

1 Grundlagen

1.1 Definitionen und Begriffe

1.1.1 Klassifizierung von Wärmepumpen

Die Einteilung und Klassifizierung von Wärmepumpentechnologien führt über geschlossene und offene Systeme (siehe Bild 1.1). Der Schwerpunkt dieses Buchs liegt auf elektrisch angetriebenen Kompressionswärmepumpen mit einem geschlossenen Kältemittelkreislauf, da dieser Typ Wärmepumpe am weitesten verbreitet und in einer Vielzahl von Grössen für verschiedene Anwendungen erhältlich ist [1], [2]. Der Begriff „Wärmepumpe“ (WP) wird hier synonym für elektrisch angetriebene Kompressionswärmepumpen verwendet.

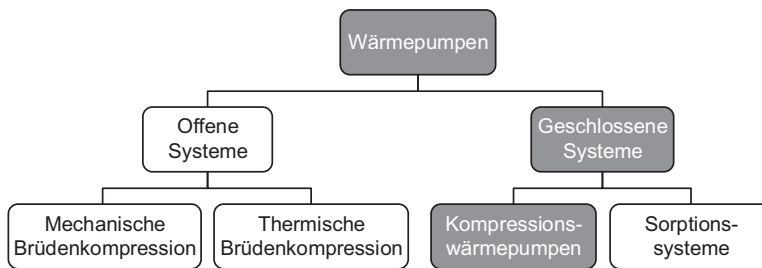


Bild 1.1: Klassifizierung von Wärmepumpen, Grafik adaptiert aus [1], mit Genehmigung von Elsevier (License Number 4432121433391)

1.1.2 Hochtemperatur-Wärmepumpe

Der Begriff „Hochtemperatur-Wärmepumpe“ (HTWP) wird häufig in Verbindung mit industriellen Wärmepumpen verwendet, hauptsächlich bei der Nutzung von Abwärme in der Prozessindustrie für die innerbetriebliche Prozesswärmeversorgung, da das Niveau der Nutzttemperaturen und auch das Temperaturniveau der Wärmequelle deutlich höher liegen als bei konventionellen Wärmepumpen für Warmwasser und Heizung im Wohnbereich [3].

Grundsätzlich bezieht sich der Begriff auf Wärmepumpen, die Wärme bei hohen Temperaturen erzeugen [4]. Allerdings ist die Terminologie über das Temperaturniveau in der Literatur nicht ganz konsistent. Tendenziell werden die Anwendung und Grenzen gegenüber herkömmlichen Wärmepumpen mit allgemein „oberhalb 100 °C“ beschrieben [4], [5]. Jakobs [6] definierte den Begriff „Industriewärmepumpen“ mit „Wärmepumpen für höhere Temperaturen von bis zu 150 °C im mittleren und hohen Leistungsbereich, die zur Wärmerückgewinnung und -aufbereitung in industriellen Prozessen, aber auch zum Heizen, Kühlen und Klimatisieren in industriellen und gewerblichen Gebäuden sowie im Geschosswohnungsbau und zur Fernwärme eingesetzt werden“. Peureux und Bobelin [7]-[11] führten den Begriff „Very High Temperature Heat Pump“ mit Senktemperaturen zwischen 100 und 140 °C ein. Auf Deutsch würde man dies mit „Höchsttemperatur-Wärmepumpe“ übersetzen. Die Firma Ochsner Energie Technik

1 Grundlagen

z. B. verwendet den Begriff „Höchsttemperatur“ für Wärmepumpen mit Vorlauftemperaturen von 95 bis 130 °C [79], [88].

Das Bild 1.2 veranschaulicht die Entwicklungsperspektiven von industriellen Wärmepumpen zur Wärmerückgewinnung in Funktion der Quellen- und Senkentemperaturen. Das Temperaturniveau in konventionellen Wärmepumpen erreicht Senkentemperaturen bis etwa 80 °C. Der grosse Wärmebedarf der Industrie im Temperaturbereich von 80 bis 140 °C führte zur Entwicklung von Wärmepumpensystemen oberhalb dieser Temperatur. Dieses Buch geht von 100 °C als Grenze für die Einteilung und Klassifizierung einer HTWP aus und unterscheidet nicht zwischen HTWP und VHTWP. Thermodynamisch betrachtet ist 100 °C auch die Temperatur, bei welcher Wasser bei 1 bar verdampft und Anwendungen zur Dampferzeugung ermöglicht.

