

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 Kreis-

prozesses ihren Aggregatzustand ändern (Phasenumwandlung) wie Wasser, Ammoniak, Fluorkohlenwasserstoffe oder CO₂.

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.

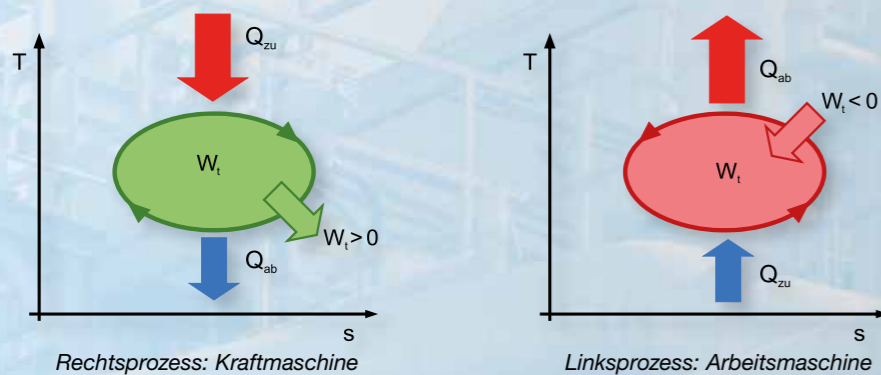
DARSTELLUNG DER KREISPROZESSE IN ZUSTANDSDIAGRAMMEN

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 mechanischer 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 insbesondere 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.



*W_t technische Nutzarbeit,
Q Wärmeenergie,
η Wirkungsgrad,
T Temperatur,
p Druck,
v spezifisches Volumen,
s Entropie,
h Enthalpie*

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

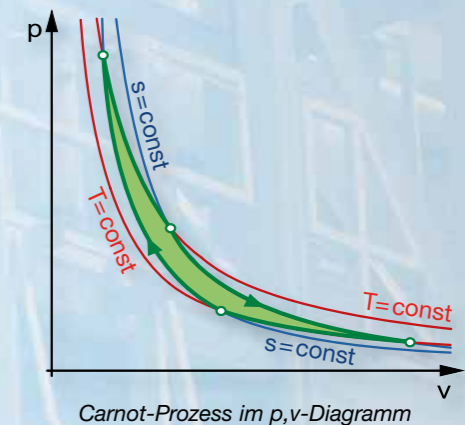
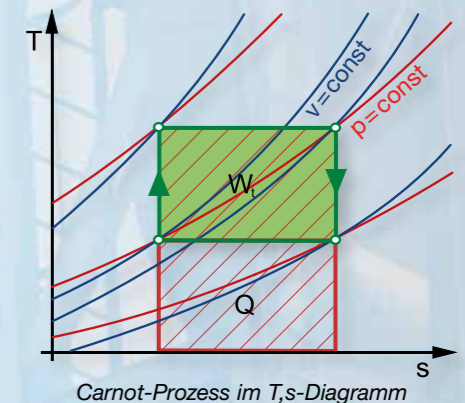
Im T,s-Diagramm bildet der Carnot-Prozess ein Rechteck. Die Fläche des Rechtecks ist ein Maß für die technische Nutzarbeit **W_t**. Die Fläche zwischen der Temperatur Null und maximalen Prozesstemperatur ist ein Maß für die aufgewendete Wärmeenergie **Q**. Damit berechnet sich der Wirkungsgrad des Carnot-Prozesses zu:

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

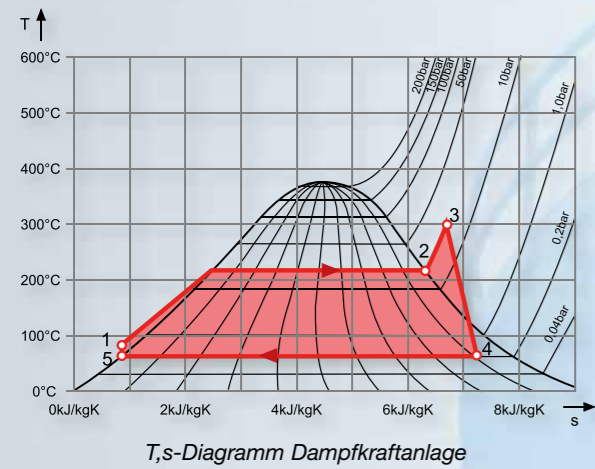
Der maximale Wirkungsgrad eines thermodynamischen Kreisprozesses ist also nur von den absoluten Maximal- und Minimaltemperaturen **T_{max}**, **T_{min}** abhängig. Damit lässt der Carnot-Prozess Aussagen über die Güte eines beliebigen technischen Kreisprozesses zu. Man erkennt weiterhin, dass jeder thermodynamische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

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.

