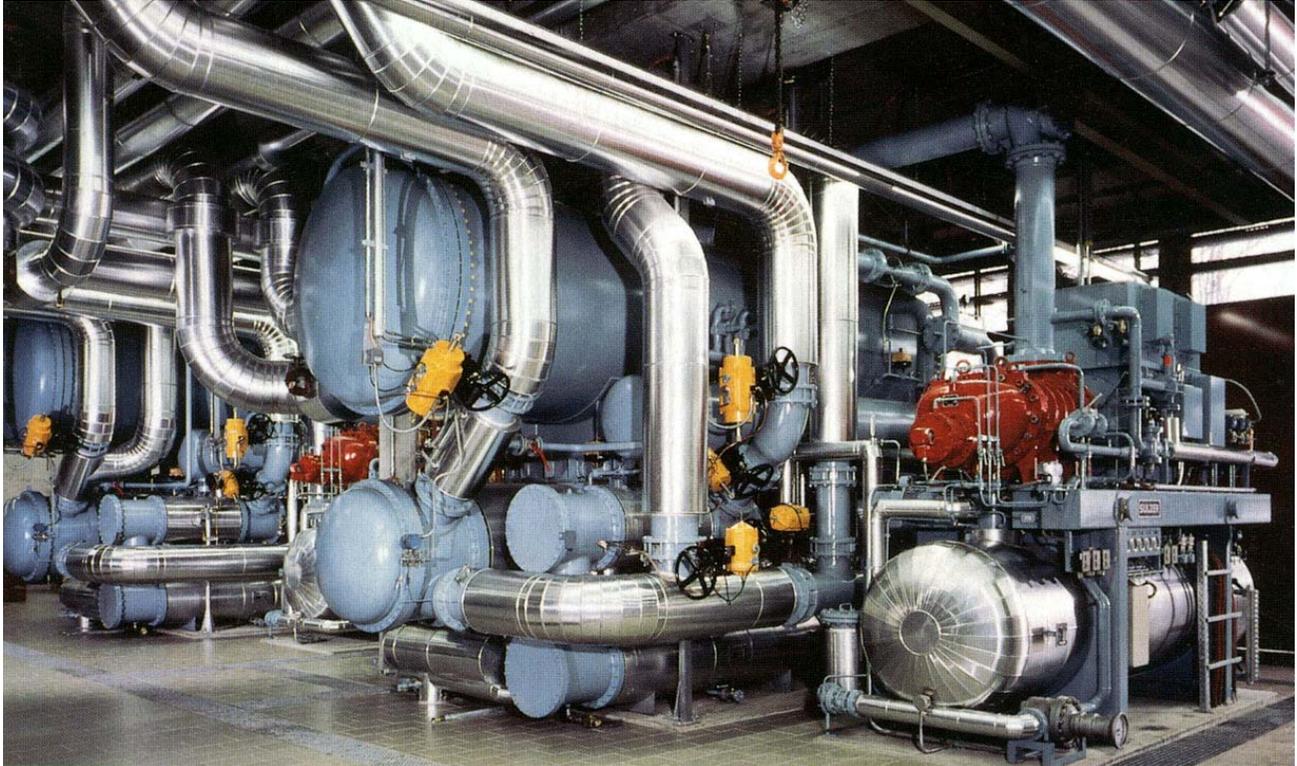


Zertifikatslehrgang ETH in angewandten Erdwissenschaften
„Geothermie – die Energie des 21. Jahrhunderts“



Wärmepumpen

Martin Zogg

1	WIE FUNKTIONIERT EINE WÄRMEPUMPE?	2
2	WAS IST VON EINER WÄRMEPUMPE ZU ERWARTEN?	4
2.1	.....Jahresarbeitszahl	4
2.2	.....Leistungszahl und Gütegrad	5
2.3	.....Abschätzen der Jahresarbeitszahl	7
3	WESHALB WÄRMEPUMPEN STATT HEIZKESSEL?	7
3.1	.....Die thermodynamisch und ökologisch sinnvollere Heizung	8
3.2	.....Stromerzeugung mit Wärme-Kraft-Kopplung oder Kombikraftwerk?	9
3.3	.....Nutzungsgrad von Wärmepumpenheizsystemen	10
4	SYMBOLVERZEICHNIS	11
5	REFERENZEN	12

1 WIE FUNKTIONIERT EINE WÄRMEPUMPE?

Unsere Umgebung (Luft, Wasser und Erdboden) enthält einen für menschliche Begriffe unerschöpflichen Wärmeverrat. Nur fließt die Wärme bekanntlich nicht von selbst von Stellen tieferer zu solchen höherer Temperatur. Dazu braucht es Wärmepumpen. Die meisten Wärmepumpen funktionieren nach dem Prinzip des Kaldampfprozesses: Bild 1. Grundidee dieses Prozesses ist die Wärmeaufnahme aus der Umgebung durch ein verdampfendes Medium (Arbeitsmittel oder Kältemittel) im Verdampfer (3) und die Wärmeabgabe dieses Mediums an die Heizung bei höherem Druck (und damit höherer Temperatur) durch Kondensation im Kondensator (2). Der höhere Druck wird durch einen Verdichter (1) erzeugt. Nach der Kondensation wird das Arbeitsmittel über ein Expansionsventil¹ (4) wieder auf den tieferen Druck gebracht. Dieser Prozess läuft nicht von selbst ab. Er benötigt zum Antrieb des Verdichters mechanische Energie. Diese wird im Allgemeinen über einen Elektromotor erzeugt. Vereinzelt werden dafür aber auch Verbrennungsmotoren eingesetzt.