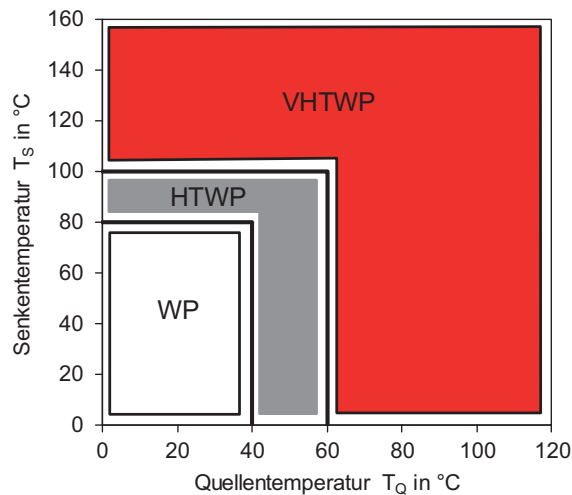


Bild 1.2: Entwicklung der Temperaturniveaus bei industriellen Wärmepumpen. WP: konventionelle Wärmepumpe bis etwa 80 °C Senktemperatur, HTWP: Hochtemperatur-Wärmepumpe (80 bis 100 °C), VHTWP: Höchsttemperatur-Wärmepumpe > 100 °C (Daten von Peureux und Bobelin [7]-[11]). Zur Wärmerückgewinnung wird Abwärme als Quelltemperatur eingesetzt, Grafik adaptiert aus [1], mit Genehmigung von Elsevier

Die Möglichkeit, industrielle Abwärme bei ausreichend hohen Temperaturen von über 70 °C zum Antrieb von thermischen Kältemaschinen zu nutzen, wie beispielsweise mit Absorptionskältemaschinen, stellt aus ökologischen und ökonomischen Aspekten eine interessante Alternative zur konventionellen Kältebereitstellung dar. Für weitere Informationen zum Thema Absorptionswärmepumpen wird an dieser Stelle auf weiterführende Literatur verwiesen [3], [12]-[20].

1.1.3 Kältemittel

Das Kältemittel ist das Arbeitsmedium der Wärmepumpe. Kältemittel sind Stoffe, die bei niedrigen Temperaturen verdampfen und gleichzeitig eine hohe innere Wärme besitzen [21]. Heute sind nur chlorfreie Kältemittel zugelassen. Diese haben keine ozonschädigende Wirkung ($ODP = 0$). Die Anforderungen an das Kältemittel sind vielfältig. Es muss chemisch stabil sein und eine hohe volumetrische Kühlleistung aufweisen, damit die Kältemittelfüllmenge klein bleibt und die Komponenten kompakt gebaut werden können. Zudem sollte das Kältemittel für die Umwelt unbedenklich sein und ein möglichst geringes Treibhauspotenzial (GWP) aufweisen, denn das Kältemittel kann bei der Befüllung der Wärmepumpe durch mögliche Leckagen und bei der Entsorgung der Wärmepumpe in die Atmosphäre austreten und zum Treibhauseffekt beitragen.

Die Wahl des Kältemittels hängt in erster Linie vom Temperaturniveau des Prozesses ab. Die Eigenschaften des Kältemittels sollten optimal auf die Prozessanforderungen abgestimmt sein, um einen hohen Wirkungsgrad zu ermöglichen.

Bild 1.3 zeigt verschiedene Kältemittel für HTWP-Anwendungen und deren Einsatzbereiche.

Die obere Anwendungsgrenze wird für subkritische Kreisprozesse (mit Kondensation) durch die kritische Temperatur gezogen. Um einen effizienten Wärmepumpenbetrieb zu gewährleisten, ist ein Abstand von 10 bis 15 K (je nach Kältemittel) von der kritischen Temperatur einzuhalten [4].

