

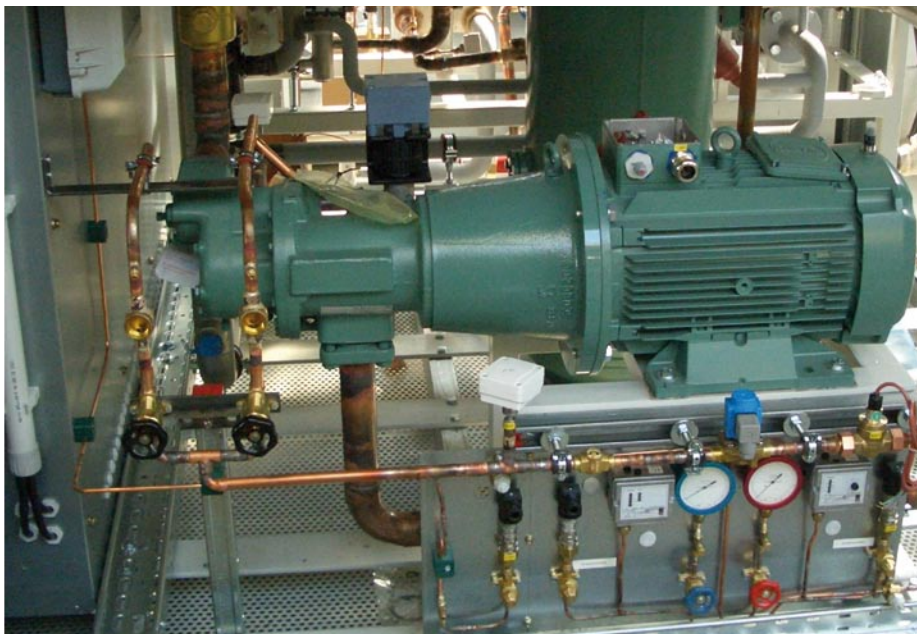
# Hochtemperaturwärmepumpen

## Aktuelle Situation und Perspektiven

**Steffen Klein,**  
Combitherm GmbH,  
Fellbach



Neben der Suche nach neuen Technologien ist die Optimierung bekannter Techniken eine Hauptaufgabe, um die latente Knappheit von Ressourcen und die Beeinträchtigungen der Umwelt zu mindern. Die Wärmepumpe hat in diesem Kontext eine wechselvolle Geschichte hinter sich. Nach einem raschen Aufstieg in den 1960er und 1970er Jahren geriet diese Technologie der Wärmeerzeugung in den Hintergrund, bevor die aktuelle Klimaproblematik und Ölpresisdiskussion sie wieder in den Fokus rückte. Dieser Artikel beschäftigt sich mit den Möglichkeiten der Wärmepumpe, Temperaturen zu erzielen, die heute nicht oder nur von speziell konstruierten Anlagen in dezidierten Anwendungsfällen erreicht werden. Konkret geht es um den Temperaturbereich von +70 °C – dem heute gängigen Temperaturniveau von Serienwärmepumpen – bis +100 °C, also kurz vor dem Siedepunkt von Wasser unter Atmosphärendruck.



Hochtemperaturanwendung mit Spezial-Schraubenverdichter

Ausgangspunkt der Überlegungen ist die Tatsache, dass es Energie auf akzeptablem Temperaturniveau und in leicht zu verarbeitenden Medien in mehr als ausreichender Fülle gibt. So liegt das durchschnittliche Temperaturniveau der Umgebungsluft in Mitteleuropa bei ca. 8 °C, wenn auch mit Schwankungen über den Tagesverlauf und in den Jahreszeiten. Gewässer liegen weltweit mit Temperaturen von +4 bis +30 °C und mehr auf einem stabileren Niveau. Betrachtet man daneben noch die geothermische Erdenergie mit einer bodennahen Temperatur von +10 bis +15 °C, ist zu erkennen, dass im Grundsatz kein Energieproblem

vorliegt, sondern eine Aufgabe, diese Energie zu nutzen, also Exergiepotentiale zu heben. Bei Wärmepumpen zur Gebäudeheizung und für niedrigere Vorlauftemperaturen sind die zuvor angeführten Wärmequellen ausreichend zur Warmegewinnung. Für Hochtemperaturwärmepumpen jedoch ist die zu überwindende Temperaturdifferenz eine Herausforderung sowohl an die Energieeffizienz als auch an das Anlagendesign. Daher werden im folgenden Parameter und Kriterien gesucht und definiert, innerhalb derer die Nutzung von Exergiepotentialen durch Wärmepumpen sinnvoll und wirtschaftlich ist.

