

## Basiswissen

## Kreisprozesse

**Thermodynamische Kreisprozesse** werden in der Technik dazu genutzt, um die Umwandlung von thermischer Energie in mechanische Energie und umgekehrt zu beschreiben.

In diesem Prozess durchläuft ein Medium periodisch verschiedene **Zustandsänderungen** wie Verdichtung und Expansion, Verdampfung und Kondensation oder Erwärmung und Abkühlung. Bei einem Kreisprozess erreicht das Medium nach dem Durchlauf der verschiedenen Zustandsänderungen wieder den Ausgangszustand und kann somit immer wieder verwendet werden.

Als Medien eignen sich sowohl Stoffe, die während des Kreisprozesses dauernd gasförmig bleiben, wie z.B. Luft oder Helium, oder Stoffe, die während des Kreisprozesses ihren Aggregat-

zustand ändern (Phasenumwandlung) wie Wasser, Ammoniak, Fluorkohlenwasserstoffe oder  $\text{CO}_2$ .

Da eine Phasenumwandlung bedeutend mehr Energie als eine reine Erwärmung oder Abkühlung umsetzt, bieten Prozesse mit Phasenumwandlung eine höhere Energiedichte und benötigen geringere Temperaturunterschiede.

Kreisprozesse können in Kraft- oder Arbeitsmaschinen angewendet werden. Kraftmaschinen wandeln thermische Energie in mechanische Energie, z.B. in einem Dampfkraftwerk. In Arbeitsmaschinen wird mechanische Energie zugeführt und in thermische Energie umgewandelt, z.B. in einer Kompressionskälteanlage.

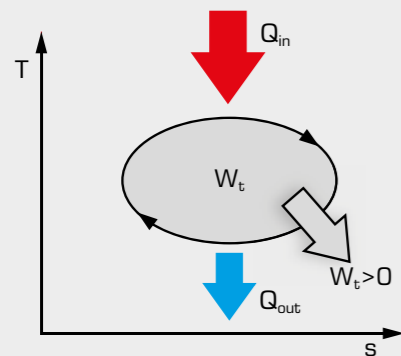
## Darstellung der Kreisprozesse in Zustandsdiagrammen

Ein thermodynamischer Kreisprozess lässt sich anschaulich in sogenannten Zustandsdiagrammen darstellen. Die am häufigsten verwendeten Zustandsdiagramme sind:

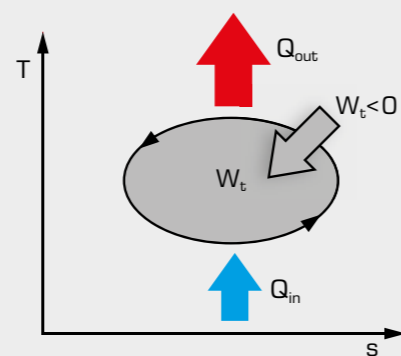
- **p,v-Diagramm:** Druck  $p$  über spezifischem Volumen  $v$ , zur Darstellung der mechanischen Leistung geeignet. Es wird gerne bei Hubkolben-Verdichtern und Verbrennungsmotoren mit einem rein gasförmigen Arbeitsmedium verwendet. Hier können zyklische Vorgänge gut beobachtet werden, da zwischen Volumenänderung und Zeit ein fester Zusammenhang besteht. Die eingeschlossene Fläche ist ein Maß für die geleistete mechanische Arbeit, die technische Nutzarbeit genannt wird.
- **h,s-Diagramm:** Enthalpie  $h$  über der Entropie  $s$ , zur Darstellung der Prozesse in Dampfturbinen. Es wird bei Wasserdampf verwendet und eignet sich gut als Werkzeug zur Auslegung von Dampfturbinen.
- **log p,h-Diagramm:** logarithmische Darstellung des Druckes  $p$  über der spezifischen Enthalpie  $h$ , es eignet sich insbeson-

dere für Kühlprozesse in der Kältetechnik, da hier die Wärmeströme direkt als horizontale Strecken aus dem Diagramm abgelesen werden können. Für die vertikale Druckskala wird eine logarithmische Teilung verwendet, da hiermit die Phasengrenzkurven vorteilhaft dargestellt werden.

