Fahrwiderstand

$F_F = \mu_F \cdot F_N$	**Fahrwiderstandskraft** in N

μ_F	Fahrwiderstandszahl	1
	Schienenfahrzeuge $\mu_F \approx 0{,}0015 \ldots 0{,}0030$	
	Kfz auf Straße $\mu_F \approx 0{,}015 \ldots 0{,}03$	

Seilreibung (→ Bild 20/1)

$F_1 = F_2 \cdot e^{\mu\alpha}$	**übertragbare Seilkraft** in N
$F_R = F_2 \cdot (e^{\mu\alpha} - 1)$	**Seilreibungskraft** in N
$F_R = F_1 \cdot \dfrac{e^{\mu\alpha} - 1}{e^{\mu\alpha}}$	**Seilreibungskraft** in N

e = Euler'sche Zahl = 2,718... $\boxed{\alpha \text{ in rad}}$

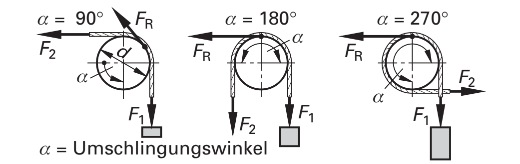

Bild 20/1

μ	Reibungszahl	1
F_2	Zugkraft	N
α	Umschlingungswinkel	rad

2.2.11 Arbeit und Energie

Die mechanische Arbeit

$W = F \cdot s$	**mechanische Arbeit** F und s gleichgerichtet

[W] = [F] · [s] = N · m = **Nm**

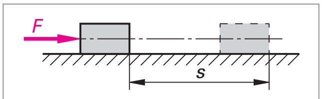

Bild 20/2

W	mechanische Arbeit	Nm
F	Kraft	N
s	Kraft in Wegrichtung	m

Arbeits- und Energieeinheiten

1 J = 1 Nm = 1 Ws	**Energieäquivalenz**

J = **Joule** ⟶ bevorzugt in Wärmelehre
Nm = **Newtonmeter** ⟶ bevorzugt in Mechanik
Ws = **Wattsekunde** ⟶ bevorzugt in Elektrotechnik

> Die abgeleitete SI-Einheit für die mechanische Arbeit ist das **Joule** (Einheitenzeichen: J). 1 J ist gleich der Arbeit, die verrichtet wird, wenn der Angriffspunkt der Kraft F = 1 N in Richtung der Kraft um s = 1 m verschoben wird (→ Bild 20/2).

Die Arbeitskomponente der Kraft (→ Bild 20/3)

> Als Arbeitskomponente wird die Kraftkomponente in Wegrichtung bezeichnet.

$F_x = F \cdot \cos\alpha$	**Arbeitskomponente** (→ Bild 20/3)
$W = F \cdot \cos\alpha \cdot s$	**mechanische Arbeit**

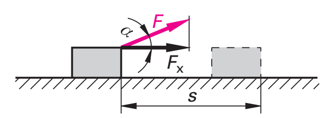

Bild 20/3

Hubarbeit und potenzielle Energie (→ Bild 20/4)

$W_h = F \cdot h$	**Hubarbeit** in Nm
$W_{pot} = F_G \cdot h = m \cdot g \cdot h$	**potenzielle Energie** = Energie der Lage

Bei Vernachlässigung der **Zapfen- und Seilreibung** ist $F = F_G$. Dann ist bei gleichem Weg $W_h = W_{pot}$.

> Die zugeführte Hubarbeit W_h entspricht der Zunahme an potenzieller Energie W_{pot}.

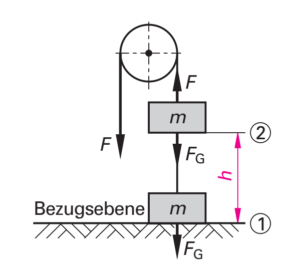

Bild 20/4

Beschleunigungsarbeit und kinetische Energie (→ Bild 20/5)

$W_a = m \cdot a \cdot s = \dfrac{m}{2} \cdot v_t^2$	**Beschleunigungsarbeit aus der Ruhe** in Nm
$W_{kin} = \dfrac{m}{2} \cdot v^2$	**kinetische Energie = Bewegungsenergie** in Nm