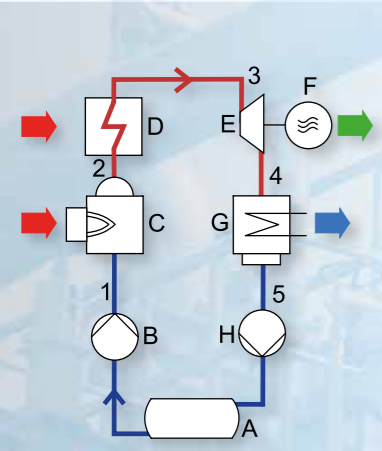


DAMPFKRAFTANLAGE



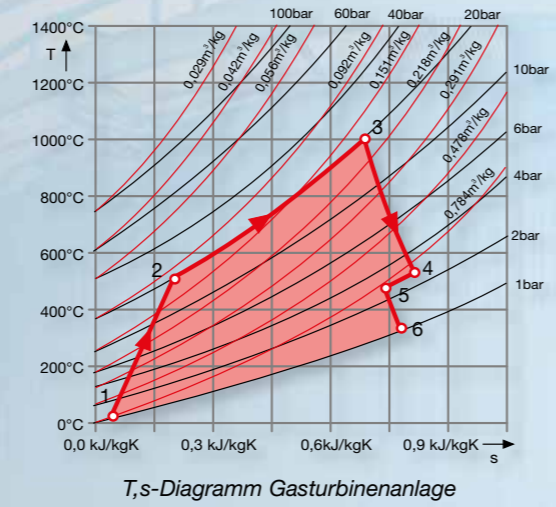
Das T,s-Diagramm zeigt den **Clausius-Rankine-Prozess** einer Dampfkraftanlage. Das Arbeitsmedium ist Wasser bzw. Wasserdampf.

- 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 Kondensat-
und Speisewasserpumpe, der Kreisprozess
schließt sich



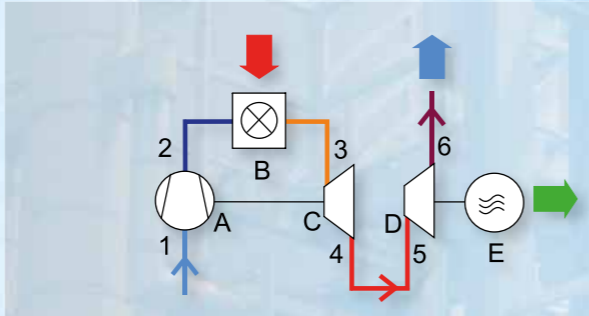
Prozessschema Dampfkraftanlage
A Speisewasserbehälter,
B Speisewasserpumpe,
C Dampfkessel,
D Überhitzer,
E Dampfturbine,
F Generator,
G Kondensator,
H Kondensatpumpe;
 ■ Wärmeenergie, tiefe Temperatur,
 ■ Wärmeenergie, hohe Temperatur,
 ■ mechanische/elektrische Energie

GASTURBINENANLAGE



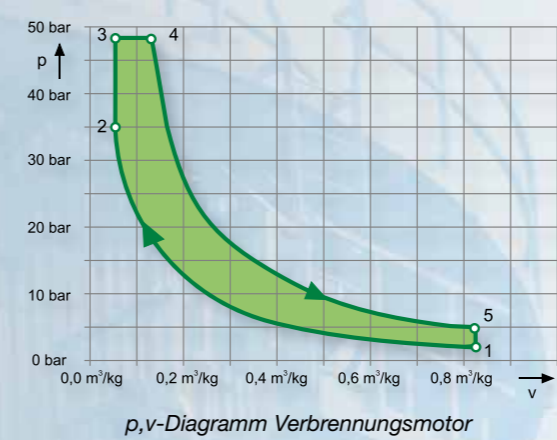
Das T,s-Diagramm zeigt einen Gasturbinenprozess mit zwei-stufiger Expansion in einer 2-Wellenanlage.