**Thermodynamische Grundlagen** | Grundlage für die Arbeitsweise der Wärmepumpe ist der linksdrehende Carnot-Prozess. Dieser definiert sich über die Grundformel

$$\varepsilon_{CW} = \frac{T_{oben}}{T_{oben} - T_{unten}}$$

wobei sich die Temperaturen  $T_{oben}$  und  $T_{unten}$  auf Kelvin vom absoluten Nullpunkt von -273,16 °C beziehen. Der Carnot'sche Wirkungsgrad  $\varepsilon_{CW}$  stellt den idealen Prozesswirkungsgrad und damit den Benchmark zur Bewertung des real ablaufenden Prozesses dar. Dieser definiert sich bei der Wärmepumpe durch

$$\varepsilon_{WP} = \frac{\text{Wärmeleistung}}{\text{Antriebsleistung}}$$

wobei die Antriebsleistung sich im Wesentlichen auf den Verdichtungsapparat als Hauptverbraucher bezieht und Nebenantriebe je nach Analyseziel hinzu addiert werden. Die Bewertung erfolgt schließlich über den Gütegrad des Prozesses und definiert sich über

$$\eta_G = \frac{\varepsilon_{WP}}{\varepsilon_{CW}}$$

in Prozent des idealen Kreisprozesses. Zur Verdeutlichung nachfolgend ein typisiertes Beispiel:

Wärmepumpe mit Warmwasser als Wärmesenke und Kaltwasser als Wärmequelle, Referenzkältemittel R134a:



Hochtemperaturwärmepumpe mit Kolbenverdichtern

Heizwasser: +75/+80 °C  
 Wärmequelle: +30/+25 °C  
 Kälteleistung: 100 kW  
 Leistungsbedarf des Verdichters: 44 kW  
 resultierende Heizleistung: 144 kW

$$\varepsilon_{CW} = \frac{80 + 273,16}{(80 + 273,16) - (30 + 273,16)} = 7,06$$

$$\varepsilon_{WVP} = \frac{144}{44} = 3,27$$

$$\eta_G = \frac{3,27}{7,06} = 46\%$$

Allgemein lässt sich festhalten, dass die Gütegrade der realen Prozesse um die 50 % des idealen Wirkungsgrades liegen, letztlich auch abhängig von der Definition des Vergleichsprozesses. Bei entsprechender Exergieanalyse der Wirkungsgradverluste zeigt sich, dass für gewöhnlich der Verdichter als Hauptaggregat des Kälteprozesses die Hauptlast an Exergieverlusten trägt, dann folgen der Wärmeaustausch über Verdampfer und Verflüssiger und zu guter Letzt ist auch das Expansionsorgan zu berücksichtigen. Wenn Nebenantriebe wie Pumpen, Ventilatoren und elektrische Komponenten in die Betrachtung mit einfließen, sind auch hier Verluste zu verzeichnen, die den Gütegrad weiter senken.

Für die Auslegung von Hochtemperaturwärmepumpen sind die Exergieverluste im Kältekreis eminent wichtig, da der Prozess qua Definition ( $T_{oben}$  relativ groß) schon ein strukturelles Problem hinsichtlich der Energieeffizienz hat und somit über den Gütegrad optimiert werden muss.

**Abgrenzung Hochtemperaturwärmepumpen und aktuelle Situation** | Die weitere Betrachtung von Hochtemperaturwärmepumpen macht den Vorschlag einer Abgrenzung zu anderen Wärmepumpenarten und eine Beschreibung der



Industriewärmepumpe mit Schraubenverdichter

aktuellen Situation auf dem Herstellermarkt notwendig. Die Definition mit der zugehörigen Marktanalyse erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit und Absolutheit, sondern dient der erleichternden Orientierung.