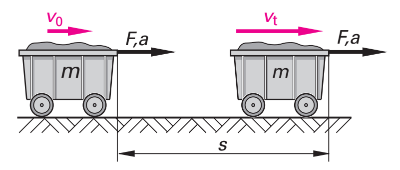

Bild 20/5

Grundlagen

2.4.6 Die Energiegleichung nach Bernoulli

Mithilfe des Energieerhaltungssatzes der Dynamik hat der Schweizer Mathematiker und Physiker Daniel **Bernoulli (1700 bis 1782)** eine weitere wichtige Strömungsgleichung – die **Energiegleichung** – aufgestellt. Diese **„Bernoulli'sche Gleichung"** ist neben der Kontinuitätsgleichung die zweite grundlegende Beziehung, auf der alle Berechnungen in der Strömungslehre aufbauen. Der Energiesatz lautet:

> Die Energie am Ende eines technischen Vorganges ist genauso groß wie die Summe der Energie am Anfang und der während des technischen Vorganges zu- oder abgeführten Energien.

Da die **Strömungsverluste** vorerst noch unberücksichtigt bleiben sollen und eine **stationäre Rohrströmung** zu Grunde gelegt wird, kann man davon ausgehen, dass während der Strömung durch die Rohrleitung dem Fluid weder Energie zu- noch abgeführt wird. Nun stellt sich natürlich die Frage nach den bei der Fluidströmung beteiligten Energien. Klarheit hierüber wird uns Bild 30/1 verschaffen.

Bild 30/1 zeigt eine sich verjüngende in Strömungsrichtung abfallende Rohrleitung. Es ist zu erkennen, dass sich beim Strömen vom Punkt ① zum Punkt ② die

potenzielle Energie $W_{pot} = m \cdot g \cdot h$

und wegen der Geschwindigkeitsveränderung auch die

kinetische Energie $W_{kin} = \frac{m}{2} \cdot v^2$

verändern (→2.2.11).

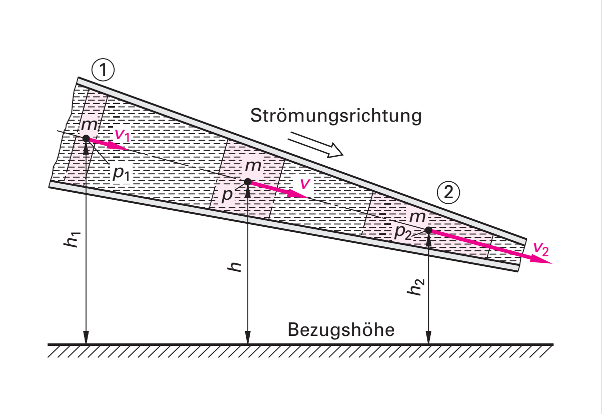

Bild 30/1: Strömendes Fluid

Diese Energien repräsentieren jeweils einen Teilbetrag der gesamten **Strömungsenergie.**

Da an jeder Stelle der Rohrleitung auch ein **statischer Druck** vorhanden ist, beinhaltet die Strömungsenergie zum Teil auch

Druckenergie (→2.7.1) $W_d = p \cdot V$ ⟶ $[\boldsymbol{W_d}] = [p] \cdot [V] = \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot \text{m}^3 = \textbf{Nm}$

Man erkennt:

> In einem strömenden Fluid ist neben kinetischer Energie auch potenzielle Energie und Druckenergie gespeichert.

Dies war die Erkenntnis von Bernoulli und demzufolge lautet an jeder Stelle der Rohrleitung die Bernoulli´-sche Gleichung in ihrer einfachsten Form:

$$W = W_d + W_{pot} + W_{kin} = \text{konst.}$$

Setzt man die o. g. Berechnungsgleichungen ein, dann erhält man bei $\boldsymbol{m = V \cdot \varrho}$ die

Bernoulli'sche Energiegleichung

$$W = p \cdot V + V \cdot \varrho \cdot g \cdot h + \frac{V \cdot \varrho}{2} \cdot v^2 = \text{konst.}$$