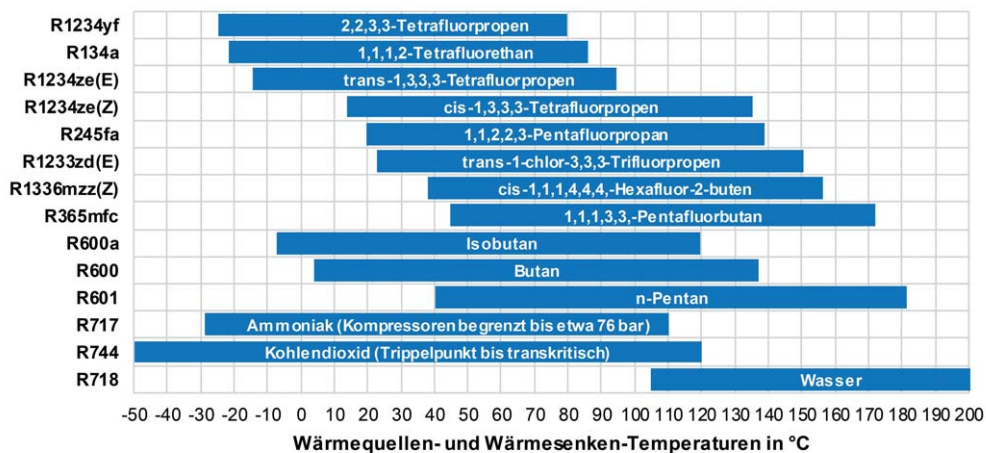


Bild 1.3: Einsatzbereiche von verschiedenen Kältemitteln für HTWP-Anwendungen (Annahmen: Untere Grenze: Temperatur bei 1 bar + 5 K Grädigkeit im Wärmeübertrager, obere Grenze: 15 K unterhalb der kritischen Temperatur, Ausnahmen: transkritische CO_2 -Prozesse bis 120 °C [22], Limit der Konstruktionsfestigkeit von Ammoniakverdichtern liegt bei etwa 76 bar bzw. 110 °C [23])

Als Kältemittel werden heute üblicherweise Hydrofluorkohlenwasserstoffe wie Pentafluorpropan (R245fa), Tetrafluorethan (R134a) und Tetrafluorpropan (R1234ze(E)) in HTWP eingesetzt. Das Treibhauspotenzial dieser Kältemittel ist jedoch vergleichsweise hoch. Im Hinblick auf die Prävention der globalen Erwärmung (F-Gase-Verordnung) werden jedoch R134a und R245fa in absehbarer Zukunft beschränkt. Daher ist die Entwicklung von alternativen Kältemitteln mit niedrigem GWP erforderlich. Natürliche Kältemittel wie Ammoniak (R717), Isobutan (R600a), Butan (R600), Kohlendioxid (R744) oder Wasser (R718) werden ebenfalls verwendet, die ein sehr geringes oder gar kein Treibhauspotenzial haben. Einige sind jedoch brennbar, giftig oder explosiv, so dass besondere Sicherheitsvorschriften zu beachten sind. Die Konstruktionsfestigkeit der heutigen R717 Verdichter liegt heute bei etwa 76 bar bzw. 110 °C [23]. R744 wird in transkritische Prozessen bis 120 °C verwendet [21].

Das Kapitel 4 widmet sich verstärkt den Kältemitteln für den Einsatz in HTWP. Es gibt einen Überblick über den Anwendungsbereich und zeigt die thermodynamischen Einsatzgrenzen auf.

1.1.4 Funktionsweise einer Wärmepumpe

Eine Wärmepumpe wandelt Wärme niedriger Temperatur in Wärme hoher Temperatur um. Dies geschieht in einem geschlossenen Kreisprozess durch ständiges Ändern des Aggregatzustands des Kältemittels (Verdampfen, Komprimieren, Verflüssigen, Expandieren) [21]. Im Gebäudebereich werden Wärmepumpen zur Heizung und Warmwasserbereitung eingesetzt. Dabei entzieht die Wärmepumpe der Umgebung (Luft, Erdreich oder Wasser als Wärmequelle) Wärme und gibt diese mittels Antriebsenergie (elektrischer Strom) in Form von Wärme an einen Heiz- bzw. Warmwasserkreislauf ab.

