

Thermodynamik

Prof. Dr.-Ing. Peter Hakenesch

peter.hakenesch@hm.edu

www.lrz-muenchen.de/~hakenesch

1	Einführung	6
1.1	Inhalt und Bedeutung der Thermodynamik	6
1.2	Historischer Rückblick	10
2	Grundbegriffe.....	15
2.1	Physikalische Größen	15
2.2	Thermodynamische Systeme.....	20
2.2.1	Allgemeines System	21
2.2.2	Formen von Energieübertragung	22
2.2.3	Unterscheidungsmerkmale von Systemen	23
2.2.4	Gleichgewichtssatz	27
2.3	Zustand, Zustandsgrößen, Zustandsänderungen	28
3	Systembeschreibung	36
3.1	Stoff und Menge	36
3.1.1	Volumen	36
3.1.2	Stoffmenge	37
3.1.3	Mengenströme	42
3.2	Druck, Temperatur und Energie	46
3.2.1	Druck	46
3.2.2	Temperatur	49
3.2.3	Energie	52
4	Zustandsgleichungen.....
4.1	Zustandsflächen
4.2	Festkörper
4.2.1	Thermische Längendehnung
4.2.2	Thermische Flächendehnung
4.2.3	Thermische Volumendehnung
4.3	Flüssigkeiten
4.4	Ideale Gase
4.4.1	Gesetz von Gay-Lussac

4.4.2	Gesetz von Boyle-Mariotte	
4.4.3	Thermische Zustandsgleichung des idealen Gases	
4.4.4	Gesetz von Avogadro	
4.4.5	Mischung idealer Gase	
4.5	Reale Gase	
4.6	Dämpfe.....	
4.6.1	Dampfarten	
4.6.2	Dampfdruckkurven	
4.6.3	Grenzkurven	
4.6.4	Thermische Zustandsgleichung von Dampf	
5	Kinetische Gastheorie.....	
5.1	Druck als Ergebnis von Stoßvorgängen.....	
5.2	Temperatur als Maß der kinetischen Energie	
6	Der erste Hauptsatz der Thermodynamik.....	
6.1	Der erste Hauptsatz für geschlossene Systeme	
6.1.1	Inhalt des ersten Hauptsatzes	
6.1.2	Mechanische Arbeit und mechanische Energie	
6.1.3	Volumenänderungsarbeit	
6.1.4	Wellenarbeit	
6.1.5	Dissipationsenergie	
6.1.6	Innere Energie	
6.1.7	Wärme	
6.2	Der erste Hauptsatz für ruhende geschlossene Systeme	
6.3	Der erste Hauptsatz für bewegte geschlossene Systeme.....	
6.4	Der erste Hauptsatz für stationäre Fließprozesse.....	
6.4.1	Technische Arbeit	
6.4.2	Enthalpie	
6.5	Instationäre Prozesse in offenen Systemen.....	

7	Kalorische Zustandsgleichungen	
7.1	Kalorische Zustandsgleichungen der inneren Energie.....	
7.2	Kalorische Zustandsgleichungen der Enthalpie	
7.3	Innere Energie und Enthalpie fester und flüssiger Phasen	
7.4	Innere Energie und Enthalpie idealer Gase	
7.5	Innere Energie und Enthalpie von Dämpfen	
7.6	Spezifische Wärmekapazitäten	
7.6.1	Wahre spezifische Wärmekapazitäten	
7.6.2	Mittlere spezifische Wärmekapazitäten	
8	Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik.....	
8.1	Inhalt des zweiten Hauptsatzes.....	
8.2	Entropie.....	
8.2.1	Entropie und Wahrscheinlichkeit	
8.2.2	Entropie als Zustandsgröße	
8.2.3	Eigenschaften der Entropie	
8.2.4	Entropie reversibler Prozesse	
8.2.5	Entropie irreversibler Prozesse	
8.2.6	Entropie fester und flüssiger Phasen	
8.2.7	Entropie idealer Gase	
8.2.8	Entropie der Dämpfe	
9	Zustandsänderungen	
9.1	Wärme und Arbeit bei reversiblen Zustandsänderungen idealer Gase.....	
9.1.1	Isochore Zustandsänderung	
9.1.2	Isobare Zustandsänderung	
9.1.3	Isotherme Zustandsänderung	
9.1.4	Adiabate Zustandsänderung	
9.2	Wärme und Arbeit bei polytroper Zustandsänderung.....	
9.3	Wärme- und Arbeit in Entropiediagrammen	
9.4	T,s -Diagramme idealer Gase	
9.4.1	Isochore Zustandsänderung idealer Gase	

- 9.4.2 Isobare Zustandsänderung idealer Gase
- 9.4.3 Isotherme Zustandsänderung idealer Gase
- 9.4.4 Isentrope Zustandsänderung idealer Gase
- 9.4.5 Adiabate Zustandsänderung idealer Gase
- 9.5 T,s -Diagramm realer Gase.....
- 9.6 h,s -Diagramme.....
- 9.7 Zusammenfassung der Zustandsänderungen.....

10 Reversible Kreisprozesse

- 10.1 Allgemeine Kennzeichen eines Kreisprozesses.....
- 10.2 Kreisprozesse geschlossener Systeme
- 10.3 Kreisprozesse in offenen Systemen
- 10.4 Bewertungskennzahlen für Kreisprozesse
- 10.4.1 Thermischer Wirkungsgrad (rechtsdrehende Prozesse)
- 10.4.2 Leistungsziffer (linksdrehende Prozesse)

11 Kreisprozesse thermischer Maschinen

- 11.1 Vergleichsprozesse für Kolbenmaschinen
- 11.1.1 Otto-Prozeß
- 11.1.2 Diesel-Prozeß
- 11.1.3 Seiliger-Prozeß
- 11.1.4 Stirling-Prozeß
- 11.2 Vergleichsprozesse für Turbomaschinen
- 11.2.1 Joule-Prozeß
- 11.2.2 Ericson-Prozeß
- 11.2.3 Clausius-Rankine-Prozeß
- 11.3 Carnot-Prozeß.....
- 11.4 Isentroper Wirkungsgrad adiabater Maschinen.....
- 11.5 Prozeßoptimierung.....
- 11.5.1 Wärmerückgewinnung
- 11.5.2 Zwischenkühlung
- 11.5.3 Zwischenerhitzung

- 11.5.4 Kombinierte Zwischenkühlung und Zwischenerhitzung
- 11.5.5 Abgasturbolader

12 Kälteanlagen

- 12.1 Allgemeiner Kältemaschinenprozeß.....
- 12.2 Dampf-Kompressions-Kälteanlage.....
- 12.3 Absorptionsverfahren
- 12.4 Luftverflüssigung (Lindeverfahren).....