**Hauswärmepumpen ...**

... liegen üblicherweise in einem Leistungsbereich von 2 kW für kleine Brauchwasserwärmepumpen und 50 kW bei Heizwärmepumpen in kleineren Gewerbegebäuden. Die Mehrzahl der verkauften Stückzahlen dürfte im Bereich 5-10 kW für den Gebrauch in Privathaushalten liegen. Hauswärmepumpen werden in Serienfertigung mit geringer Variationsbreite hergestellt und von örtlichen Installationsfirmen nach Katalogangaben angeboten und eingebaut. Die gängigen Warmwassertemperaturen liegen in einem Bereich von maximal +55 bis +60 °C. Viele große Heizungshersteller haben mittlerweile Fabriken zur Serienfertigung aufgebaut, Produzenten von Split- und Multisplitsystemen haben ihre Luftkühlanlagen zu Wärmepumpen umgerüstet. In der Summe gibt es eine Vielzahl von Anbietern.

**Industriewärmepumpen ...**

... haben eine Heizleistungskapazität von 20 bis 5000 kW. Als Anwendungsbereich sind alle industriellen Prozesse denkbar, die Wärme benötigen. Diese Wärmepumpen werden in typisierter Bauweise unter Rückgriff auf bewährte Einzelkomponenten und unter Berücksichtigung von Erfahrungen realisierter Projekte ausgelegt und konstruiert. In der Regel erfolgt die Abwicklung projektorientiert in enger Abstimmung mit dem Bauherrn und Architekten oder TGA-Planer. Industriewärmepumpen erreichen prozesstypische Arbeitstemperaturen von +65 bis +75 °C. Einige Hersteller von Kaltwassersätzen passen ihre Maschinen aus der Kleinserienfertigung an Wärmepumpenanwendungen an. Dane-



Mehrstufige Wärmepumpe

ben gibt es noch eine überschaubare Zahl mittelständischer Anbieter, welche die Wärmepumpen in anlagenbautypischen Lösungen an die speziellen Anwendungen anpassen.

**Großwärmepumpen ...**

... beginnen bei einer Heizleistung von 2000 kW und können durchaus Leistungen von 50000 kW und mehr erreichen. Großwärmepumpen werden häufig in Einzelfertigung hergestellt, die Komponenten können singuläre Entwicklungen für den speziellen Anwendungsfall sein. Die Errichtung dieser Großanlagen erfolgt unter Mitwirkung von Behörden bei der Genehmigung, Architekten für die benötigten Bauwerke und Fachplaner für die aufwändige Gesamtkonzeption. Großwärmepumpen können maximale Wassertemperaturen von +75 °C aufwärts erzielen, nach oben gibt es eine Schwelle beim Übertritt in den Dampfbereich bei +100 °C. Die Grenzen und Übergänge zwischen den drei Anlagenbereichen sind fließend, grundsätzlich können in allen Bereichen Hochtemperaturwärmepumpen eingesetzt werden. Es wird vorgeschlagen, ab einer Vorlauftemperatur von +70 °C von Hochtemperaturwärmepumpen zu sprechen.

**Potentiale und Anwendungsbereiche** | Die Anwendungspotentiale für Hochtemperaturen lassen sich unterteilen in Möglichkeiten auf der Wärmequellenseite (Verdampfer) zum einen und auf der Wärmesenkenseite (Verflüssiger) zum anderen. Nur wenn beide Seiten eine ausreichende Qualität aufweisen, kann man von einem Potential für Hochtemperaturwärmepumpen sprechen.

**Potentiale auf der Wärmequellenseite**

Wie eingangs erwähnt, gibt es ein unerschöpfliches Exergiepotential zur Wärmenutzung aus natürlichen Quellen, welche für herkömmliche Wärmepumpen ausreichend

sind. Zur Wärmegewinnung für Hochtemperaturwärmepumpen sind diese aber in aller Regel ungenügend. Einzig Wüstengegenden mit Umgebungstemperaturen von +40 °C und höher oder sehr warme Gewässer wie der Arabische Golf in den Sommermonaten können in Betracht kommen. Diese sind aber über den Tagesverlauf instabil oder saisonalen Schwankungen der Jahreszeit unterworfen und daher nur im Einzelfall für Prozesswärme geeignet. Ähnliches gilt für geothermische und vulkanische Warmwasserquellen oder solare Systeme.