In industriellen Prozessen entstehen Abwärmeströme (z. B. Abwasser, Abwärme, Abluft), die aufgrund des niedrigen Temperaturniveaus nicht mehr sinnvoll im Produktionsprozess genutzt werden können und meist an die Umwelt abgegeben werden. Mithilfe einer Wärmepumpe können diese Abwärmeströme auf ein nutzbares Temperaturniveau (Nutztemperatur, Vorlauftemperatur, Senktemperatur) angehoben und wieder in den Produktionsprozess integriert werden.

Die wichtigsten Komponenten einer Wärmepumpe sind in Bild 1.4 schematisch dargestellt. Im einfachsten Fall besteht eine Wärmepumpe aus zwei Wärmeübertragern (Verdampfer und Kondensator), einem Kompressor und einem Expansionsventil (typischerweise elektronisch geregelt) sowie einem geschlossenen Kältemittelkreislauf.

Die Bauart der Wärmeübertrager richtet sich nach den Anforderungen der Wärmequelle und der Wärmesenke. Als Verdampfer und Kondensatoren werden bei industriellen Wasser/Wasser- bzw. Sole/Wasser-Wärmepumpen in der Regel Rohrbündel-Wärmeübertrager eingesetzt, bei Luft/Wasser-Geräten Lamellen-Verdampfer. Bei flüssigen, wenig verschmutzten Medien werden in der Industrie gerne Plattenwärmeübertrager eingesetzt.

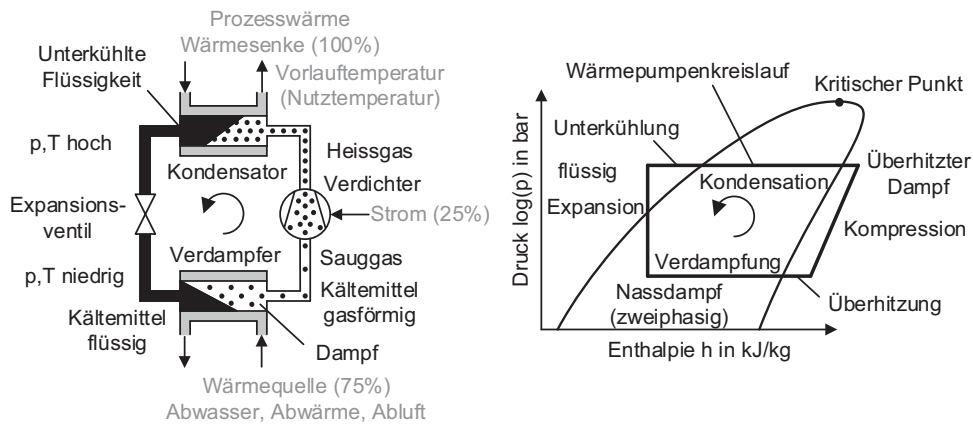


Bild 1.4: Wärmepumpenkreislauf mit den wichtigen Begriffen und Darstellung des idealen Kreisprozesses im $\log(p),h$ -Diagramm

Der Kompressor fördert und verdichtet das Kältemittel. Er wird von einem Elektromotor angetrieben und hat je nach Ausführung eine Leistungsregelung. Die folgenden Kompressoren werden hauptsächlich in Wärmepumpen eingesetzt:

- Rollkolbenverdichter
- Scrollverdichter
- Hubkolbenverdichter
- Schraubenverdichter
- Turboverdichter

Rollkolbenverdichter und Hubkolben werden eher im unteren Leistungsbereich eingesetzt, Scrollverdichter im kleinen bis mittleren und Schraubenverdichter im grossen Leistungsbereich. Turbokompressoren decken einen weiten Leistungsbereich ab.