1 Einführung

1.1 Inhalt und Bedeutung der Thermodynamik

Hauptaufgabengebiet der Thermodynamik:

- Untersuchung und Beschreibung von Energieumwandlungsprozessen durch Analyse der unterschiedlichen Erscheinungsformen von Energie und deren Verknüpfungen in Energiebilanzgleichungen
- ⇒ Grundlage zur Konzeption und Auslegung von Anlagen zur Energieumwandlung, z.B.
- Klassische Dampfmaschine
 - Verbrennungsmotoren in Kraftfahrzeugen und Luftfahrzeugen
 - Kraftwerken auf Wind-, Wasser- oder Kernkraftbasis
 - Klimatechnik, Lüftungs- oder auch die Kältetechnik.

Basis der Thermodynamik

Beschreibung durch die sogenannten Hauptsätze der Thermodynamik

- Keine Ableitung aus bereits bewiesenen physikalischen Gesetzen
- Postulate, die auf allgemeinen Erfahrung basieren
- Arbeitshypothesen, die bis heute noch nicht widerlegt werden konnten

Zusammenfassung der Kernaussagen in Hauptsätzen

Erster Hauptsatz oder auch der **Energieerhaltungssatz**

Energie kann weder erzeugt noch vernichtet werden; sie kann lediglich zwischen verschiedenen Erscheinungsformen umgewandelt werden

Zweiter Hauptsatz

Beschreibt Grenzen der Energieumwandlung und welche Umwandlungsprozesse überhaupt möglich sind

Dritter Hauptsatz

Beschreibt die Nichterreichbarkeit des absoluten thermischen Nullpunktes

Nullter Hauptsatz

Definition des thermischen Gleichgewichts

Thermodynamik nach dem heutigen Verständnis ist eine allgemeine Energielehre, Unterteilung in **statistische** und **phänomenologische** Thermodynamik

- **Statistische** bzw. **molekularstatistische Thermodynamik** geht von der molekularen Struktur der Materie aus und berechnet die Wechselwirkung zwischen den Molekülen und ihrer Umgebung unter Anwendung mathematisch-statistischer Methoden (kinetische Gastheorie)
- **Klassische** oder auch **phänomenologische Thermodynamik** stützt sich auf die Beobachtung thermodynamischer Prozesse aus deren Ablauf empirische Gesetze abgeleitet werden. Dieser Ansatz wird in der folgenden Vorlesung weiter verfolgt werden

1.2 Historischer Rückblick

Historische Entwicklung der Erforschung von Wärmeerscheinungen begründete die frühere Bezeichnung Wärmelehre für Thermodynamik

Bis Mitte des 19. Jahrhunderts ordnete man Wärme einem hypothetischen unzerstörbaren Stoff (*caloricum*) zu.

- ⇒ Entspricht in groben Zügen dem Prinzip des ersten Hauptsatzes (Energieerhaltung)
- ⇒ Vorstellung der stofflichen Eigenschaft war jedoch unzutreffend

D. Papin (1647-1712) und T. Newcomen (1663-1729) bzw. J. Watt (1736-1819)

Entwicklung der ersten Wärmekraftmaschinen (Dampfmaschinen)

⇒ Erste Zweifel an der Stofftheorie

Lord Rumford (1753-1814)

Beobachtet Aufheizung beim Aufbohren von Kanonenrohren

⇒ Vorstellung, daß es eine Äquivalenz zwischen Wärme und Arbeit geben müsse

J.P. Joule (1818-1889)

Weiterentwicklung dieser Idee

⇒ Bestimmung des sogenannten mechanischen Wärmeäquivalents auf experimentellem Weg

N.L.S. Carnot (1796-1832)

Mitbegründer der modernen Thermodynamik

- ⇒ Entwicklung der Theorie, daß Wärme und Arbeit äquivalente Energieformen seien,
jedoch keine Veröffentlichung seiner Theorie

J.R. Mayer (1814-1878)

Veröffentlichung dieser Theorie unabhängig von den Arbeiten von Joule und Carnot

- ⇒ Mit der später erfolgten Veröffentlichung des ersten Hauptsatzes wurde die Stofftheorie als
Gedankenmodell endgültig ad acta gelegt

R. Clausius (1822-1888)

- ⇒ Erste quantitative Formulierung des **ersten Hauptsatzes** durch Gleichungen zwischen den Größen Wärme, Arbeit und innere Energie auf der Basis der Arbeiten von Carnot, Mayer und Joule
- ⇒ Einführung einer neuen Größe Zur Definition des **zweiten Hauptsatzes** ‚Äquivalenzwert einer Verwandlung‘ und später (1865) als **Entropie**

W. Thomson (1824-1907), seit 1892 Lord Kelvin

- ⇒ Gelange unabhängig von Clausius fast zeitgleich zu anderen Formulierungen des zweiten Hauptsatzes
- ⇒ Theorie von der Zerstreuung der Energie (dissipation of energy), d.h., bei real vorkommenden Prozessen verringert sich der Vorrat an umwandelbarer bzw. arbeitsfähiger Energie
- ⇒ Aus dem zweiten Hauptsatz schloß Thomson auf die Existenz einer universellen Temperaturskala (**Kelvin-Skala**)

Entropiebegriff nach der Definition von Clausius

- ⇒ Herleitung von allgemeingültigen Gesetzen aus den thermodynamischen Hauptsätzen für das Verhalten der Materie in ihren unterschiedlichen Aggregatzuständen und in chemischen Reaktionen

- ⇒ Entwicklung einer neuer Disziplin, der sogenannten physikalischen Chemie, deren Grundlagen von J.W. Gibbs (1839-1903) durch die Definition der Phasenregel mit entwickelt wurden

2 Grundbegriffe

2.1 Physikalische Größen

Charakteristische Eigenschaften von Objekten, wie z.B.

