

2.4 Erster Hauptsatz der Thermodynamik

Der erste Hauptsatz (Axiom) formuliert das Prinzip der Energieerhaltung für die Thermodynamik:

1. Hauptsatz der Thermodynamik (Energiesatz): Energie kann nur umgewandelt werden, die Summe der Energien in einem *geschlossenen* System ist konstant.

Im Unterschied zur Mechanik spielt bei Energiebetrachtungen die Energieform **Wärme** eine Rolle und zudem muss der Begriff der Arbeit auf ein *Kontinuum* (Gas, Flüssigkeit) übertragen werden. Für die Betrachtung von Arbeitsprozessen mit Gasen können potentielle, kinetische und elektrische Energie in der Regel vernachlässigt werden, so dass die Energieform Arbeit A aus der Mechanik übernommen werden kann:

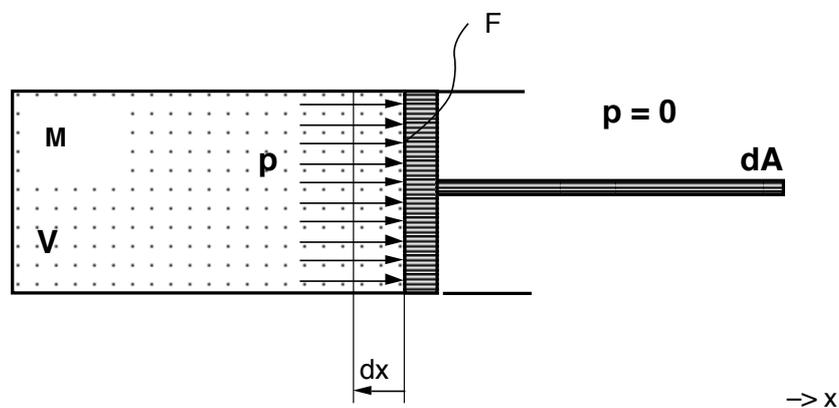
$$dA = K dx \quad (\text{bzw. } K dx \cos \alpha) \quad [J], [Nm],$$

K = Kraft, dx = Weg (infinitesimal): gerichtete Größen

Absolute Größen werden durch Grossbuchstaben gezeichnet, z.B.: $[A] = [J]$

Spezifische Größen durch Kleinbuchstaben, z.B.: $[a] = [J/kg]$

p,v-Diagramm. Der Begriff der Arbeit kann nun für thermodynamische Anwendungen auf ein Gas übertragen werden. Dazu betrachten wir einen mit einem Kolben abgeschlossenen Zylinder. Er enthalte die Masse M an Gas, das ein Volumen V bei einem Druck p einnimmt.



Ausserhalb des Kolbens sei der Druck $p = 0$. Zur Verschiebung des Kolbens um die Weglänge dx muss Arbeit gegen die Gaskraft K geleistet werden:

$$dA = K dx$$

im Gas gilt: $K = (p_i - p_a) F$ oder für $p_a = 0$ und $p_i = p$: $K = p F$

damit folgt $dA = p F dx$

Die Volumenänderung beträgt dabei

$$dV = - F dx$$

(Vorzeichenkonvention: dem System zugeführte Arbeit ist positiv)

Die Arbeit beträgt somit

$$dA = - p dV$$

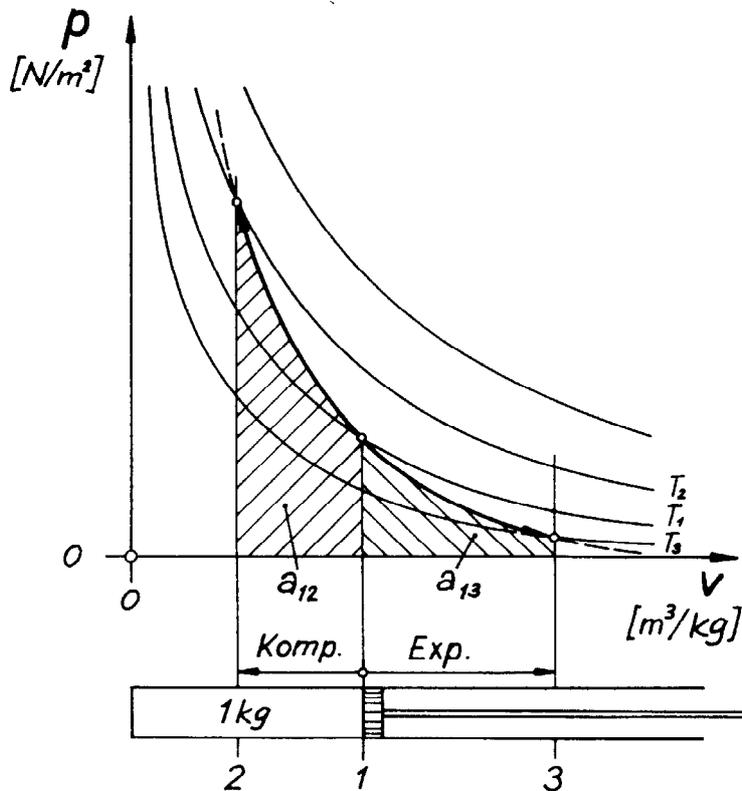
$$[A] = [J] \quad ; \quad [V] = [m^3]$$

Diese Arbeit wird als **Volumenänderungsarbeit** bezeichnet. Dividiert mit der Gasmasse m kann die *spezifische Volumenänderungsarbeit pro kg Gas* wie folgt geschrieben werden:

$$da = - p dv \qquad [a] = [J/kg]$$

$$a_{12} = - \int_{v_1}^{v_2} p dv \qquad [v] = [m^3/kg]$$

Dies ist die Formulierung des **1. HS für geschlossene Systeme**. Die Volumenänderungsarbeit kann im p,v-Diagramm dargestellt werden. Bei Kompression des Gases wird sie positiv, da Arbeit aufgewendet werden muss, bei Expansion negativ:



Darstellung der Volumenänderungsarbeit beim geschlossenen System im p,v-Diagramm.

Kompression: 1 – 2 $dv < 0 \rightarrow a_{12} > 0$

Expansion: 1 – 3 $dv > 0 \rightarrow a_{12} < 0$

Für ein offenes System wird immer eine andere Stoffmenge betrachtet. Es entsteht ein Fließprozess und die zugehörige Anordnung wird als offenes System bezeichnet. Zuerst muss der Zylinder gefüllt werden. Dabei gibt das System die Einschiebearbeit a_{ein} ab (Energiezufuhr von aussen):

$$a_{\text{ein}} = - p_1 F x_1$$

mit $F x_1 = v_1$

ist $a_{\text{ein}} = - p_1 v_1$

Die für die Kompression zu leistende Volumenänderungsarbeit ist

$$a_{12} = - \int p \, dv$$

Die Ausschiebearbeit a_{aus} muss aufgewendet werden um das Gas wieder auszuschieben:

$$a_{\text{aus}} = p_2 F x_2$$

mit $F x_2 = v_2$

ist $a_{\text{aus}} = p_2 v_2$

Die Arbeit für die gesamte Kompression in einem offenen System beträgt somit

$$a_{12} = - p_1 v_1 - \int p \, dv + p_2 v_2$$

Oder gemäss Flächenvergleich im p,v-Diagramm gilt der **1. HS für das offene System**:

$$da = v \, dp$$

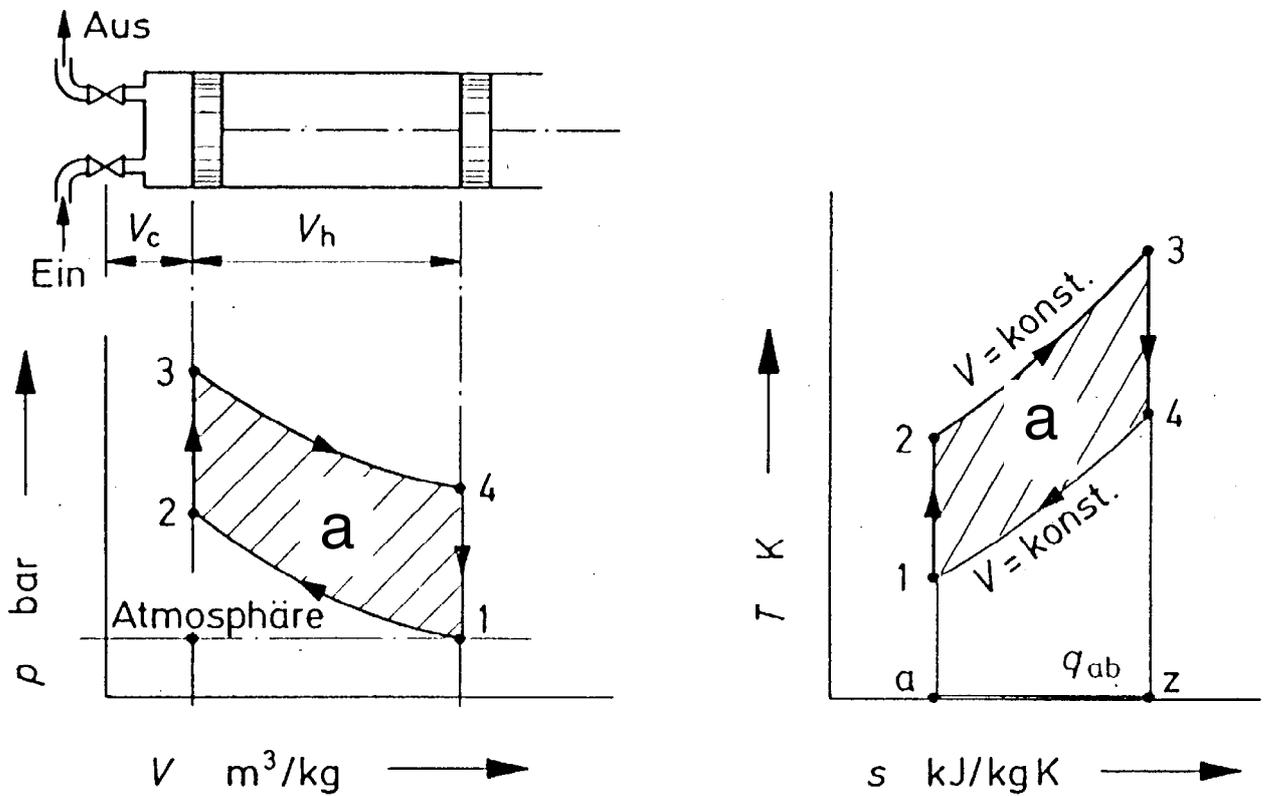
$$a_{12} = \int_{p_1}^{p_2} v \, dp$$

a_{12} gibt die technische Arbeit an, die in einem Fließprozess für die Zustandsänderung 1 – 2 aufgewendet werden muss (Kompression) bzw. frei wird (Expansion).

Für die Betrachtung thermischer Maschinen sind die **Kreisprozesse** von Bedeutung. Sie werden durch folgende Definition beschrieben: Jeder Prozess, der ein System wieder in seinen Anfangszustand bringt, ist ein Kreisprozess.

Die zugehörige Zustandslinie im p,v-Diagramm ist somit ein geschlossener Linienzug. Die umschlossene Fläche eines rechtslaufenden Kreisprozesses ist die gewinnbare Arbeit für einen Durchlauf. Bei linkslaufendem Kreisprozess muss die entsprechende Arbeit aufgewendet werden.

Als Beispiel wird im p,v-Diagramm der Ottomotor-Kreisprozess (vereinfacht als geschlossener Prozess) gezeigt. Die insgesamt während des Zyklus gewonnene technische Arbeit a erscheint im p,v-Diagramm als Fläche:



- 0 – 1 Ansaugen des Brennstoff-Luft-Gemisch aus der Atmosphäre über einen Vergaser
- 1 – 2 Verdichtung des Gemischs im Zylinder mit Anstieg von Temperatur und Druck (isentrop, $s=c$)
- 2 – 3 Zündung und Wärmezufuhr durch Verbrennung des Gemisches (isochor, $v=c$)
- 3 – 4 Expansion der Gase und Arbeitsabgabe an den Kolben (isentrop)
- 4 – 1 Wärmeabgabe durch Öffnen der Auslassventile und Auspuff der Abgase (isochor).

2.5 Funktion von Verbrennungsmotoren

Übersicht zu den ausgeführten Motorvarianten

Treibstoff	Benzin (schlecht entzündend; Antiklopfmittel)		Diesel (zündwillig)
Zündungsart	Fremdzündung		Selbstzündung
Treibstoffzuführung	Konventionell: Einspritzung von Benzin/Luft-Gemisch, alt mit Vergaser, neu mit Einspritzpumpe Sparsamere Alternative: Benzin-Direkteinspritzung		Diesel-Einspritzung mit bis über 2000 bar in komprimierte Luft, zündet sofort, Verbrennung erfolgt mit Zeitverzug, damit wird Prozess Carnot-ähnlicher
Maximalwerte nach Kompression nach Verbrennung	10 – 16 bar / 350° – 450°C 70 bar / 2500°C		30 – 50 bar / 550° – 700°C 60 – 100 bar / 2000°C
PROZESS Bauart Aufwand / Kosten	OTTO mit Ventil mittel	OTTO ohne Ventil klein	DIESEL (mit Ventil) gross
4-Takt	PW, Motorräder usw.	–	LKW, Schiffe, PW usw.
2-Takt	Evtl. in Zukunft: Wirkungsgrad höher dank 2-Takt, Emis- sionen tief dank Ventilen	Mofa, Kleinmaschinen, Boote, ...	Schiffe

Nachfolgend einige Grundlagen zu Verbrennungsmotoren (Auszug aus [Heinz Grohe 1982])

Das Arbeitsverfahren ist der Vorgang, nach dem sich im Motor die Umwandlung der Kraftstoff zugeführten Energie in mechanische Arbeit vollzieht. Man unterscheidet zwei Arbeitsverfahren:

Zweitakt- und Viertaktverfahren.

Nach diesen beiden Verfahren arbeiten sowohl Diesel- als auch Ottomotoren. Fast alle Motoren werden heute einfachwirkend ausgeführt, d. h., nur eine Kolbenseite kommt mit den Verbrennungsgasen in Berührung.

3.1.1. Viertaktverfahren

Der Begriff Takt bedeutet beim Motor soviel wie Hub. Das Viertaktverfahren erstreckt sich über 4 Hübe oder 2 Kurbelwellenumdrehungen. In den einzelnen Takten laufen im Motor folgende Vorgänge ab:

1. Takt, Ansaugen

Der Kolben bewegt sich bei offenem Einlaß- und geschlossenem Auslaßventil von OT nach UT und saugt dabei frische Ladung in den Zylinder. In diesem herrscht ein Unterdruck von wenigen zehntel Bar.

2. Takt, Verdichten

Bei geschlossenen Ventilen läuft der Kolben von UT nach OT und verdichtet die Ladung. Druck und Temperatur steigen. Ihre Endwerte betragen:

Dieselmotor etwa 30 bis 50 bar und 550 bis 700 °C

Ottomotor etwa 10 bis 16 bar und 350 bis 450 °C

3. Takt, Arbeitstakt

Die Ventile sind geschlossen. Die Verbrennung des Kraftstoffs beginnt etwa in Kolbenstellung OT. Als Folge davon steigen Temperatur und Druck und erreichen folgende Höchstwerte:

Dieselmotor etwa 2000 °C und 60 bis 100 bar

Ottomotor etwa 2500 °C und 40 bis 70 bar

Nach der Verbrennung dehnt sich das Gas aus. Nur während dieses Taktes wird vom Gas Arbeit auf den Kolben übertragen; während der drei anderen Takte muß der Kolben Arbeit am Gas leisten.

4. Takt, Auschieben

Bei geöffnetem Auslaß- und geschlossenem Einlaßventil schiebt der Kolben die verbrauchte Ladung aus dem Zylinder hinaus. Dabei herrscht im Zylinder ein geringer Überdruck.

