enthaltene Wasserdampf kann anschließend auskondensiert und die damit gewonnene Wärme in einen Niedertemperaturheizkreis eingekoppelt werden.

Wird das getrocknete Adsorbens nach der Beladung luftdicht verschlossen, kann dieses theoretisch für eine unbegrenzte Zeit gelagert werden, ohne dass die Fähigkeit Wasserdampf zu adsorbieren nachlässt. Dadurch ist eine lange, vor allem aber verlustarme Speicherung von Wärme möglich.

Das Entladen geschieht in umgekehrter Reihenfolge, wobei dem Adsorbensstoff möglichst gesättigte feuchte Luft (oder Wasserdampf) zugeführt wird. Das dampfförmige Wasser wird adsorbiert, und die nun trockene und heiße Luft strömt mit Temperaturen von bis zu 200 °C aus dem Speicher.

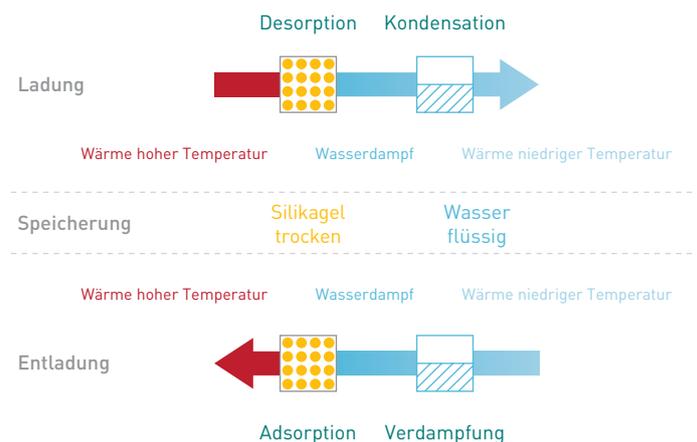


Abb. 48: Lade- und Entladezyklus eines Adsorptionsspeichers

## Absorptionsspeicher

Bei Absorptionsspeichern ist das Speichermedium eine wässrige Salzlösung, welche stark hygroskopisch ist und Wasserdampf absorbiert.

Das Wasser lagert sich hier nicht an die Salzmoleküle an, sondern vermischt sich mit der Lösung.

### Speicherzyklus

Wie beim Adsorptionsspeicher wird durch Zufuhr von zu speichernder Wärme beim Beladen des Speichers Wasser ausgetrieben, in diesem Fall aus der Salzlösung. Auch hier kann der ausgetriebene Wasserdampf in einem nachgeschalteten Schritt wieder kondensiert und die Restwärme auf niederem Temperaturniveau weiter verwendet werden.

Beim Entladen wird wieder Wasser in das Absorbens eingelagert. Dabei wird Wärme frei, welche als Nutzwärme verwendet werden kann. Das Temperaturniveau dieser Nutzwärme ist allerdings niedriger als bei den Adsorptionsspeichern.

Die Kosten für Sorptionsspeicher sind aufgrund der nicht unerheblichen Kosten für die Sorptionsmedien und aufgrund des noch vorhandenen Entwicklungspotenzials entsprechend hoch anzusetzen. Daher ist für einen wirtschaftlichen Betrieb eine hohe Anzahl an Lade- und Entladezyklen einzuplanen, um die hohen Investitionskosten auf viele Speicherzyklen umlegen zu können. Als saisonaler Wärmespeicher ist diese Technologie somit eher ungeeignet.

## 6.2.7 Mobile Wärmespeicher

Häufig kann in einem Betrieb nicht die gesamte anfallende Abwärme betriebsintern genutzt werden. Dies ist häufig der Fall, wenn zahlreiche Thermoprozessanlagen betrieben werden, Produktionsstätten durch innere thermische Lasten beheizt sind und nur wenig Bürofläche thermisch zu versorgen ist.

In solchen Fällen kann die Abwärme zum Beispiel in ein vorhandenes Fernwärmenetz eingespeist, einem benachbarten Unternehmen oder einer Wohnsiedlung zur Verfügung gestellt werden.

Wenn der dafür notwendige Aufbau eines Wärmenetzes technisch nicht umsetzbar oder nicht wirtschaftlich ist, zum Beispiel wegen zu großer Entfernungen zum Nutzer oder zu geringer Wärmeströme, kann auch ein mit Abwärme geladener Wärmespeicher zu einer Wärmesenke, also zu einem Wärmeverbraucher, transportiert werden.

Für diesen Zweck sind derzeit bereits Latent-Wärmespeicher im Eurocontainerformat am Markt verfügbar, welche mit dem Lebensmittelzusatzstoff Natriumacetat mit einer Schmelztemperatur von 59 °C befüllt sind. Bei einer Beladungstemperatur von 65–90 °C können ca. 2,5 MWh pro Container transportiert werden. Die Wärmeentladung findet auf einem Temperaturniveau von 40–52 °C statt, die Wärmeverluste liegen laut Hersteller bei 0,5 % pro Tag.

In Pilotprojekten wird mit solchen mobilen Systemen seit einiger Zeit industrielle Abwärme an Schulen und Schwimmbäder geliefert.

Theoretisch können hierfür auch Puffer- oder Sorptionsspeicher eingesetzt werden.

Die Wirtschaftlichkeit dieser Systeme ist dabei wesentlich von Logistikmanagement und -kosten sowie der Entfernung und Menge des Wärmebedarfs abhängig.



Abb. 49: Mobiler Latentwärmespeicher

### 6.3 Verbrennungsluftvorwärmung

Die Verbrennungsluftvorwärmung ist eine Form der direkten Wärmenutzung, bei der erhebliche Mengen Primärenergie eingespart werden können. Dabei wird die Abgastemperatur reduziert und die dem Abgas entzogene Wärme durch die Verbrennungsluft dem Prozess wieder zur Verfügung gestellt. Sie ist vor allem bei Industrieöfen mit hohen Temperaturen interessant, da das Einsparpotenzial mit der Prozessstemperatur steigt. Der Einsatz an den etwa 70.000 Industrieöfen in Deutschland ist unproblematisch möglich, da die Brennertechnologien bereits ausgereift sind und die Maßnahmen sich in kürzester Zeit amortisieren.

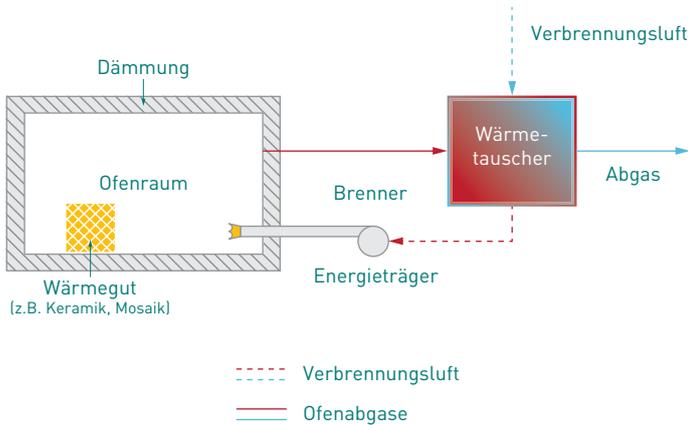


Abb. 50: Schema Verbrennungsluftvorwärmung

Bei der Verbrennungsluftvorwärmung wird mit der Abwärme der Prozessabgase über einen Wärmetauscher die Verbrennungsluft erwärmt, welche den Sauerstoff für die Verbrennung zur Verfügung stellt. Bei der Verbrennung erwärmen sich als erstes die Reaktionsprodukte der Verbrennung und die mit der Verbrennungsluft mitgeführten Gase. Zu diesen gehört auch der in der Luft vorhandene Stickstoffanteil (80 %), welcher nicht an der Reaktion teilnimmt, aber miterwärmt werden muss.