- Gewicht
- Abmessungen
- Temperatur
- Leistung einer Maschine

Wahl geeigneter Einheiten und Definitionen ist in beliebiger Art und Weise möglich

Technischen Naturwissenschaften

Verwendung des international vereinbarten 'Système International d'Unité' oder auch SI-System

Ausnahmen

USA, UK, Luftfahrt, Verwendung des englischen und amerikanischen Maßsystems bzw. einer Mischung aus beiden und dem SI-System

Deutschland

Gesetz über die Einheiten im Meßwesen vom 02.07.1969 schreibt die Verwendung des international vereinbarten 'Système International d'Unité' oder auch SI-System vor

aber

Diese Erkenntnis hat sich offensichtlich noch nicht bis zum Luftfahrt-Bundesamt (LBA) durchgesetzt

SI-Systems - Vorteile

Ausgehend von sieben Basiseinheiten lassen sich alle weiteren physikalischen Größen durch eine Kombination dieser Basiseinheiten darstellen, bzw. ineinander überführen

Größe	Einheit	Zeichen	Definition
Länge	Meter	m	siehe Tab. 14.1
Masse	Kilogramm	kg	
Zeit	Sekunde	s	
Elektrische Stromstärke	Ampère	A	
Temperatur	Kelvin	K	
Lichtstärke	Candela	cd	
Stoffmenge	Mol	mol	

Basiseinheiten des SI-Systems

SI-Systems - abgeleitete Größen

Größe	Einheit	Zeichen	Definition
Kraft	Newton	N	$N = \text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$
Leistung	Watt	W	$W = \text{N} \cdot \text{m}/\text{s}$
Energie, Arbeit	Joule	J	$J = \text{N} \cdot \text{m}$
Druck	Pascal	Pa	$\text{Pa} = \text{N}/\text{m}^2$

Abgeleitete Größen des SI-Systems

SI-Systems - Definitionen

Größe	Einheit	Zeichen	Definition
Länge	Meter	[m]	Länge, die das Licht im Vakuum in 1/299792458 Sekunden durchläuft
Masse	Kilogramm	[kg]	Masse des internationalen Kilogramm-Prototyps
Zeit	Sekunde	[s]	9192631770fache Periodendauer der dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustandes von Atomen des Nuklids ^{133}Cs entsprechenden Strahlung.
Elektr. Stromstärke	Ampère	[A]	Die Stärke eines zeitlich konstanten elektrischen Stroms, der durch zwei im Vakuum parallel, im Abstand von 1 Meter voneinander angeordnete, geradlinige, unendlich lange Leiter von vernachlässigbar kleinem kreisförmigen Querschnitt fließend, zwischen diesen pro 1 Meter Leiterlänge eine elektrodynamische Kraft von $2 \cdot 10^{-7}$ N erzeugen würde.
Temperatur	Kelvin	[K]	Der 273.16te Teil der Temperatur des Tripelpunktes von Wasser
Lichtstärke	Candela	[cd]	Die Lichtstärke in einer bestimmten Richtung einer Strahlungsquelle, die monochromatische Strahlung von $540 \cdot 10^{12}$ Hz aussendet und deren Strahlstärke in dieser Richtung 1/683 Watt pro Steradian beträgt.
Stoffmenge	Mol	[mol]	Die Stoffmenge eines Systems, das aus ebensovielen Teilchen besteht, wie Atome in 0.012 kg des Nuklids ^{12}C enthalten sind.

2.2 Thermodynamische Systeme

Beschreibung von Prozeßabläufen und Maschinen oder Teilen von Maschinen, Beschreibung durch mehr oder weniger willkürliche Definition von Systemgrenzen

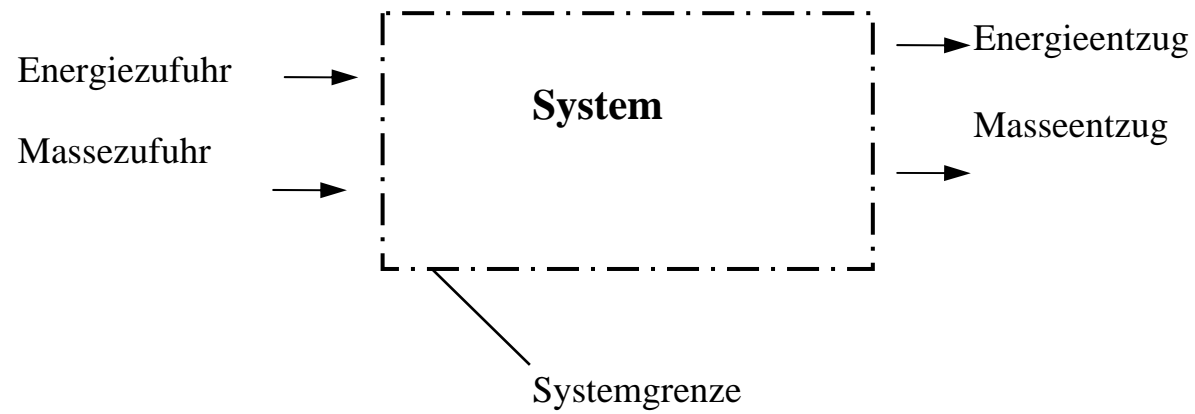
System- oder auch Kontrollgrenzen

- Erfassung des Energie- und Masseaustauschs des Systems mit seiner Umwelt
- Festlegung von Systemgrenzen orientiert sich zweckmäßigerweise an der konkreten Problemstellung, z.B. der inneren oder äußeren Umrandung einer Brennkammer oder eines Dampfkessels, kann aber auch beliebiger abstrakter Natur sein
- Wesentliches Merkmal einer Systemgrenze ist die Möglichkeit die über die Systemgrenzen hinweg stattfindenden Energie- und Masseströme sinnvoll erfassen zu können.