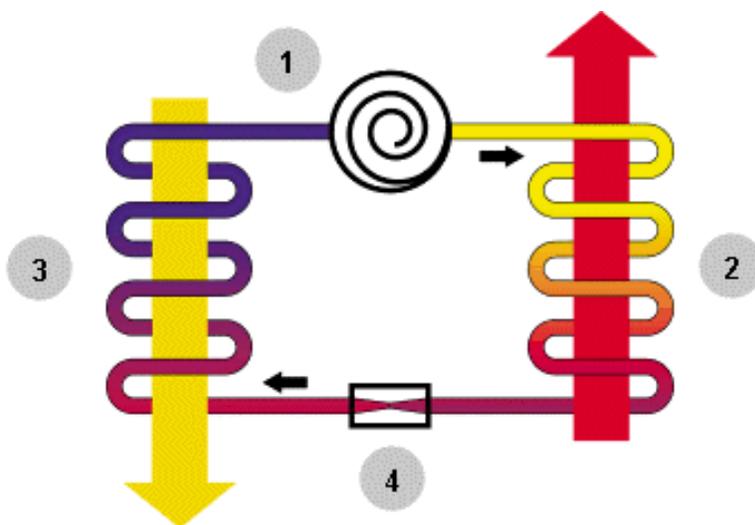
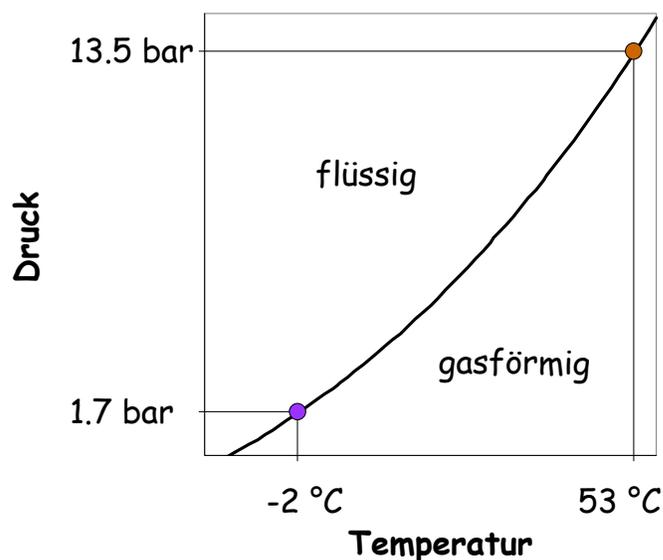


Bild 1:
Einfacher Wärmepumpenprozess (Kaldampfprozess).
1: Verdichter,
2: Kondensator,
3: Verdampfer,
4: Expansionsventil

Bild 2:
Dampfdruckkurve eines Arbeitsmittels. Eingezeichnete Punkte für das Beispiel des Wärmepumpenprozesses gemäss Bild 3



¹ Zur Steigerung der Effizienz (Energierückgewinnung) kann anstelle eines Expansionsventils auch eine Expansionsmaschine eingesetzt werden. Dabei sind allerdings die durch eine Teilverdampfung verursachten Probleme zu bewältigen.

Damit das Ganze funktioniert, benötigt man ein geeignetes Arbeitsmittel. Dieses muss nebst anderen Eigenschaften für die jeweilige Anwendung eine geeignete Dampfdruckkurve (Dampfdruck in Funktion der Temperatur) aufweisen: Bild 2. Für Wärmepumpen werden heute vorwiegend unbrennbare synthetische Fluorkohlenwasserstoffe (FKW wie z.B. R134a, R407C), Ammoniak, Kohlenwasserstoffe (z.B. Propan) und Kohlendioxid eingesetzt.

Wir wollen den Prozess mit einem Zahlenbeispiel anhand von Bild 3 noch etwas detaillierter verfolgen und uns dabei stets die Dampfdruckkurve des verwendeten Arbeitsmittels (Bild 2) vor Augen halten. Wir erkennen aus dem Bild 3, dass die Wärmepumpe vereinfachend² zwei Druckbereiche aufweist (1.7 bar auf der linken und 13.5 bar auf der rechten Seite). Das in den Verdichter (oder Kompressor) eintretende Sauggas weist bei einem Druck von 1.7 bar eine Temperatur von 3°C auf. Das gemäss dem Bild 2 gasförmige Arbeitsmittel wird im Verdichter auf 13.5 bar verdichtet. Dabei erhitzt es sich auf 73.5°C. Im Kondensator wird das Heissgas zunächst auf die Kondensationstemperatur von 53°C abgekühlt („enthitzt“, vergl. Bild 2). Den weit grösseren Wärmeanteil gibt das Arbeitsmittel dann durch Kondensation bei der konstanten Kondensationstemperatur ab. Nach der vollständigen Kondensation erfolgt noch eine Abkühlung des flüssigen Kondensats von 53°C auf 48°C (Unterkühlung des flüssigen Arbeitsmittels). Als Nutzeffekt wird das Wasser im Heizungskreislauf durch die Wärmeabgabe im Kondensator von 45°C auf 50°C erwärmt. Das unterkühlte Kondensat wird zum Expansionsventil geführt und darin auf einen Druck von 1.7 bar gedrosselt. Dabei wird das Arbeitsmittel stark abgekühlt, in unserem Beispiel auf -2°C. Der entsprechende Prozesspunkt liegt im Bild 2 auf der Dampfdruckkurve. Das Arbeitsmittel ist hier flüssig – enthält aber bereits einen geringen gasförmigen Anteil. Da es nun kälter ist als die Wärmequelle (beispielsweise Umgebungsluft mit einer Temperatur von 7°C), nimmt es von dieser Wärme auf. Durch diese Umgebungswärme wird das Arbeitsmittel im Verdampfer bei einer konstanten Temperatur von -2°C verdampft und nach dem vollständigen Verdampfen im gasförmigen Zustand noch auf 3°C erwärmt („überhitzt“). Damit ist der Kreis geschlossen.