Beim Vergleich der Stellen ① und ② wird schließlich

$$p_1 \cdot V + V \cdot \varrho \cdot g \cdot h_1 + \frac{V \cdot \varrho}{2} \cdot v_1^2 = p_2 \cdot V + V \cdot \varrho \cdot g \cdot h_2 + \frac{V \cdot \varrho}{2} \cdot v_2^2$$

Teilt man nun beide Seiten dieser Gleichung durch das Volumen V, dann erhält man die

2.9.4.6 Der Stirling-Prozess

① ➞ ②: isotherme Wärmeabfuhr (Kompression), Arbeitszufuhr

② ➞ ③: isochore Wärmezufuhr

③ ➞ ④: isotherme Wärmezufuhr (Expansion), Arbeitsabfuhr

④ ➞ ①: isochore Wärmeabfuhr

$$\boxed{\eta_{th} = 1 - \frac{T_1}{T_3}}$$

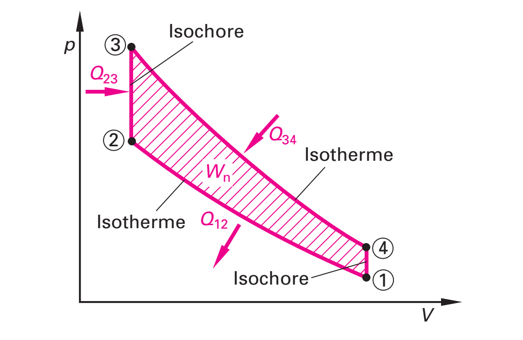

Bild 70/1: Stirling-Prozess

2.9.4.7 Der Carnot-Prozess

① ➞ ②: isentrope Kompression

② ➞ ③: isotherme Wärmezufuhr (Expansion)

③ ➞ ④: isentrope Expansion

④ ➞ ①: isotherme Wärmeabfuhr (Kompression)

$$\boxed{\eta_{th} = 1 - \frac{T_4}{T_2}}$$

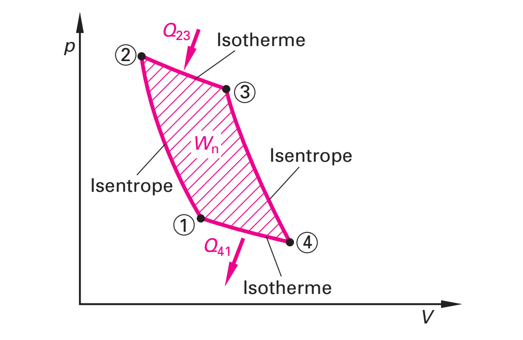

Bild 70/2: Carnot-Prozess

2.9.4.8 Der (klassische) Dampfkraftprozess

Dieser Kraftmaschinenprozess wird nach dem deutschen Physiker Rudolf **Clausius (1822 bis 1888)** und dem schottischen Ingenieur William John **Rankine (1820 bis 1872)** benannt. Er besteht, wie der Joule-Prozess, aus zwei Isentropen und zwei Isobaren. Der Unterschied liegt aber darin, dass sich beim **Joule-Prozess** das Prozessmedium annähernd wie ein **ideales Gas** verhält, während beim **Dampfkraftprozess** eine ständige **Änderung des Aggregatzustandes flüssig – dampfförmig** gegeben ist.

Deshalb zeigt Bild 70/3 den Prozess in Verbindung mit dem ***p, V*-Diagramm für Wasserdampf** (→2.6.9).

> Der Clausius-Rankine-Prozess ist ein **geschlossener Prozess** (→2.9.4.1).

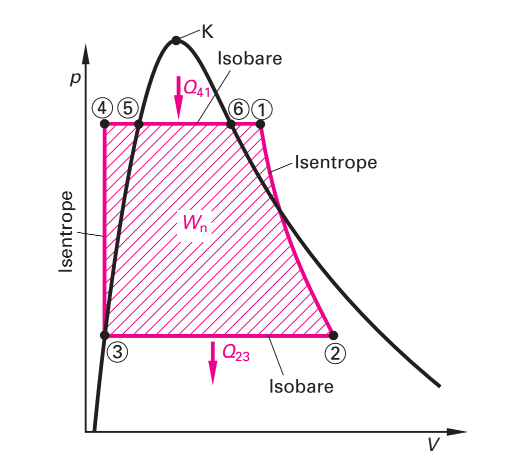

Bild 70/3: Clausius-Rankine-Prozess

Ablauf des Clausius-Rankine-Prozesses

① ➞ ②: isentrope Entspannung (Expansion) in der Wärmekraftmaschine (Dampfturbine oder Kolbendampfmaschine)

② ➞ ③: isobare Wärmeabfuhr bei gleichzeitiger Kondensation des Dampfes in einem Kondensator.