Vorzeichendefinition für Energie- und Massenströme

- Positiv für Ströme, die in das System hineinfließen,
- negativ für Ströme, die das System verlassen

2.2.1 Allgemeines System



2.2.2 Formen von Energieübertragung

Mechanische Arbeit

Kolbenbewegung in einem Zylinder durch Expansion des Gases im Kontrollraum

Thermische Energie

Aufheizung des Kontrollvolumens durch Verbrennung oder Kompression des Kontrollraums

Stoffgebundene Energieübertragung

Massefluß zu oder aus dem Kontrollraum

Wärmestrahlung

Erwärmung durch Sonneneinstrahlung, Heizstrahler

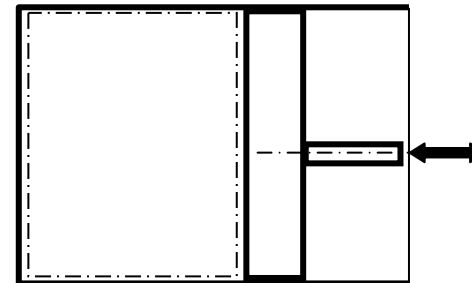
2.2.3 Unterscheidungsmerkmale von Systemen

Geschlossene Systeme

Merkmal: Materieundurchlässig, d.h. es findet kein Masseaustausch über die Systemgrenze hinweg mit der Umgebung statt



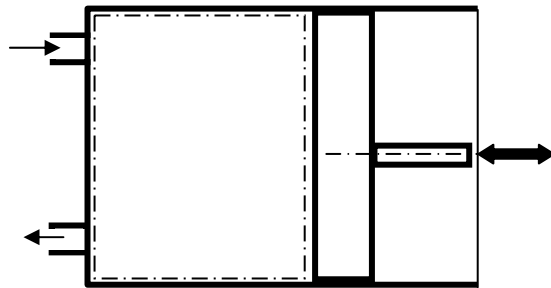
Geschlossenes System - starre Systemgrenze



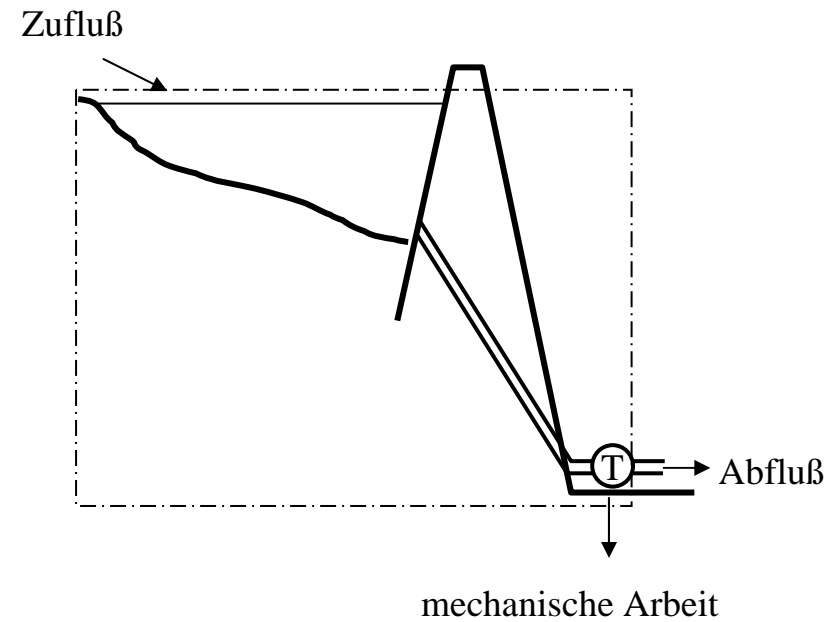
Geschlossenes System - variable Grenzen

Offene Systeme

Merkmal: Stoffübertragung über die Systemgrenze ist möglich



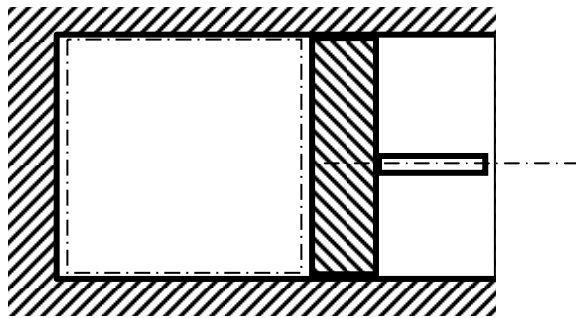
Offenes System, Zylinder



Offenes System, Kraftwerk

Adiabate Systeme

Merkmal:Keine Wärmeübertragung über die Systemgrenzen hinweg, d.h. 'ideal' isolierte Wände



ideale Isolierung

Adiabates geschlossenes System



Adiabates offenes System

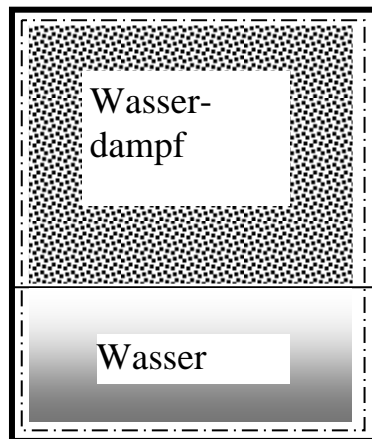
Einphasensysteme

Unterscheidung nach der inneren Struktur, d.h. nach fester, flüssiger oder gasförmiger Phase

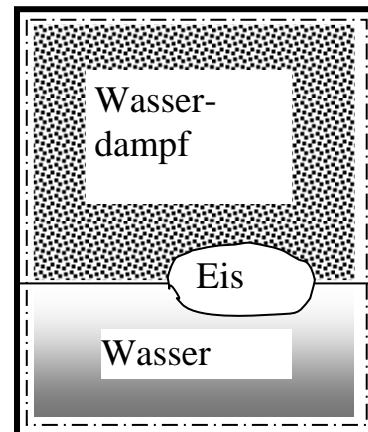
Einphasensystem besteht aus homogener Substanzmenge, deren chemische und physikalische Eigenschaften örtlich konstant sind

Mehrphasensysteme

System, mit mindestens zwei unterschiedlichen Phasen, z.B. flüssiges Wasser und Dampf



Zweiphasensystem



Dreiphasensystem

2.2.4 Gleichgewichtssatz

Allgemein

Jedes sich selbst überlassene geschlossene System strebt einem Gleichgewichtszustand zu, in dem es so lange verharrt, so lange keine äußeren Einflüsse auf das System einwirken

- Thermisches Gleichgewicht: $T = \text{const.}$
- Mechanisches Gleichgewicht: $p = \text{const.}$
- Chemisches Gleichgewicht: $M = \text{const.}$

Thermodynamisches Gleichgewicht

⇒ Gleichzeitiges Vorliegen aller drei Gleichgewichtszustände

Nullter Hauptsatz der Thermodynamik:

Zwei geschlossene Systeme befinden sich im thermischen Gleichgewicht, wenn beide Systeme die gleiche Temperatur besitzen (Bsp.: Berührungsthermometer)