Im Bild 3.1.1 sind die vier Takte und das zugehörige p, V -Diagramm dargestellt.

3.1.2. Zweitaktverfahren

Beim Zweitaktverfahren dauert das Arbeitsspiel nur 2 Hübe oder 1 Kurbelwellenumdrehung. Es ist aber nicht so, daß die beiden Takte Ansaugen und Aus-

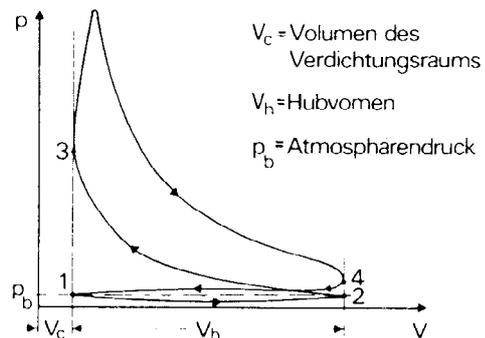
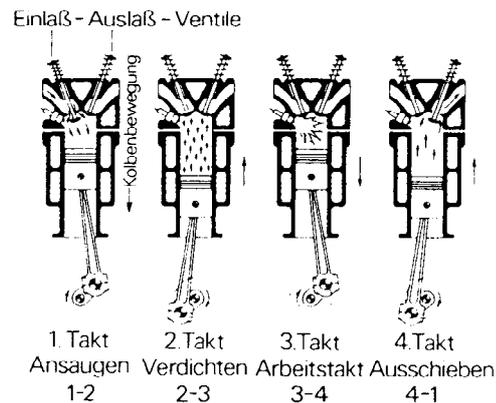


Bild 3.1.1. Viertaktverfahren

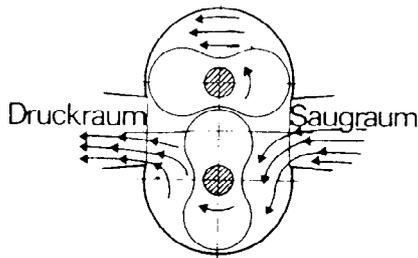


Bild 3.1.2. Spülgebläse (Drehkolbengebläse)

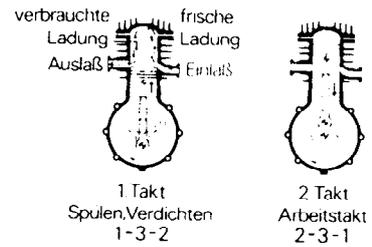


Bild 3.1.3. Zweitaktverfahren

schieben vollständig eingespart würden, sondern sie laufen in einer anderen Maschine, nämlich im Spülgebläse, ab. Beim Zweitakt-Ottomotor arbeitet die Kolbenunterseite als Spülgebläse. Da der Dieselmotor mehr Luft benötigt als die Kolbenunterseite liefern kann, baut man bei ihm ein besonderes Gebläse an (Bild 3.1.2).

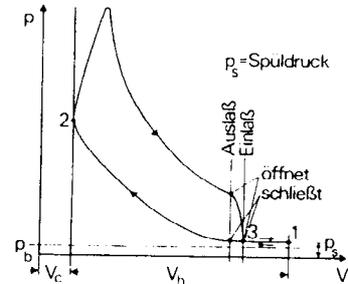
Das Arbeitsspiel des Zweitaktmotors läuft wie folgt ab:

1. Takt, Spülen und Verdichten

Der Kolben bewegt sich von UT nach OT. Solange der Kolben die Einlaß- und Auslaßschlitze noch nicht verdeckt, spült die frische Ladung die verbrauchte aus dem Zylinder hinaus. Zu diesem Zweck wird sie im Spülgebläse auf einen Druck verdichtet, der etwas größer ist als der Abgasdruck. Nach Abschluß der Schlitze durch den Kolben wird die Ladung verdichtet. Dabei entstehen Drücke und Temperaturen mit Werten, ähnlich denen beim Viertaktmotor.

2. Takt, Arbeitstakt

Die Verbrennung beginnt wie beim Viertaktmotor etwa in der OT-Stellung des Kolbens. Temperatur und Druck erreichen ungefähr dieselben Werte wie beim Viertaktmotor. Danach dehnt sich das Gas aus. Sobald der Kolben die Auslaßschlitze freigibt, pufft das verbrannte Gas in die Abgasanlage. Kurz danach öffnen sich auch die Einlaßschlitze, und die einströmende frische Ladung spült das Abgas aus dem Zylinder hinaus. In Bild 3.1.3 sind die beiden Takte und das p, V -Diagramm dargestellt.



3.2. Vergleichsprozesse

Vergleichs- oder Idealprozesse sind gedachte Kreisprozesse, nach denen eine vollkommene oder ideale Maschine arbeiten würde. Mit Hilfe dieser Prozesse lassen sich die verschiedenen Arbeitsverfahren hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit vergleichen. Die wirklichen Arbeitsprozesse weichen meist erheblich von den Idealprozessen ab, und ihre Wirtschaftlichkeit ist sehr viel geringer. Änderungen im Prozeßablauf lassen sich im Idealprozeß leichter rechnerisch untersuchen und ihr Einfluß auf die Wirtschaftlichkeit des wirklichen Prozesses abschätzen. So stellen die Vergleichsprozesse wichtige Hilfsmittel bei der Wahl des Arbeitsablaufes in der wirklichen Maschine dar.

Für den Ottomotor wurde als Vergleichsprozeß der Gleichraumprozeß und für den Dieselmotor der ge-

mischte Vergleichsprozeß oder Seiligerprozeß gewählt (Bild 3.2.1).

An einen vollkommenen oder idealen Motor werden folgende Anforderungen gestellt:

1. Alle Abmessungen sind die gleichen wie beim wirklichen Motor.
2. Im Zylinder befindet sich nur reine Ladung, kein Restgas vom vorangegangenen Arbeitsspiel.
3. Das Luftverhältnis λ ist das gleiche wie beim wirklichen Motor.
4. Der Kraftstoff verbrennt vollständig (bei $\lambda \geq 1$).
5. Die Verbrennung läuft nach genau vorgegebener thermodynamischer Gesetzmäßigkeit ab: Dieselmotor – gemischte Verbrennung, Ottomotor – Gleichraumverbrennung.
6. Zwischen dem Arbeitsgas und den umgebenden Wänden findet kein Wärmeaustausch statt.

Bild 9.2.3. Abgasturbolader

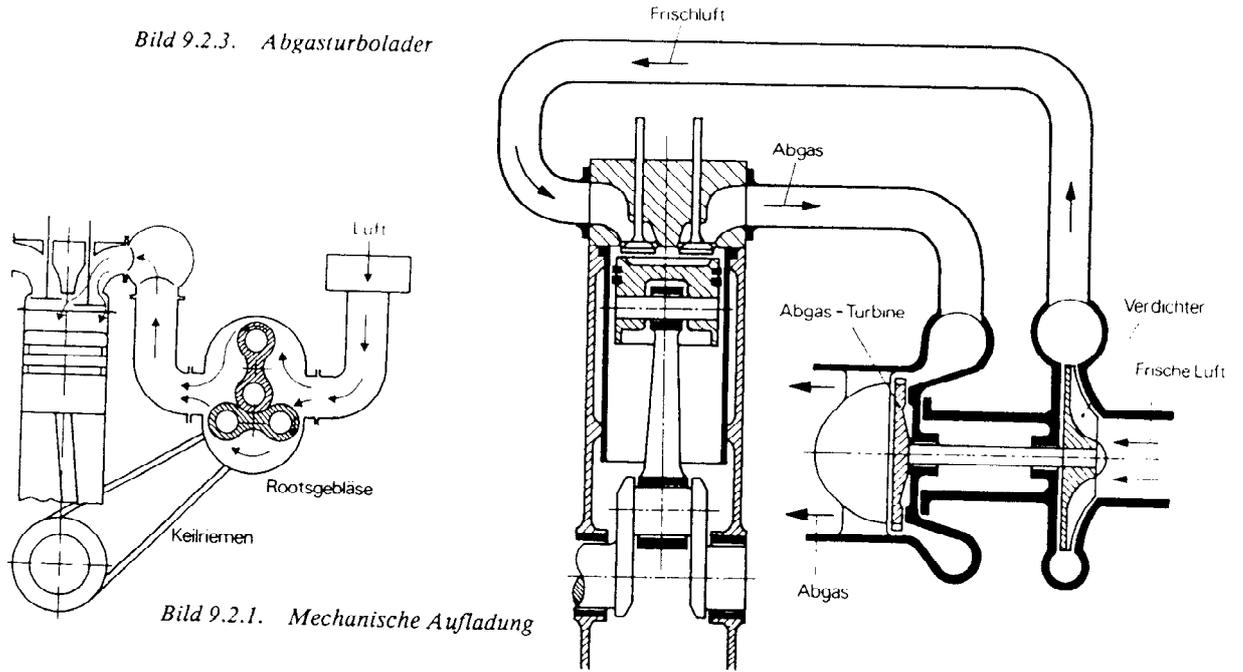


Bild 9.2.1. Mechanische Aufladung

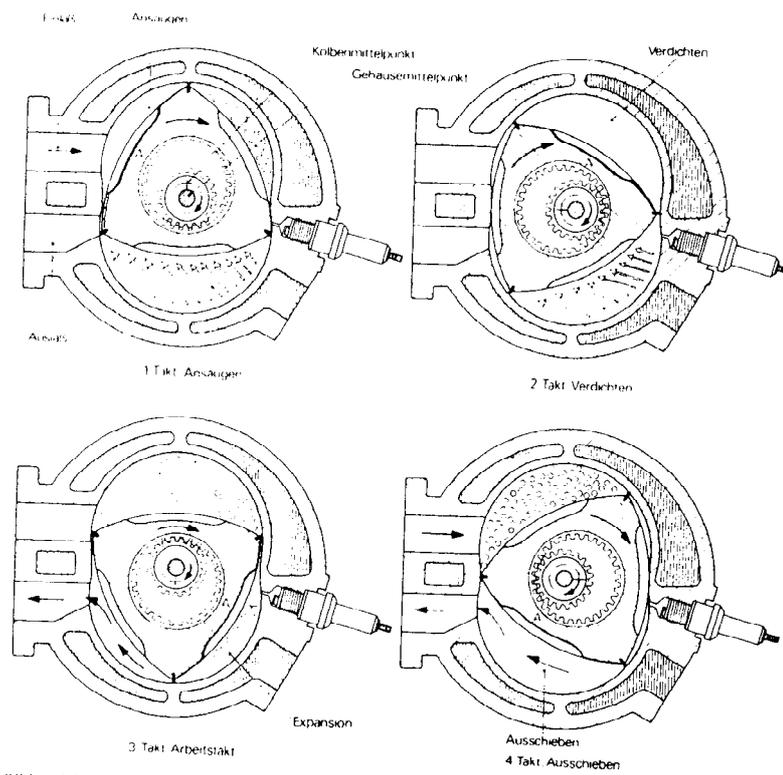


Bild 11.1.1. Arbeitsweise des Wankelmotors

2.6 T,s-Diagramm und Carnot-Prozess

Im p-V-Diagramm kann die Arbeit zwar als Fläche dargestellt werden, die zu- oder abgeführten Wärmemengen lassen sich jedoch nicht darstellen. Um dies zu ermöglichen hat Clausius als weitere Grösse den Begriff **Entropie** in die Wärmetechnik eingeführt.

Die Entropie S bei der Wärmeübertragung wird wie folgt definiert:

Entropieänderung = (Wärmezufuhr oder Wärmeabfuhr) / (Temperatur der Wärmeübertragung)

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad [dS] = [J/K] = \text{Grad der Irreversibilität; somit: } dQ = T dS \quad : \text{ Fläche im T,s-Diagramm}$$

Entropie ist keine absolute Grösse, sondern eine thermodynamische **Zustandsgrösse** des Systems und sie beschreibt den momentanen Zustand gegenüber einem Anfangszustand. Der Anfangszustand kann beliebig gewählt werden, so dass die Entropie, ähnlich wie die Celsius-Temperatur, auch negativ sein kann.

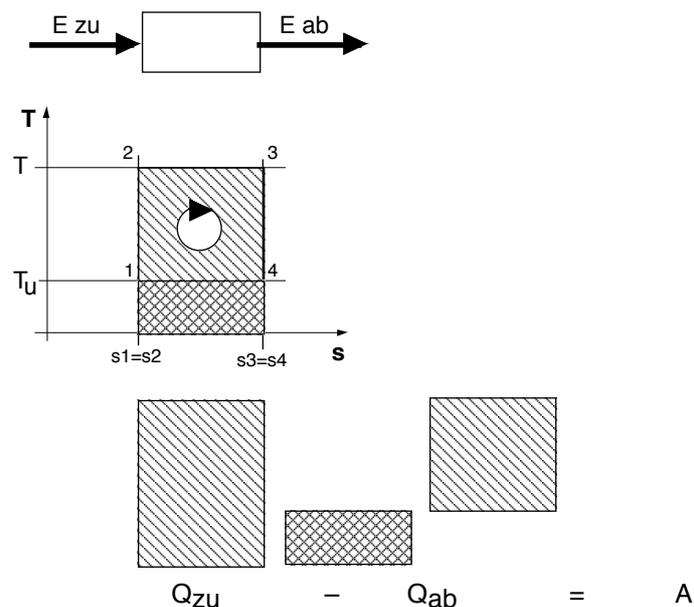
Der Ottomotor-Kreisprozess kann im T,s-Diagramm wie folgt dargestellt werden: Durch Integration der infinitesimalen Wärmeflüsse ist ersichtlich, dass dem System mehr Wärme zugeführt als abgeführt wird. Die Differenz ist, gemäss dem 1. Hauptsatz, die Arbeit A, die am Kolben abgegeben wird. Somit lassen sich im T,s-Diagramm Temperaturen, Wärmemengen und mechanische Arbeit abbilden.

$$dQ = T dS \quad \rightarrow \quad Q = \int_{s_1}^{s_2} T dS$$

1. Hauptsatz: $E_{zu} = E_{ab}$; für Wärmekraftmaschine gilt: $E_{zu} = Q_{zu} \rightarrow E_{ab} = A + Q_{ab}$

\rightarrow 1. Hauptsatz für Wärmekraftmaschine: $A = Q_{zu} - Q_{ab}$

Der **Carnot-Prozess** ist ein zu Vergleichszwecken verwendeter idealer, reversibler, Kreisprozess. Er verläuft zwischen zwei Isothermen ($T = \text{konstant}$) und zwei Isentropen ($s = \text{konstant}$).