Diese Erwärmung ist vergleichbar mit einem beträchtlichen Falschluffstrom, der miterwärmt wird, aber keinen Nutzen bringt. Wird die Verbrennungsluft vorgewärmt, muss weniger Energie zur Erwärmung dieser Luft aufgewendet und damit auch weniger Brennstoff bereitgestellt werden. Gleichzeitig mit der Reduzierung des Brennstoffs verringert sich auch die eingesetzte Verbrennungsluftmenge und damit wiederum die Abgasmenge, mit der Wärme aus dem Prozess ausgetragen wird.

Das Einsparpotenzial der Verbrennungsluftvorwärmung ist wesentlich von der aus der Thermoprozessanlage austretenden Abgastemperatur abhängig. Abbildung 51 zeigt das Einsparpotenzial der Verbrennungsluftvorwärmung in Abhängigkeit von der Ofentemperatur und der Reduzierung der Abgastemperatur.

Die über einen externen Luftvorwärmer versorgten Brenner erreichen Luftvorwärmtemperaturen von ca. 400 °C.

Bei den Rekuperator- sowie den Regeneratorbrennern bilden die Luftvorwärmer zusammen mit den Brennern eine Baueinheit. Hier werden noch höhere Temperaturen erreicht. Durch den Verzicht auf Zuleitungen und die kompaktere Bauform können beim Rekuperatorbrenner Temperaturen zwischen 500–700 °C und beim Regeneratorbrenner Temperaturen von 800–1.000 °C erreicht werden.

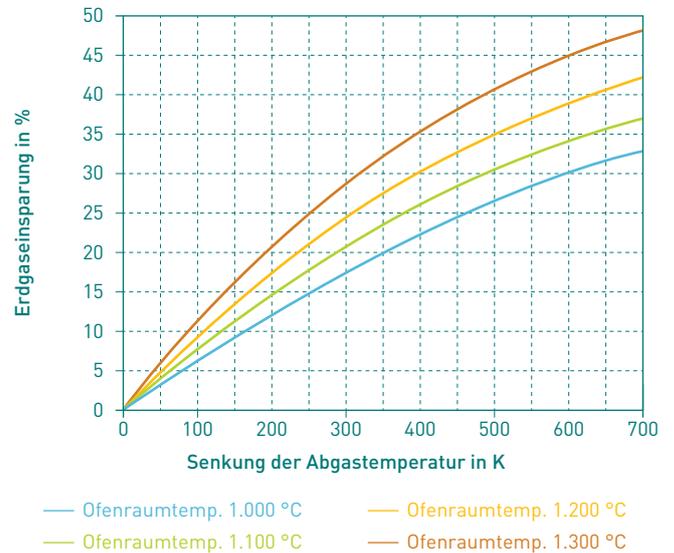


Abb. 51: Energieeinsparung durch Senkung der Abgastemperatur

### 6.3.1 Rekuperator-Brenner

Die Besonderheit der Rekuperator-Brenner besteht in der Nutzung der heißen Abgase unmittelbar am Brenner. Dazu wird das heiße Abgas direkt an der Außenwand des Zuluft leitenden Rohres entlang geführt, wobei es Wärme an die Verbrennungsluft überträgt. Zur Verbesserung dieses Wärmeübergangs ist die Oberfläche z. B. durch Rippen, Zacken oder Wellen vergrößert. Abbildung 54 zeigt den Aufbau eines solchen Brenners. Diese komplexen Hochleistungsbrenner sind in Leistungsklassen von ca. 8–60 kW verfügbar. Die Wärmeübertrager bestehen aus wärmebeständigem Cr-Ni-Stahl oder aus gut wärmeleitender SiC-Keramik.



Abb. 52: Rekuperator-Brenner



Abb. 53: Rekuperator-Brenner, ECOMAX

Eine Weiterentwicklung des klassischen Rekuperatorbrenners zeigt Abb. 52. Bei diesem Brenner wurde die Wärmeübertragung von den Abgasen an die Verbrennungsluft nochmals durch das Einbringen zahlreicher Rohre am Brennermund verbessert. Dadurch wird die Wärmeübertragungsfläche und damit der Wärmeübergang vergrößert, so dass eine noch höhere Luftvorwärmung realisiert werden kann.

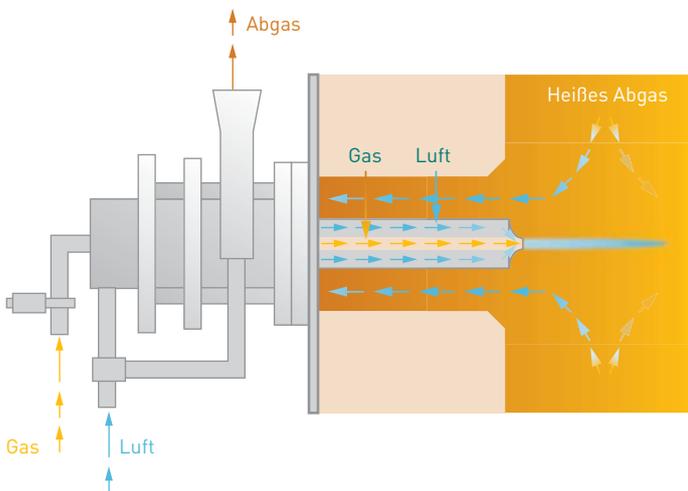


Abb. 54: Funktionsprinzip Rekuperator-Brenner

### 6.3.2 Regenerator-Brenner

Regeneratorbrenner haben mindestens zwei Wärmespeicher, durch die abwechselnd dem Brenner die Verbrennungsluft zugeführt oder das Abgas des Brenners abgeleitet wird. Dabei wird der Wärmespeicher bei der Durchströmung durch die heißen Abgase aufgeheizt. Nach einem kurzen Umschaltprozess wird dann die Verbrennungsluft durch den heißen Wärmespeicher geleitet, so dass diese sich erwärmt, während die Abgase nun durch den zweiten Wärmespeicher strömen. Da die Umschaltzeiten kurz sind, ist ein quasi-kontinuierlicher Betrieb realisierbar. Regenerator-Brenner haben noch höhere Wirkungsgrade als die Rekuperator-Brenner. Der höheren Effizienz steht aber auch ein höherer konstruktiver Aufwand, mehr Wartungsaufwand und höhere Investitionskosten gegenüber, so dass Regeneratorbrenner häufig erst bei sehr hohen Prozesstemperaturen eingesetzt werden.



Abb. 55: Regenerator-Brenner

Wie Abbildung 56 zeigt, können die Regeneratoren dabei in den Brenneraufbau integriert sein oder wie z. B. bei Glaswannen als eigenständiges Bauwerk neben dem Brenner angeordnet sein.

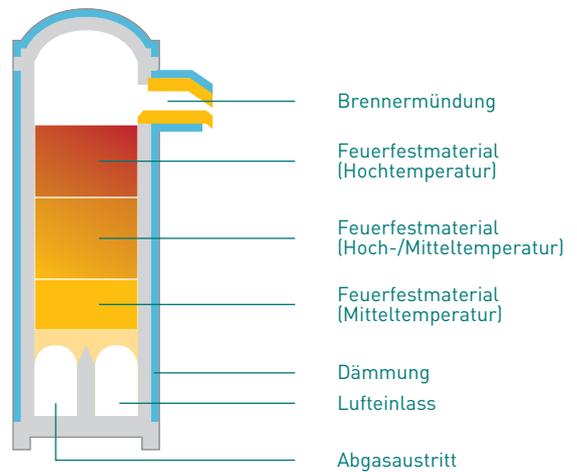


Abb. 56: Regenerator einer Glaswanne

## 6.4 Wärmepumpen und Kältemaschinen

Neben der direkten Wärmenutzung mit und ohne Speicher bietet sich auch die Möglichkeit der indirekten Wärmenutzung an, indem das Temperaturniveau der Abwärme geändert wird.