Daraus folgt unmittelbar, dass die reine Wärmegewinnung aus Umweltenergie für Hochtemperaturwärmepumpen ein eher bescheidenes Potential ergibt. Der Fokus muss sich also auf die Wärmerückgewinnung aus künstlich erzeugter Wärme richten, wo einem Prozess bereits Energie zugeführt wurde. Anstatt die Prozessabwärme ungenutzt an die Umgebung abzugeben, kann sie durch Wärmepumpen rückgewonnen werden. Abwärme auf einem für Hochtemperaturwärmepumpen nutzbaren Niveau liegt nahezu ausschließlich im industriellen Bereich oder mit Einschränkungen bei Abwässern in Wohngebieten oder in Kläranlagen vor. Daher richtet sich der Fokus für mögliche Anwendungen folgerichtig auch auf der Wärmenutzungsseite auf den Industriesektor.

**Potentiale auf der Nutzungsseite**

Wärmequelle und Wärmesenke sollten geographisch nahe beieinander liegen, um Verluste beim Energietransport zu minimieren. Das bedeutet, dass industrielle Abwärme typischerweise auch im Industriebetrieb wieder genutzt wird oder Abwasser in dem entsprechenden Wohngebiet respektive der Kläranlage. Bei größeren Heizzentralen im Megawattbereich kann auch eine Fernwärmeleitung vertretbar sein, vor allem wenn die Wärmepumpe nicht der einzige Wärmeerzeuger ist und nur der Rücklaufanhebung dient.

Neben der geographischen Nähe ist auch die zeitliche Kongruenz des Exergiepotentials und der effektiven Nutzung von Bedeutung. Dies ist in Produktionsprozessen in der Regel der Fall.

Das Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) an der Universität Stuttgart hat 2008 eine umfassende Studie zu den Potentialen von Wärmepumpen in der Industrie vorgelegt. Es kommt darin zu dem Ergebnis, dass eine Wärmeleistung von 232 Petajoule pro Jahr durch Wärmepumpen

auf einem Niveau bis +70 °C bereit gestellt werden könnten. Bis zu einem Temperaturniveau von +100 °C gibt es sogar ein Potential von 429 Petajoule/a. Somit ergeben sich hinreichende Marktchancen für Wärmepumpen im Hochtemperaturbereich.

**Konstruktionskriterien** | Die Aufgabe liegt darin, die Potentiale auf der Wärmepumpe zu identifizieren, sie in ein planerisches Konzept einzubinden und nicht zuletzt ein passendes Wärmepumpensystem zu implementieren. Letzteres soll in diesem Abschnitt näher beleuchtet werden. Betrachtet werden dabei ausschließlich Kompressionswärmepumpen.

**Leistungszahl**

Hauptkriterium für den effektiven Einsatz einer Hochtemperaturwärmepumpe ist eine Leistungszahl, die unter Berücksichtigung des Kraftwerksmixes, der Kraftwerks- und Leitungsverluste ökologisch und ökonomisch sinnvoll ist. Die Amortisationszeiten unter Berücksichtigung des Life-Cycle-Konzepts sollten dabei innerhalb 6-8 Jahren liegen, bei Großanlagen oder ideellen Ansätzen werden auch längere Zeiten akzeptiert.

Um diese Anforderungen zu erfüllen, hat sich eine Jahresarbeitszahl von 3,0 als praktikable Grenze herauskristallisiert. Bei kleinerer Jahresarbeitszahl ist der Wärmepumpeneinsatz eher schwer darstellbar, bei höheren Werten wird die Verwendung einer Wärmepumpe zunehmend vorteilhaft.