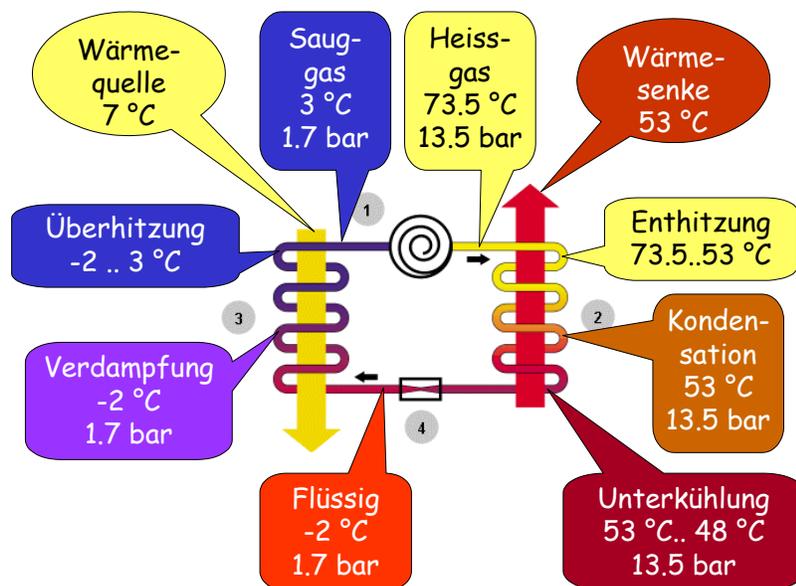


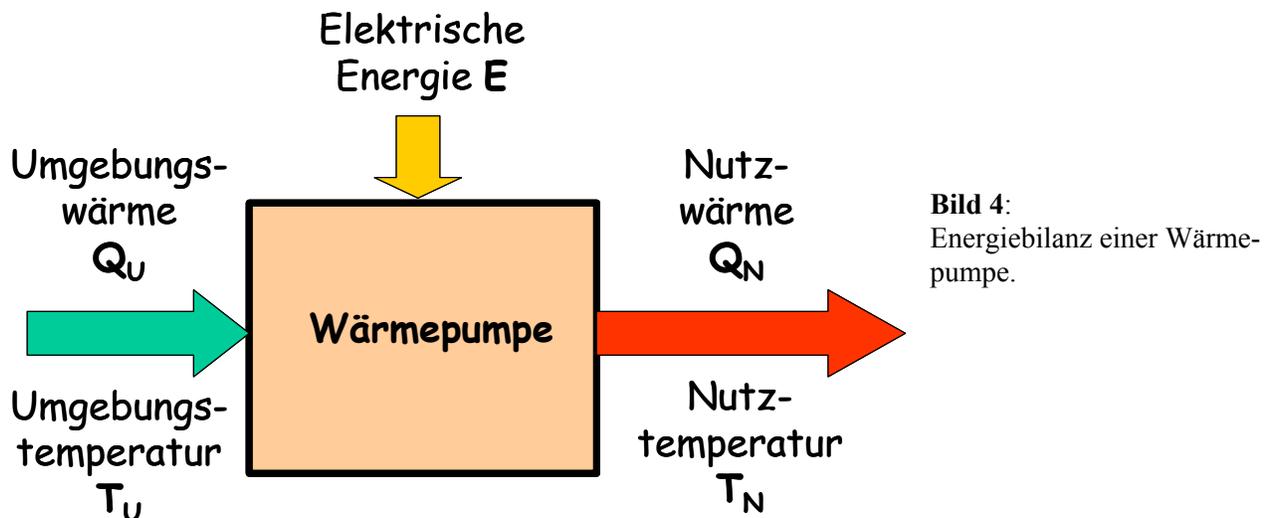
Bild 3:
Beispiel eines einfachen Wärmepumpenprozesses.

Die Differenz zwischen der Temperatur der Wärmequelle T_U und der Wärmesenke T_N bezeichnet man als Temperaturhub. In Altbauten sind infolge der hohen Heizungstemperaturen oft hohe Temperaturhübe zu überwinden. Dafür – aber auch zur Erhöhung der energetischen Effizienz – wurden kompliziertere Wärmepumpenprozesse als der im Bild 1 gezeigte entwickelt [1] und [2]. Nebst den im Allgemeinen elektrisch angetriebenen Kompressionswärmepumpen gibt es noch Absorptionswärmepumpen und Sorptionswärmepumpen. Bei diesen wird die beim Binden und Wiederaustreiben von Gasen in Flüssigkeiten (Absorption) oder in Feststoffen (Sorptions) frei werdende

² Die in Wirklichkeit in den durchströmten Teilen auftretenden Druckverluste werden dabei vernachlässigt.

bzw. benötigte Wärme genutzt. Die Energiezufuhr erfolgt hier in der Form von Wärme (Abwärme, Verbrennung von Brennstoffen). Man nennt diese Wärmepumpen deshalb auch thermisch angetriebene Wärmepumpen. Wir müssen uns aber im Folgenden auf die weitaus wichtigeren Kompressionswärmepumpen mit elektrischem Antrieb beschränken. Näheres zu den Wärmepumpenprozessen in [2].

2 WAS IST VON EINER WÄRMEPUMPE ZU ERWARTEN?



Die üblicherweise eingesetzten elektrischen Kompressionswärmepumpen benötigen zur Erzeugung der gewünschten Nutzwärme zwar einen Anteil an elektrischer Energie. Der wesentlich grössere Anteil der erzeugten Nutzwärme entzieht die Wärmepumpe der Umgebung: Bild 4.

2.1 Jahresarbeitszahl

Die durch die Wärmepumpe erzeugte Nutzwärme Q_N ist die Summe aus dem in der Regel wesentlich grösseren Anteil an Umgebungswärme Q_U und der von der Wärmepumpe benötigten elektrischen Energie E :

$$Q_N = Q_U + E \quad (1)$$

Das Verhältnis der während eines ganzen Jahres erzeugten Nutzwärme zu der von der Wärmepumpe total benötigten elektrischen Energie wird als **Jahresarbeitszahl JAZ** bezeichnet:

$$JAZ = \frac{Q_N}{E} \quad (2)$$

Als Wärmequelle für Wärmepumpen dienen Umgebungsluft, Erdwärme, Grundwasser, Seewasser, Flusswasser, Abwärme, ARA-Abwasser und Schmutzwasser der Kanalisation. Die Anteile dieser Wärmequellen und die damit in ausgeführten Anlagen inklusive aller Verluste (auch allfälliger Wärmespeicher) erreichten Jahresarbeitszahlen sind in der Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1: Anteil an den in der Schweiz im Jahr 2008 verkauften Wärmepumpen aus [3], minimale Gütegrade der Wärmepumpe bei Vorlauftemperaturen von 35°C³, im Rahmen einer umfangreichen schweizerischen Messkampagne („Feldanalyse Wärmepumpe“ FAWA) in der Zeitperiode von 1996 bis 2003 an einer grossen Zahl ausgeführter Wärmepumpenheizungen für die gesamten Heizungsanlagen⁴ gemessene mittlere Jahresarbeitszahlen und Mittelwerte der zwanzig besten Anlagen (8.5% der geprüften Anlagen – entspricht dem heutigen Stand der Technik) sowie in dieser Zeitperiode erreichte Maximalwerte (Näheres in [4], Abschnitt 8.2):