Mittels Wärmepumpen wird dies möglich: Die Wärmepumpe kann zum Heizen verwendet werden, wenn die Wärme von einem geringen auf ein höheres Temperaturniveau angehoben wird, oder zum Kühlen, wenn der gering temperierten Wärmequelle die Wärme entzogen wird.

Für diese Arbeit benötigt die Wärmepumpe Antriebsenergie, welche ihr bei Kompressionswärmepumpen in Form von Strom, bei Sorptionswärmepumpen in Form von Wärme zugeführt wird.

Das Verhältnis von nutzbarer Wärmeleistung zu eingesetzter elektrischer Leistung definiert die **Leistungszahl** (COP – Coefficient Of Performance) einer Kompressionswärmepumpe (Beispiel: Die thermische Leistung der Abwärmequelle beträgt 3 kW. Zur Bereitstellung einer Wärmeleistung von 4 kW auf einem höheren Temperaturniveau benötigt der Kompressor eine elektrische Anschlussleistung von 1 kW. Demzufolge beträgt die Leistungszahl: 4).

Das Verhältnis von Wärmeleistung zum Energiegehalt des eingesetzten Brennstoffes oder der Abwärme wird bei der Sorptionswärmepumpe hingegen **Heizzahl** genannt (Beispiel: Mit 1 kWh Abwärme werden 1,3 kWh Wärme auf einem höheren Temperaturniveau erzeugt: Heizzahl: 1,3).

Der **COP** von Sorptionskältemaschinen gibt das Verhältnis von Nutzkälte zu eingesetzter Antriebswärme wieder (Beispiel: Mit 1 kW Abwärme können 0,6 kW Kälte erzeugt werden: COP: 0,6).

Technologie	Investitionskosten	Leistungsklasse	Temperaturniveau	Wirkungsgrad	
Kompressionswärmepumpe	100–350 €/kW <sub>Heiz</sub>	2 kW–18 MW	Wärmequelle: -20–90 °C Vorlauf: bis 65 °C, bis 90 °C mit spez. Kältemitteln	COP 3,5–6	
Absorptionswärmepumpe	500–1.200 €/kW <sub>Heiz</sub>	1,5 kW–20 MW	Wärmequelle: -20–90 °C Vorlauf: bis 65 °C, bis 90 °C mit spez. Kältemitteln	Heizzahl 1,3–1,6	
Absorptionskältemaschine	LiBr-Anlagen: 50–350 €/kW <sub>Kühlt</sub> NH <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O-Anlagen: 400–1.275 €/kW <sub>Kühlt</sub>	21 kW–2 MW	Wärmequelle: 90 °C Kältequelle: -10 °C	COP 0,6–0,75 (einstufig) 1,3–1,6 (zweistufig)	
Adsorptionswärmepumpe	1.500 €/kW <sub>Heiz</sub>	1,5–10 kW	Wärmequelle: -20–90 °C Vorlauf: bis 300 °C	Heizzahl 1,3–1,6	
Adsorptionskältemaschine	500–1.500 €/kW <sub>Kühlt</sub>	8–590 kW	Wärmequelle: 60–85 °C Kältequelle: 6–9 °C	COP 0,6	

Tab. 13: Übersicht Wärmepumpen und Kältemaschinen (Abb. 57–61)

### 6.4.1 Kompressionswärmepumpe

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



Abbildung 62 zeigt den Kreisprozess einer Kompressionswärmepumpe. Dabei wird einer Wärmequelle (z. B. Erdreich, Luft, Abwärme) Wärme entzogen. Diese Wärme wird genutzt, um ein Kältemittel zu verdampfen (1). Üblicherweise werden hierzu Stoffe mit sehr niedrigen Siedepunkten eingesetzt, die zum Teil schon bei  $-40\text{ °C}$  gasförmig vorliegen. Das verdampfte und damit gasförmige Kältemittel wird im Verdichter (2) komprimiert und erwärmt sich dabei. Dem nun unter hohem Druck stehenden und gleichzeitig warmen Medium kann über einen Wärmetauscher (Verflüssiger) thermische Energie entzogen werden, die an das Heizsystem abgegeben werden kann (3). Bei diesem Vorgang kühlt sich das Kältemittel ab und kondensiert. Der noch immer hohe Druck wird anschließend durch das Drosselventil (4) wieder auf das Niveau des Verdampfers abgesenkt. Dabei kühlt sich das Kältemittel auf eine niedrige Temperatur ab, die unter der der Wärmequelle liegt. Danach kann wieder Wärme aufgenommen werden, wodurch der Kreisprozess von neuem beginnt.

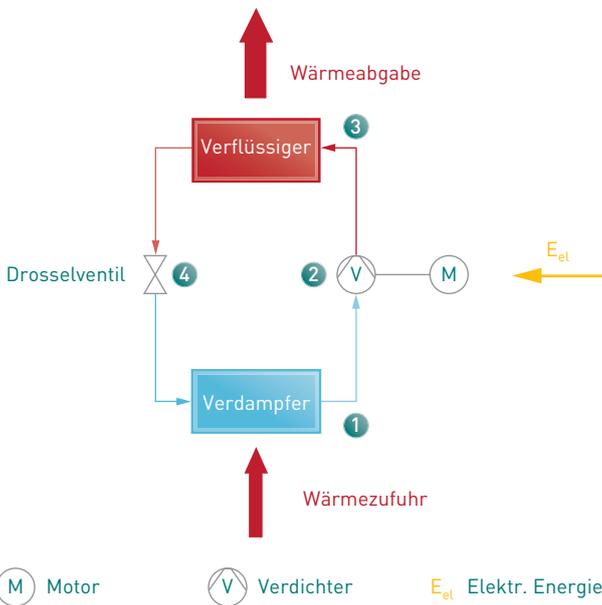


Abb. 62: Funktionsprinzip einer Kompressionswärmepumpe

Für die Effizienz einer Wärmepumpe ist die Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Heizung entscheidend. Je geringer diese Differenz ist, umso höhere Leistungszahlen können erzielt werden. Dies bedeutet, dass bei gleichbleibender Heiztemperatur auch eine möglichst hohe Temperatur der Wärmequelle angestrebt werden sollte.

Derzeit lassen sich Wärmepumpen ab einer Leistungszahl von ca. 3,5 wirtschaftlich betreiben. Standardmäßige Wärmepumpen erreichen dabei eine Temperaturerhöhung um ca.  $40\text{--}50\text{ K}$ . Normale Wärmepumpen erreichen übliche Heißwassertemperaturen bis  $65\text{ °C}$ . Darüber hinaus müssen spezielle Kältemittel eingesetzt werden, die Temperaturen bis  $90\text{ °C}$  zulassen.

Kompressionswärmepumpen sind technisch ausgereift und in vielen Größen und Leistungsklassen verfügbar.

Im häuslichen Bereich werden als Wärmequelle beispielsweise das Erdreich, Wasser oder Luft verwendet. Erdreich und Grundwasser werden mit relativ gleichmäßigen Temperaturen von  $8\text{ bis }12\text{ °C}$  über das ganze Jahr in den meisten Anwendungen als Hauptwärmequellen favorisiert. Bei diesen Wärmequellentemperaturen lassen sich Wärmepumpen wirtschaftlich betreiben.

Da industrielle Abwärme meist auf einem deutlich höheren Temperaturniveau anfällt, ist die industrielle Nutzung von Wärmepumpen besonders interessant. Wie die Beispiele in Kap. 4 zeigen, können Luftwärmepumpen z. B. auch sehr gut zur Nutzung diffuser Abwärme eingesetzt werden. Wenn der Strom regenerativ erzeugt wird, kann die Wärmepumpe und damit der Heizprozess ohne  $\text{CO}_2$ -Emission betrieben werden.

Die Investitionskosten einer Anlage sind abhängig von der Leistungsklasse. Neben den reinen Anschaffungskosten der Wärmepumpe müssen auch die Kosten für die Erschließung der Wärmequellen berücksichtigt werden.