2.3 Zustand, Zustandsgrößen, Zustandsänderungen

Vollständige Beschreibung eines thermodynamischen Systems erfordert neben der Definition der Systemgrenzen auch eine Beschreibung seiner physikalischen und chemischen Systemeigenschaften

Systemeigenschaften werden durch die Zustandsgrößen beschrieben, welche Variable darstellen

Zustand eines einfachen, homogenen Systems wird beschrieben durch die Zustandsgrößen

- Stoffmenge
- Volumen
- Druck
- Temperatur

Einteilung von Zustandsgrößen

- Äußerer Zustand

Ortskoordinaten, Geschwindigkeit, Beschleunigung z.B. x, \dot{x}, \ddot{x}

- Innerer Zustand

Volumen, Druck, Temperatur, Masse z.B. V, p, T, m

- Intensive Zustandsgrößen

Unabhängig von der Systemmasse, sie bleiben bei einer Aufteilung des Systems in Subsysteme unverändert, z.B. p, T

- Extensive Zustandsgrößen

Im Gegensatz zu den intensiven Zustandsgrößen sind die extensiven Zustandsgrößen abhängig von der Systemmasse, z.B. V

- Spezifische Zustandsgrößen

Auf die Systemmasse bezogene Zustandsgrößen, z.B. $v = \frac{V}{m}$

Abhängigkeit der einzelnen Zustandsgrößen von einander läßt sich durch sog. Zustandsgleichungen beschreiben

Bsp.: Zustandsgleichung des idealen Gases:

$$p = \rho \cdot R \cdot T \Rightarrow p = f(\rho, T) \text{ mit der stoffabhängigen Gaskonstanten } R$$

Zustandsänderungen

Zustandsgrößen sind wegunabhängig, d.h.

⇒ Weg auf dem ein Zustand erreicht wird, ist ohne Bedeutung

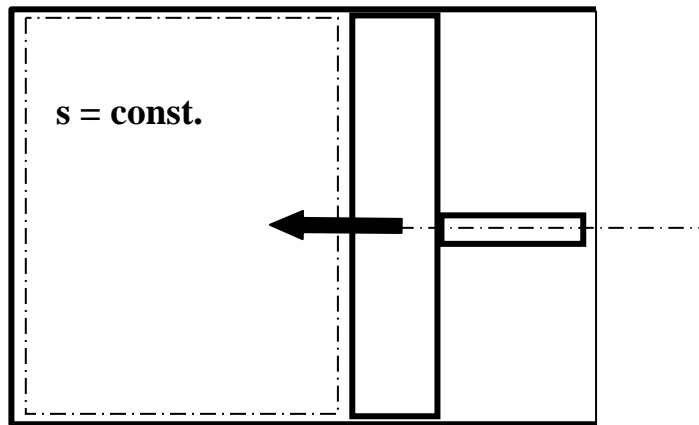
Bsp.:

Überführung einer Gasmenge von einem Anfangszustand '1' in einen Endzustand '2'

Der Anfangszustand '1', gekennzeichnet durch den Druck p_1 und das spezifische, d.h. auf die Masse m bezogene Volumen v_1 lässt sich auf mehrere Möglichkeiten in den Zustand '2', gekennzeichnet durch p_2 und v_2 , überführen

Zustandsänderungen

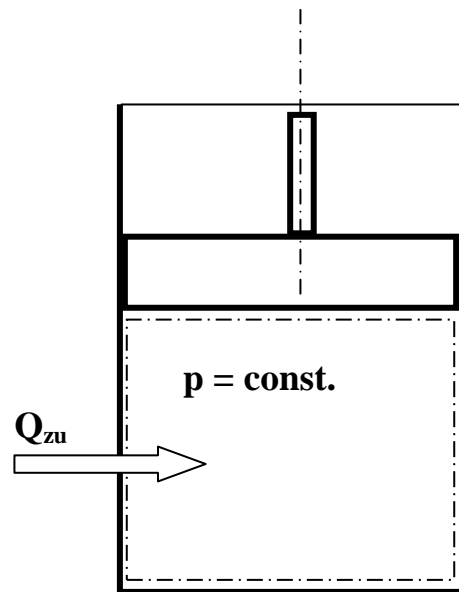
A) Verdichtung in einem Kolben bei konstanter Entropie, $s = \text{const.}$



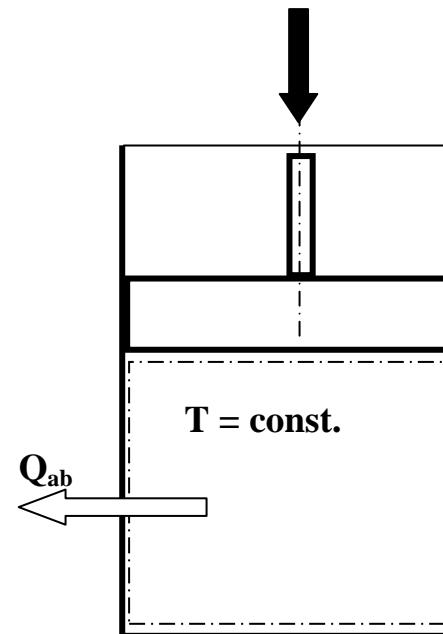
Kolben mit isentroper Kompression

Zustandsänderungen

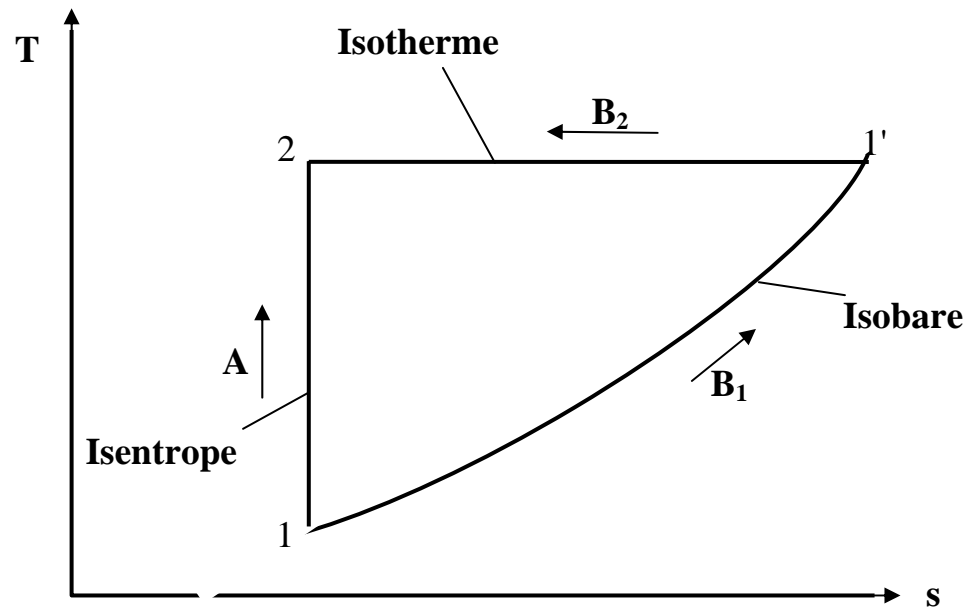
B) Wärmezufuhr bei konstantem Druck p_1 und anschließender Kompression auf p_{12} bei konstanter Temperatur $T = T_2$ durch Rückkühlung