Wärmequelle	Anteile 2008	Minimaler Gütegrad η der WP für DACH-Gütesiegel	JAZ gesamte Heizungsanlage Mittel/20best	beste JAZ gesamte Heizungsanlage
Umgebungsluft	58.3 %	0.321	2.6 / 3.1	3.4
Erdwärme (Erdwärmesonden)	39.0 %	0.454 ⁵	3.4 / 5.0	5.6 ⁶
Wasser (Grund-, Fluss-, Seewasser)	2.7 %			

2.2 Leistungszahl und Gütegrad

In der Tabelle 1 wurden mittlere Messwerte aus zahlreichen realisierten Anlagen aufgeführt. Im Einzelnen können die Werte aber je nach der Vorlauftemperatur des Heizungssystems und der Temperatur der Wärmequelle erheblich variieren. Für eine genauere Analyse und eine Einsicht in die Abhängigkeiten ist es deshalb erforderlich, anstelle von Wärmen und Energien für ein ganzes Jahr momentane Wärmeströme (Wärmeleistungen) und elektrische Leistungen zu betrachten. Mit dem der Umwelt entzogenen Wärmestrom Q_{stU} , der zum Antrieb der Wärmepumpe erforderlichen elektrischen Leistung P und dem von der Wärmepumpe ans Wärmeverteilsystem abgegebenen Nutzwärmestrom Q_{stN} kann man damit analog zur Gl.(1) eine Leistungsbilanz aufstellen:

$$Q_{stN} = Q_{stU} + P \quad (3)$$

Analog zur Gl.(2) ist das Verhältnis des von der Wärmepumpe erzeugten Nutzwärmestroms Q_{stN} zu der von der Wärmepumpe aufgenommenen elektrischen Leistung P einschliesslich aller Hilfsantriebe (wie Ventilator bei Luft oder Umwälzpumpe bei Erdwärmesondenanlagen, Steuerung usw.) für die momentane Effizienz einer Wärmepumpe massgebend. Es wird als Leistungszahl oder „Coefficient of Performance“ COP bezeichnet:

$$COP = \frac{Q_{stN}}{P} \quad (4)$$

In der technischen Thermodynamik ([5] und [6]) wird gezeigt, dass sich die Leistungszahl einer idealen, verlustlosen Wärmepumpe aus der Temperatur der Wärmequelle T_u (in [K]) und der Temperatur des von der Wärmepumpe abgegebenen Nutzwärmestroms T_N (in [K]) aus der folgenden Gleichung berechnen lässt:

³ Temperatur der Umgebungsluft 2°C, Soleeintrittstemperatur aus Erdwärmesonden 0 °C

⁴ Einschliesslich aller Hilfsantriebe und Wärmeverlusten allfälliger Wärmespeicher

⁵ Ohne Berücksichtigung des Energiebedarfs für die Wärmeträger-Umwälzpumpe! Reduktion mit Berücksichtigung der Wärmepumpe um ca. 8% auf rund 0.43 für einen fairen Vergleich mit L/W-Wärmepumpen.

⁶ Wasser anstelle von „Sole“ als Wärmeträger im Kreislauf Erdwärmesonde-Wärmepumpe.

$$COP_{id} = \frac{T_N}{T_N - T_U} \tag{5}$$

Dieser Idealwert kann zwar auch mit sehr aufwändigen Prozessen nicht erreicht werden. Die Gleichung (5) zeigt aber auch für reale Wärmepumpen die Tendenz der Abhängigkeit der Leistungszahl von den Temperaturen der Wärmequelle und der Wärmesenke (Nutzwärmeabgabe). Entscheidend für den erreichten Entwicklungsstand realer Wärmepumpen ist der **Gütegrad** η als Verhältnis zwischen dem realen COP-Wert und dem maximalen COP-Wert einer verlustlosen Wärmepumpe:

$$\eta = \frac{COP}{COP_{id}} \tag{6}$$

Gute Wärmepumpen erreichen heute etwa die in der Tabelle 2 angegebenen Gütegrade. Die Werte gelten einschliesslich aller Hilfsantriebe in realen Anlagen. Sie gelten für T_U als Eintrittstemperatur der Wärmequelle und T_N als Austrittstemperatur des Nutzwärmestroms⁷.

Wärmequelle	Gütegrad η
Umgebungsluft	0.35
Erdwärme (Erdwärmesonden)	0.45
Wasser (Grund-, Fluss-, Seewasser)	0.50

Tabelle 2: Anhaltswerte für den Gütegrad moderner Wärmepumpen einschliesslich aller Hilfsantriebe von der Wärmequelle bis zum Heizungsverteilungssystem.

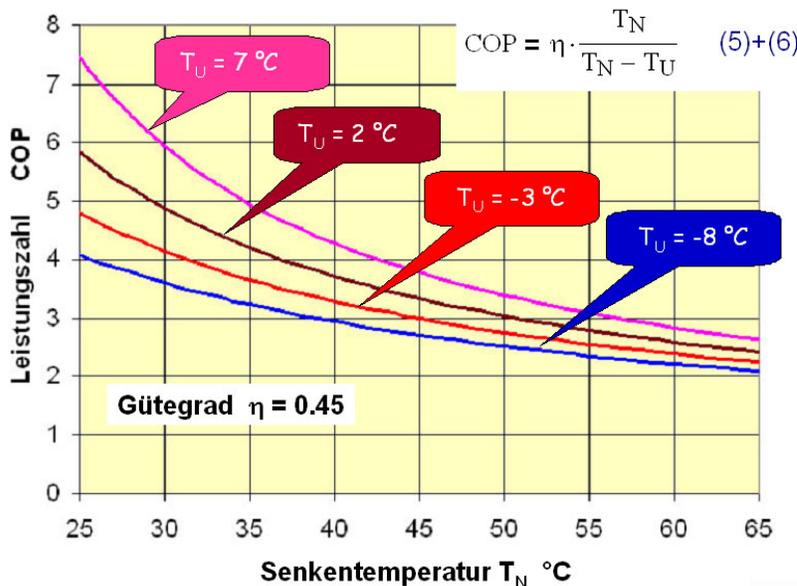


Bild 5: Abhängigkeit der Leistungszahl von der Wärmequellentemperatur T_U und von der Wärmesenktemperatur (Vorlauftemperatur Wärmepumpe) T_N für einen als konstant angenommenen Gütegrad von 0.45.