Carnot-Prozess im T-s-Diagramm. T = Prozesstemperatur, T_u = untere Temperatur

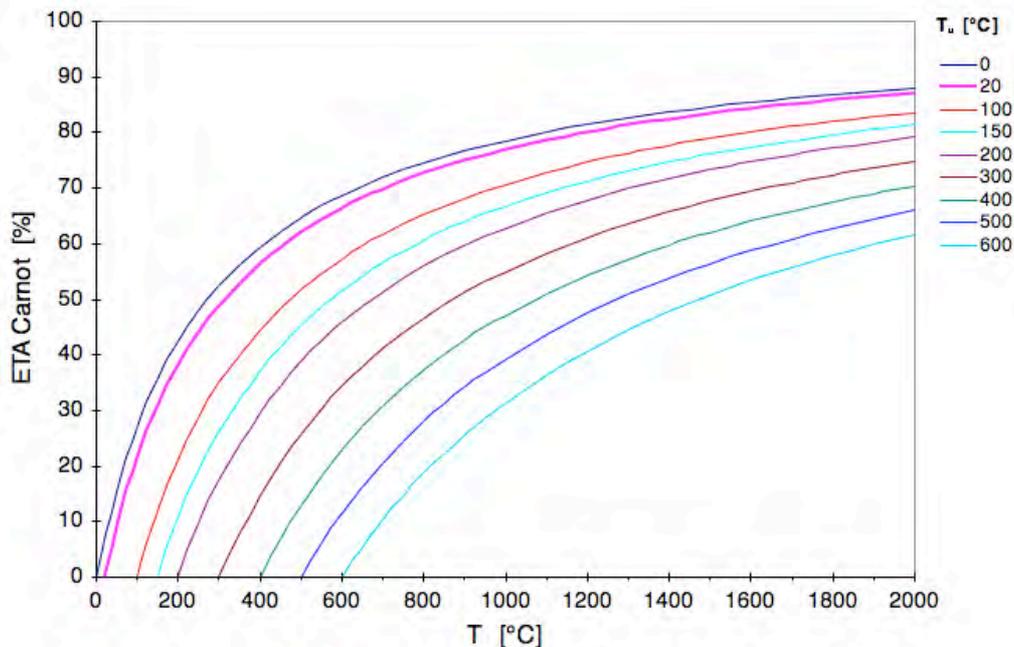
Der Carnot-Wirkungsgrad η_c ist der maximal erreichbare Wirkungsgrad eines Kreisprozesses:

Carnot-Wirkungsgrad: $\eta_c = \frac{A}{Q_{zu}} = \frac{Q_{zu} - Q_{ab}}{Q_{zu}}$

$$\eta_c = \frac{T - T_u}{T} = 1 - \frac{T_u}{T}$$

wobei T_u = Temperatur der Wärmeabfuhr im Carnot-Prozess (untere Temperatur)
 T = Temperatur der Wärmezufuhr (obere Temperatur; auch T_o genannt)

Der Wirkungsgrad des Carnot-Prozesses ist somit abhängig von der Temperaturdifferenz zwischen der heißen und kalten Seite des Prozesses. Der effektiv erreichbare Wirkungsgrad thermischer Maschinen wird deshalb in entscheidendem Mass durch die Materialtemperatur derjenigen Maschinenteile begrenzt, welche der höchsten Temperatur und gleichzeitig hohen mechanischen Beanspruchungen ausgesetzt sind (z.B. Turbinenschaufeln in Gasturbinen). Für den Wirkungsgrad ist zudem auch die untere Temperatur entscheidend. Bei reiner Kraft- bzw. Stromerzeugung ist diese zum Beispiel durch die Umgebungstemperatur bestimmt, so dass zum Beispiel ein thermisches Kraftwerk mit Wärmeabgabe in einem Kühlturm im Winter einen höheren Wirkungsgrad erzielt als im Sommer. Bei Anlagen zur Wärmekraftkopplung wird die untere Temperatur durch die Nutzttemperatur der Wärme bestimmt, so dass durch Nutzung der Wärme bei Wärmekraftkopplung zwar der Gesamtwirkungsgrad (Summe von elektrischem und thermischem Nutzen) erhöht wird, der elektrische Wirkungsgrad der Anlage jedoch abnimmt .



Wirkungsgrad des Carnot-Prozesses in Funktion der Prozesstemperatur T und der unteren Temperatur Tu

Nebst dem Carnot-Prozess existieren folgende weiteren reversiblen Kreisprozesse:

	Carnot	Stirling	Ericsson
Prozess	T = const. s = const.	T = const. v = const.	T = const. p = const.
Maschine	ummöglich	existiert	existiert

2.7 Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik

Der zweite Hauptsatz beschreibt die Wertigkeit der Energieformen, indem er die Umkehrbarkeit von gewissen Vorgängen einschränkt. Der zweite Hauptsatz ist das Natur“gesetz“ (korrekt: ein Axiom, d.h. eine nicht widerlegte Behauptung), aus dem sich die Unmöglichkeit der vollständigen Umwandlung von Wärme in Arbeit ableitet. Zur Veranschaulichung können folgende Vorgänge beschrieben werden, welche belegen, dass gewisse Vorgänge nicht umkehrbar sind:

Mechanik:

Eine Kugel befindet sich auf der einen Seite eines Tales. Sobald sie losgelassen wird, rollt sie abwärts, die potentielle Energie wird dabei in kinetische Energie umgewandelt. Auf der anderen Talseite steigt die Kugel wieder hinauf, wobei die Bewegungsenergie wieder in potentielle Energie umgesetzt wird. Im reibungsfreien Fall ist dieser Vorgang vollständig umkehrbar, d.h. der Vorgang ist reversibel. Im reibungsbehafteten Fall steigt die Kugel auf der gegenüberliegenden Seite nicht mehr gleich hoch, bis sie nach einer gewissen Zeit im Talgrund stehen bleibt. Die potentielle Energie wurde dabei vollständig in Reibungswärme umgewandelt, der Vorgang ist irreversibel, d.h. es wurde noch nie beobachtet, dass die Kugel von sich aus wieder den Berg hinauf rollt.

Thermodynamik:

Analog zum Vorgang aus der Mechanik ist auch in der Thermodynamik die Speicherung potentieller Energie und deren Umwandlung in kinetische möglich (Beispiel Gasfeder, Luftgewehr). Dagegen ist ein Ausgleichsvorgang von Wärme, z.B. beim Zusammenbringen zweier Körper unterschiedlicher Temperatur, immer irreversibel (analog gilt dies auch für Stoffaustauschvorgänge wie die Diffusion). Nach einer endlichen Zeit weisen beide Körper die gleiche Temperatur auf, eine Umkehrung des Vorgangs wurde noch nie beobachtet. Der 2. HS kann damit wie folgt formuliert werden:

2. Hauptsatz der Thermodynamik (Wertigkeit der Energie):

- Wärme kann nie von selbst von einem System niedriger Temperatur auf ein System höherer Temperatur übergehen.
- Wärme kann nicht vollständig in Arbeit umgewandelt werden, d.h. die Erzeugung mechanischer Arbeit durch eine thermische Maschine ist mit der Abgabe von Wärme verbunden.
- Allgemein: Die Umwandlung von einer Energieform in eine andere ist nicht beliebig möglich, sondern physikalischen Beschränkungen unterworfen. Energie einer geordneten Form (z.B. Bewegungsenergie) kann vollständig in Energie einer weniger geordneten Form (z.B. Wärme) übergeführt werden. Dagegen kann Energie einer ungeordneten Form nur teilweise in Energie geordneter Form übergeführt werden (z.B. Transformation von Wärme in Strom).
- Begriffe Exergie und Anergie: Der Anteil, der in Energie einer geordneten Form übergeführt werden kann, wird als **Exergie** bezeichnet, der verbleibende Rest als **Anergie**.

Irreversibel sind zum Beispiel: Wärmeübergang, Diffusion, chemische Reaktion.

Exergie und Anergie im T,s-Diagramm

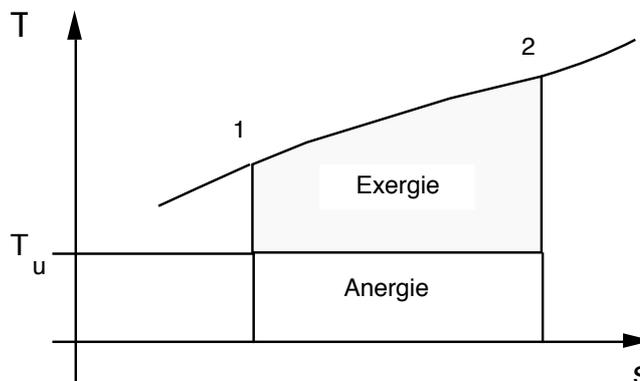
Exergie = Arbeitsfähigkeit eines Systems = maximal gewinnbare Arbeit des Systems, wenn es ins thermodynamische Gleichgewicht mit der Umgebung U gebracht wird.

Anergie = nicht in Arbeit umwandelbarer Anteil der Energie.

$$E = E_{\text{ex}} + E_{\text{an}}$$

$$E_{\text{ex}} = \int_1^2 \frac{T - T_u}{T} dQ$$

$$E_{\text{an}} = \int_1^2 \frac{T_u}{T} dQ$$



Wichtige Energieformen und ihre korrespondierenden Exergien

Energieform	Energie	Exergie
kinetische Energie	$E = \frac{1}{2} mv^2$	$E_{\text{ex}} = E$
potentielle Energie	$E = mgh$	$E_{\text{ex}} = E$
Arbeit (ohne dV)	$E = A$	$E_{\text{ex}} = E$
Arbeit (mit dV)	$E = A_{12}$	$E_{\text{ex}} = A_{12} - p_u dV$
innere Energie	$E = U$	$E_{\text{ex}} = U - U_u - T_u dS + p_u dV$
Enthalpiestrom	$\dot{E}_i = \dot{H}_i$	$\dot{E}_{\text{ex}} = \dot{H}_i - \dot{H}_u - T_u (\dot{S}_i - \dot{S}_u)$
Wärme	$E = Q = mcT$	$E_{\text{ex}} = Q \frac{T - T_u}{T}$
Reaktionsenthalpie	$E = -dH_R$	$E_{\text{ex}} = -dH_R - T_u (S - S_u)$
chemische Energie	$E = H_u$	$E_{\text{ex}} \approx H_u$
elektrische Energie/Leistung	$\dot{E}; \dot{=} = UI$	$\dot{E}_{\text{ex}} = \dot{E}$

Der Term $\frac{T - T_u}{T}$ bezeichnet den Carnot-Wirkungsgrad η_c .

3 Anwendungen der Thermodynamik

3.1 Forderungen aus dem 1. und 2. Hauptsatz

Forderung 1:

Aus dem 1. HS geht eine direkte Abhängigkeit zwischen Verbrauch an Energie und Ressourcen hervor. Die Forderung zum **Energiesparen**, d.h. zur **rationellen Verwendung von End- bzw. Nutzenergie** z.B. durch Wärmedämmung von Gebäuden, bzw. an Energiedienstleistungen z.B. durch Absenkung der Raumtemperatur, ist somit prioritär und sofort einsichtig, da der verminderte Bedarf an Endenergie auch eine direkte Einsparung an Primärenergie zur Folge hat. Eine bedürfnisorientierte Befriedigung der Dienstleistungen bietet heute noch ein erhebliches Sparpotenzial, das durch verbesserte Intelligenz der Systeme ausgeschöpft werden kann.

Forderung 2:

Die Schonung nichterneuerbarer Ressourcen verlangt nicht nur eine Verminderung des End- und Nutzenergiebedarfs, sondern gleichzeitig die **Minimierung des Einsatzes an Exergie** zur Bereitstellung der jeweils benötigten Form von Nutzenergie. Diese Forderung kann aus der **Wertigkeit** der verschiedenen Energieformen (2. HS) abgeleitet werden und sie beinhaltet auch die **Forderung nach maximalen Umwandlungswirkungsgraden**, damit die jeweils gewünschte Form von Nutzenergie mit der minimal notwendigen Menge Primärenergie bereitgestellt wird.

Die grundsätzliche Notwendigkeit des Energiesparens und auch entsprechende Massnahmen sind weitgehend bekannt und werden mehr oder weniger konsequent auch verwirklicht. Dagegen ist die Forderung zur **Minimierung des Exergieverbrauchs**, also eines möglichst hochwertigen Einsatzes der jeweiligen Energieträger, praktisch nicht im Bewusstsein der Konsumentinnen und Konsumenten von Energiedienstleistungen und die Konsequenzen aus dieser Forderung sind in der heutigen Energiepolitik noch kaum umgesetzt.

Zur Illustration können aus der Forderung 2 z.B. folgende Thesen abgeleitet werden:

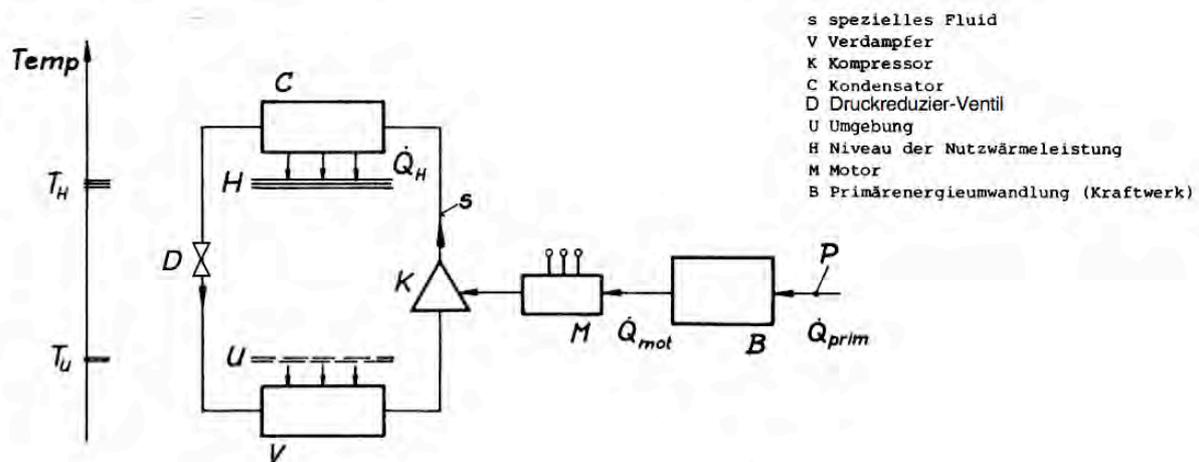
- Für reine Heizzwecke sollen keine (exergetisch hochwertigen) fossilen Brennstoffe sowie keine exergetisch hochwertige Elektrizität eingesetzt werden. Erdöl und Erdgas sind viel zu wertvoll zum Verheizen!
- Wenn fossile Brennstoffe oder Strom für Heizzwecke eingesetzt werden, soll deren hohe exergetische Wertigkeit z.B. durch Veredelung von Umweltwärme mit einer Wärmepumpe genutzt werden. Der Einsatz von Elektroheizungen widerspricht Forderung 2.
- Für mobile Anwendungen sind Verbrennungsmotoren an sich wenig sinnvoll, da der Hauptteil des Energieinhalts in nicht verwertbare Anergie (Abwärme) umgewandelt wird.

Die Bedeutung eines verbesserten Einsatzes hochwertiger Energieträger wird im folgenden anhand der Beispiele 1 bis 4 aufgezeigt.

3.2 Wärmepumpe

Beispiel 1: Ersatz einer Elektrospeicherheizung durch eine **Wärmepumpe**
(korrekt wäre die Bezeichnung Wärmekompressor, da Dampf verdichtet wird)

Zur Funktion einer Wärmepumpe: Bei Umgebungstemperatur T_U steht in der Luft oder im Wasser praktisch beliebig viel thermische Energie zur Verfügung. Eine Verwendung ist jedoch nur bei einer höheren Temperatur (allenfalls tieferen Temperatur) möglich. Durch Einsatz mechanischer (allenfalls höherwertiger thermischer) Energie (also von Exergie) in einer Wärmepumpe wird Umgebungswärme auf ein höheres Temperaturniveau angehoben und so nutzbar gemacht.



Schema einer Wärmepumpe. Quelle: Suter

Die Wärmepumpe nutzt das Phänomen, dass die Phasenänderungsenthalpie sehr gross ist und bei konstanter Temperatur übertragen werden kann, sowie die Tatsache, dass die Phasenänderungstemperatur eine Funktion des Druckes ist. Aus diesem Grund erfordert die Realisierung der Wärmepumpe zwei Druckniveaus für das Medium.