Isobare Erwärmung



Isotherme Kompression

Zustandsänderungen - Darstellung in einem $T - s$ - Diagramm

Zustandsänderung von '1' zu '2' in einem $T - s$ - Diagramm

Zustandsänderungen - mit einer konstanten Zustandsgröße

Volumen	$V = \text{const.}$	$dV = 0$	Isochore
Druck	$p = \text{const.}$	$dp = 0$	Isobare
Temperatur	$T = \text{const.}$	$dT = 0$	Isotherme
Entropie	$s = \text{const.}$	$ds = 0$	Isentrope
Enthalpie	$h = \text{const.}$	$dh = 0$	Isenthalpe

Zustandsänderungen mit einer konstanten Zustandsgröße

Prozeß

Beschreibung der Zustandsänderung eines Systems

Unterschiedliche Prozesse können die gleiche Zustandsänderung hervorrufen

3 Systembeschreibung

3.1 Stoff und Menge

3.1.1 Volumen

Räumliche Ausdehnung eines Systems, beschrieben durch die Systemgrenzen definiert sein
Volumen V (extensive Zustandsgröße)

In der Thermodynamik wird das auf die Systemmasse m bezogene spezifische Volumen v verwendet

$$v = \frac{V}{m} \left[\frac{m^3}{kg} \right]$$

bzw. die Dichte ρ als Kehrwert des spezifischen Volumens v

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1}{v} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

3.1.2 Stoffmenge

Definition durch Angabe seiner Masse m [kg] oder durch Anzahl seiner Mole, d.h. seine Molzahl n

Mol

Ein Mol eines Stoffes entspricht der Anzahl der Teilchen, die in 0.012 kg des Kohlenstoff-Isotops ^{12}C enthalten sind, d.h. $6.0221367 \cdot 10^{23}$ Teilchen (Avogadro-Konstante, bzw. Loschmidtsche Zahl)

$$N_A = 6.0221367 \cdot 10^{23} \text{ [1/mol]}$$

Molmasse M

Die Molmasse M eines Stoffes, ist ähnlich seiner Dichte ρ eine charakteristische Stoffeigenschaft, Multiplikation der Teilchenmasse m_T mit der Avogadro-Konstante N_A , ergibt die Molmasse des Stoffes:

$$M = m_T \cdot N_A \text{ [kg/kmol]}$$

Stoff	Chemisches Symbol	Molmasse M [kg/kmol]
Wasserstoff	H ₂	2.01594
Helium	He	4.0026
Kohlenstoff	C	12.01115
Stickstoff	N ₂	28.0134
Sauerstoff	O ₂	31.9988
Fluor	F ₂	37.9968
Chlor	Cl ₂	70.906
Schwefel	S	32.066
Schwefeldioxid	SO ₂	64.065
Stickstoffdioxid	NO ₂	46.0055
Lachgas	N ₂ O	44.0128
Kohlenmonoxid	CO	28.010
Kohlendioxid	CO ₂	44.010
Methan	CH ₄	16.043
Luft (trocken)		28.9647

Molvolumen V_m

Ergibt sich aus dem Volumen V und der Stoffmenge (=Molzahl) n zu

$$V_m = V/n = M \cdot v \quad [\text{m}^3/\text{kmol}]$$

Zusammenhang zwischen Masse m , Molzahl n , Teilchenmasse m_T sowie der Molmasse M

$$m = n \cdot N_A \cdot m_T = n \cdot M \quad [\text{kg}]$$

Beschreibung eines Systems durch Molzahl

Systeme, in denen chemische Reaktionen ablaufen, z.B. Verbrennungsvorgänge

Beschreibung eines Systems durch Masse

Systeme ohne chemische Reaktionen, z.B. Kompression, Expansion von Gasen

Ü 3.1: Bestimmung der Masse m von $n = 0.56$ kmol Lachgas

Molmasse von Lachgas (N_2O) aus Tabelle

$$M_{(\text{N}_2\text{O})} = 44.0128 \text{ kg/kmol}$$

$$m = n \cdot M = 24.647 \text{ kg}$$

Ü 3.2: Bestimmung der Molmasse M von Wasser

Zur Synthese von 1 kmol Wasser werden 1 kmol Wasserstoff und 0.5 kmol Sauerstoff benötigt.

Mit den Molmassen aus Tabelle folgt

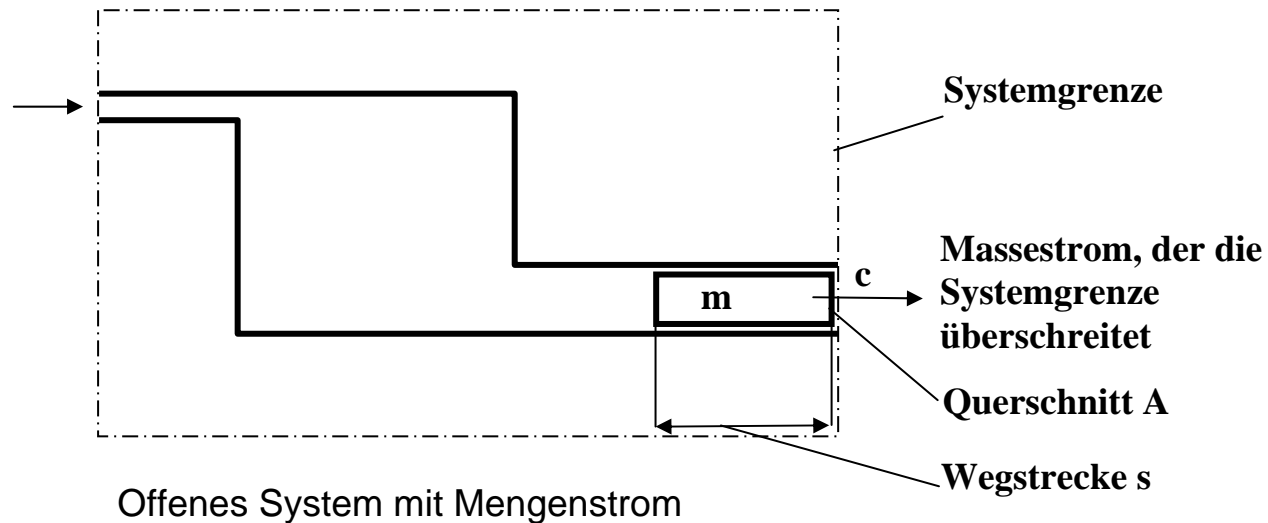
$$M_{(\text{H}_2\text{O})} = M_{(\text{H}_2)} + 0.5 \cdot M_{(\text{O}_2)} = 2.01594 + 0.5 \cdot 31.9988 = 18.01534 \text{ kg/kmol}$$