Der Gütegrad einer Wärmepumpe ist über den ganzen Betriebsbereich nur näherungsweise konstant. Bei optimaler Auslegung der Wärmepumpe wird im häufigsten Temperaturhubbereich (Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Wärmesenke) ein Maximum erreicht. Gegen höhere und tiefere Temperaturhübe ist ein Abfall des Gütegrads um bis zu 20% zu beobachten. Trotzdem lassen sich die Leistungszahlen COP guter Wärmepumpen mit den Anhaltswerten aus der Tabelle

⁷ Die Wärmequelle wird im Verdampfer der Wärmepumpe abgekühlt, das Wasser des Wärmeverteil- und Wärmespeichersystems im Kondensator erwärmt – die Temperaturen der Wärmequelle und der Wärmesenke bleiben also in der Wärmepumpe nicht konstant (Lorenz-Wirkungsgrad siehe [4], Abschnitt 2)

2 mit Hilfe der Gln. (5) und (6) für übliche Quellen und Senkentemperaturen recht gut abschätzen. Das Bild 5 zeigt die Ergebnisse für einen Gütegrad von 0.45. Wir erkennen daraus, dass Wärmepumpen umso effizienter arbeiten, je geringer die Senkentemperaturen und je höher die Quellentemperaturen sind. Wärmepumpen arbeiten also umso effizienter, je geringer der zu überwindende Temperaturhub ist.

2.3 Abschätzen der Jahresarbeitszahl

Da während einem Heiztag wie auch während der Heizsaison die Temperaturen der Wärmequelle und der Wärmesenke laufend ändern, sind auch der von der Wärmepumpe ans Heizungssystem abgegebene Wärmestrom Q_{st_N} und die aufgenommene elektrische Leistung P zeitlich variabel. Die Jahresarbeitszahl JAZ entsteht deshalb durch eine Integration über ein ganzes Jahr:

$$JAZ = \frac{\int_0^{365 \cdot 24 \cdot 3600 \cdot s} Q_{st_N} dt}{\int_0^{365 \cdot 24 \cdot 3600 \cdot s} P dt} \quad (7)$$

Diese Beziehung ist nur für Computersimulationen brauchbar. Man erhält aber eine gute Näherung für die bei durchschnittlichen Heizungsverteilsystemen zu erwartende Jahresarbeitszahl, wenn man den COP-Wert für eine mittlere Umgebungslufttemperatur bzw. eine mittlere Soletemperatur T_U von 2°C ($= 275\text{ K}$) und eine mittlere Vorlauftemperatur ans Wärmeverteilsystem T_N von 40°C ($= 313\text{ K}$) mit den Gleichungen (5) und (6) berechnet. Bei guten Fussbodenheizungen ist die mittlere Vorlauftemperatur wesentlich tiefer (\rightarrow höhere JAZ), bei älteren Radiatorheizungen höher (\rightarrow tiefere JAZ).

3 WESHALB WÄRMEPUMPEN STATT HEIZKESSEL?

Niedertemperaturwärme zur Raumheizung und Warmwasserbereitung hat einen Anteil von über 50% des Nutzenergiebedarfs der Schweiz. Mit den dafür mehrheitlich noch eingesetzten Heizkesseln können dabei Nutzungsgrade⁸ von 100% nicht ganz erreicht werden. Heute werden mit der Kombination grösserer Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen und Kompressionswärmepumpen (WKK-WP-Systeme) beim Erzeugen von Niedertemperaturwärme aus fossilen Brennstoffen bereits **Nutzungsgrade von 175% und mehr** erreicht. Dasselbe gilt für die Kombination von Kombikraftwerken mit Kompressionswärmepumpen (GuD-WP-Systeme). Ein Ersatz der Kesselheizungen durch effiziente Wärmepumpenheizungssysteme (WKK-WP oder GuD-WP) brächte somit einen erheblichen Beitrag zur Senkung des Kohlendioxidausstosses und des Bedarfs an fossilen Brennstoffen. Während sich die Wärmepumpe bei neuen Einfamilienhäusern einen Marktanteil von 75% erobert hat, haben Wärmepumpen für Altbauten mit einem jüngst auf etwa 4% angestiegenen Marktanteil noch einen erheblichen Aufholbedarf.

⁸ Verhältnis der benötigten Brennstoffenergie zur erzeugten Wärme.

3.1 Die thermodynamisch und ökologisch sinnvollere Heizung

Es ist eine Binsenwahrheit, dass man mit Heizkesseln nicht mehr Wärme an einen Verbraucher (Raumheizung, Warmwasserbereitung) abgeben kann, als bei der Verbrennung freigesetzt wird: Bild 6.

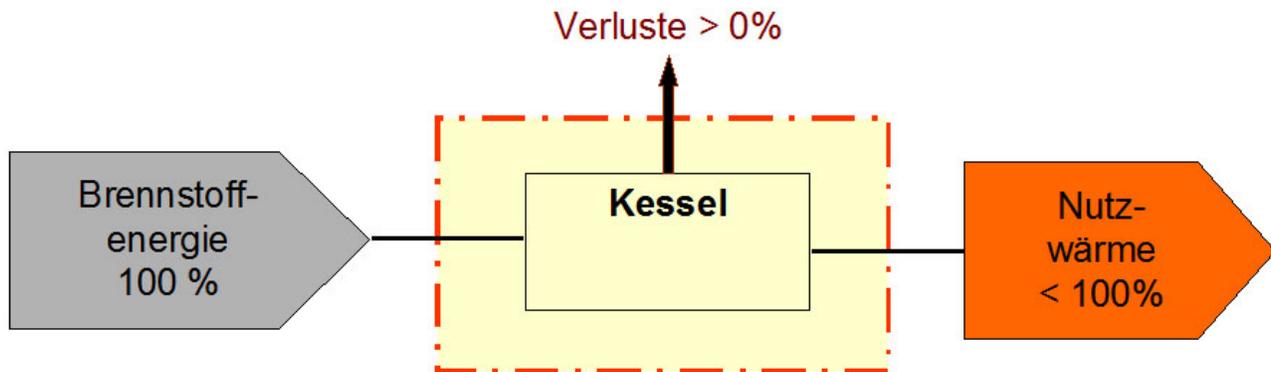


Bild 6: Schlechte Nutzung der Brennstoffenergie bei der Kesselheizung.