- **T,s-Diagramm:** Temperatur  $T$  über Entropie  $s$ , zur Darstellung der thermodynamischen Verhältnisse geeignet. Der Umlaufsinn des Kreisprozesses gibt an, ob es eine Kraftmaschine oder Arbeitsmaschine ist. Der **Rechtsprozess** (Uhrzeigersinn) gibt eine Kraftmaschine, der **Linksprozess** (Gegenuhrzeigersinn) eine Arbeitsmaschine an. Beim Rechtsprozess wird Wärme auf hohem Temperaturniveau aufgenommen und bei niedriger Temperatur abgegeben. Beim Linksprozess dagegen wird Wärme bei niedriger Temperatur aufgenommen und bei hoher Temperatur abgegeben. Der angetriebene Linksprozess eignet sich also als Wärmepumpe oder Kältemaschine. Die eingeschlossene Fläche ist ein Maß für die technische Nutzarbeit, wie auch im p,v-Diagramm.



Rechtsprozess: Kraftmaschine  
(technische Nutzarbeit wird abgeführt)



Linksprozess: Arbeitsmaschine  
(technische Nutzarbeit wird zugeführt)

$W_t$  technische Nutzarbeit,  $Q$  Wärmeenergie,  $T$  Temperatur,  $s$  Entropie

## Beispiele für thermodynamische Kreisprozesse

Typ	Kraft / Arbeitsmaschine	Arbeitsmedium	Aggregatzustand
Dampfkraftwerk	Kraftmaschine	Wasser	flüssig-gasförmig
Verbrennungsmotor	Kraftmaschine	Luft / Verbrennungsgas	gasförmig
Gasturbine	Kraftmaschine	Luft / Verbrennungsgas	gasförmig
Stirlingmotor	Kraftmaschine	Luft, Helium	gasförmig
ORC-Kraftwerk (Organic Rankine Cycle)	Kraftmaschine	Fluorkohlenwasserstoffe, Kohlenwasserstoffe	flüssig-gasförmig
Kältemaschine	Arbeitsmaschine	Fluorkohlenwasserstoffe, Kohlenwasserstoffe, Ammoniak etc.	flüssig-gasförmig
Stirling-Kältemaschine	Arbeitsmaschine	Luft, Helium	gasförmig

Im Folgenden werden einige technisch relevante Kreisprozesse mit ihren Diagrammen vorgestellt.

## Der Carnot-Prozess

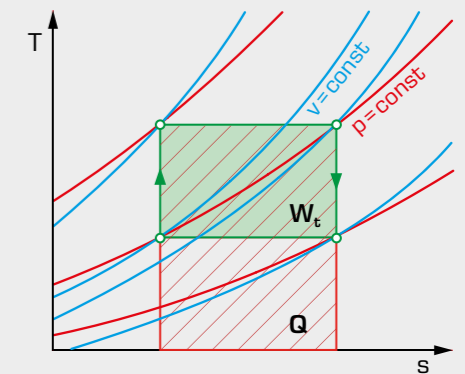
Im T,s-Diagramm bildet der Carnot-Prozess ein Rechteck und nutzt dabei die zugeführte Wärmeenergie maximal aus. Es ist der Prozess mit dem höchsten thermodynamischen Wirkungsgrad. Die Fläche des Rechtecks ist ein Maß für die technische Nutzarbeit  $W_t$ . Die Fläche zwischen der Temperatur Null und maximalen Prozesstemperatur ist ein Maß für die aufgewendete Wärmeenergie  $Q$ . Damit berechnet sich der Wirkungsgrad  $\eta$  des Carnot-Prozesses zu:

$$\eta = \frac{W_t}{Q} = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max}}$$