Abb. 63: Luft/Wasserwärmepumpe zur Gebäudebeheizung

## 6.4.2 Absorptionswärmepumpe/-kältemaschine

Absorptionswärmepumpen und -kältemaschinen besitzen einen thermischen Antrieb anstelle eines mechanischen Verdichters. Dieser thermische Antrieb besteht aus Absorber, Austreiber, Lösungsmittelpumpe und Expansionsventil. Die restlichen Komponenten des Kreislaufs (Verdampfer, Verflüssiger, Expansionsventil) sind identisch mit denen der Kompressionswärmepumpen.



Der Absorptionsprozess gleicht dem der Absorptionswärmespeicher: Ein Kältemittel, auch Arbeitsmittel, wird unter Wärmeabgabe in einem Lösungsmittel absorbiert. Dieses Gemisch muss anschließend unter Druck und Wärmezufuhr in einem Austreiber wieder getrennt werden.

Abbildung 64 zeigt den Prozess schematisch.

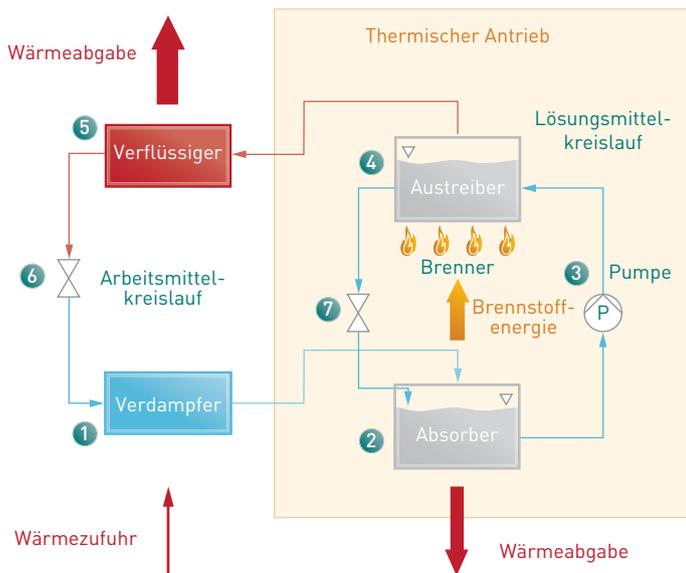


Abb. 64: Funktionsprinzip einer Absorptionswärmepumpe

Im Verdampfer (1) wird dem Arbeitsmittel thermische Energie aus der Wärmequelle (industrielle Abwärme, Wasser, Erdbo-den) zugeführt, wodurch es vom flüssigen in den gasförmigen Zustand übergeht. Dieser Kältemitteldampf gelangt in den Absorber (2), wo er vom flüssigen Lösungsmittel aufgenommen wird. Bei diesem Prozess wird Wärme freigesetzt, die an das Heizsystem abgegeben werden kann. Die Lösung wird durch eine Pumpe (3) auf einen höheren Druck gebracht und in den Austreiber (4) transportiert. Durch Erwärmung verdampft das Arbeitsmittel und kondensiert letztlich am Verflüssiger (5) aus, wo die Nutzwärme mit einem hohen Temperaturniveau an das Heizsystem abgegeben werden kann. Nach der Wärmeabgabe wird das Arbeitsmittel wieder im Expansionsventil (6) entspannt, bevor es im Verdampfer (1) erneut Wärme aufnehmen kann. Das Lösungsmittel, welches das Arbeitsmittel im

Absorber (2) aufgenommen und zum Austreiber (4) transportiert hat, wird in einem Drosselventil (7) entspannt und wieder dem Absorber zugeführt.

Für die Absorptionswärmepumpen wird als Kälte- oder Arbeitsmittel meist Ammoniak und als Lösungsmittel Wasser eingesetzt. Die erforderliche Antriebsenergie für den Austreiber wird durch die Verbrennung von fossilen Brennstoffen, wie z. B. Gas oder Öl, Biomasse oder durch Abwärme auf einem hohen Temperaturniveau ab ca. 500 °C bereitgestellt. Als zweite Wärmequelle können wie bei der Kompressionswärmepumpe Erdreich, Wasser oder vorzugsweise Abwärme bei geringer Temperatur verwendet werden.

Die Absorptionswärmepumpe erreicht übliche Heißwassertemperaturen bis maximal 65 °C. Aufgrund der wenigen beweglichen Bauteile hat die Absorptionswärmepumpe lange Standzeiten und einen geringen Wartungsbedarf. Derzeit wird die Absorptionswärmepumpe vor allem im industriellen Bereich mit Abwärmeeinfall eingesetzt.

Absorptionskältemaschinen benötigen geringere Temperaturen am Austreiber als Absorptionswärmepumpen, sodass sie auch mit Solarwärme und Niedertemperaturabwärme betrieben werden können.

Je nach eingesetztem Arbeitsmittel wird zwischen Ammoniak-Wasser- und Wasser-Lithiumbromid-Absorptionskälteanlagen unterschieden.

Wasser-Lithiumbromid-Absorptionskälteanlagen haben einen einfacheren Aufbau und sind kostengünstiger, erreichen aber nur Kühlttemperaturen bis 5 °C, während Ammoniak-Wasser-Anlagen bis -10 °C kühlen. Eine weitere Abkühlung kann bei Bedarf durch nachgeschaltete Kompressionswärmepumpen erreicht werden.



Abb. 59: Absorptionskältemaschine

Durch einen mehrstufigen Absorptionskälteprozess wird die Effizienz von Absorptionskältemaschinen gesteigert. Mit 2- oder 3-stufigen Anlagen können höhere COP-Werte erreicht werden. Damit erhöht sich auch die Wirtschaftlichkeit.

### 6.4.3 Adsorptionswärmepumpe/-kältemaschine

Adsorptionswärmepumpen und -kältemaschinen nutzen ebenfalls einen thermischen Antrieb, indem ein Adsorbiermedium ein Kältemittel unter Wärmeabgabe adsorbiert und das Kältemittel danach wieder durch Wärmezufuhr vom Adsorbier getrennt wird. Adsorptionsmaschinen bestehen aus zwei mit Adsorptionsmittel gefüllten Arbeitskammern, in denen wechselweise der Adsorptions- und Desorptionsprozess abläuft. Durch das Umschalten zwischen den Kammern läuft der zyklische Prozess quasi kontinuierlich ab.



Im Folgenden wird anhand von Abbildung 65 der Prozess einer Adsorptionswärmepumpe beschrieben.

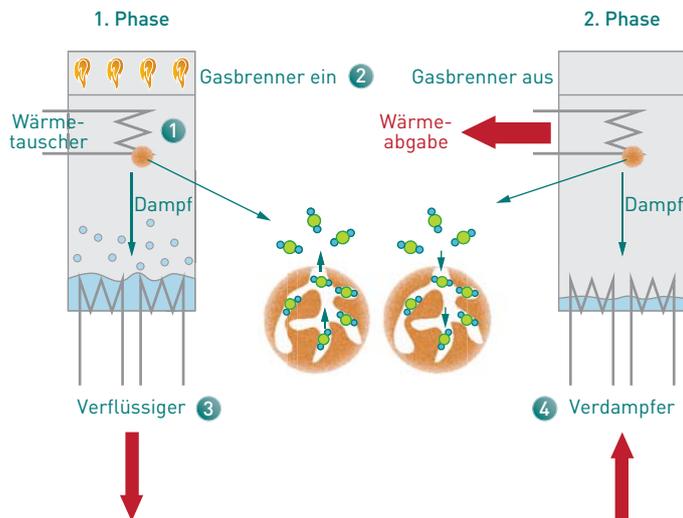


Abb. 65: Funktionsprinzip einer Adsorptionswärmepumpe

In der ersten Phase (Desorptionsphase) ist die Oberfläche des Adsorbierers mit Molekülen des Kältemittels besetzt. Der Adsorbier ist dabei gut wärmeleitend auf einem Wärmetauscher (1) angebracht. Durch einen Gasbrenner oder eine andere Hochtemperaturwärmequelle wird dem Wärmetauscher und damit dem Adsorptionsmittel Wärme zugeführt (2), welche das gebundene Kältemittel als Dampf freisetzt. Der Dampf strömt nun zu einem zweiten Wärmetauscher (Verflüssiger: (3)) und wird dort auskondensiert. Diese Kondensationswärme kann an das Heizsystem abgegeben werden. Ist das gesamte Kältemittel ausgetrieben und kondensiert, wird die Hochtemperaturwärmequelle abgeschaltet und die erste Phase ist beendet.