Der Nutzungsgrad ist das Verhältnis der an den Wärmeverbraucher (Raumheizung, Warmwasserbereitung, Niedertemperaturprozesswärme) abgegebenen Nutzwärme zu der mit dem Brennstoff zugeführten Brennstoffenergie:

$$\text{Nutzungsgrad} = \frac{\text{abgegebene Nutzwärme}}{\text{zugeführte Brennstoffenergie}}$$

Ersetzt man den Kessel gemäss dem Bild 7 durch einen Verbrennungsmotor, der den Verdichter einer Wärmepumpe über eine direkte mechanische Kopplung antreibt, sind Nutzungsgrade über 175% erreichbar. Grund dafür ist die Nutzung der Umgebungswärme mit der Wärmepumpe. Diese Systeme mit mechanischer Übertragung der Antriebsleistung von der WKK-Arbeitsmaschine (z.B. Verbrennungsmotor, Turbomaschine) an den Verdichter der Wärmepumpe sind wenig flexibel im Einsatz und haben sich auch mechanisch als problematisch erwiesen (unterschiedliche Kinetik der beiden Maschinen).

Die wesentlich bessere Lösung erhält man, wenn man die mechanische Kopplung durch eine elektrische Übertragung der Antriebsenergie über einen Generator in der WKK-Einheit, über das vorhandene Stromnetz und über Elektromotoren in den Wärmepumpen ersetzt: Bild 8. Man muss zwar durch die elektrischen Verluste in Generator, Übertragungsleitung und Elektromotor eine kleine Einbusse im Nutzungsgrad in Kauf nehmen. Dafür verschwinden die mechanischen Probleme der direkten Ankopplung der Wärmepumpe, und der Betrieb wird wesentlich flexibler.

Die Wärmepumpen können im selben Raum wie die WKK-Einheit aufgestellt sein. Meistens werden mit dem erzeugten elektrischen Strom aber externe Wärmepumpen angetrieben. Selbstverständlich zieht man keine separaten Stromleitungen von der WKK-Einheit zu den externen Wärmepumpen, sondern benützt das vorhandene Elektrizitätsverteilungsnetz. Der Nutzungsgrad und die CO₂-Einsparung bleiben dabei – abgesehen von kleinen Übertragungsverlusten – dieselben.

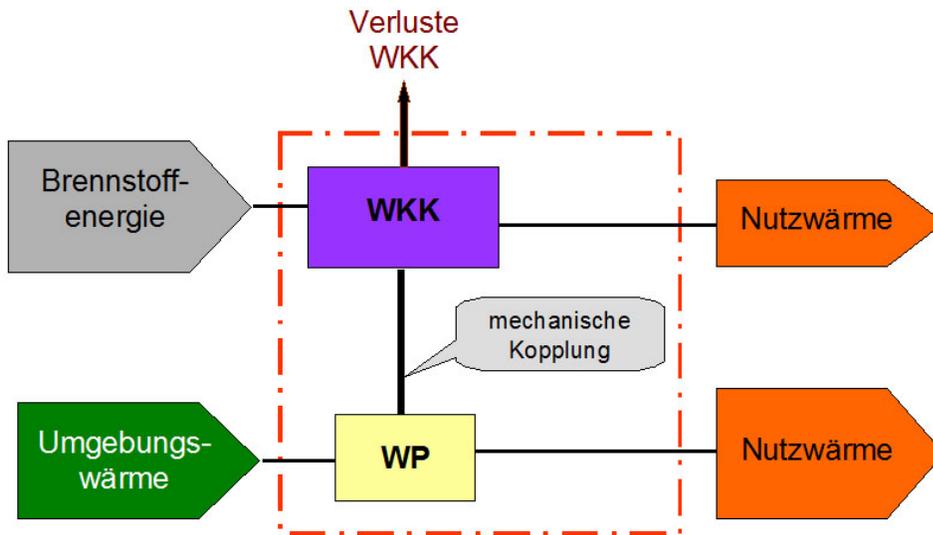


Bild 7: Kombination einer WKK-Einheit mit einer Wärmepumpe durch mechanische Kopplung (z.B. Verbrennungsmotor und Wärmepumpenverdichter mit direkter Wellenverbindung).

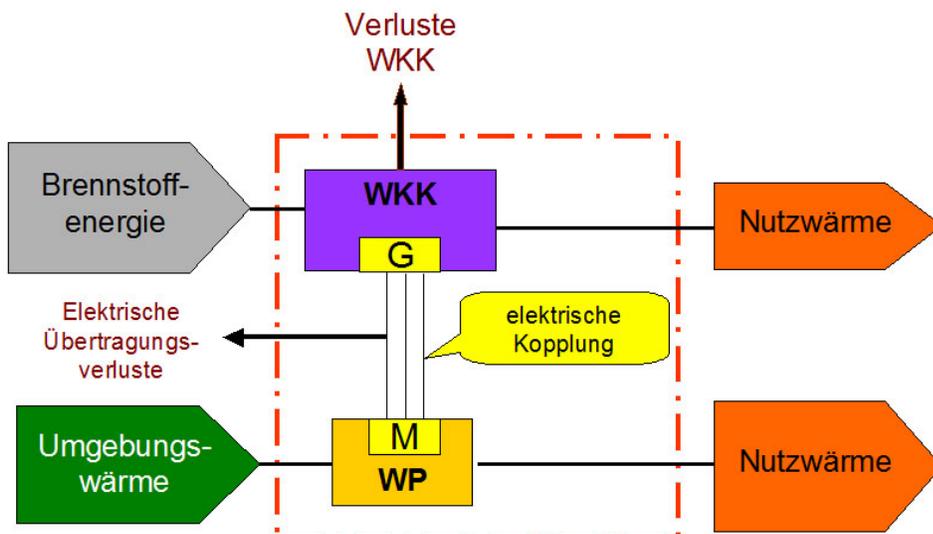


Bild 8: Kombination einer WKK-Einheit mit einer Wärmepumpe durch elektrische Kopplung.