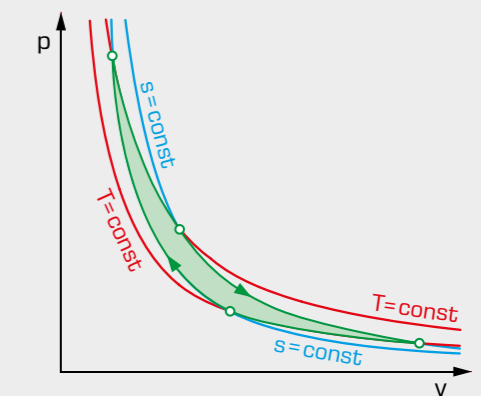
Der maximal mögliche Wirkungsgrad eines thermodynamischen Kreisprozesses ist also nur von den absoluten Maximal- und Minimaltemperaturen  $T_{\max}$ ,  $T_{\min}$  abhängig. Damit lässt der Carnot-Prozess Aussagen über die Güte eines beliebigen technischen Kreisprozesses zu. Man erkennt weiterhin, dass jeder thermodynamische Prozess eine Temperaturdifferenz braucht, um Arbeit zu leisten.

Die für den Carnot-Prozess notwendigen Zustandsänderungen wie isotherme und isentrope Verdichtung bzw. Expansion lassen sich nur schwer technisch realisieren. Daher ist dieser Prozess trotz seines hohen Wirkungsgrades nur von theoretischem Interesse.

Ein weiterer entscheidender Nachteil des Carnot-Prozesses ist im nebenstehenden p,v-Diagramm dargestellt. Trotz großer Druck- und Volumenunterschiede ist der Flächeninhalt des Diagramms und damit die geleistete mechanische Arbeit sehr klein. Dies bedeutet bei der Realisierung des Carnot-Prozesses eine große und schwere Maschine mit geringer Leistung.



Carnot-Prozess im T,s-Diagramm

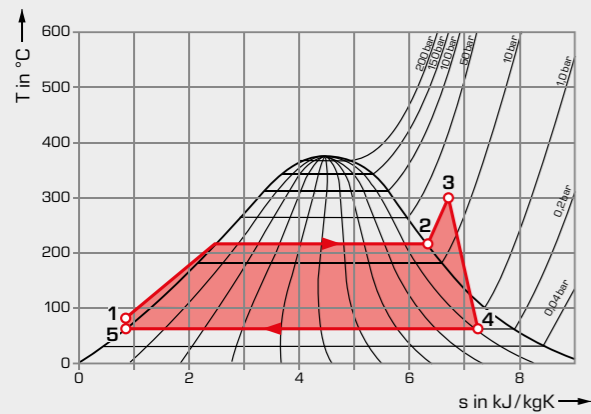


Carnot-Prozess im p,v-Diagramm

$W_t$  technische Nutzarbeit,  $Q$  Wärmeenergie,  $T$  Temperatur,  $p$  Druck,  $v$  spezifisches Volumen,  $s$  Entropie

Basiswissen  
Kreisprozesse

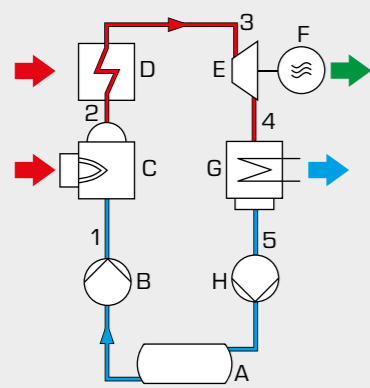
Dampfkraftanlage



T,s-Diagramm Dampfkraftanlage

Das T,s-Diagramm zeigt den Clausius-Rankine-Prozess einer Dampfkraftanlage. Das Arbeitsmedium ist Wasser bzw. Wasserdampf.

- 1 – 2 das Wasser wird im Dampfkessel bei einem Kessel-  
druck von 22 bar **isobar** erhitzt und verdampft
- 2 – 3 **isobare** Überhitzung des Dampfes auf 300°C
- 3 – 4 der Dampf expandiert **polytrop** in der Dampfturbine  
auf einen Druck von 0,2 bar und gibt dabei mechani-  
sche Energie ab
- Punkt 4** Nassdampfgebiet: der Dampfgehalt beträgt nur  
noch 90%
- 4 – 5 Kondensation des Dampfes
- 5 – 1 Druckerhöhung auf den Kesseldruck über Konden-  
sat- und Speisewasserpumpe, der Kreisprozess  
schließt sich