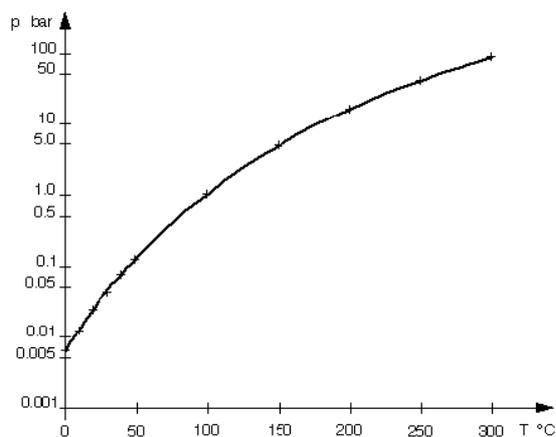
Damit die Wärme z.B. von Seewasser bei einer verwertbaren und konstanten Temperatur zur Verfügung steht, wird das **Phänomen der Verdampfung und Kondensation** ausgenutzt, insbesondere die Tatsache, dass **Taupunkt und Siedepunkt druckabhängig** sind (was durch die Dampfdruckkurve beschrieben wird) und die spezifischen **Phasenänderungsenthalpien gross** sind. Die Verdampfungswärme eines Mediums (Kältemittels) wird auf zwei unterschiedlichen Temperaturniveaus bei jeweils annähernd konstanter Temperatur zugeführt bzw. abgeführt. Die zwei Temperaturniveaus ergeben sich durch die Druckabhängigkeit der Siede- und Kondensationstemperatur (Dampfdruckkurve), so dass durch Kompressor und Druckreduzierventil die zwei gewünschten Druckniveaus eingestellt werden müssen. Der Kompressor benötigt die von aussen zugeführte mechanische Arbeit

In der Wärmepumpe kommt ein geeignetes Medium, ein sogenanntes Kältemittel zum Einsatz, welches bei entsprechendem Systemdruck z.B. etwas unterhalb der Umgebungslufttemperatur verdampft und dabei seine Verdampfungswärme von der Luft bezieht. Der Dampf wird in einem Kompressor ('Pumpe' z.B. durch Elektrizität oder Dieselmotor angetrieben) auf einen höheren Druck komprimiert.

und kann anschliessend bei höherer Temperatur (in der Regel um 30° – 50°C), seine Kondensationswärme bei T zu Heizzwecken abgeben.

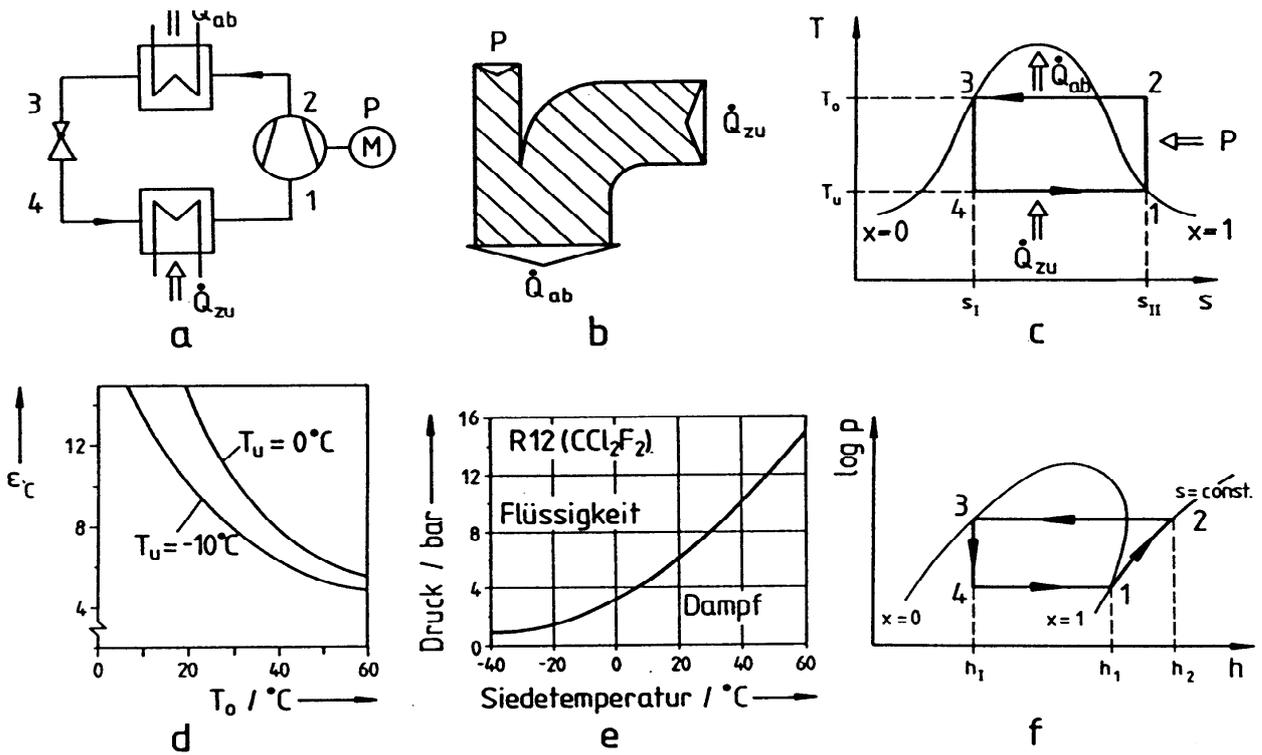
Beim realen Prozess ist zu beachten, dass sich die Temperatur der Wärmequelle (Luft oder Wasser) während der Wärmeübertragung verändert, da der Massenstrom endlich ist und auf Seite der Quelle keine Phasenänderung stattfindet. Die Verdampfungstemperatur ist deshalb nicht von der Quelleneintrittstemperatur T_{Quelle} abhängig, sondern von der tieferen Verdampferaustrittstemperatur T_{Senke} . Aus diesem Grund haben Abluftwärmepumpen trotz hoher Quellentemperatur (rund 20°C) tiefe Leistungszahlen.

Als Kältemittel wurde früher vor allem Ammoniak eingesetzt. Es wurde zwischenzeitlich durch die leistungsfähigen FCKW verdrängt, welche jedoch zum Ozonabbau beitragen und deshalb heute nicht mehr zum Einsatz kommen. Heute werden vorwiegend FKW (z.B. R 134a) eingesetzt, welche zwar als Treibhausgas wirksam sind, jedoch nicht zum Ozonabbau beitragen. In Europa kommen vermehrt natürliche Kältemittel zum Einsatz (also Stoffe, die auch in der Natur vorkommen), vor allem Propan und erneut auch wieder Ammoniak. Ammoniak ist allerdings giftig und deshalb ungeeignet zur Verwendung im Wohnbau und für Kleinanlagen. Natürliche Kältemittel weisen gegenüber FKW den Nachteil auf, dass eine höhere Kompression erforderlich ist, was sich aus der Dampfdruckkurve der Kältemittel ergibt. Als Alternative wird zudem auch an CO₂-Kompressoren geforscht. Für eine Beurteilung der Umweltverträglichkeit muss im Prinzip eine Ökobilanz über den gesamten Lebenszyklus betrachtet werden, wobei die Stromerzeugung im Kraftwerk in die Bilanz miteinbezogen werden muss. Allenfalls kann ein umweltschädlicheres Kältemittel dann ökologisch vorteilhaft sein, wenn bei der Anwendung eine höhere Leistungszahl erreicht wird und die Umweltbelastung durch das Kältemittel durch die eingesparten Emissionen des Kraftwerks mehr als kompensiert werden. Selbstverständlich kann durch Recycling der Kältemittel deren Umweltauswirkung drastisch vermindert werden. Allerdings ist doch mit einer gewissen Leckage und einer nicht hundertprozentige Recyclingrate zu rechnen.



Dampfdruckkurve von Wasser

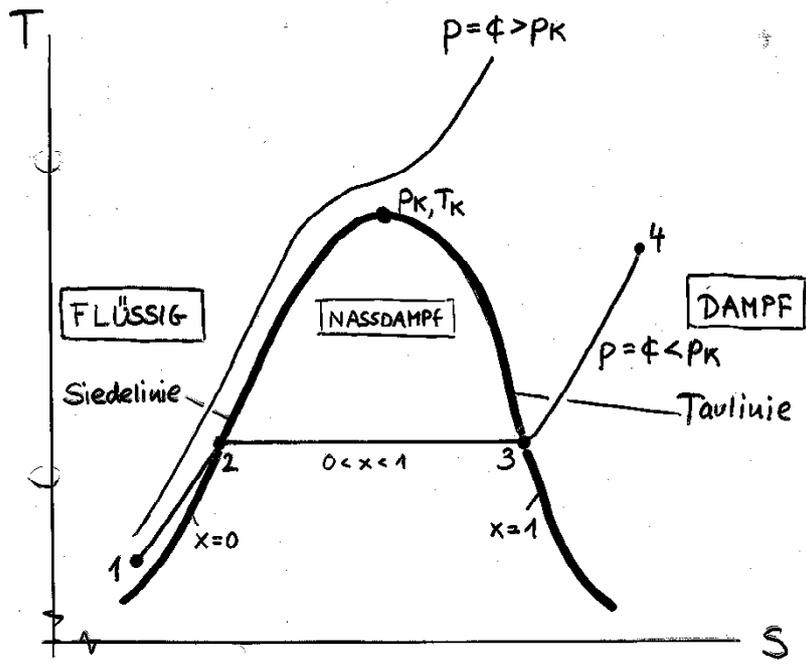
Dampfdruckkurve weiterer Stoffe: NH₃, Propan, ..



- a: Grundprinzip, b: Sankeydiagramm
 c: Qualitatives T-s-Diagramm, d: Leistungsziffer
 e: Dampfdruckkurve eines Kältemittels (R12), f: log p-h-Diagramm

Idealer Wärmepumpenprozess [Kugeler]. Beim realen Prozess liegt Punkt 2 im T-s-Diagramm bei einer höheren Temperatur als Punkt 3 (auf einer Linie $p_2 = p_3$). In Grafik c) ist der ideale Prozess dargestellt, also der linksläufige Carnot-Prozess.

Realer Wärmepumpenprozess.

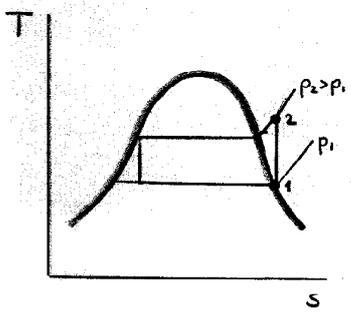


$$ds = \frac{da}{T} \quad \int_1^2 \frac{c_p dT}{T} \quad \frac{\Delta h_v}{T} \quad \int_3^4 \frac{c_p dT}{T}$$

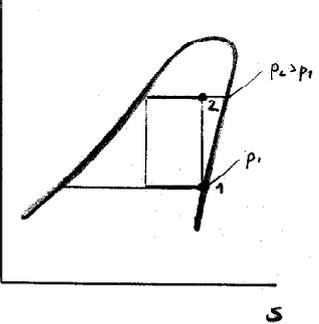
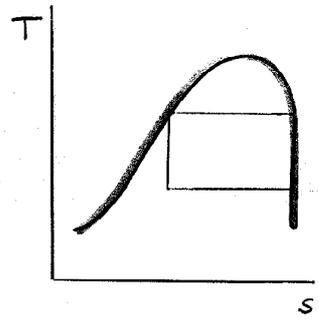
T,s-Diagramm von Wasser

NH₃
R 22
H₂O
CO₂

Hochmolekulare wie
R 114, R 115
R 123



1-2 : isentrope
Kompression
→ Dampfüberhitzung



1-2 : isentrope
Kompression
→ Nassdampf (!)
Kondens. mit T ↑ u. p ↑

T,s-Diagramm für verschiedene Stoffe.

Der Nutzen einer Wärmepumpe ist die abgeführte Wärme, die in der Regel als Heizwärme genutzt wird. Der Aufwand setzt sich zusammen aus der zugeführten Arbeit für die Verdichtung des Kältemittels (Kompressorleistung) und der zugeführten Wärme. Für das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand gilt damit theoretisch:

$$\frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{Q_{ab}}{A_{zu} + Q_{zu}} = 1$$

Da $Q_{ab} = A_{zu} + Q_{zu}$ gilt, hat dieses Verhältnis den Wert 1 und ist damit ungeeignet zur Beschreibung der Leistungsfähigkeit einer Wärmepumpe.

Die zugeführte Wärme einer Wärmepumpe ist entweder Umgebungswärme, die als erneuerbar gilt, oder Abwärme, die ohne Einsatz einer Wärmepumpe nicht genutzt werden kann und damit als wertlos gilt. Zur Bewertung von Wärmepumpen wird deshalb die zugeführte Wärme nicht als Aufwand bewertet. Dies wird beschrieben durch die Definition der **Leistungszahl ϵ** .

Da beim Wärmepumpenprozess $A_{ab} = 0$ ist, wird A_{zu} durch A ersetzt. Im weiteren wird die Leistungszahl als Momentanwert für einen bestimmten Zustand (aktuelle Temperaturen) ausgewiesen und somit durch die zeitlich abgeleiteten Größen beschrieben (d.h. Leistung P statt Arbeit A und Wärmeleistung Q' statt Wärme Q):

$$\epsilon = \left(\frac{Q_{ab}}{A} = \frac{Q_{ab}}{Q_{ab} - Q_{zu}} \right) = \frac{\dot{Q}_{ab}}{P}$$

Zur rechnerischen Ermittlung von ϵ können \dot{Q}_{ab} und P aus dem T,s -Diagramm oder einfacher aus dem $\log p,h$ -Diagramm als Enthalpiedifferenzen der entsprechenden Zustandsänderungen bestimmt werden:

$$\epsilon = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1}$$

Der ideale Prozess setzt sich aus Isothermen und Isentropen zusammen und beschreibt als links-läufiger Kreisprozess im T,s -Diagramm (Rechteck im T,s -Diagramm) den umgekehrten Carnot-Prozess. Für die Leistungszahl des idealen Prozesses gilt mit dem Index C für Carnot:

$$\epsilon_C = \left(\frac{Q_{ab}}{A} = \frac{Q_{ab}}{Q_{ab} - Q_{zu}} = \frac{\dot{Q}_{ab}}{P} \right) = \frac{T}{T - T_u} = \frac{1}{\eta_c}$$

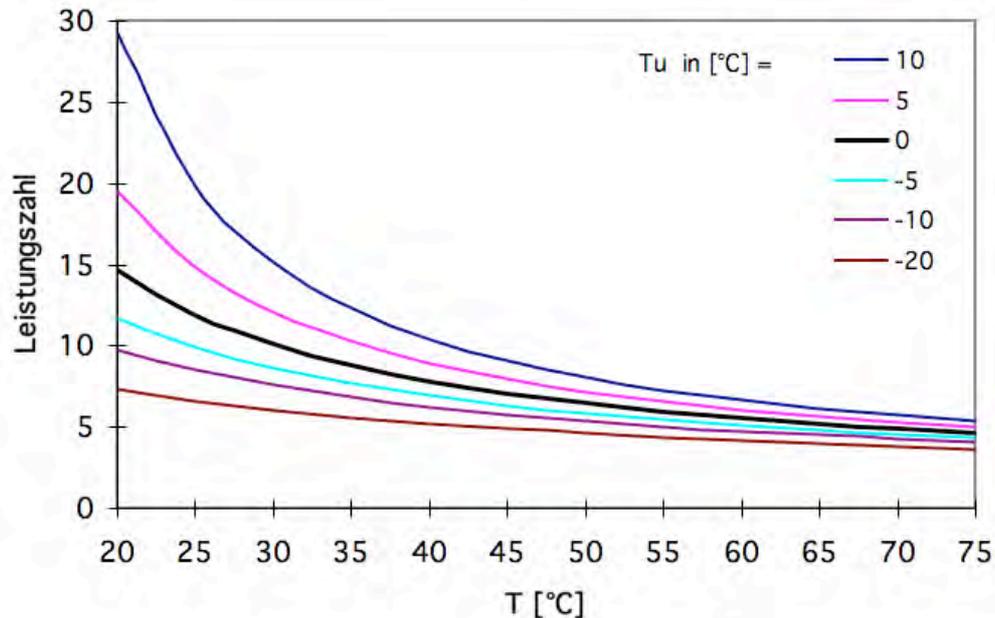
wobei

T_u = unteres Temperaturniveau (Wärmezufuhr, Temperatur der Wärmequelle + $\Delta T_{WÜ}$)

T (= T_{ab} auch = T_o) = Temperatur der Nutzwärme (Wärmeabgabe, Heiztemperatur + $\Delta T_{WÜ}$).