Jede Wärmepumpe ist ein thermodynamischer Kreisprozess, in dem ein Kältemittel zirkuliert. Der Kreisprozess lässt sich am einfachsten im $\log(p),h$ -Diagramm (Druck-Enthalpie) darstellen. Die y-Achse zeigt den Druck des Kältemittels in einer logarithmischen Skalierung, die x-Achse weist die Enthalpie (Energieinhalt) in linearer Skalierung auf. Die Grenzkurve zeigt die Trennung zwischen flüssiger Phase und Dampf. Im Inneren der Kurve liegt das Nassdampfgebiet, wo Flüssigkeit und Dampf gemeinsam vorhanden sind. Oberhalb des kritischen Punktes, dem Scheitelpunkt der Kurve, kann zwischen Dampf und Flüssigkeit nicht mehr unterschieden werden.

Der Wärmepumpen-Kreisprozess folgt prinzipiell dem rückwärtslaufenden Carnot-Prozess. In Kapitel 2 wird auf typische Wärmepumpen-Kreisläufe näher eingegangen, welche in der Praxis bei industriellen Wärmepumpen umgesetzt werden. Dies beinhaltet auch zweistufige Prozesse (Kaskaden) oder Economiser-Schaltungen mit Zwischeneinspritzung [21]. Bei der Zwischeneinspritzung wird während des Verdichtens ein Dampf- oder Flüssigkeitsteilstrom in den Kompressor eingespritzt. Dadurch entstehen ein lokaler Kühlungseffekt und eine Erhöhung des Massenstroms, was zu einer Leistungssteigerung (mehr Wärme in der Kondensation) und höheren COPs

führt. Nebst den aufgeführten Informationen können weiter die Dichte oder, je nach Diagramm das spezifische Gewicht sowie der Dampfgehalt im Nassdampfbereich abgelesen werden.

Die effektivste Form zur Nutzung der Flüssigkeitsunterkühlung ist die direkte Unterkühlung. Bei gleicher Leistungsaufnahme steigt die Heizleistung; die zusätzliche Leistung wird der Wärmequelle entnommen. Eine zweite Möglichkeit, die Flüssigkeitsunterkühlung zu nutzen, ist der Einsatz eines internen Wärmeübertragers (IHX). Die Kältemittelflüssigkeit wird durch das Sauggas unterkühlt. Die Effizienzsteigerung ist abhängig vom eingesetzten Kältemittel, unabhängig davon steigt die Druckgastemperatur. Diese höhere Temperatur kann im Enthitzer zur stärkeren Erwärmung eines Mediums genutzt werden.

1.1.5 COP

Die Leistungszahl ist die wesentliche Effizienzkennzahl einer Wärmepumpe und gibt die abgegebene Heizleistung auf hohem Temperaturniveau (Kondensator) im Verhältnis zur aufgewendeten Antriebsleistung für die Verdichtung des Kältemittels an. Üblicherweise wird die Leistungszahl als COP (engl. Coefficient of Performance) angegeben.

Je geringer die Temperaturdifferenz (Temperaturhub) zwischen Wärme-Senkentemperatur (Nutztemperatur oder auch Vorlauftemperatur) und Wärmequellentemperatur, desto höher ist der COP. Eine Leistungszahl von 4 bedeutet daher, dass das Vierfache der aufgewendeten elektrischen Antriebsleistung in nutzbare Wärmeleistung umgewandelt wird. Die Leistungszahl ist ein Momentanwert.

Der theoretische maximale Wirkungsgrad einer Wärmepumpe wird durch den Carnot-Wirkungsgrad beschrieben:

$$\text{COP}_{\text{Carnot}} = T_S / (T_S - T_Q) = T_S / \Delta T_{\text{Hub}} \quad (1-1)$$

Mit: T_Q : Temperatur der Wärmequelle (Verdampfer)

T_S : Temperatur der Wärmesenke (Kondensator)

ΔT_{Hub} : Temperaturdifferenz (Temperaturhub) zwischen Wärmequelle und -senke
($\Delta T_{\text{Hub}} = T_S - T_Q$), alle Temperaturen in Absolutgraden K

Die Gleichung zeigt, dass die Leistungszahl nach Carnot von der Senken- und Quellentemperatur abhängt. Mit einem idealen Verdichtungszyklus ohne Verluste ist es möglich, die Carnot-Effizienz zu erreichen. In der Realität gibt es jedoch Verluste (wie z. B. Reibung im Kompressor, Wärmeabstrahlung), die einen negativen Einfluss auf die Effizienz haben. Der tatsächliche COP ergibt sich also aus dem Produkt der Carnot-Effizienz und einem Systemgütegrad η .