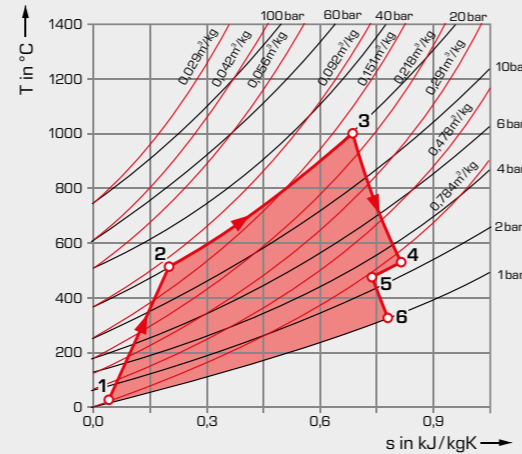


Prozessschema Dampfkraftanlage

A Speisewasserbehälter, B Speisewasserpumpe,  
C Dampfkessel, D Überhitzer, E Dampfturbine, F Generator,  
G Kondensator, H Kondensatpumpe;

- Wärmeenergie, tiefe Temperatur, (blue arrow)
- Wärmeenergie, hohe Temperatur, (red arrow)
- mechanische /elektrische Energie (green arrow)

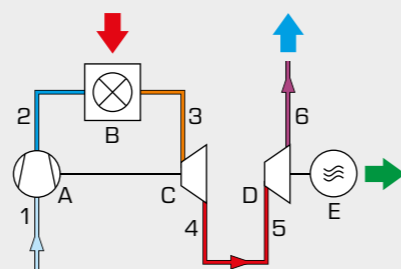
Gasturbinenanlage



T,s-Diagramm Gasturbinenanlage

Das T,s-Diagramm zeigt einen Gasturbinenprozess mit zwei-stu-  
figer Expansion in einer 2-Wellenanlage.

- 1 – 2 die Luft wird **polytrop** auf einen Druck von 20 bar  
verdichtet; am Austritt des Verdichters hat die Luft  
eine Temperatur von 500°C
- 2 – 3 **isobare** Erhitzung der Luft auf die Eintritts-  
temperatur der Hochdruckturbine von 1000°C  
durch die Einspritzung und Verbrennung von  
Brennstoff
- 3 – 4 **polytrope** Entspannung in der Hochdruckturbine,  
die den Verdichter antreibt
- Punkt 5** in dem Übergang zur Nutzturbine kühlt das Gas  
**isobar** etwas ab
- 5 – 6 die zweite Entspannung in der Nutzturbine: das  
gebrauchte Abgas entweicht und wird nicht erneut  
in den Prozess zurückgeführt; man spricht daher  
von einem offenen Gasturbinenprozess; die Umge-  
bung dient hier zur Abgabe der Prozesswärme

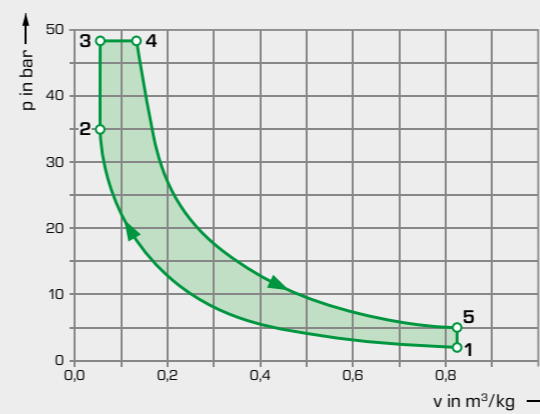


Prozessschema Gasturbinenanlage

A Verdichter, B Brennkammer, C Hochdruckturbine,  
D Nutzturbine, E Generator;

- Wärmeenergie, tiefe Temperatur, (blue arrow)
- Wärmeenergie, hohe Temperatur, (red arrow)
- Abgas, (purple arrow)
- mechanische /elektrische Energie (green arrow)

Verbrennungsmotor



p,v-Diagramm Verbrennungsmotor

Das p,v-Diagramm zeigt den Seiliger-Prozess eines Verbren-  
nungsmotors. Beim Verbrennungsmotor finden alle Zustands-  
änderungen zeitlich nacheinander im gleichen Raum, dem  
Zylinder, statt.