Wenn die Wärmeübertragung auf der warmen Seite nicht bei konstanter Temperatur erfolgt, kann zur Beschreibung des Ersatz-Prozesses die thermodynamische Mitteltemperatur eingesetzt werden:

$$T = \frac{\dot{Q}_{ab}}{\int \frac{d\dot{Q}}{T}}$$



Leistungszahl in Funktion von T und T_u .

Da die Leistungszahl gross wird für kleine Temperaturdifferenzen zwischen der kalten und warmen Seite, ist für den Einsatz von Wärmepumpen ideal:

- wenn die Verdampfungstemperatur (unteres Temperaturniveau) möglichst hoch ist, d.h. wassergespiesene Anlagen sind in der Regel besser als luftbetriebene, im weiteren spielt auch der Massenstrom der Wärmequelle eine Rolle
- wenn die Kondensationstemperatur (oberes Temperaturniveau) möglichst tief ist, d.h. tiefe Vorlauftemperaturen für Niedertemperaturheizsysteme sind besser als hohe Vorlauftemperaturen für konventionelle Heizsysteme.

Der **Gütegrad** beschreibt das Verhältnis zwischen der Leistungszahl eines realen und des idealen Prozesses:

$$\eta_g = \frac{\epsilon}{\epsilon_C} = 0.35 \dots 0.45$$

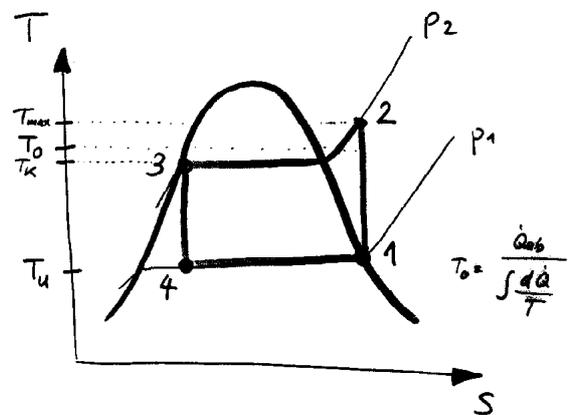
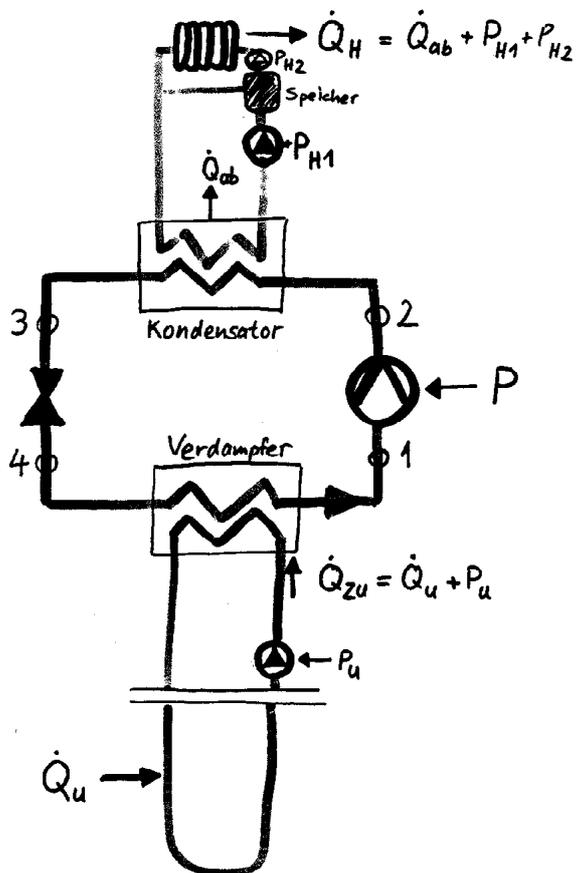
Wegen der Temperaturdifferenzen > 0 in den Wärmeüberträgern, der Druckverluste im Kreislauf, nicht-istentroper Drosselung und weiteren Verlusten werden für reale Prozesse deutlich niedrigere Leistungszahlen erreicht als für den idealen Prozess, weshalb wie angegeben typische Werte von $\epsilon_{\text{real}} = 0.35 \dots 0.45 \epsilon_C$ erreicht werden.

Die Leistungszahl bewertet die Leistungsfähigkeit der Wärmepumpe bei einer definierten Temperatursituation (T und T_u). Es handelt sich also lediglich um eine momentane Bewertung, bei der zudem der Hilfsenergieaufwand für die Heizanlage (z.B. der Stromverbrauch für die Pumpleistung für eine Erdwärmesonde oder den Ventilator einer Luft-Wasser-WP) und Verluste ausserhalb der Wärmepumpe nicht erfasst sind, d.h. die Bilanzgrenze wird um den thermodynamischen Prozess der Wärmepumpe gezogen.

Wenn die Wärmepumpe praxisgerechter bewertet werden soll, muss die Bilanzgrenze weiter gefasst werden, so dass der Hilfsenergieverbrauch für Pumpen und Ventilatoren sowie Verluste im äusseren Kreis mit erfasst werden. Dies wird oft mit dem **COP (Coefficient of Performance)** beschrieben, die Terminologie ist aber nicht einheitlich. Auch diese Grösse beschreibt jedoch noch einen Momentanwert für einen bestimmten Zustand (insbesondere einer gegebenen Temperatur auf der kalten und warmen Seite).

In der Praxis variieren beide Temperaturen und der Heizleistungsbedarf über das Jahr. Eine Praxisbewertung wird deshalb durch den Begriff der **Jahresarbeitszahl JAZ** ermöglicht. Für die Bestimmung der JAZ umfasst die Bilanzgrenze auch Hilfsenergie und -verluste und die Bilanzierung erfolgt über ein ganzes Jahr bzw. über eine ganze Heizperiode. Die JAZ wird demnach mittels den in der Praxis messbaren Grössen wie folgt definiert:

$$JAZ = \frac{\text{Jährlich produzierte Nutzwärme der WP ab Speicher oder WP}}{\text{Jährlicher Stromverbrauch für Wärmepumpe + Wärmequelle + Speicher}}$$



$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_{ab}}{P} \quad \varepsilon_c = \frac{T_0}{T_0 - T_u} \quad \text{Gütegrad} \quad \eta = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}$$

$$JAZ = \frac{\int_0^{1 \text{ Jahr}} (\dot{Q}_H - P_{H2}) dt}{\int_0^{1 \text{ Jahr}} (P + P_u + P_{H1} + \dot{Q}_{Hilf}) dt}$$

$$\dot{Q}_{Hilf} = \text{Carterheizung} + \text{Abtauvorrichtung}$$

Bilanzgrenzen und Definitionen von Leistungszahl und Jahresarbeitszahl.

Die Jahresarbeitszahl ist somit kleiner als die Leistungszahl. Ausgeführte Wärmepumpen erreichen je nach Typ und Temperaturverhältnissen Jahresarbeitszahlen im Bereich von rund 2 bis 5:

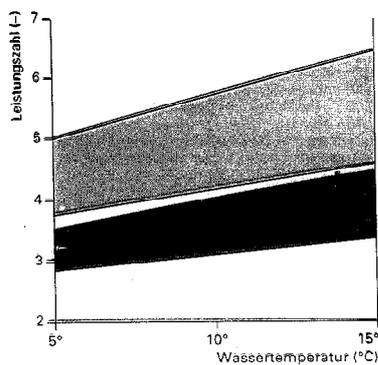
JAZ	Heizung mit Luft-Wasser-WP	Warmwasser* mit Luft-Wasser-WP	Heizung mit Erdwärmesonden-WP
Mittel bis Jahr 2000	2,0		3,1
Mittel neu Jahr 2000	2,6	2,0	3,4
Bereich Jahr 2000	2,0 bis > 3,0		2 bis > 4

*für Warmwasser werden tiefere JAZ erzielt, da die Temperatur mindestens 60°C betragen muss.

Bauart	Leistungszahl* (COP)	Jahresarbeitszahl (JAZ)
Wasser-Wasser (monovent)	4,0-4,5	3,5-4,0

* bezogen auf eine Vorlauftemperatur von 35 °C und eine Wärmequellentemperatur von 2 bis 10 °C
Quelle: Testzentrum Töss

Wasser-Wasser-Wärmepumpen

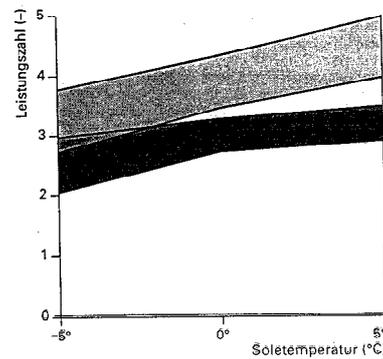


Streubereich verschiedener Wärmepumpenfabrikate
 - Vorlauftemperatur 35 °C
 - Vorlauftemperatur 50 °C

Bauart	Leistungszahl* (COP)	Jahresarbeitszahl (JAZ)
Sole-Wasser (monovent)	3,8-4,3	3,0-3,5

* bezogen auf eine Vorlauftemperatur von 35 °C und eine Wärmequellentemperatur (Sole) von 0 bis 5 °C
Quelle: Testzentrum Töss

Sole-Wasser-Wärmepumpen

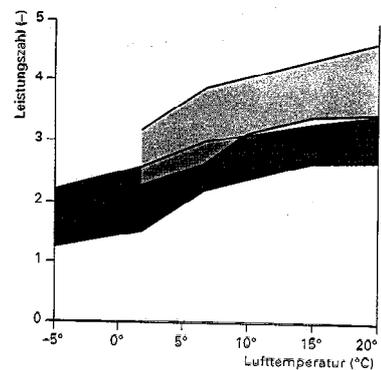


Streubereich verschiedener Wärmepumpenfabrikate
 - Vorlauftemperatur 35 °C
 - Vorlauftemperatur 50 °C

Bauart	Leistungszahl* (COP)	Jahresarbeitszahl (JAZ)
Luft-Wasser (monovent)	2,5-2,9	2,0-2,5
Luft-Wasser (bivalent)	3,1-4,1	2,5-3,5

* bezogen auf eine Vorlauftemperatur von 35 °C und eine Aussenlufttemperatur von 2 bis 10 °C
Quelle: Testzentrum Töss

Luft-Wasser-Wärmepumpen



Streubereich verschiedener Wärmepumpenfabrikate
 - Vorlauftemperatur 35 °C
 - Vorlauftemperatur 50 °C

COP und Jahresarbeitszahl von Wärmepumpen. Resultate von Prüfstandsmessungen des Wärmepumpen Testzentrums Töss, Stand 2003 (www.wpz.ch).

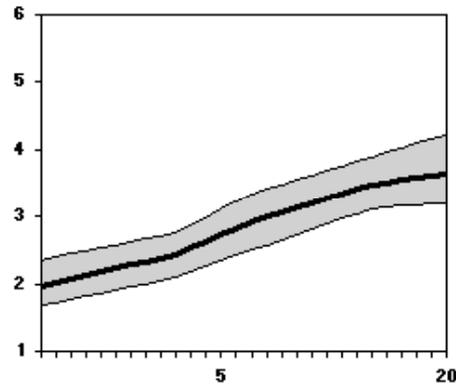
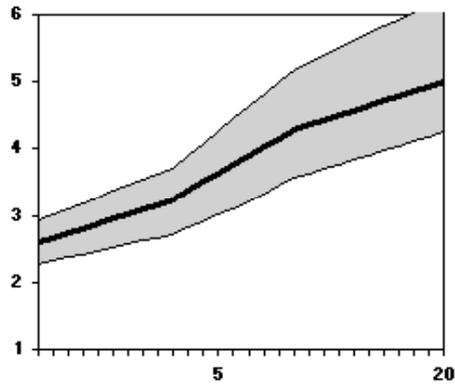
Leistungsziffern (COP) in Abhängigkeit der Temperatur der Wärmequelle der in diesem Bulletin veröffentlichten Wärmepumpen

(Schwarze Linie: Mittelwert, graues Band: Streubereich der Messwerte)

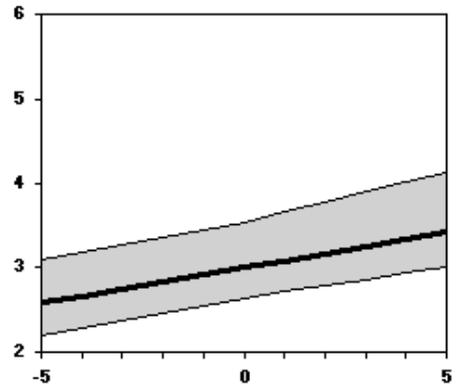
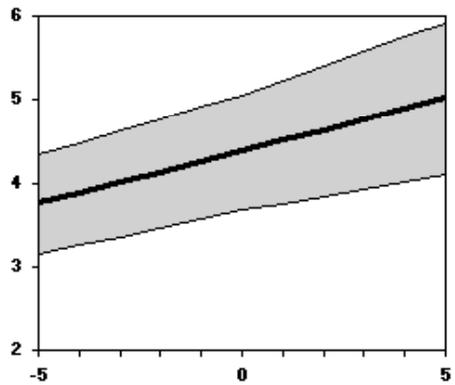
Vorlauftemperatur = 35°C

Vorlauftemperatur = 50°C

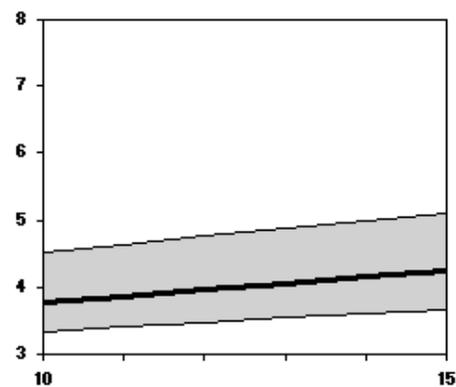
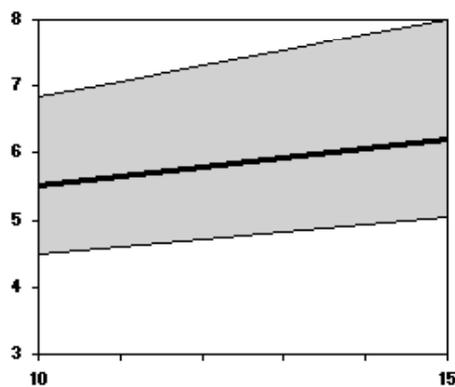
Luft/Wasser-Wärmepumpen



Sole/Wasser-Wärmepumpen



Wasser/Wasser-Wärmepumpen



Die Anlagekomponenten für Wärmepumpen sind auf einem ausgereiften Standard verfügbar. Im einzelnen Fall ist abzuklären, welche Quelle an Umgebungswärme (Luft, Erdwärme, Wasser) am besten geeignet ist. Der Einsatz von Elektroheizungen ist dagegen eine Verschwendung wertvoller Exergie.