$$\text{COP} = \eta \cdot \text{COP}_{\text{Carnot}} \quad (1-2)$$

Mit: η : Gütegrad

Der typische Gütegrad industrieller HTWP beträgt 40 bis 60 % (siehe Bild 2.3 in Abschnitt 2.2). Wenn keine konstanten Quellen- und Senkentemperaturen vorhanden sind wie im Carnot-Prozess, sondern ein Temperaturgleit auf der Quellen- und/oder Senken-Seite, so wird der theoretische maximale Wirkungsgrad durch den Lorentz Wirkungsgrad beschrieben. Der Lorentz-

COP errechnet sich aus den jeweiligen logarithmischen mittleren Temperaturen im Verdampfer und Kondensator. Diese mittlere Temperatur wird aus der Temperatur am Ein- und Ausgang des Wärmeübertragers berechnet:

$$\text{COP}_{\text{Lorentz}} = T_{m,S} / (T_{m,S} - T_{m,Q}) \quad (1-3)$$

$$T_{m,K} = (T_{S,\text{Ein}} - T_{S,\text{Aus}}) / \ln(T_{S,\text{Ein}} / T_{S,\text{Aus}}) \quad (1-4)$$

$$T_{m,V} = (T_{Q,\text{Ein}} - T_{Q,\text{Aus}}) / \ln(T_{Q,\text{Ein}} / T_{Q,\text{Aus}}) \quad (1-5)$$

Mit: $T_{m,S}$: mittlere logarithmische Temperatur im Kondensator (Wärmesenke)
 $T_{m,Q}$: mittlere logarithmische Temperatur im Verdampfer (Wärmequelle)
 $T_{Q,\text{Ein}}$: Temperatur der Wärmequelle am Verdampfer-Eintritt
 $T_{Q,\text{Aus}}$: Temperatur der Wärmequelle am Verdampfer-Austritt
 $T_{S,\text{Ein}}$: Temperatur der Wärmesenke am Kondensator-Eintritt
 $T_{S,\text{Aus}}$: Temperatur der Wärmesenke am Kondensator-Austritt
 (alle Temperaturen in Absolutgraden K)

Ähnlich wie bei Carnot wird der Lorentz-Wirkungsgrad in der Praxis aufgrund von Verlusten aller Art nicht erreicht. Um den tatsächlichen COP zu ermitteln, muss eine Systemeffizienz berücksichtigt werden.

Bild 1.5 zeigt den Verlauf des Carnot-Wirkungsgrads einer Wärmepumpe mit sich verändernden Wärmequellen- und Senkentemperaturen. Mit niedrigerem Temperaturhub werden merklich höhere COPs erreicht. Gleichzeitig werden bei konstantem Hub mit höherer Wärmequellentemperatur (z. B. Temperaturniveau der Abwärme als Wärmequelle für die Wärmepumpe) höhere COPs erzielt.

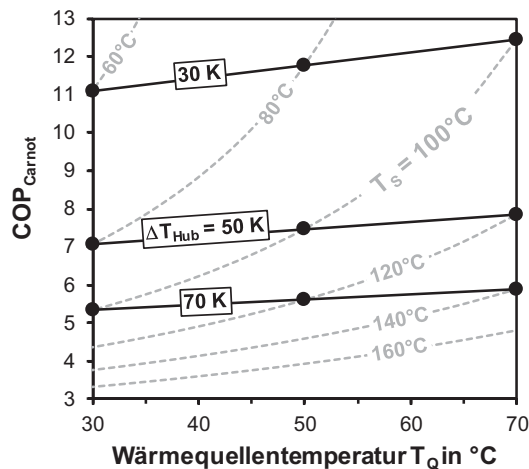


Bild 1.5: Verlauf des COP Carnot als Funktion der Nutz- und der Wärmequellentemperatur (bzw. Senken- und Quellentemperatur). Die markierten Werte verdeutlichen einen nahezu linearen COP-Anstieg bei konstantem Temperaturhub von 30, 50 und 70 K, Grafik adaptiert aus [1], mit Genehmigung von Elsevier

Die markierten Werte in Bild 1.5 zeigen jeweils einen nahezu linearen COP-Anstieg. Dies verdeutlicht das Potenzial industrieller Wärmepumpen zur Abwärmenutzung und Wärmerückgewinnung. Industrielle Wärmepumpen können in dieser Hinsicht einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung der Effizienz sowie zur Verringerung der CO₂-Emissionen leisten.