- 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 Turbineneintritts-
temperatur von 1000°C durch die Einspritzung und
Verbrennung von Brennstoff
- 3 – 4 **polytrope** Entspannung in der Antriebsturbine des
Verdichters
- 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 Niederdruckturbine, **E** Generator;
 ■ Wärmeenergie, tiefe Temperatur,
 ■ Wärmeenergie, hohe Temperatur,
 ■ Abgas, ■ mechanische/elektrische Energie

VERBRENNUNGSMOTOR

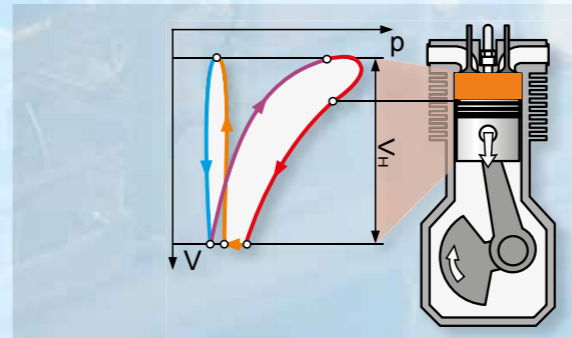


Das p,v-Diagramm zeigt den **Seiliger-Prozess** eines Verbrennungsmotors. Der Kreisprozess beim Verbrennungsmotor wird nicht kontinuierlich, sondern zyklisch durchlaufen. Alle Zustandsänderungen finden im gleichen Raum, dem Zylinder, statt.

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

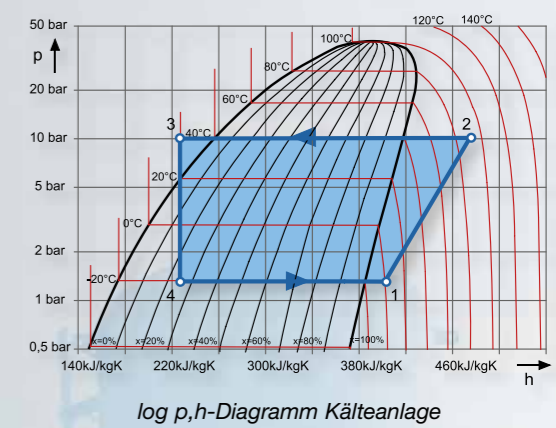
Dies geschieht beim Zweitaktmotor ohne zusätzlichen Hub, beim Viertaktmotor schließt sich hier der Auspuff- und Ansaughub an. Der Seiliger-Prozess ist ebenso wie der Gasturbinenprozess ein offener Kreisprozess.

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.



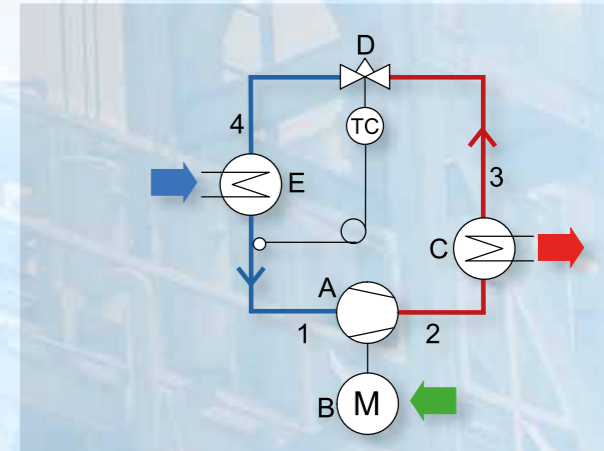
Indikator-Diagramm eines 4-Takt-Motors
 p Druck, V Volumen, V_H Hubvolumen;
 ■ ansaugen, ■ verdichten, ■ arbeiten, ■ ausstoßen

KÄLTEANLAGE



In diesem log p,h-Diagramm ist ein Kältekreisprozess eingezeichnet. Das Arbeitsmedium ist das Kältemittel Fluorkohlenwasserstoff R134a.

- 1 – 2 das bei niedrigem Druck und niedriger Temperatur gas-
förmige Kältemittel wird verdichtet, **polytrope** Verdichtung
- Punkt 2** das unter hohem Druck (10bar) und hoher Temperatur
stehende Kältemittel verlässt den Verdichter und wird im Ver-
flüssiger **isobar** unter Wärmeabgabe bis zum **Punkt 3** gekühlt
und verflüssigt. Mit einer Temperatur von 40°C tritt das Kälte-
mittel flüssig in das Expansionsventil ein und wird **adiabat** auf
den Verdampfungsdruck von 1,3 bar bei **Punkt 4** entspannt.
Zwischen **4 und 1** verdampft das Kältemittel **isobar** unter
Wärmeaufnahme und kühlt mit einer Temperatur von -20°C.
Nach einer gewissen Überhitzung des Kältemitteldampfes
wird dieser in **Punkt 1** vom Verdichter wieder angesaugt und
verdichtet. Hiermit ist der Kreisprozess geschlossen.



Prozessschema Kälteanlage
A Verdichter, **B** Antriebsmotor, **C** Verflüssiger,
D Expansionsventil, **E** Verdampfer;
 ■ Wärmeenergie, tiefe Temperatur,
 ■ Wärmeenergie, hohe Temperatur,
 ■ mechanische/elektrische Energie