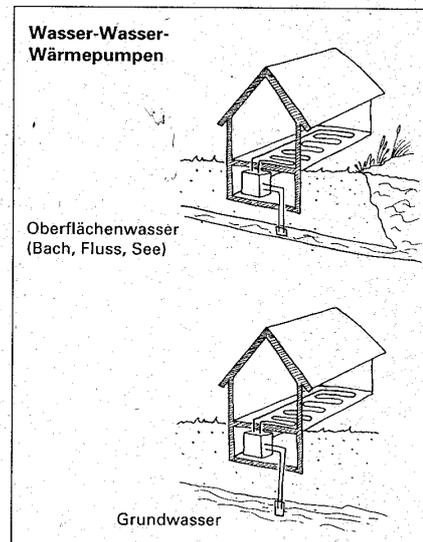
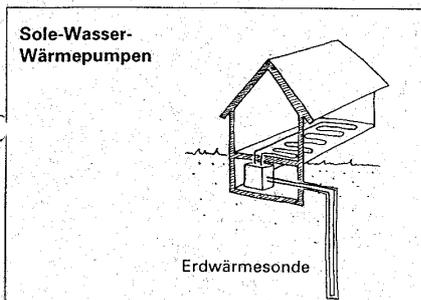
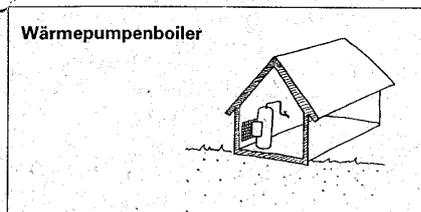
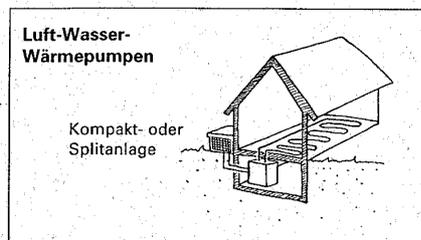
Für Wärmepumpen werden folgende Bezeichnungen verwendet:

W5/W35: Wasser-Wasser-WP mit Quelltemperatur von 5°C und Wärmeabgabe bei 35°C.

L2/W30: Luft-Wasser-WP mit 2°C/30°C.

Für die Erzeugung von Warmwasser kommen verschiedene Schaltungen in Frage:

- WP dient für Vorwärmung, Zusatzerwärmung auf über 60°C erfolgt elektrisch
- WP wird zweistufig betrieben, höhere Verdichtung mit zweitem Verdichter für Warmwasseraufbereitung in alternierendem Betrieb (Heizung oder Warmwasser).
- Heizung und Warmwasser unabhängig (bivalent)



4.1 Luft-Wasser-Wärmepumpen im monovalenten und bivalenten Betrieb

66 Prozent aller in der Schweiz installierten Wärmepumpensysteme nutzen als Wärmequelle die Aussenluft. Sie ist überall vorhanden und einfacher zu erschliessen als andere Arten von Umweltwärme; ausserdem braucht man, um sie zu nutzen, keine Bewilligung. Dagegen ist beim zuständigen Elektrizitätswerk eine Bewilligung für den Anschluss der Wärmepumpe einzuholen, was jedoch auch für alle anderen Anlagentypen gilt.

Luft-Wasser-Wärmepumpensysteme – «Wasser» steht für den Heizwasserkreislauf – kommen insbesondere auch bei Heizungsanierungen oft zum Einsatz. Sie zeichnen sich durch vergleichsweise tiefe Investitionskosten aus, während die Betriebskosten eher höher sind als bei anderen Wärmepumpenanlagen.

Wärmepumpen-Systeme. Für Luft-Wasser-Wärmepumpen kommt auch der Einsatz eines Erdregisters in Frage (hier nicht aufgeführt).

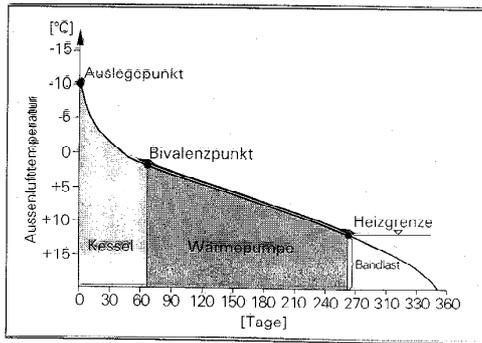


Bild 22: Bivalent-alternativer Betrieb

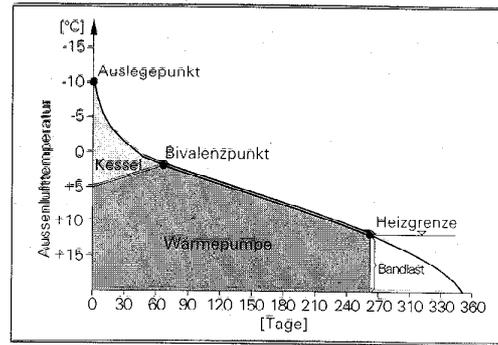


Bild 21: Bivalent-parallel Betrieb

Heizkurven mit verschiedenen Einsatzarten von Wärmepumpen



System	Heiz-/Primärenergie	Bemerkung
Öl-/Gasheizung	0.75 / 0.85	
Fernwärme	0.65	10% Transportverluste
Elektroheizung	0.36	10% Netzverluste
Wärmepumpe, JAZ = 2.5	0.90	Elektroantrieb
Wärmepumpe	1.5	Dieselantrieb

Zahlenbeispiele für das Verhältnis von Heizenergie zu Primärenergie verschiedener Heizsystem, wenn Strom aus thermischem Kraftwerk mit 40 % elektrischem Wirkungsgrad zur Verfügung steht.

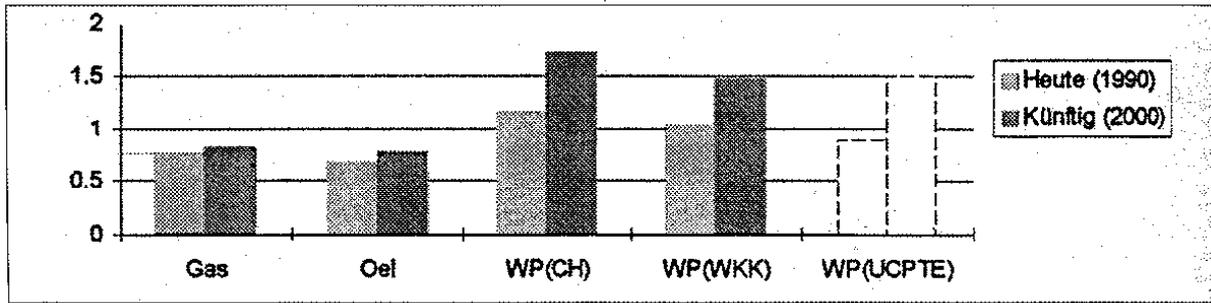


Bild 2 Verhältnis der Nutz-Heizenergie zur nicht-erneuerbaren Primärenergie (auch «Erntefaktor» genannt). Gas: Low-NO_x kondensierend, Öl: Low-NO_x, WP (CH): schweizerischer Strommix mit Berücksichtigung der Winterimporte, WP (WKK): Strom aus WKK-Anlagen, WP (UCPTE): zum Vergleich, obwohl nicht relevant.

Erntefaktor-Vergleich von WP mit Gas und Öl (F. Rognon, Heizung Klima 12 1997, 60–61).

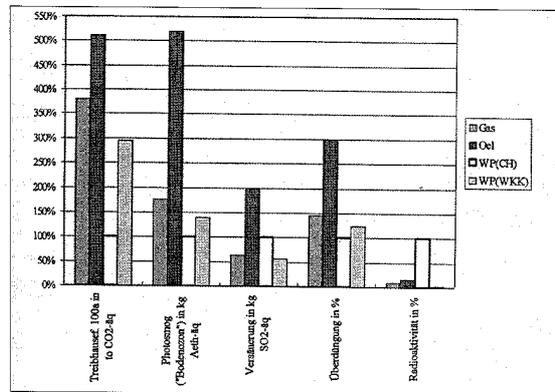


Bild 3 Vergleich der Wirkungen verschiedener Umwelteinflüsse. Gas: Low-NO_x, kondensierend; Öl: Low-NO_x; WP (CH): schweizerischer Strommix mit Berücksichtigung der Winterimporte; WP (WKK): Strom aus WKK-Anlagen, Stand 1990.

Umweltbelastungs-Vergleich von WP mit Gas und Öl (F. Rognon, Heizung Klima 12 1997, 60–61).

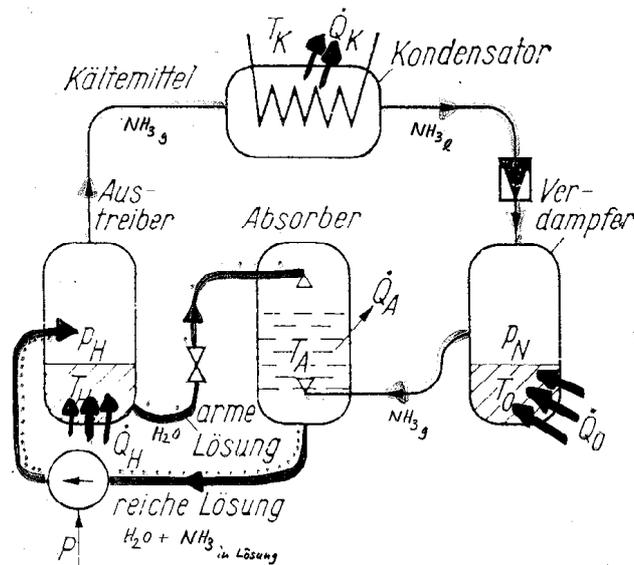
3.3 Diffusions-Absorptions-Wärmepumpe

Beispiel 2: Ersatz einer Gasheizung durch **Diffusions-Absorptions-Wärmepumpe DAWP:**
(thermisch angetriebene Wärmepumpe mit Ersatz der Flüssigkeitspumpe durch Dampfblasenpumpe)

Ein weiteres Beispiel dafür, dass durch geeigneten Einsatz hochwertiger Energieträger eine massgebliche Effizienzsteigerung möglich ist, ist die gasbetriebene Diffusions-Absorptions-Wärmepumpe (DAWP), welche seit 1980 in der Schweiz entwickelt wurde und zur Heizung und/oder Kühlung eingesetzt werden kann.

Funktionsprinzip: Durch Verwendung eines geeigneten **Dreistoffgemisches** (Ammoniak, Wasser und H_2 (Sicherheitsproblem) oder Helium) wird durch Wärme (Verbrennung von Erdgas) ein Kreislauf mit Ammoniak als Kältemittel angetrieben. Die bei einer Wärmepumpe mechanisch aufgebraachte Kompressionsarbeit wird dabei durch den Prozess **Absorption/Desorption** ersetzt und die **Verdichtung durch eine Dampfblasenpumpe** mit Helium realisiert. Dies wird erzielt durch ein geeignetes **Drei-Komponentengemisch** mit Helium oder Wasserstoff, welches bei tieferer Temperatur als Ammoniak verdampft, sowie Ammoniak und Wasser als Gemisch für die Lösung.

Eine als Heizung eingesetzte DAWP erzielt einen Wirkungsgrad von 150%, was gegenüber einer Gasfeuerung eine Einsparung um 30% ermöglicht. Auf der kalten Seite des Prozesses steht Kühleistung zur Verfügung, welche als 'Abkälte' z.B. für eine Tiefkühltruhe genutzt werden kann, wobei natürlich die Gleichzeitigkeit der Nutzung gegeben sein muss, damit eine Nutzung von Kälte und Wärme möglich ist.



Aufbau einer Absorptionswärmepumpe [Jungnickel et al.].

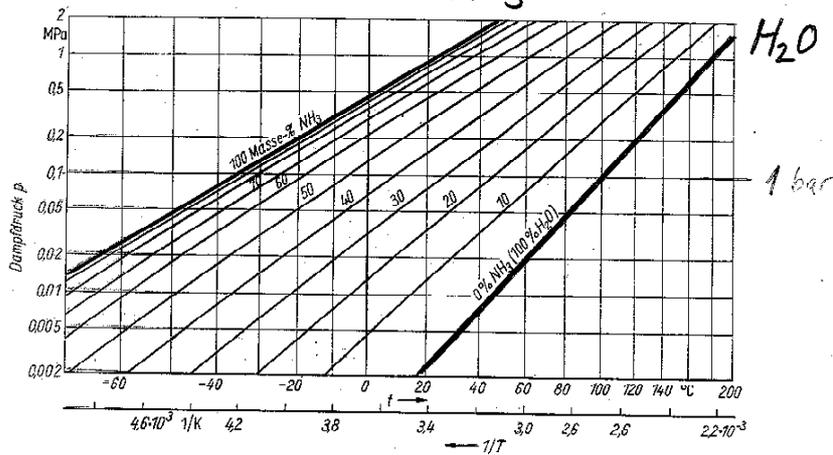
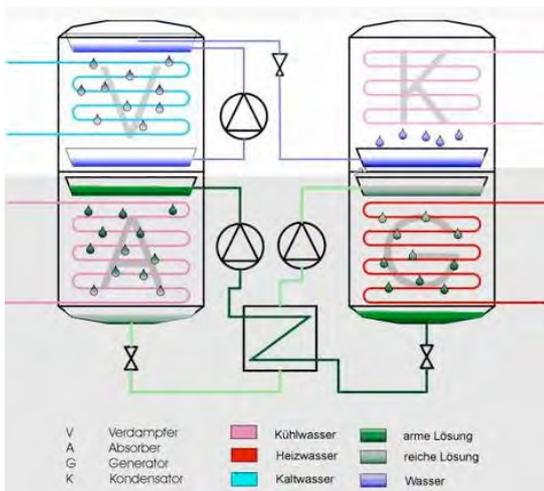


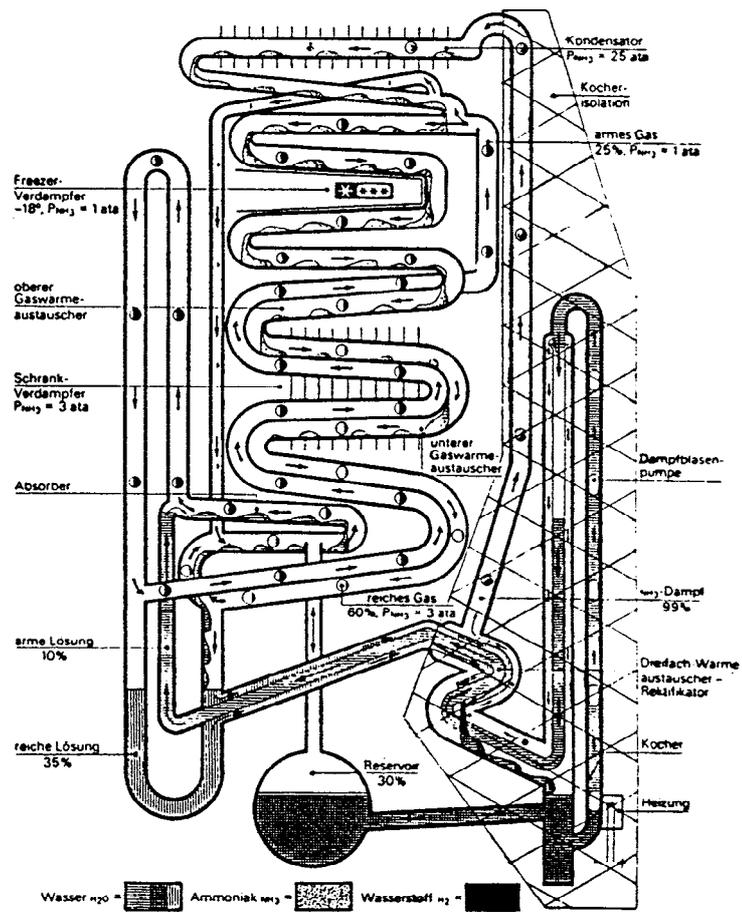
Bild 3.33. Dampfdruckkurven der Mischung Ammoniak und Wasser

Dampfdruckkurve des Zweiphasengemisches Ammoniak-Wasser [Jungnickel et al.].