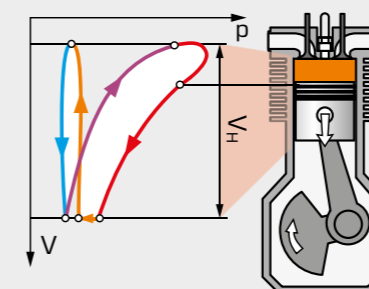
- 1 – 2 das Gas wird **polytrop** verdichtet
- Punkt 2** Zündung mit nachfolgender Verbrennung des  
Kraftstoffes

idealisierte Unterteilung der Verbrennung in:  
2 – 3 **isochorer** Anteil der Verbrennung  
3 – 4 **isobarer** Anteil der Verbrennung

- 4 – 5 polytrope (**isentrope**) Expansion mit Arbeits-  
leistung
- 5 – 1 **isochore** Entspannung und Ladungswechsel

Dies geschieht beim Zweitaktmotor ohne zusätzlichen Hub, beim  
Viertaktmotor schließt sich hier der Auspuff- und Ansaughub  
an. Der Seiliger-Prozess ist ebenso wie der Gasturbinenprozess  
ein offener Kreisprozess.

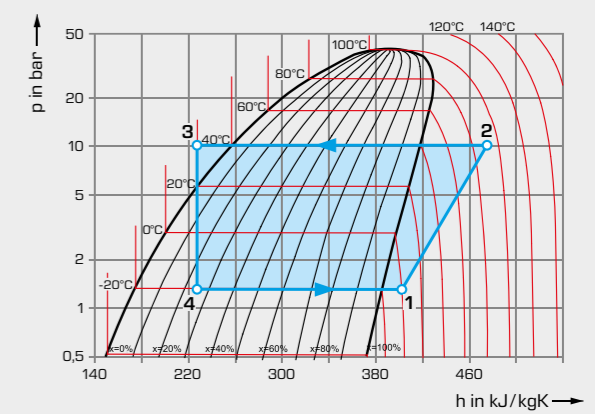
Bei dem Seiliger-Prozess handelt es sich um einen Vergleichs-  
oder Idealprozess in der Annahme eines idealen Motors. Der  
reale Arbeitsprozess wird im Indikator-Diagramm dargestellt.



Indikator-Diagramm eines 4-Takt-Motors

- p Druck, V Volumen, V<sub>H</sub> Hubvolumen;
- ansaugen, (blue arrow), verdichten, (purple arrow), arbeiten, (red arrow), ausstoßen, (orange arrow)

Kälteanlage

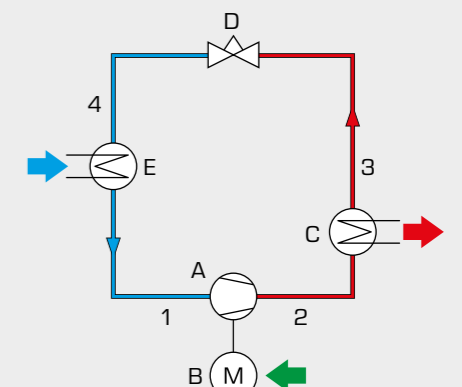


log p,h-Diagramm Kälteanlage

In diesem log p,h-Diagramm ist ein Kältekreisprozess einge-  
zeichnet. Das Arbeitsmedium ist das Kältemittel Fluor-Kohlen-  
wasserstoff R134a.

- 1 – 2 **polytrope** Verdichtung
- 2 – 3 **isobare** Abkühlung und Verflüssigung unter  
Wärmeabgabe
- 3 – 4 **isenthalpe** Entspannung auf Verdampfungsdruck
- 4 – 1 **isobare** Verdampfung unter Wärmeaufnahme

Nach einer gewissen Überhitzung des Kältemitteldampfes wird  
dieser in Punkt 1 vom Verdichter wieder angesaugt und ver-  
dichtet. Hiermit ist der Kreisprozess geschlossen.



Prozessschema Kälteanlage

A Verdichter, B Antriebsmotor, C Verflüssiger,  
D Expansionsventil, E Verdampfer;  
Wärmeenergie, tiefe Temperatur, (blue arrow)  
Wärmeenergie, hohe Temperatur, (red arrow)  
mechanische /elektrische Energie (green arrow)