In der zweiten Phase wird durch Wärmezufuhr das Kondensat wieder verdampft (4). Die dazu nötige Wärmemenge kann über eine Niedertemperaturwärmequelle (z. B. Erdwärme, Abwärme) zur Verfügung gestellt werden. Bei der Adsorptionskältemaschine wird hier die Nutzkälte erzeugt. Der Kältemitteldampf strömt zu dem Adsorptions-Wärmetauscher und wird dort adsorbiert. Die hierbei entstehende Wärme wird wieder an das Heizsystem abgegeben. Wenn das komplette Wasser verdampft und im Adsorbier adsorbiert ist, ist ein Zyklus des Wärmepumpenprozesses beendet.

Bei hohen Temperaturen werden Zeolithe als Sorptionsmittel eingesetzt.

Wenn der Desorptionsprozess bei niedrigeren Temperaturen stattfinden soll (wie zum Beispiel mit Solarwärme ab 60 °C), kommt als Adsorptionsmittel Silikagel zur Anwendung.

Mit bis zu 300 °C sind die maximal erreichbaren Temperaturen deutlich höher als bei anderen Wärmepumpentypen. Bei diesen Temperaturen lassen sich bereits viele industrielle Prozesse wie z. B. Trocknung betreiben. Neben industriellen Anlagen sind bereits erste Systeme für Ein- und Zweifamilienhäuser auf dem Markt erhältlich.

Adsorptionskältemaschinen arbeiten nach dem gleichen Prinzip wie Adsorptionswärmepumpen. Der Verdampfungsprozess (4) wird zur Kälteerzeugung genutzt. Die bei der Verflüssigung (3) entstehende Wärme auf niedrigem Temperaturniveau wird meist über Außenkühler abgeführt.

Als Kältemittel werden dabei Wasser oder Ammoniak eingesetzt. Eine häufige Anwendung ist die Kältegewinnung aus Solarwärme. Hier besteht auch eine große Übereinstimmung von Kältebedarf und Wärmeangebot. Es können Kühlwassertemperaturen von ca. 6 °C erreicht werden.



Abb. 61: Adsorptionskältemaschinen der SorTech AG

## 6.5 Stromerzeugung

Die Stromerzeugung stellt eine weitere Möglichkeit der Abwärmenutzung dar. Häufig sind in der industriellen Abwärme noch große Mengen an nutzbarer Energie enthalten, welche zur Wärmenachverstromung genutzt werden können.

Als Technologien zur Stromerzeugung aus Abwärme stehen der Stirlingmotor, die Dampfturbine und der ORC-Prozess zur Verfügung. Welche Technologie am vorteilhaftesten eingesetzt werden kann, wird meist durch das Temperaturniveau der Abwärme bestimmt.

Dabei können mitunter auch relativ niedrige Wirkungsgrade der Energieumwandlung in Kauf genommen werden, da die (bisher verworfene) Abwärme als Energieträger quasi zum Nulltarif zur Verfügung steht. Wenn Abwärme auf einem höheren Temperaturniveau anfällt, als sie für einen nachgeschalteten Abwärmeprozess verwendet wird, ist auch zu überlegen, ob eine Stromerzeugung zwischengeschaltet werden kann.

Technologie	Investitionskosten	Leistungsklasse (thermisch)	Temperaturniveau	Elektr. Wirkungsgrad	
Dampfturbine	1.100–1.400 €/kW	45 kW–160 MW	250–540 °C	25–42 %	
ORC (Organic Rankine Cycle)	3.000 €/kW <sub>el</sub>	35 kW–25 MW	70–350 °C	10–20 %	
Stirling-Motor	1.500–3.000 €/kW	5–210 kW	650–1.000 °C	12,5–22,5 %	

Tab. 14: Übersicht Stromerzeugung (Abb. 66–68)



Abb. 69: Umspannwerk

### 6.5.1 Wasserdampfturbine

Anhand von Abbildung 70 lässt sich der Dampfturbinenprozess beschreiben: In einem Dampfturbinenprozess wird Wasser durch eine Pumpe auf ein hohes Druckniveau gebracht (1)–(2). Anschließend wird es erwärmt und verdampft (2)–(3). Dieser Hochdruckwasserdampf kann anschließend in einer Dampfturbine entspannt werden (3)–(4), wodurch dessen potentielle Energie in die kinetische Energie einer rotierenden Welle umgewandelt wird. Zur Erzeugung von elektrischer Leistung wird die mechanische Energie in einem Generator in Strom umgewandelt. Der Niederdruckwasserdampf, der aus der Turbine austritt, muss am Ende vollständig kondensiert werden (4)–(1). Dafür ist ein Kühlkreislauf notwendig, dessen Wärme weiter genutzt werden kann. Anschließend beginnt der Kreislauf erneut.

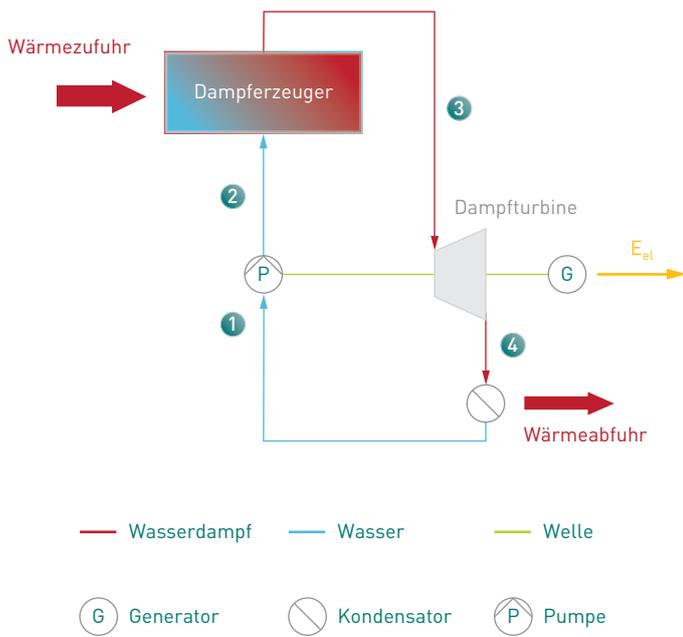


Abb. 70: Schema eines Dampfturbinenprozesses

Der in jedem Kreisprozess theoretisch maximal erreichbare Wirkungsgrad (Carnot-Wirkungsgrad) lässt sich aus dem Verhältnis der höchsten und niedrigsten Temperatur des Prozesses berechnen:

$$\eta = 1 - \frac{T_u}{T_o} \quad , \quad T [K]$$

Er ist umso höher, je größer das Temperaturgefälle zwischen  $T_o$  (obere Systemtemperatur) und  $T_u$  (untere Systemtemperatur) ist.

### 6.5.2 ORC-Prozess

Der ORC-Prozess (Organic Rankine Cycle) ist vergleichbar mit dem Dampfturbinenprozess. Allerdings wird an Stelle von Wasser eine organische Flüssigkeit verwendet, wodurch der Prozess bei deutlich geringeren Temperaturen betrieben werden kann.



Die für den ORC-Prozess verwendeten organischen Flüssigkeiten haben einen deutlich niedrigeren Siedepunkt als Wasser, so dass unter hohem Druck der Verdampfungsprozess auch bei geringeren Temperaturen ablaufen kann.