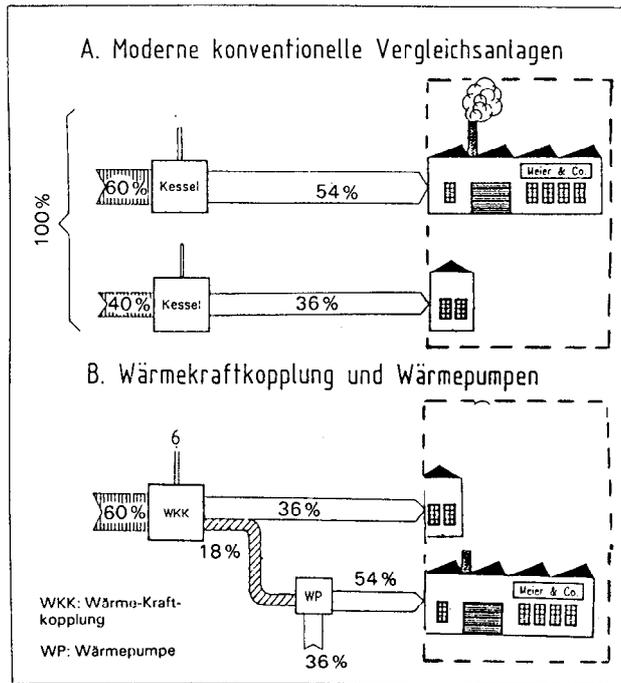


- Lösungspumpe:** Die den Absorber verlassende kältemittelreiche Lösung wird durch eine Pumpe abgesaugt. Diese Lösungsmenge wird durch einen Wärmetauscher zum Generator gefördert.
- Generator:** Die kältemittelreiche Lösung wird gleichmäßig über dem Generator verteilt. Durch die Zufuhr von Warmwasser wird aus der Lösung Kältemittel ausgedampft. Die nun wieder konzentrierte Lithiumbromid-Lösung wird mit einer Pumpe zurück zum Absorber gefördert.
- Kondensator:** Der im Generator ausgetriebene Kältemitteldampf strömt zum Kondensator und wird dort verflüssigt. Die dabei frei werdende Wärme wird an das Kühlwasser abgegeben. Das verflüssigte Kältemittel wird über eine Drossel entspannt und dem Verdampfer zugeführt.
- Verdampfer:** Das vom Kondensator kommende Kältemittel fließt zur Verdampferwanne. Dort wird es von einer Kältemittelpumpe angesaugt, nach oben in ein Berieselungssystem gepumpt und über den Verdampferrohren verteilt. Auf Grund des hohen Vakuums verdampft ein Teil des Kältemittels bereits bei sehr niedrigen Temperaturen. Die für die Verdampfung notwendige Wärme entzieht das Kältemittel dem in den Verdampferrohren fließendem Kaltwasser, welches sich dabei von 12 °C auf bis zu 6 °C abkühlt.
- Absorber:** Im Absorber wird der aus dem Verdampfer kommende Kältemitteldampf mit konzentrierter Lösung in Verbindung gebracht, wobei die Lösung ebenfalls mit einem Berieselungssystem fein verteilt wird. Bei diesem Vorgang wird der Kältemitteldampf von der Lösung absorbiert. Die dabei frei werdende Wärme wird durch das Kühlwasser aufgenommen und über ein Rückkühlwerk an die Umgebung abgegeben. Die entstehende kältemittelreiche Lösung sammelt sich im Sumpf des Absorbers und wird dort von der Lösungspumpe angesaugt.

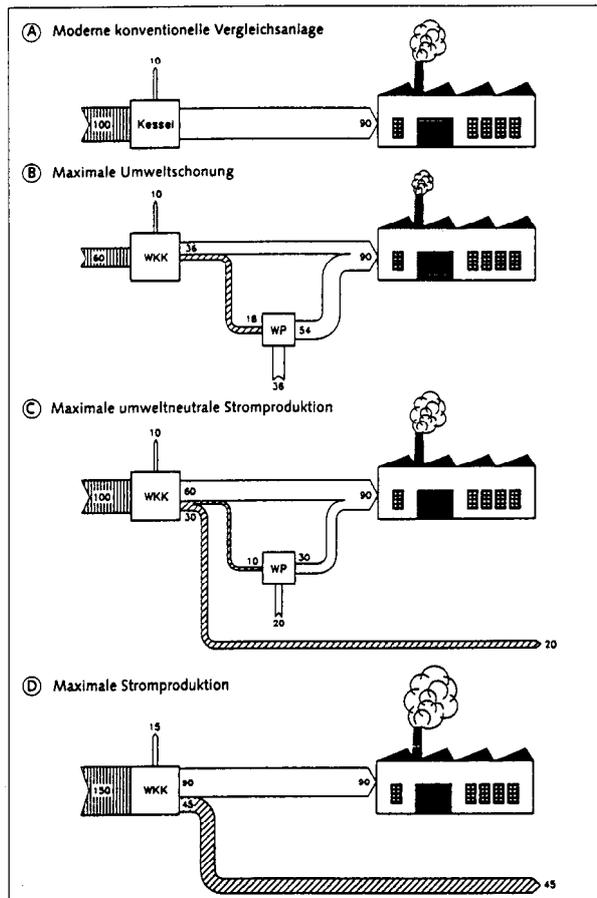
Prinzip der Absorptionskältemaschine [www.heinke-doering.de].



Diffusions-Absorptions-Wärmepumpe (DAWP). Quelle: Creatherm AG, H. Stierlin

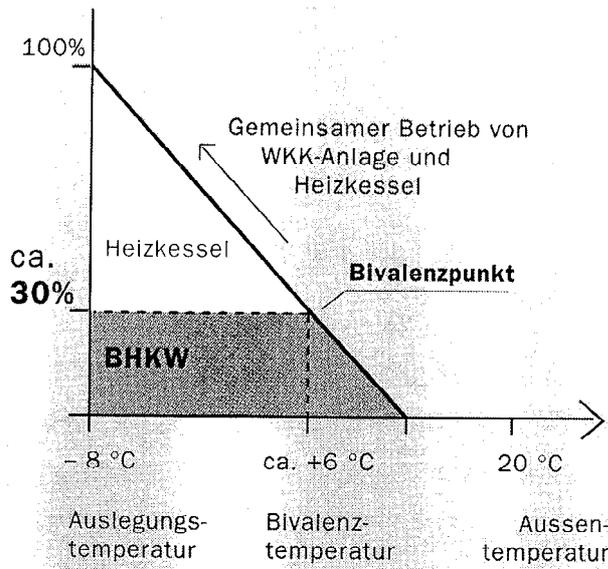


Wärmekraftkopplung und Wärmepumpen verbrauchen nur 60% des Brennstoffs der Vergleichsanlage bei gleichen Gebäuden. Bild: ATG Stadt Zürich

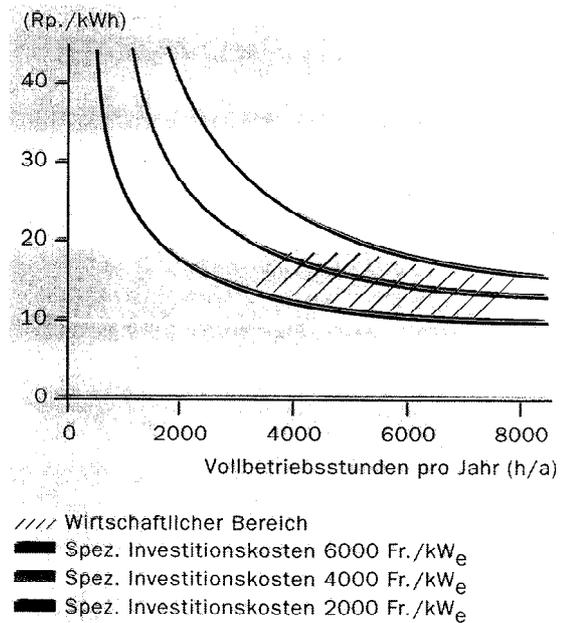


Energiebilanz einer modernen konventionellen Anlage im Vergleich zu den Energiebilanzen von Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen, welche drei typische Grenzfälle darstellen. (Grafik Gabathuler AG)

Verschiedene Schaltungsarten zur Wärmekraftkopplung.



Heizkurve für WKK-Anlagen.



Stromgestehungskosten von Gas-BHKW zur Wärmekraftkopplung (Stand. 1995, heute sind Investitionskosten tiefer).

Heutige Gasmotoren erreichen Wirkungsgrade von 30 % (< 1 MW) bis gegen 40 ... 43 % (> 1 MW). Der Einsatz von Dreiweg-Katalysatoren ist problemlos möglich, wobei auch Magermotorbetrieb zum Einsatz kommt. Im Vergleich zu Benzinmotoren weisen Gasmotoren allerdings relativ hohe CO-Emissionen auf. Dies ist nicht die Folge unvollständiger Verbrennung, sondern von Brennstoff-Schlupf in der Grössenordnung von 1 bis 3 %. Aus diesem Grund werden Gasmotoren auch mit CO-Katalysatoren ausgerüstet (sofern nicht ohnehin Dreiweg-Katalysatoren eingesetzt werden).

Dieselmotoren erreichen dagegen deutlich höhere Wirkungsgrade als Gasmotoren. Sie kommen in der Schweiz derzeit allerdings wegen der erhöhten Emissionen an Russ und Stickoxiden praktisch nicht zur Wärmekraftkopplung zum Einsatz. Eine stationäre Anwendung von Dieselmotoren setzt die Einhaltung der Luftreinhalte-Verordnung voraus (was strengere Grenzwerte als im Verkehr zur Folge hat). Dies ist technisch möglich mit dem Einsatz von Partikelfilter und SCR-Einrichtungen zur Entstickung.

Fazit: Wenn schon heizen mit fossilen Brennstoffen, sollten diese wenigstens zur Wärmekraftkopplung genutzt werden. Aus wirtschaftlichen Gründen ist der Einsatz eines BHKW's allerdings auf die Grundlast beschränkt und sie setzt eine gewisse Mindestgrösse voraus. Sogenannte TOTEMS (BHKW im Kleinst-Leistungsbereich für Einfamilienhäuser) haben sich nicht durchgesetzt und erscheinen weder ökonomisch noch ökologisch attraktiv.

3.5 Brennstoffzelle

Beispiel 4: Ersatz einer fossilen Wärmeerzeugung durch ein BHKW mit Brennstoffzelle:

Eine weitere Steigerung der Effizienz ist möglich durch den Einsatz von Brennstoffzellen, welche eine direkte Umsetzung eines Brennstoffs in Strom ermöglichen. Als Brennstoffe zum Einsatz kommt in erster Linie Wasserstoff, in zweiter Linie Erdgas (allenfalls mit vorgängiger Reformierung zu Wasserstoff gemäss der Reaktion $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3 \text{H}_2$, z.B. bei 800°C an einem Katalysator). Für die Zukunft bestehen auch Bestrebungen zur Nutzung von Methanol und anderen Flüssigtreibstoffen (wiederum mit vorheriger Reformierung) sowie von Produktgas aus der Vergasung von Kohle und Biomasse.

Im Gegensatz zu thermischen Wärmekraftmaschinen, deren mechanischer Wirkungsgrad theoretisch durch den Carnot-Prozess (real noch niedriger) auf relativ niedrigem Niveau physikalisch begrenzt ist, können Brennstoffzellen einen theoretischen Wirkungsgrad von annähernd 100% erreichen. Allerdings sind gerade die leistungsfähigen Brennstoffzellen auf Arbeitstemperaturen deutlich über Umgebungstemperatur angewiesen (Hochtemperatur-Brennstoffzellen bis ca. 900°C), so dass der Vorteil bei reiner Krafterzeugung technisch erst beschränkt ausgenutzt werden kann. Bis anhin wurden elektrische Wirkungsgrade von ca. 50% bis 60% erzielt, so dass auch bei Brennstoffzellen eine kombinierte Nutzung von Kraft und Wärme sinnvoll sein kann. Zum Vergleich: Ein modernes Erdgaskraftwerk mit Kombiprozess (Gas- und Dampfturbine) erreicht auch Wirkungsgrade von 60 % elektrisch, allerdings sind dazu grosse Leistungen notwendig ($> 100 \text{ MW}_e$). Brennstoffzellen versprechen auch im kleinen Leistungsbereich ähnlich hohe oder gar höhere Wirkungsgrade und ermöglichen auch Anwendungen zur dezentralen Stromerzeugung oder zum Antrieb von Fahrzeugen.

Funktionsprinzip: Die Umsetzung eines Brennstoffs setzt sich zusammen aus Oxidation und Reduktion, welche bei einer gewöhnlichen Verbrennung ohne örtliche Trennung ablaufen (z.B. direkte Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser). Die Reaktionsenthalpie tritt dabei als Wärme bzw. Temperaturanstieg in Erscheinung.

Bei der Brennstoffzelle laufen Oxidation und Reduktion dagegen getrennt an einer Anode und einer Kathode ab. Dazwischen befindet sich ein Elektrolyt, d.h. ein elektrisch isolierendes Medium, welches für Ionen, nicht jedoch für Elektronen leitfähig ist. Der Brennstoff wird an der Anode oxidiert mit negativ geladenen Ionen (je nach Zellentyp OH^- , CO_3^- , O^-), die Elektronen fliessen über eine elektrisch leitfähige Verbindung von der Anode zur Kathode, so dass eine Spannung abgegriffen werden kann. Eine Brennstoffzelle funktioniert damit ähnlich wie eine Batterie. Die Reaktionsenthalpie führt nicht zu einem Temperaturanstieg, sondern direkt zu einer elektrischen Spannung. Bei einer Batterie werden allerdings die Elektroden verbraucht, während bei der Brennstoffzelle Betriebsstoffe zugeführt sowie Abgase und Wasser abgeführt werden.

Da die Abgastemperaturen bei bisherigen Anwendungen deutlich über 70°C betragen, wird das Wasser bis anhin ausschliesslich dampfförmig abgegeben. Zur weiteren Wirkungsgradverbesserung für eine allfällige Wärmenutzung käme somit auch bei Brennstoffzellen eine Abgaskondensation in Frage.

Anwendungen von Brennstoffzellen: tragbare Geräte (Batterie-Ersatz), Stromerzeugung in Kraftwerken, Wärmekraftkopplung, Antriebe.

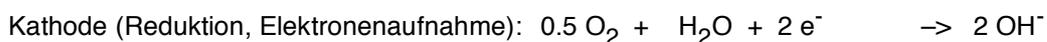
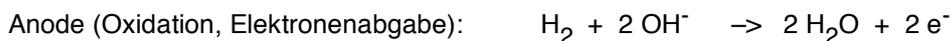
Vorteile von Brennstoffzellen:

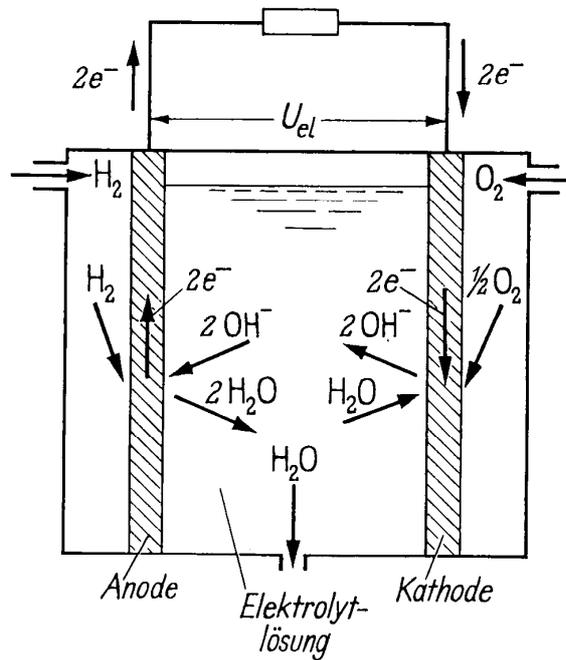
- Potenzial von höherem **elektrischen Wirkungsgrad** als von Wärmekraftmaschinen, insbesondere auch hoher Teillastwirkungsgrad im Vergleich zu Motoren oder Turbinen
- Praktisch **schadstofffreier** Betrieb möglich, insbesondere auch ohne NO_x
- Keine bewegten Teile, geräuscharm, mechanisch einfacher Aufbau, auch Kleinstanlagen möglich (z.B. als Stromversorgung für Notebooks, wo auch hohe spezifische Kosten tolerierbar sind)
- Im Einsatz als WKK-Anlage hohe Stromkennzahl möglich mit einfacher Regelbarkeit zu bedarfsweise höherer Heizleistung.