5.2 Verdichter

Unter einem Verdichter wird eine Arbeitsmaschine zur Verdichtung von gas- oder dampfförmigen Medien von einem niederen **Anfangsdruck** auf einen höheren **Enddruck** verstanden. Anfangs- und Enddruck können gegenüber dem Atmosphärendruck im **Unterdruckgebiet** oder im **Überdruckgebiet** liegen (→ 2.3.1).

Das **Verhältnis der absoluten Drücke** am Anfang der Verdichtung und am Ende der Verdichtung wird als **Druckverhältnis** bezeichnet.

5.2.1 Verdichterbezeichnungen

Bei **kleinen Druckverhältnissen** sind für Verdichter die folgenden Bezeichnungen üblich:

- **Ventilator** Druckverhältnis bis 1,1. Verwendung nur zur Luftbewegung
- **Gebläse** Druckverhältnis 1,1 bis 3,0. Verwendung in Lüftungsanlagen. Bei Luftabsaugung werden sie auch als **Lüfter** bezeichnet.

Unter einer **Verdichtung,** die man auch als **Kompression** (→ 2.6.3, 2.6.4, 2.8, 2.9) bezeichnet, versteht man die Verringerung des Volumens und dadurch die **Erhöhung des Druckes,** insbesondere bei Gasen und Dämpfen.

Somit ist auch die früher sehr häufig für einen Verdichter verwendete Bezeichnung Kompressor erklärt. An dieser Stelle kann das Folgende festgestellt werden:

Ein **Verdichter** verdichtet bzw. fördert Gase bzw. Dämpfe, eine **Pumpe** fördert Flüssigkeiten.

Sieht man einmal von den Ventilatoren und Gebläsen bzw. Lüftern ab, dann umfasst die große Gruppe der Verdichter – entsprechend unterschiedlicher **Druckbereiche** nach Tabelle 235/1

- **Vakuumpumpen,**
- **Niederdruckverdichter,**
- **Mitteldruckverdichter,**
- **Hochdruckverdichter**
- **Höchstdruckverdichter.**

Tabelle 235/1: Druckbereiche und Verdichterbezeichnungen

Bezeichnung	Druckbereich	Verwendungszweck
Vakuumpumpe	$< p_{amb}$ (Saugseite)	Fördern von Gasen und Dämpfen aus Räumen in denen ein Unterdruck herrscht (→ 2.3.1)
Niederdruckverdichter	2 bis 10 bar	Hauptsächlich zur Erzeugung von Druckluft für Werkstattbetriebe und zum Antrieb von druckluftbetriebenen Werkzeugen (→ 5.6), Kältemittelverdichter (→ 5.3)
Mitteldruckverdichter	10 bis 100 bar	Ferngasverdichter, chemische Industrie, Verdichter für die Anlassluft von mittleren und großen Dieselmotoren (→ 4.7.3), Kältemittelverdichter (→ 5.3)
Hochdruckverdichter	100 bis 500 bar	Hochdruckbearbeitung in der Fertigung, chemische Industrie, Kältemittelverdichter (→ 5.3)
Höchstdruckverdichter	500 bis 2000 bar	Beinahe ausschließlich in der chemischen Verfahrenstechnik

Verdichter können **Verdrängermaschinen** oder **Strömungsmaschinen** sein, ganz im Sinne der Bezeichnungsprinzipien bei den Verbrennungskraftmaschinen (→ 4.7) und den Pumpen (→ 5.1). Man unterscheidet:

- **Verdrängerverdichter** Hubkolbenverdichter, Drehkolbenverdichter
- **Strömungsverdichter** Turboverdichter

Bild 236/1 zeigt die **Einsatzbereiche** verschiedener Verdichterbauarten.