Die Wärmeübertragung von der Abwärmequelle zur ORC-Anlage wird in den meisten Fällen durch einen Thermoölkreislauf (mit oder ohne Zwischenspeicher) realisiert. Abbildung 71 zeigt das Prozessschema mit einem Wärmeträgerkreislauf.

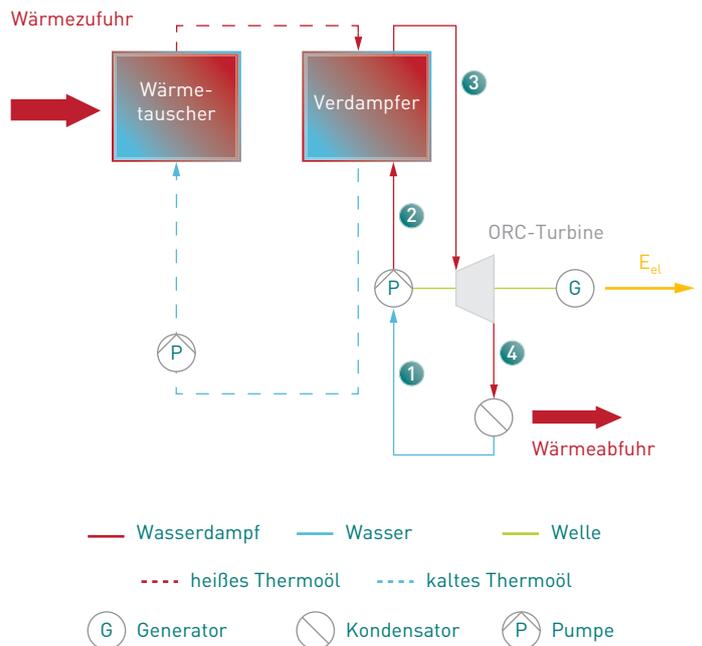


Abb. 71: Schema eines ORC-Prozesses

Der Kreisprozess gleicht dem der Dampfturbine. Durch die Pumpe wird eine Druckerhöhung erzielt (1)–(2). Danach wird das organische Arbeitsmedium erwärmt und verdampft (2)–(3). Die dafür nötige Wärme wird dem Verdampfer über einen Thermoölkreislauf zugeführt. Das verdichtete und verdampfte Medium wird nun in einer Turbine entspannt, wodurch Druck und Temperatur sinken (3)–(4). Die gewonnene Arbeit der Turbine wird zur elektrischen Energieerzeugung durch einen Generator genutzt. Nach der Turbine wird das Medium in einem Kondensator abgekühlt und vollständig verflüssigt (4)–(1). Die Kondensation ist notwendig, um in dem geschlossenen Kreisprozess das Arbeitsmittel wieder der Flüssigkeitspumpe zur Druckerhöhung zuführen zu können.

Die niedrige Anwendungstemperatur der ORC-Technik führt zu einer geringeren Temperaturdifferenz zwischen höchster und niedrigster Prozesstemperatur, sodass die Wirkungsgrade von ORC-Anlagen deutlich geringer sind als die von Dampfturbinen.

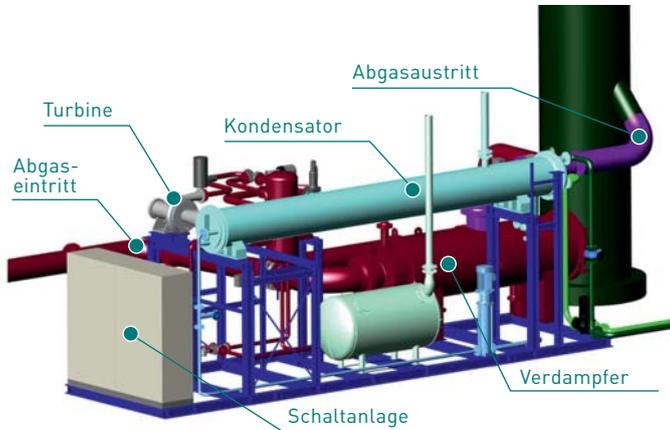


Abb. 72: Prinzipschema einer ORC-Anlage Typ A-100

Im Unterschied zu Wasserdampf zersetzen sich die als Arbeitsmittel eingesetzten organischen Flüssigkeiten ab einer bestimmten Temperatur, welche somit nicht überschritten werden sollte. Daher wird häufig ein Wärmeträgerkreislauf zwischen Abwärmequelle und ORC-Anlage geschaltet. Dieser Schritt empfiehlt sich vor allem dann, wenn die Temperatur der Abwärme höher ist als die maximal zulässige Einsatztemperatur des Arbeitsmediums. Wird der Wärmeträgerkreislauf um einen Wärmespeicher erweitert, können Temperaturschwankungen und Lastspitzen im Abwärmestrom gut ausgeglichen werden.



Abb. 73: ORC-Anlage, Standort Altenberge (Münsterland)

Aufgrund des geringen Wirkungsgrades sollten ORC-Prozesse stationär im optimalen Betriebspunkt der Turbine betrieben werden und eine hohe jährliche Vollaststundenzahl erreichen. Weiterhin hängt die Wirtschaftlichkeit der ORC-Anlagen wesentlich von den Kosten der Wärmebereitstellung ab. Wenn sie zur Abwärmenutzung eingesetzt werden und Wärme kostenfrei zur Verfügung steht (da sie sonst ungenutzt in die Umgebung abgeleitet würde), können ORC-Anlagen rentabel arbeiten.

Eine Alternative zum ORC-Prozess kann zukünftig auch der Kalina-Prozess sein, bei dem statt eines organischen Arbeitsmediums ein Ammoniak-Wasser-Gemisch eingesetzt wird. Zum Preis einer heute noch teureren Anlagentechnik können höhere Wirkungsgrade als beim ORC-Prozess erzielt werden. Erste Einsätze findet der Kalina-Prozess derzeit in geothermischen Kraftwerken bei einer Wärmequellentemperatur von ca. 120 °C.

### 6.5.3 Stirlingmotor

Der Stirlingmotor ist ein Heißgasmotor. Im Gegensatz zu Verbrennungsmotoren sind bei ihm die Zylinder geschlossen, und es werden von außen keine Medien zu- oder abgeführt. Die zum Betrieb notwendige Energie wird ihm von außen durch eine kontinuierliche Wärmezufuhr bzw. -abfuhr zur Verfügung gestellt. Im Zylinder befindet sich ein Arbeitsgas. Dieses dehnt sich im erwärmten Bereich des Zylinders aus und zieht sich im kalten Bereich wieder zusammen, wobei nutzbare mechanische Arbeit entsteht.



Der Stirlingmotor ist aus zwei beweglichen Kolben aufgebaut. Der Arbeitskolben ist dabei für die Nutzung der technischen Arbeit und der Verdrängerkolben für die Verschiebung des Gases verantwortlich. Beide sind um 90° phasenverschoben an einem Schwungrad befestigt. Abbildung 75 zeigt die vier Phasen eines Stirlingprozesses.

Thermodynamisch betrachtet wandelt der Stirlingmotor Energie in einem Doppel-Isothermen-Isochoren-Prozess. Theoretisch erreicht er bei Einsatz eines Regenerators den thermischen Wirkungsgrad des Carnot-Prozesses (siehe Abb. 74). Dort wird deutlich, dass der Wirkungsgrad dieser Wärmekraftmaschine stark von der Temperatur abhängig ist.

Die Wärme wird von außen über die starke Zylinderwand mittels Wärmeleitung auf das Arbeitsgas übertragen. Dies führt zu einer hohen thermischen und damit festigkeitsreduzierenden Beanspruchung des Zylindermaterials. Um die Wärmeübertragung zwischen kaltem und heißem Gas zu vereinfachen, wird daher ein Regenerator eingesetzt. Der Regenerator dient als kurzzeitiger Wärmespeicher und erhöht die Effektivität des Wärmeeintrags in der entsprechenden Prozessphase.