3.2 Stromerzeugung mit Wärme-Kraft-Kopplung oder Kombikraftwerk?

Wir wollen nun die Überlegenheit der Wärmepumpenheizsysteme an je einem Beispiel für den Verbund WKK-WP und den Verbund Kombikraftwerk-WP (GuD-WP) näher erläutern. Als erstes betrachten wir ein grösseres, modernes Blockheizkraftwerk mit einem elektrischen Wirkungsgrad von 35% und einem Gesamtwirkungsgrad von 90% im Verbund mit Wärmepumpenanlagen mit einer bescheidenen Jahresarbeitszahl von 3,5: **Bild 9**. Dieses WKK-WP-System produziert aus 100% Brennstoffenergie durch die Nutzung von 85% Umgebungs-wärme eine Gesamtnutzwärme von 174%. Dabei wird eine Übertragung der elektrischen Energie im Niederspannungsnetz auf Wärmepumpen in der Nähe des BHKWs (z.B. innerhalb einer Gemeinde) mit den mittleren Übertragungsverlusten eines Niederspannungsnetzes von 2,5% berücksichtigt.

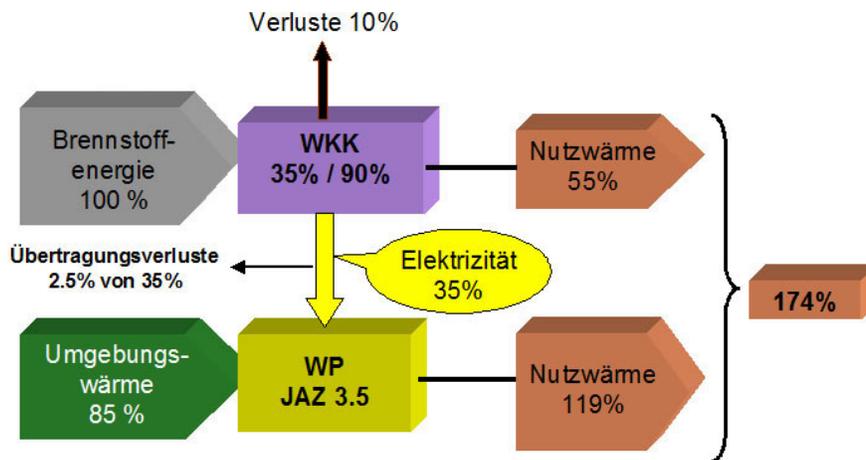


Bild 9: Kombination eines Blockheizkraftwerks mit einer Kompressionswärmepumpe. Gesamtwirkungsgrad des BHKWs 90%, elektrischer Wirkungsgrad 35%, Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe 3.5.

Mit zunehmendem elektrischem Wirkungsgrad wird die Nutzung der Abwärme aus der WKK-Anlage immer unbedeutender. Dies entspricht der erstrangigen Bedeutung einer hohen Exergie-nutzung in der WKK-Anlage. Es vermag deshalb nicht zu verblüffen, dass man mit einem hocheffizienten Kombikraftwerk (Gas- und Dampfturbinenanlage GuD) ohne jede Abwärmenutzung ebenfalls auf sehr hohe Gesamtnutzungsgrade kommt: Bild 10.

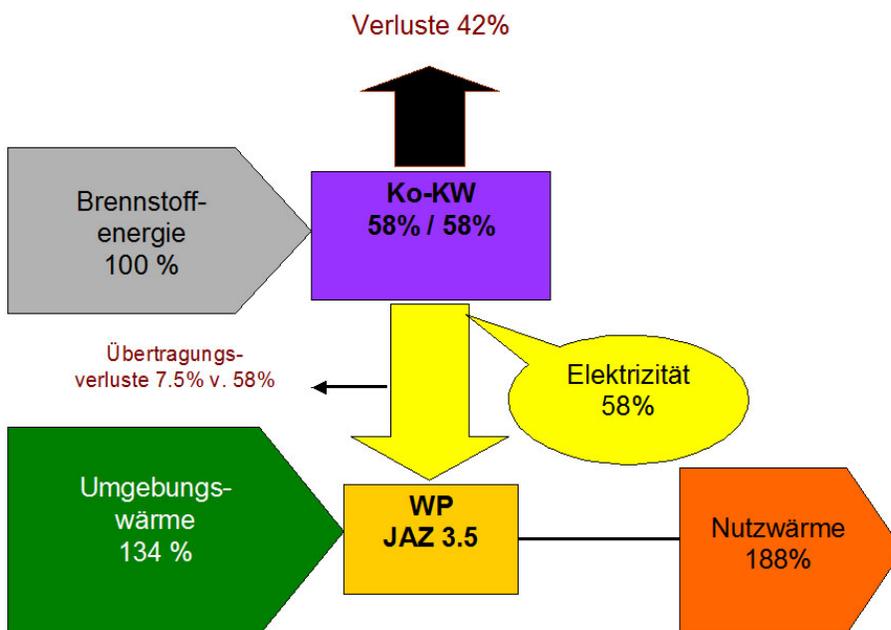


Bild 10: Heizsystem aus einem Kombi-Kraftwerk ohne Abwärmenutzung. Elektrischer Wirkungsgrad 58%, Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe 3.5.

3.3 Nutzungsgrad von Wärmepumpenheizsystemen

Die oben an einigen Beispielen verdeutlichten Aussagen werden im Bild 11 für die Fälle Blockheizkraftwerk-Wärmepumpen und Kombikraftwerk-Wärmepumpen verallgemeinert. Dieses Bild bestätigt, dass die zentrale Stromproduktion mit modernen Kombikraftwerken mit effizienten Wärmepumpen eine vergleichbare Ausnutzung der Brennstoffenergie ergibt wie grosse Blockheizkraftwerke mit höchsten elektrischen Wirkungsgraden um 40%. Kleine Blockheizkraftwerke mit elektrischen Wirkungsgraden unter 30% schneiden dagegen deutlich schlechter ab. Weitere Überlegungen zu den Systemen BHKW-WP und Kombi-KW-WP in [7] u.[8].