Ü 3.3: Bestimmung des spezifischen Volumens v , der Dichte ρ , des Molvolumens V_m und der Stoffmenge n eines mit $m = 1000$ kg Ethan gefüllten Druckbehälters, der ein Volumen $V = 5$ m³ aufweist.

Molmasse Ethan (C ₂ H ₆)	$M_{(C_2H_6)}$	= 30.070 kg/kmol
spezifisches Volumen	$v = V/m$	= 0.005 m ³ /kg
Dichte	$\rho = 1/v$	= 200 kg/m ³
Molvolumen	$V_m = M \cdot v$	= 0.15 m ³ /kmol
Stoffmenge	$n = m/M$	= 33.3 kmol

3.1.3 Mengenströme

Zur Charakterisierung offener Systeme ist die Beschreibung der Mengenströme erforderlich



Ein Stoff fließt mit der Geschwindigkeit c über die Systemgrenze (Rohr mit Querschnitt A)

In der Zeitspanne $\Delta\tau$ legen die Stoffteilchen den Weg $s = c \cdot \Delta\tau$ zurück

Dadurch ergeben sich folgende Ströme

- Volumenstrom:

$$\dot{V} = \frac{V}{\Delta\tau} = \frac{s \cdot A}{\Delta\tau} = c \cdot A \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

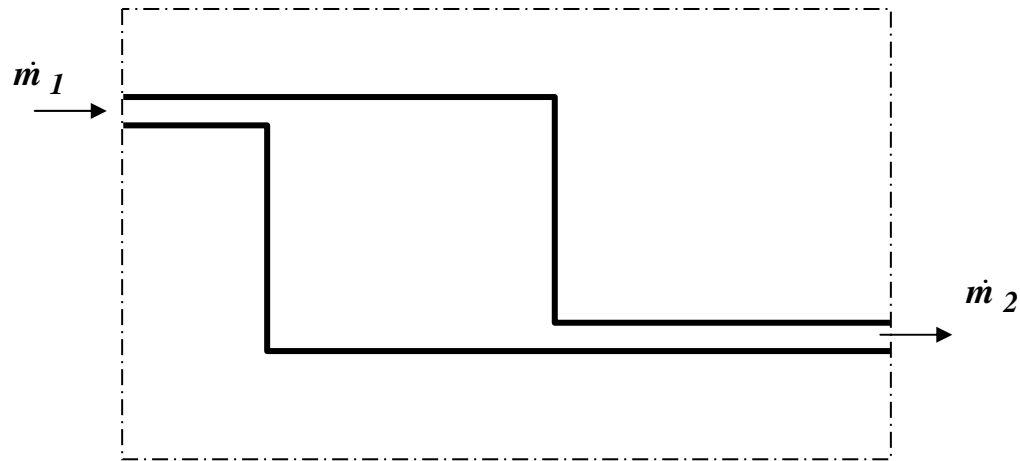
- Massestrom:

$$\dot{m} = \frac{m}{\Delta\tau} = \frac{\rho \cdot V}{\Delta\tau} = \rho \cdot \dot{V} = \rho \cdot c \cdot A \left[\frac{kg}{s} \right]$$

- Massestromdichte:

$$\dot{j} = \frac{\dot{m}}{A} = \frac{\rho \cdot \dot{V}}{A} = c \cdot \rho \left[\frac{kg}{s \cdot m^2} \right]$$

Stationär durchströmtes System



Stationär durchströmtes System

$$\dot{m} = \dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \text{const} \quad \Rightarrow \quad \dot{m}_1 = \rho_1 \cdot c_1 \cdot A_1 = \rho_2 \cdot c_2 \cdot A_2 = \dot{m}_2 \quad (\text{Masseerhaltung})$$

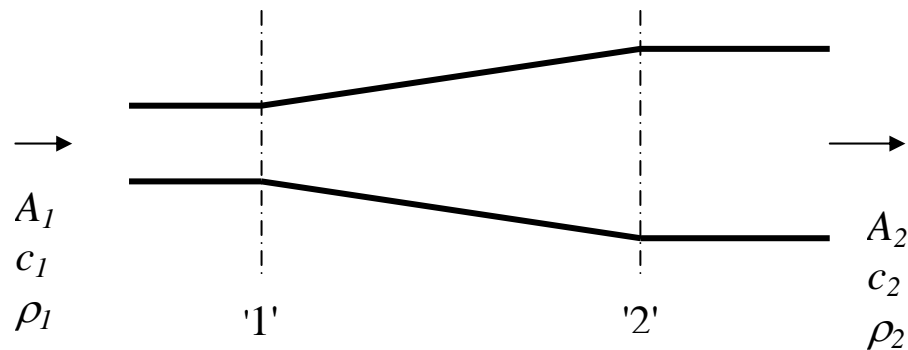
Ü 3.4: Mit Wasser durchströmtes konisches Rohr

Mittlere Eintrittsgeschwindigkeit (1): $c_1 = 0.0632 \text{ m/s}$

Eintrittsquerschnitt: $d_1 = 48.4 \text{ mm}$

Austrittsquerschnitt: $d_2 = 112.3 \text{ mm}$

Welcher Massestrom, welche Massestromdichte und welche Geschwindigkeit ergeben sich im Austrittsquerschnitt (2)?