Nachteile von Brennstoffzellen:

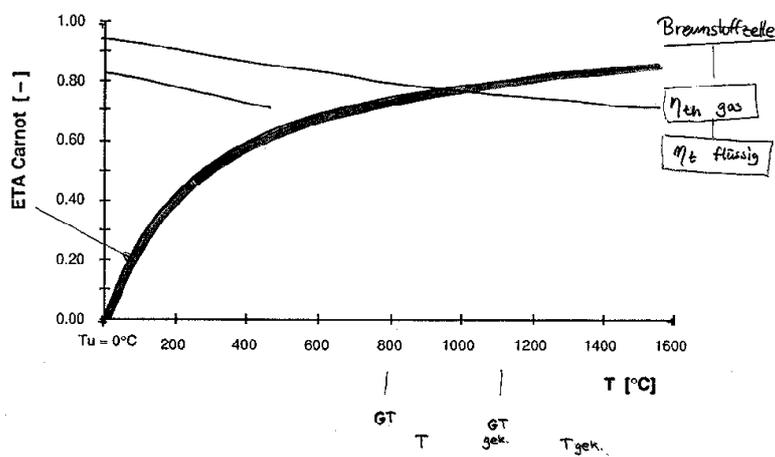
- Sehr hohe Anforderungen an Brennstoffreinheit
- Bis anhin in erster Linie für Wasserstoff verfügbar sowie allenfalls für Erdgas mit Reformierung
- Die Primärenergieeffizienz für eine Wasserstoffwirtschaft mit Brennstoffzellen ist jedoch immer einer direkten Nutzung der Primär- oder Sekundärenergie gegenüber zu stellen. Ein Brennstoffzellenfahrzeug mit H_2 aus Kohle wird mehr CO_2 als ein Diesel- oder Benzinfahrzeug produzieren. Wenn dagegen H_2 durch Elektrolyse mit Wind- oder Solarstrom hergestellt wird, ist dem Brennstoffzellenfahrzeug ein Elektrofahrzeug mit leistungsfähiger Batterie gegenüber zu stellen (sowie partieller Stromspeicherung über das Netz zum Beispiel in Pumpspeicherwerken). Auch bei dieser Anwendung ist davon auszugehen, dass das Brennstoffzellenfahrzeug eine geringere Gesamteffizienz erreichen wird. Die Brennstoffzelle ist damit zwar ein leistungsfähiges Energieumwandlungsaggregat. Wenn jedoch ein zusätzlicher, mit grossen Verlusten verbundener Umwandschritt dafür in Kauf genommen wird, wird die Energieeffizienz insgesamt tiefer als mit anderen optimierten Systemen.
- Leistungsfähige Brennstoffzellen benötigen derzeit hohe Betriebstemperaturen, was den Vorteil gegenüber Verbrennungsmotoren und Gasturbinen wieder einschränkt.

Beispiel der Reaktionen bei der Umsetzung von Wasserstoff in einer Brennstoffzelle mit einer KOH-Lösung als Elektrolyt und einer Zellenspannung von 1.229 V:





Aufbau einer Brennstoffzelle (Alkaline Fuel Cell, AFC). Elektrolytlösung: KOH-Lösung [Baehr]



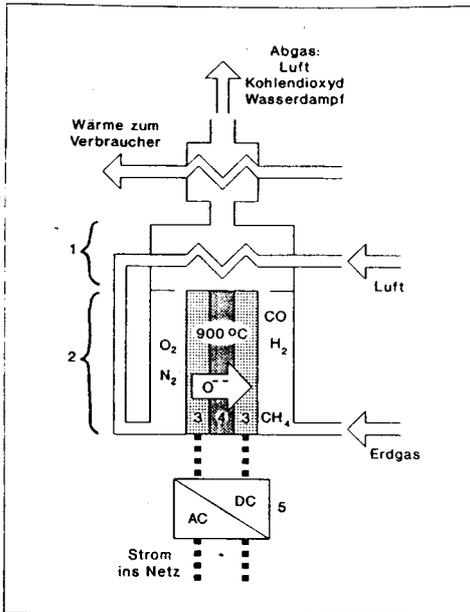
Theoretischer Wirkungsgrad von Brennstoffzellen (bezogen auf den Brennwert, deshalb der Unterschied zwischen gasförmigen und flüssigen Produkten) in Abhängigkeit der Temperatur im Vergleich zum Carnot-Prozess (GT = Gasturbine)

Tabelle 3.1 Bezeichnungen und Betriebstemperaturen von Brennstoffzellen. NT/MT: Niedertemperatur- und Mitteltemperatur-Brennstoffzellen, HAT: Hochtemperatur-Brennstoffzellen

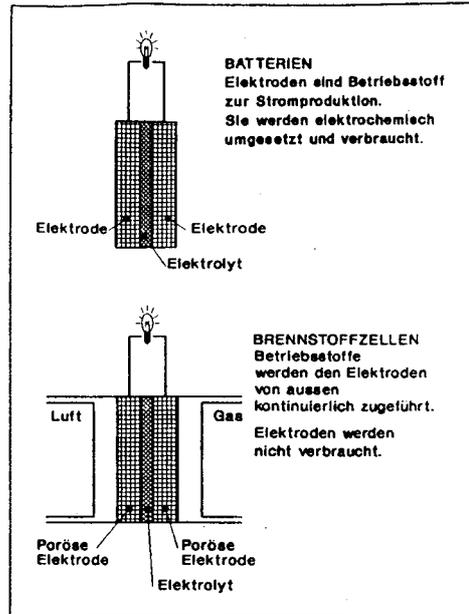
Bereich	Abkürzung	Bezeichnung	Temperatur
NT MT	AFC	alkaline fuel cell (Alkalische Brennstoffzelle)	70°C
	PEMFC	polymer elektrolyte membran fuel cell (Polymer-Elektrolyt-Membran Brennstoffzelle)	100°C
	PAFC	phosphoric acid fuel cell (Phosphorsäure Brennstoffzelle)	200°C
HT	MCFC	molten carbonate fuel cell (Schmelzkarbonat Brennstoffzelle)	650°C
	SOFC	solid oxide fuel cell (Oxidkeramische oder Festoxid Brennstoffzelle)	750°C – 900°C

Tabelle 3.2 Anforderungen an Gasqualität für verschiedene Brennstoffzellentypen nach [Rösch und Kaltschmitt 1998, Spliethoff et al. 1998].

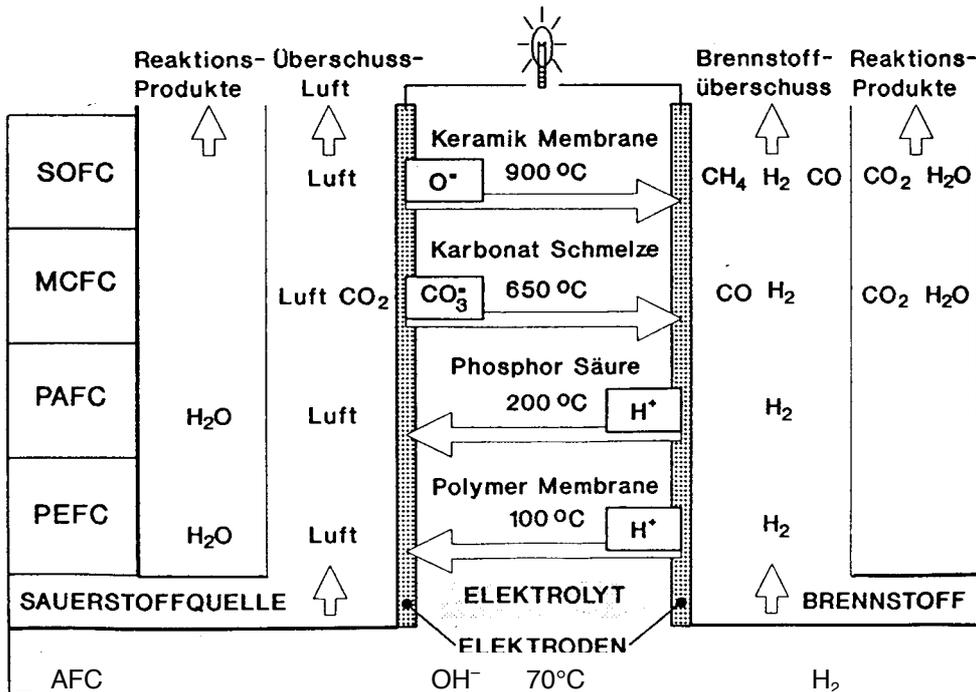
Brennstoffzellentyp	Anforderungen	Tolerierte inerte Verbindungen
AFC	kein CO ₂ , H ₂ S	N ₂ , CH ₄
PEMFC	CO < 10...100 ppm CH ₄ O, CH ₃ OH < 0,5 %	(N ₂), CO ₂ , CH ₄
PAFC	N ₂ < 4 %, CO < 1 % NH ₃ < 0,2 %, Cl < 1 ppm S < 1...50 ppm	N ₂ , CO, CO ₂
MCFC SOFC	S < 1...10 ppm, Cl < 1 ppm	N ₂ , CO, CO ₂



Schematischer Aufbau und Funktionsprinzip von SOFC-Brennstoffzellen-Systemen. 1 Nachbrenner und Luftvorwärmer, 2 Reaktionskammer, 3 Elektrode, 4 Keramische Elektrolyt-membrane, 5 Elektrischer Umrichter.

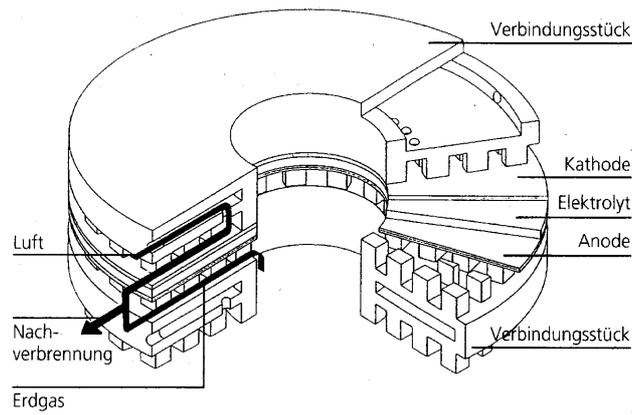


Verwandtschaft zwischen Batterien und Brennstoffzellen.

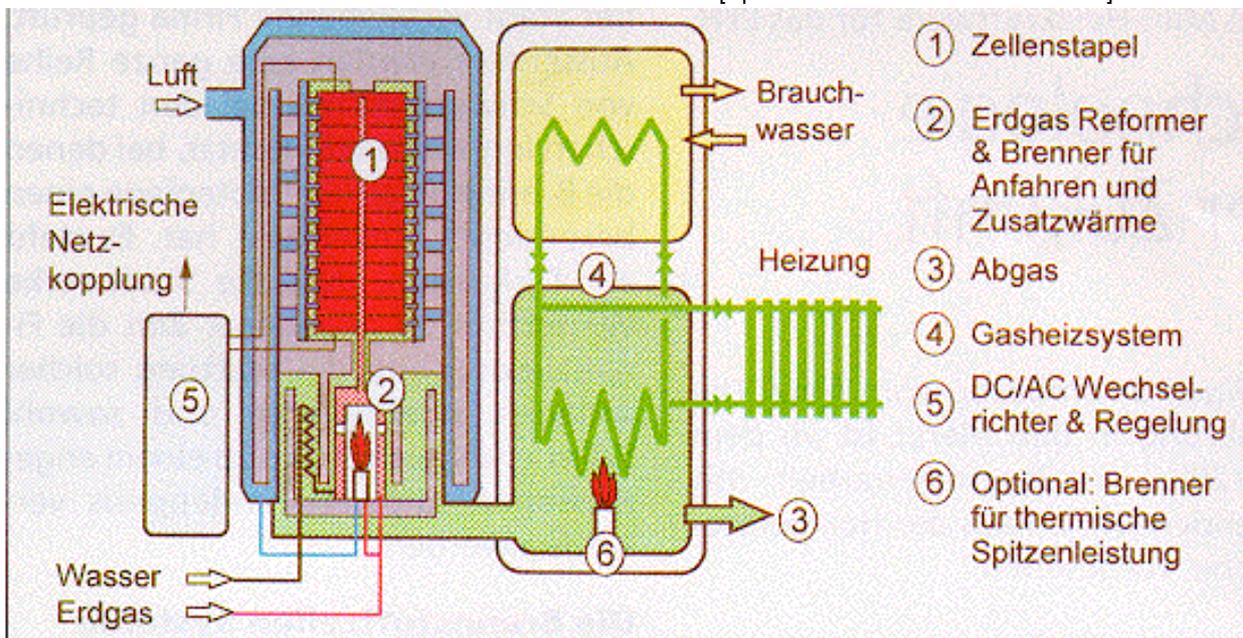


Wichtigste Brennstoffzellentypen. Klassierung nach: Betriebstemperatur, Art des Elektrolyten, Art des Stoffaustausches.

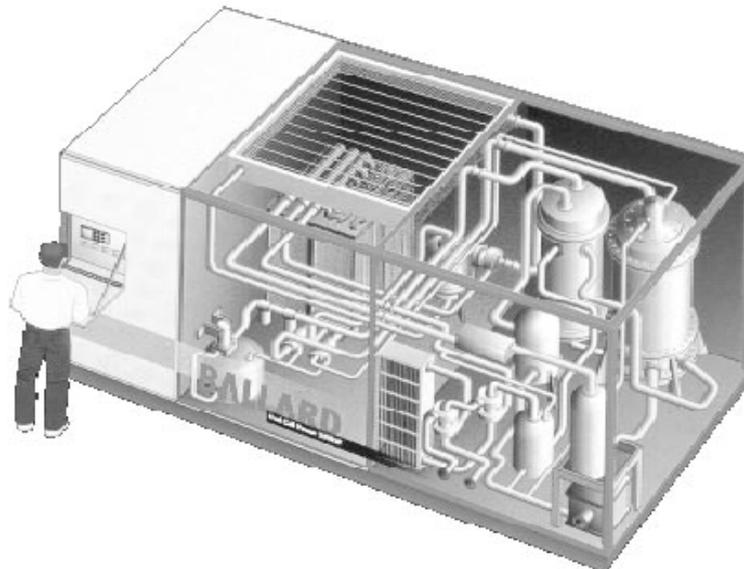
Funktionsprinzip verschiedener Brennstoffzellen [Barp et. al, gwa 12/92].



Ausführung einer Brennstoffzelle als Klein-BHKW (Sulzer Hexis). Oben: BHKW-Modul mit zusätzlichem Gasheizkessel. Unten: Schnitt durch einen Zellenstapel. [Spektrum der Gebäudetechnik 1/97].



Sulzer Hexis Brennstoffzellen-Modul kombiniert mit einem konventionellen Gasheizsystem.



Stationäre 250 kW-PEM-Brennstoffzellenanlage (Ballard)