Der Stirlingmotor ist emissionsarm, leise, wartungsarm und hat ein hohes Drehmoment bei geringen Drehzahlen. Sein größter Vorteil ist, dass er bei einem kontinuierlichen Wärmestrom betrieben werden kann, unabhängig davon, ob dieser aus Wärme aus einem Verbrennungsprozess fossiler oder nachwachsender Rohstoffe, aus Solarthermie oder Erdwärme, aus Abwärme industrieller Quellen oder aus Blockheizkraftwerken stammt. Dadurch ergeben sich für den Stirlingmotor vielfältige Anwendungsmöglichkeiten.

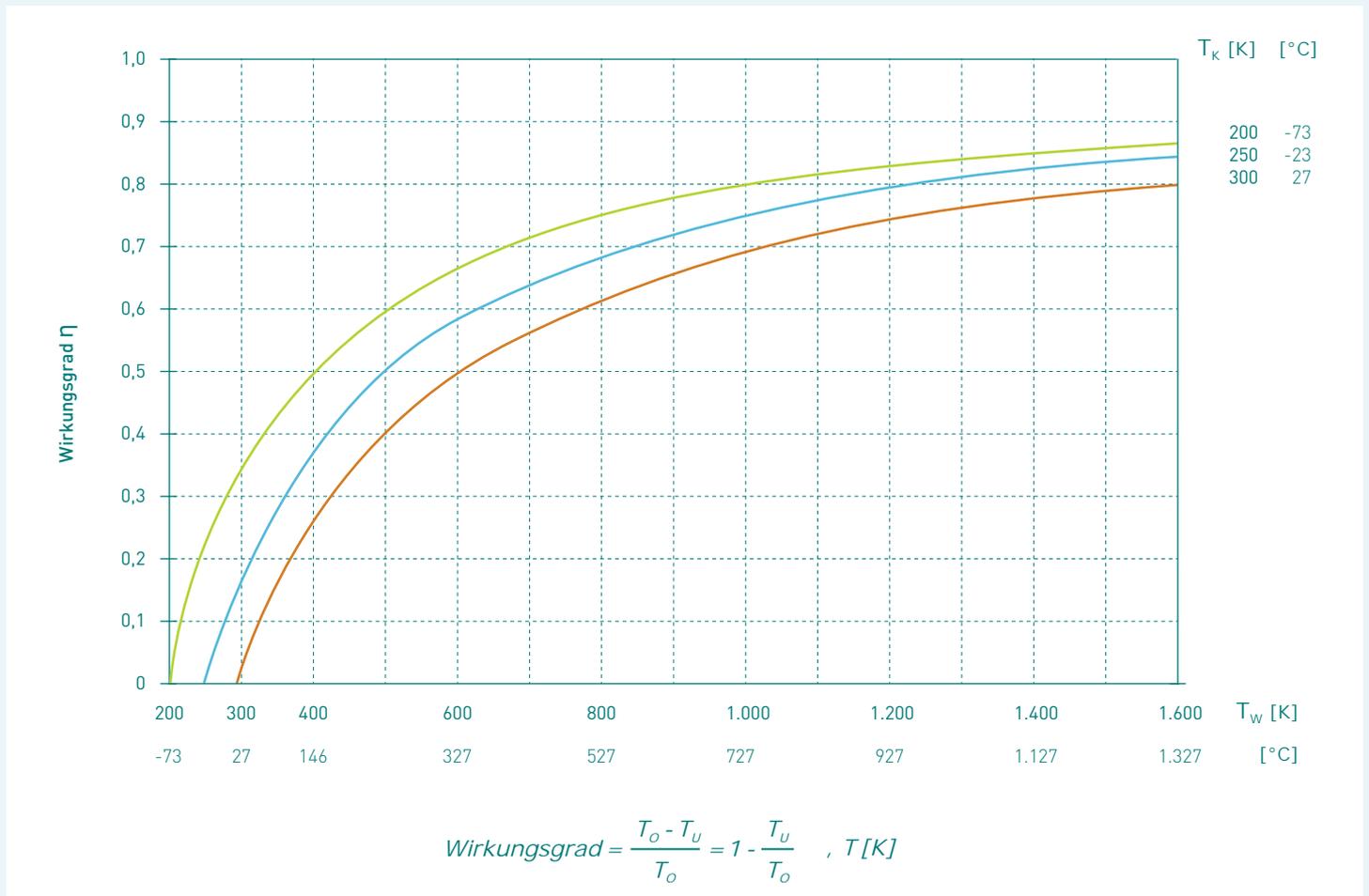


Abb. 74: Carnot-Wirkungsgrad

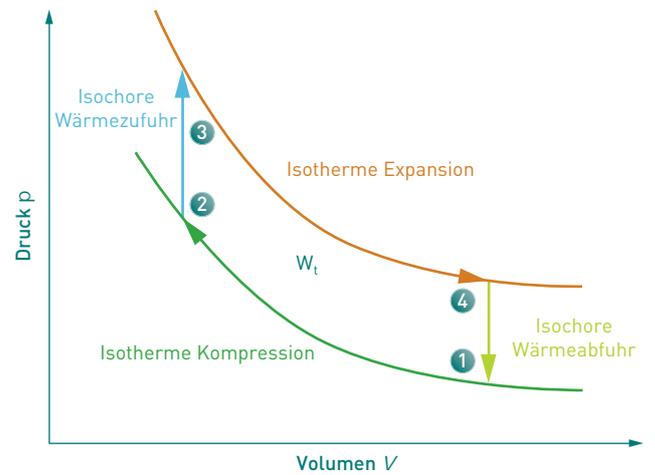
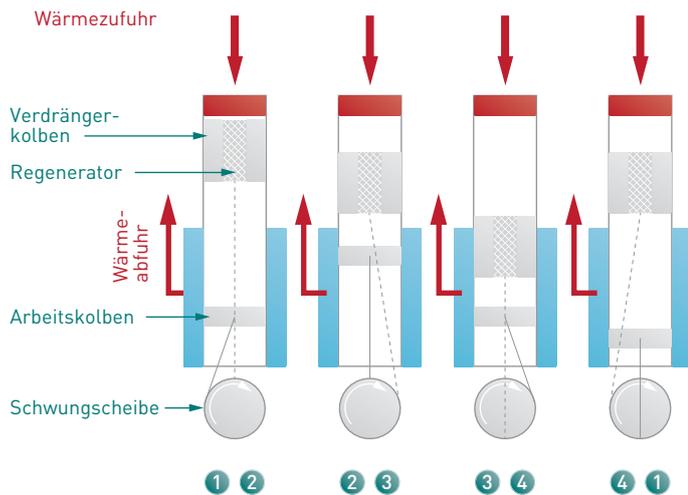


Abb. 75: Funktionsprinzip Stirlingmotor

(1)	Das Gas wird durch Verschieben des Arbeitskolbens im Zylinder komprimiert. Die dafür notwendige Arbeit wird vom Schwungrad bereitgestellt. Die entstehende Kompressionswärme wird an die Umgebung abgegeben.
(2)	Das Gas wird durch den Verdrängerkolben vom unteren kalten Bereich durch den warmen Regenerator hindurch in den oberen heißen Bereich gedrückt. Dabei wird es vom Regenerator erwärmt. Im oberen Bereich wird es weiter durch Wärmezufuhr erhitzt.

(3)	Durch die Wärmezufuhr aus der externen Quelle kommt es zur Volumenvergrößerung des Gases. Dieses drückt dabei den Verdrängerkolben nach unten, welcher Arbeit am Schwungrad verrichtet.
(4)	Der Verdrängerkolben schiebt das Gas vom heißen in den kalten Bereich. Dabei wird das heiße Gas durch den kühleren Regenerator hindurch gedrückt und gibt Wärme an diesen ab. Im unteren kalten Bereich wird das Gas gekühlt. Der Zyklus beginnt von vorn.