Für eine grobe Entscheidung über die Wirtschaftlichkeit von Wärmepumpen und speziell für Hochtemperaturwärmepumpen können Wärmequelleneintrittstemperatur

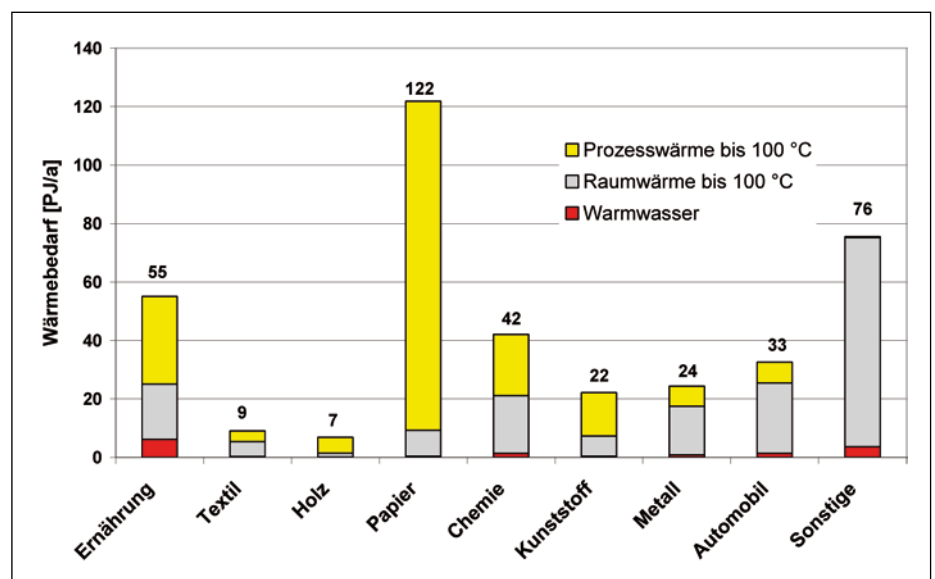


Verbundwärmepumpe mit Kolbenverdichtern

am Verdampfer und Wärmesenkenaustrittstemperatur am Verflüssiger herangezogen werden: Ist die mittlere Differenz über den Jahresverlauf größer als 50 K, wird die Jahresarbeitszahl unter 3,0 liegen und damit ungünstig sein; bei einer Differenz kleiner 50 K kann von vorteilhaften Betriebsbedingungen ausgegangen werden (siehe auch obiges Beispiel). Diese Faustformel kann die erste Richtung vorgeben, eine detaillierte Untersuchung vor Projektbeginn ersetzt sie nicht.

**Verdichter**

Kältemittelverdichter für Hochtemperaturanwendungen müssen systemimmanent in der Lage sein, hohe Druckdifferenzen zu überwinden. Mittlerweise sind nahezu alle Verdichterhersteller dazu übergegangen, neben Allroundverdichtern auch optimierte Bauformen für spezielle Anwendungsgebiete zu konstruieren. Grundsätzlich sind alle üblichen Verdichterarten wie Kolben, Scroll, Schrauben und auch mehrstufige Turboverdichter für Hochtemperaturwärmepumpen denkbar. Jedoch zeigen derzeit Verdrän-



gungsverdichter wie Kolbenkonstruktionen bei großen Druckdifferenzen strukturelle Vorteile gegenüber den Rotationsverdichtern hinsichtlich Energieeffizienz und mechanischer Stabilität. Auch die thermische Stabilität spielt eine große Rolle. Bedingt durch die hohen Verflüssigungstemperaturen ergeben sich in der Folge Druckgastemperaturen bis 150 °C, die bei der Konstruktion und Materialauswahl zu berücksichtigen sind.

Je nach Leistungsgröße und Anwendung muss eine optimierte Auswahl hinsichtlich Jahresarbeitszahl, Betriebsstabilität und mechanischer Belastbarkeit getroffen werden. Es bleibt auch abzuwarten, wie die Verdichterhersteller mit angepassten Produkten auf die Herausforderungen der Hochtemperaturwärmepumpen reagieren werden.

#### Kältemittel und Öl

Weiterer Kernpunkt bei der Konzeption von Hochtemperaturwärmepumpen ist die Auswahl des Kältemittels. Aufgrund der temperaturbedingt hohen Drucklage auf der Verflüssigerseite empfiehlt sich die Verwendung eines Niederdruckkältemittels. Die momentan verfügbaren Kältemittel mit niedriger Drucklage finden sich in der oben stehenden Tabelle.