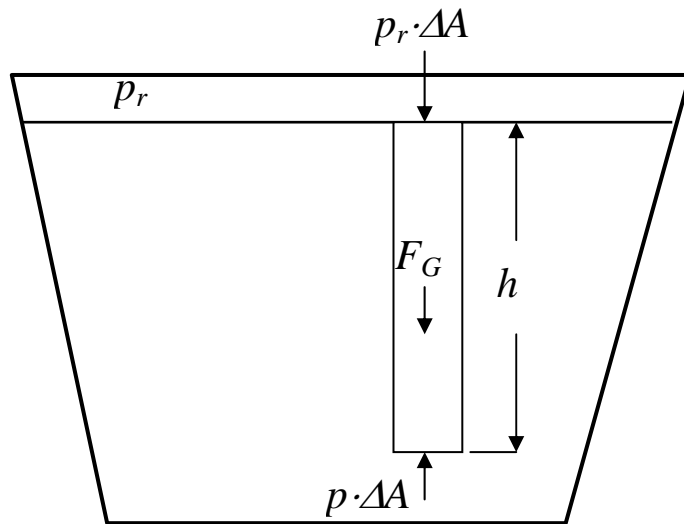


3.2 Druck, Temperatur und Energie

3.2.1 Druck

Druck p wird definiert als Quotient aus der Druckkraft F und der Fläche A auf die diese wirkt, wobei die Druckkraft senkrecht auf die Fläche A wirkt

$$p = \frac{F}{A} \text{ [Pa]} = \frac{\text{[N]}}{\text{[m}^2\text{]}}$$

Bsp.: Druck in einem ruhenden Fluid (hydrostatischer Druck)

$$p = \frac{F}{A} \Rightarrow F = p \cdot A$$

$$F = m \cdot g = \rho \cdot V \cdot g = \rho \cdot h \cdot \Delta A \cdot g$$

Kräftebilanz am Fluidelement:

$$p \cdot \Delta A - F_G - p_r \cdot \Delta A = 0$$

$$p(h) \cdot \Delta A - \rho \cdot g \cdot h \cdot \Delta A - p_r \cdot \Delta A = 0$$

$$p(h) = p_r + \rho \cdot g \cdot h$$

Druck in einem ruhenden Fluid

Ü 3.5: Druckänderung in Wasser von $h = 0$ auf $h = -5\text{m}$

$$\Delta p = p_{(h=-5)} - p_{(h=0)} = \rho \cdot g \cdot h$$

$$\Delta p = 10^3 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 9.81 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \cdot 5 [\text{m}] = 4.905 \cdot 10^4 [\text{Pa}] \approx 0.5 [\text{bar}]$$

Ü 3.6: Druckänderung in der Atmosphäre von $h = 0$ auf $h = +5000\text{m}$

Barometrische Höhenformel:

$$p_{(h=5000)} = p_{(h=0)} \cdot \left(1 + \frac{\gamma \cdot h}{T_{(h=0)}} \right)^{\frac{-g}{R \cdot \gamma}}$$

mit den Größen für die Normatmosphäre:

$$p_{(h=0)} = 101325 [\text{Pa}]$$

$$g = 9.81 [\text{m/s}^2]$$

$$T_{(h=0)} = 288.15 [\text{K}]$$

$$R = 287.1 [\text{J/kg} \cdot \text{K}] \quad (\text{spez. Gaskonstante Luft})$$

$$\gamma = -0.0065 [\text{K/m}] \quad (\text{Temperaturgradient, } 0 < h < 11 \text{ km})$$

3.2.2 Temperatur

Ein System, für welches durch eine bestimmte Vorschrift eine Temperaturfunktion ϑ festgelegt wird, bezeichnet man als Thermometer

- ⇒ Willkürliche Festlegung dieser Vorschrift
- ⇒ Bezeichnung von ϑ als empirische Temperatur
- ⇒ Temperaturmessung eines Systems beruht darauf, das Thermometer und das System in ein thermisches Gleichgewicht zu bringen

Voraussetzungen

- Temperatur des zu messenden Systems bleibt unverändert
- Es ändert sich lediglich die Temperatur des Thermometers
- ⇒ Insbesondere bei der Temperaturmessung kleiner Massen wird diese Anforderung nur näherungsweise erfüllt
- ⇒ Abhilfe: Berührungsfreie Meßverfahren (z.B. die Infrarot-Thermographie)

Temperaturmessung

Verwendung von Systemen, die eine eindeutige temperaturabhängige physikalische Eigenschaft aufweisen, z.B.

- Volumenänderung von Flüssigkeiten (Quecksilberthermometer)
- Änderung des elektrischen Widerstands mit der Temperatur (Widerstandsthermometer).

Temperaturskalen

- Celsius-Skala [$^{\circ}\text{C}$]
- Fahrenheit-Skala [$^{\circ}\text{F}$]
- Rankine-Skala [$^{\circ}\text{R}$]
- Thermodynamische bzw. absolute Temperatur in Kelvin [K]

Temperaturskalen

Skala	Wassereis	Siedendes Wasser
Celsius-Skala [°C]	0.00 °C	100.00°C
Fahrenheit-Skala [°F]	32.00 °F	212.00 °F
Rankine-Skala [°R]	491.67 °R	671.67 °R
Thermodynamische Temperatur, Kelvin-Skala [K]	273.15 K	373.15 K

Umrechnungsformeln

- Celsius in Kelvin: $T[K] = t[C] + 273.15K$

- Fahrenheit in Celsius: $t[C] = \frac{5}{9} \cdot (t[F] - 32)$

- Kelvin in Rankine $T[R] = t[K] \cdot \frac{9}{5}$

3.2.3 Energie

Mit Energie in Zusammenhang stehenden Einheiten

- Arbeit (=Energie) = Kraft x Weg

$$1 \text{ Joule} = 1J = 1Nm = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{m} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2} = 1W \cdot \text{s}$$

- Energiestrom = Leistung = Arbeit/Zeit

$$1 \text{ Watt} = 1W = 1 \frac{J}{\text{s}} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^3}$$

- Spezifische Energie = Energie/Masse

$$1 \frac{J}{\text{kg}} = 1 \frac{W \cdot \text{s}}{\text{kg}} = 1 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

- Spezifischer Energiestrom = Energiestrom/Masse

$$1 \frac{W}{\text{kg}} = 1 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^3}$$