## 7. Förderung und Beratung

### Förderung

Die Investition in Technologien der Abwärmenutzung wird von verschiedenen Institutionen in Deutschland und Sachsen gefördert. Einen aktuellen Überblick bietet die Fördermitteldatenbank des Bundesministeriums für Wirtschaft:

[www.foerderdatenbank.de](http://www.foerderdatenbank.de)

#### ➤ Richtlinie Energie und Klimaschutz (SAB – Sächsische Aufbaubank – Förderbank)

- Zuschüsse zum Beispiel für Anlagen zur Wärmerückgewinnung, Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen, Anlagen zur effizienten Kälteerzeugung, Sorptionswärmepumpen
- Internet: [www.sab.sachsen.de/euk](http://www.sab.sachsen.de/euk)
- Telefon: 0351 4910-4648

#### ➤ Energieeffizienzprogramm (KfW – Kreditanstalt für Wiederaufbau)

- Darlehen zum Beispiel für Wärmerückgewinnungsanlagen
- Internet: [www.kfw.de](http://www.kfw.de)
- Telefon: 0800 539-9001

#### ➤ Klimaschutzinitiative (BAFA – Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle)

- Zuschüsse zum Beispiel für effiziente Kälteanlagen, Mini-KWK-Anlagen
- Internet: [www.bafa.de](http://www.bafa.de)
- Telefon: 06196 908-249

Auch Energieeffizienzberatungen werden gefördert:

#### ➤ Energieberatung Mittelstand (KfW – Kreditanstalt für Wiederaufbau)

- Zuschuss für Initial- und Detailberatung
- Internet: [www.kfw.de](http://www.kfw.de)
- Telefon: 030 20264-0

#### ➤ Mittelstandsförderung - Intensivberatung/Coaching, Außenwirtschaftsberatung (SAB – Sächsische Aufbaubank – Förderbank)

- Zuschuss z.B. für Energieberatung
- Internet: [www.sab.sachsen.de](http://www.sab.sachsen.de)
- Telefon: 0351 4910-4910

### Sächsischer Gewerbeenergiepass

Vor der Umsetzung von konkreten Energieeffizienzmaßnahmen sollte immer eine Analyse der energetischen Betriebsstruktur erfolgen. Dadurch werden dem Entscheider die Hauptverbraucher im Unternehmen aufgezeigt und entsprechend passende Maßnahmen zur Effizienzsteigerung empfohlen. Als Instrument hierfür wurde der Sächsische Gewerbeenergiepass (SäGEP) entwickelt.



Der SäGEP analysiert die Energieeffizienz eines Unternehmens. Dabei handelt es sich um eine standardisierte Detailberatung, die erfahrene und entsprechend qualifizierte Energieberater in sächsischen Industrie- und Handwerksunternehmen durchführen.

Der SäGEP garantiert ein nachhaltiges Ergebnis mit hohem Detaillierungsgrad: Auf Basis der Bewertungen aller im Betrieb existierenden Energieverbraucher und energieintensiven Produktionstechniken werden Einsparpotenziale für Wärme-, Strom- und ggf. Treibstoffverbrauch vollständig abgebildet und bewertet.

Der SäGEP bietet viele Vorteile:

- Die geprüfte Energieeffizienz steigert die Wettbewerbsfähigkeit.
- Für die Umsetzung der Verbesserungsvorschläge existieren Fördermöglichkeiten.
- Das Bewertungsverfahren orientiert sich an der ISO 50.001 für Energiemanagementsysteme.
- Das Unternehmen erhält vom Freistaat Sachsen eine Urkunde mit werbewirksamer Botschaft.
- Das Unternehmen leistet einen Beitrag zum Klimaschutz in Sachsen.

Informationen zum SäGEP:

Internet: [www.gewerbeenergiepass.de](http://www.gewerbeenergiepass.de)  
Telefon: 0351 4910-3179

## 8. Impressum

### Herausgeber

#### Sächsische Energieagentur - SAENA GmbH

Pirnaische Str. 9  
01069 Dresden

Telefon: 0351 4910-3179  
Telefax: 0351 4910-3155

E-Mail: [info@saena.de](mailto:info@saena.de)  
Internet: [www.saena.de](http://www.saena.de)

### Layout

#### media project creative network GmbH

### Redaktion

#### Sächsische Energieagentur - SAENA GmbH

#### Therm-Process-Consulting

Dr.-Ing. Jens Strack

#### DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH

Fachgebiet Gasanwendung

### Druck

#### Druckerei Wagner Verlag und Werbung GmbH

Die Sächsische Energieagentur - SAENA GmbH ist das unabhängige Kompetenz- und Beratungszentrum zu den Themen erneuerbare Energien, zukunftsfähige Energieversorgung und Energieeffizienz. Gesellschafter sind der Freistaat Sachsen und die Sächsische Aufbaubank – Förderbank –.

### Bild- und Quellenachweis

„Technologierecherche Abwärmenutzung“, DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH, Fachgebiet Gasanwendung, 2010;  
[www.abwaermeatlas-sachsen.de](http://www.abwaermeatlas-sachsen.de)

Titel: Stefan Gröschel – media project creative network GmbH, Abb. 01: thermea. Energiesysteme GmbH, Abb. 03: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Abb. 04: WätaS Wärmetauscher Sachsen GmbH, Abb. 06: Jan Felber/foto-chemnitz.de, Abb. 07: Glen Dimplex Deutschland GmbH, Abb. 08: Haase GFK-Technik GmbH, Abb. 11: Klingenburg GmbH, Abb. 12: HOWATHERM Klimatechnik GmbH, Abb. 13: © Raimond Spekking / CC-BY-SA-3.0 (via Wikimedia Commons), Abb. 14: Wieland-Werke AG, Abb. 15: TRANTER HES GmbH, Abb. 16: Wieland-Werke AG, Abb. 17: Fa. Gondzik, Abb. 18: AEL Apparatebau GmbH Leisnig, Abb. 19: Penke, Reineward & Co. GmbH, Abb. 28: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Abb. 29: ACTech GmbH, Abb. 30: Fraunhofer IGB, Abb. 31: Thermlnox Wärmetechnik FeRo GmbH & Co. KG, Abb. 32: Thorsten Urbaneck/TU Chemnitz, Abb. 33: Ingenieurbüro für Haustechnik + Energetik Prof. Reichel GmbH, Abb. 34: Solites, Abb. 35: <http://www.volksspeicher.de>, Abb. 36: AEE – Institut für Nachhaltige Technologien, Abb. 39: Solites, Abb. 40: Solites, Abb. 43: Ingenieurbüro für Haustechnik + Energetik Prof. Reichel GmbH, Abb. 44: ACTech GmbH, Abb. 49: LaTherm GmbH, Abb. 52: WS Wärmeprozessestechnik GmbH, Abb. 53: Elster GmbH, Abb. 55: WS Wärmeprozessestechnik GmbH, Abb. 57: Max Weishaupt GmbH, Abb. 58: Robur GmbH, Abb. 59: mattes engineering GmbH, Abb. 60: Vaillant Deutschland GmbH & Co. KG, Abb. 61: SorTech AG, Abb. 63: Glen Dimplex Deutschland GmbH, Abb. 68: Wikipedia/Wittkowsky, Abb. 67: GMK – Gesellschaft für Motoren und Kraftanlagen mbH, Abb. 68: Vissmann Werke, Abb. 69: Karl-Heinz Laube/pixelio.de, Abb. 72: Fraunhofer UMSICHT, Abb. 73: Fraunhofer UMSICHT, Abb. 74: <http://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Carnot-eta.PNG>

**Sächsische Energieagentur - SAENA GmbH**  
Pirnaische Straße 9, 01069 Dresden, [info@saena.de](mailto:info@saena.de)  
[www.saena.de](http://www.saena.de)