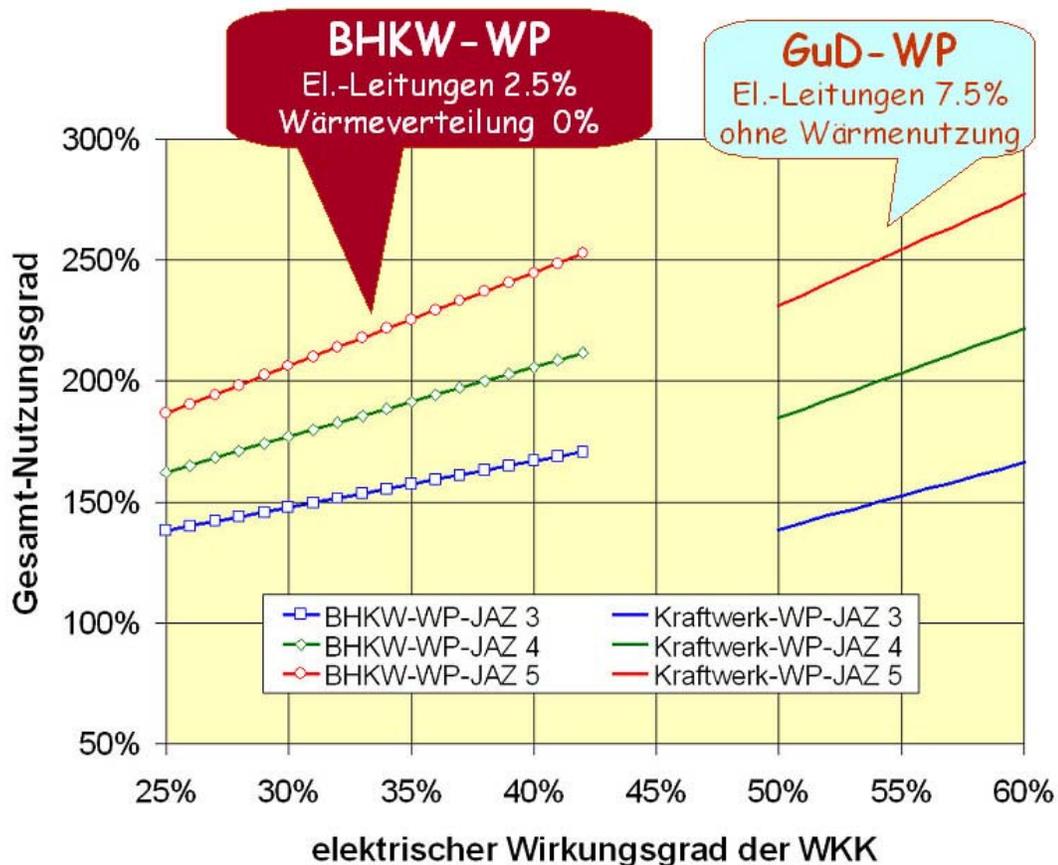


Bild 11: Gesamtnutzungsgrad von Wärmepumpenheizsystemen für dezentrale Stromproduktion in einem BHKW (linke Kurvenschar: Gesamtwirkungsgrad 90%, 2.5% Übertragungsverluste für die elektrische Energie, keine Verluste in der Wärmeverteilung) und für eine zentrale Stromproduktion in einem Kombi-Kraftwerk (Gas- und Dampfkraftwerk GuD) ohne Abwärmenutzung (rechte Kurvenschar, elektrische Übertragungsverluste 7.5%).

4 SYMBOLVERZEICHNIS

COP	-	Leistungszahl (coefficient of performance), Gl.(4)
COP _{id}	-	Leistungszahl einer idealen, verlustfreien Wärmepumpe
E	J	aufgenommene elektrische Energie
JAZ	-	Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe, Gl.(2)
P	W	aufgenommene elektrische Leistung
Q _N	J	von der Wärmepumpe abgegebene Nutzwärme
Q _U	J	von der Wärmepumpe aufgenommene Umgebungswärme
Q _{stN}	W	von der Wärmepumpe abgegebener Nutzwärmestrom
Q _U	W	von der Wärmepumpe aufgenommener Umgebungswärmestrom
t	s	Zeit
T _N	K	Austrittstemperatur der Wärmesenke
T _U	K	Eintrittstemperatur der Wärmequelle
η	-	Gütegrad der Wärmepumpe (Lorenz- oder exergetischer Wirkungsgrad) Gl. (6)

5 REFERENZEN

- [1] Zogg, M: Wärmepumpen für die Heizungssanierung: Probleme und Lösungen, Tagungsband zur 8.UAW-Tagung vom 8.Mai 2001, Bundesamt für Energie 2001, S. 11/19;
Download ab www.zogg-engineering.ch/Publi/2001_UAW8_Zogg.pdf
- [2] von Cube, H.L., Steimle, F., Lotz, H., Kunis, J.: Lehrbuch der Kältetechnik, Band1, 4. Aufl., C.F.Müller Verlag, Heidelberg 1997.
- [3] Statistiken der Fördergemeinschaft Wärmepumpen Schweiz (FWS) vom 2009-07-08:
http://www.fws.ch/zahlen_04.html
- [4] Zogg, M.: Geschichte der Wärmepumpe - Schweizer Beiträge und internationale Meilensteine, Bundesamt für Energie, Bern 2008;
Download ab www.zogg-engineering.ch/Publi/GeschichteWP.pdf
- [5] Baer, H.D.: Thermodynamik, Grundlagen und technische Anwendungen 14.Aufl., Springer, Heidelberg u.a.O. 2009.
- [6] Moran, M.J., Shapiro, H.,N.: Fundamentals of Engineering Thermodynamics, SI Version, 5th Edition, John Wiley & Sons, Chichester, New York, u.a.O. 2004.
- [7] Zogg, M: Maximale Primärenergienutzung und CO₂-Reduktion mit Wärmepumpenheizsystemen, Bundesamt für Energie 1998;
Download ab www.zogg-engineering.ch/Publi/1998_BFE_WP_Heizsyst_d.pdf
- [8] Zogg, M: Wärme und Strom aus Brennstoffen – effizient und umweltschonend, Gas-Wasser-Abwasser gwa 82(2002)12, 907/912;
Download ab www.zogg-engineering.ch/Publi/WKK_WP_Strom.pdf

Einführende Informationen zur Wärmepumpentechnik in
www.heatpumpcentre.org Menü „About heat pumps“ (englisch)

Wärmepumpenmarkt, Statistiken, Qualitätssicherung, Workshops, Weiterbildungskurse: Förder-
gemeinschaft Wärmepumpen Schweiz in www.fws.ch

Informationen über die aktuelle Wärmepumpenentwicklung in der Schweiz in
www.zogg-engineering.ch und
www.waermepumpe.ch Menü „Forschung und Entwicklung“