1.2 Wärmebedarf in der Industrie

Laut einer Studie der Internationalen Energieagentur (IEA) im Jahre 2011 [24], ist die Industrie mit 79 EJ (oder 21 944 TWh) der weltweit grösste wärmeverbrauchende Sektor. Der Wärmeverbrauch entspricht fast 46 % des globalen Gesamtenergieverbrauchs. Das durchschnittliche Wachstum liegt bei knapp 3 % pro Jahr gegenüber 61 EJ im Jahr 2000.

Wie die „HeatRoadmap“ [25] in Europa (EU-28) aufzeigt, wird die thermische Energie weitgehend aus fossilen Brennstoff-Quellen (42 % Gas, 12 % Öl, 8 % Kohle) erzeugt und nur 13 % stammen aus erneuerbaren Energien. Die Entkarbonisierung des Wärmesektors erfordert Effizienzsteigerungen (z. B. Wärmedämmung, Abwärmenutzung) und den Ersatz von fossilen Brennstoffen durch erneuerbare Energien.

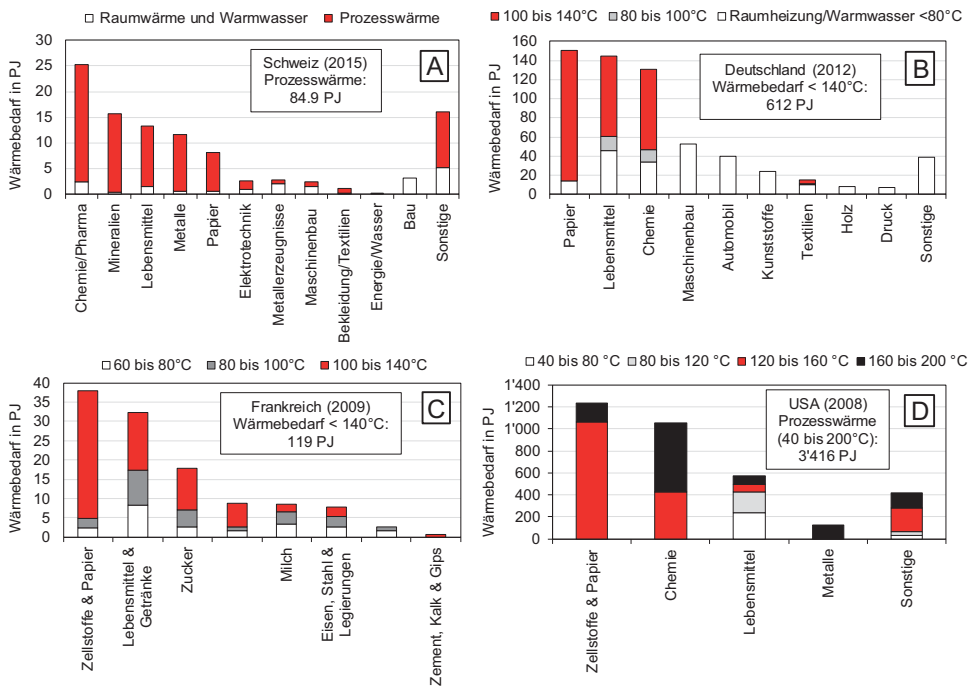


Bild 1.6: Theoretisches Potenzial für HTWP in verschiedenen Industriezweigen, aufgeteilt nach Temperaturbereichen der Prozesswärme, welche mit industriellen Wärmepumpen erreicht werden können. (A) Schweiz [26], [27], (B) Deutschland [8], [28]-[31], (C) Frankreich [8], [10], [32], [33], (D) USA [34]. Grafik adaptiert aus [1], mit Genehmigung von Elsevier