Soweit möglich empfiehlt sich der Einsatz des umfassend bekannten und geläufigen Kältemittels R134a. Von den thermodynamischen Eigenschaften wäre Isobutan hervorragend geeignet, wird aber aufgrund der Brennbarkeit und niedrigen Zündgrenze nur in Sonderfällen zur Anwendung kommen.

Die Auswahl des Öls erfolgt in erster Linie passend zum Kältemittel. Neben der Verträglichkeit und Viskosität ist auch hier die thermische Stabilität von Bedeutung, eine Verkokung des Öls bei den hohen Druckgastemperaturen gilt es unbedingt zu verhindern.

#### Design

Da Hochtemperaturwärmepumpen ihren überwiegenden Einsatzbereich in der Industrie finden, werden auch industrielle Standards hinsichtlich Produktqualität, Ersatzteilversorgung und Service gefordert. Die hohe thermische Belastung stellt entsprechende Anforderungen an die Belastbarkeit und Langlebigkeit der Komponenten. Durch die Einbindung in Produktionsprozesse wird zudem die Integration der Mess-, Regel- und Steuerungstechnik in die Prozessleittechnik sinnvoll sein und zumindest bei komplexeren Systemen über Bus-Kommunikation erfolgen.

**Fazit** | Zusammenfassend lassen sich folgende Kriterien für Hochtemperaturwärmepumpen postulieren:

- Die Wärmequelle muss auf einem nutzbaren Temperaturniveau vorliegen, welches kontinuierlich zur Verfügung steht.
- Das Potential der Wärmequelle muss in einem vernünftigen Verhältnis zur benötigten Wärmemenge auf der Nutzungsseite stehen.
- Die Wärmesenke ist nutzungsdefiniert und stellt damit einen gegebenen, unveränderlichen Parameter dar.
- Als Faustformel für die Eignung von Hochtemperaturwärmepumpen kann man konstatieren, dass eine Temperaturdifferenz von <50 Kelvin zwischen Wärmequelleneintritt und Wärmesenkenaustritt vorteilhaft ist.

	GWP <sub>100</sub>	Sicherheitsgruppe	Kritische Temperatur	Verflüssigungstemp. bei 26 bar abs.
R134a	1300	A1	101 °C	80 °C
R227ea	2900	A1	102 °C	96 °C
R236fa	6300	A1	>120 °C	117 °C
R245fa	950	B1	154 °C	ca. 135 °C
R600a Isobutan	3	A3	135 °C	114 °C

Quelle: Bitzer-Kältemittelreport 15

- Hochtemperaturwärmepumpen finden geeignete Anwendungen überwiegend im industriellen und industrienahen Bereich.
- Die Herstellung von Hochtemperaturwärmepumpen erfordert ein hohes Qualitätsniveau und hohe Flexibilität.

Die Combitherm GmbH ([www.combitherm.de](http://www.combitherm.de)) bietet eine umfassende Palette an Hochtemperaturwärmepumpen im Bereich 20-500 kW Heizleistung an. Die Standardanlagen decken einen Bereich bis +40 °C Wärmequelleneintrittstemperatur und +80 °C Wärmesenkenaustrittstemperatur ab. Für höhere Temperaturbereiche stehen Sonderlösungen bereit.

# HOCHTEMPERATUR WÄRMEPUMPEN

FÜR DIE VERFAHRENSTECHNIK

Heizwassertemperatur bis +75 °C ✓

Wärmequellen-Eintritt bis +45 °C ✓

Leistungsbereich 20 - 500 kW ✓

Energieeffizienzklasse A ✓

Anpassung an kundenspezifische Bedürfnisse ✓



## Combi therm

APPARATE- UND ANLAGENBAU

COMBITHERM GmbH | Friedrichstraße 14 | 70736 Fellbach  
Tel. (0711) 951918-0 | Fax 951918-40 | [www.combitherm.de](http://www.combitherm.de)

Källetechnik · Wärmepumpentechnik · Wärmerückgewinnung · Energietechnik · Kältemittel-Umrüstung · Wartung & Service