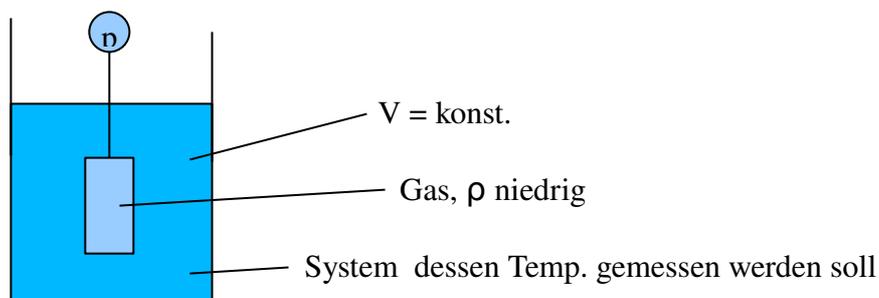


Bestimmung von anderen Temperaturen (z.B. Raumtemperatur)  
nach Messung von V aus (Formel siehe oben)

Eine Temperaturskala, die nicht stoffabhängig ist.

Normal: Gasthermometer

Eigenschaft: Durch von Gasen niedriger Dichte  $\rho$



### Eine mögliche Skala

Fixpunkte wie bei Celcius

1. Eiswasser  $0^\circ \rightarrow P_1$
2. siedendes Wasser (1 bar)  $100^\circ \rightarrow P_2$

Skala: 
$$t = \frac{(P - P_1)}{(P_2 - P_1)} * 100^\circ$$

=> Skala ähnlich (aber nicht gleich) der Celcius- Skala

Befunde: - Ermittelte Temperaturen sind unabhängig von Gasart und Menge  
solange die Dichten relativ klein sind.

- Vorhersage der Existenz einer kleinsten Temperatur  
(für  $P = P_{min} = 0 \text{ bar}$ )

=> 
$$t_{min} = \frac{-P_1}{(P_2 - P_1)} * 100^\circ$$

=> 
$$t_{min} = -273,15^\circ$$

Anm.: Auch dieses Ergebnis ist unabhängig von der verwendeten Gasart.

-> Damit modifizierte Skala

Kelvin Skala

Normal: Gasthermometer } s.oben  
Eigenschaft: Druck }

Skala:

Fixpunkt 1.  $P = 0 \leftrightarrow T = 0 \text{ K}$   
absoluter Temperaturnullpunkt

Fixpunkt 2.

(Im Prinzip Eiswasser 1 atm  $\leftrightarrow$  273,15 K

Steng: Tripelpunkt von Wasser (Dreiphasengleichgewicht fest- flüssig- gasförmig  
 $\Rightarrow$  273,16 K

(näheres siehe Kapitel 4.2)

Skala:  $T = \frac{P}{P_2} * 273,16 K$  **Kelvin Skala**

Anm.:

- Bezug zur molekularen Thermodynamik: Gase niedriger Dichte:  $\rightarrow$  keine Wechselwirkungen (potentielle Energie)
  - $\rightarrow$  nur kinetische Energie
  - $\rightarrow$  Temperatur ist Maß für kinetische Energie
  - $\rightarrow T = 0 \Leftrightarrow E_{kin} = 0$
- Später: weitere Möglichkeit, eine Temperaturskala festzulegen, die ganz unabhängig von Stoffeigenschaften ist.  
"Thermodynamik Temperatur"
  - $\rightarrow$  identisch mit Kelvin Skala

### 1.3.2 Temperaturmessung

Internationale Vereinbarung über Temperaturskala

$\rightarrow$  ITS 90 (1990)

$\rightarrow$  Beiblatt 1

Dort Festlegung von sekundären Normalen

$\rightarrow$  auch Messung mit diesen Normalen sind in der Regel zu aufwändig

$\rightarrow$  In der Praxis einfachere Methoden

Häufig eingesetzt:

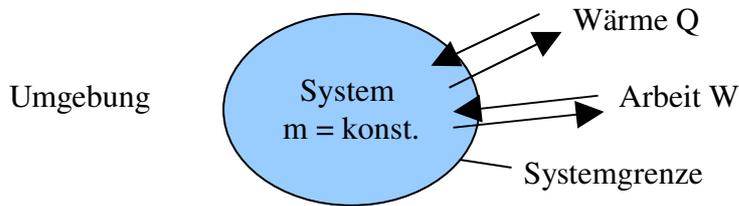
- einfache Platin- Widerstandthermometer
- Thermoelement
- Halbleiterthermometer

Thermometer müssen eigentlich gegen ITS 90 – Normal kalibriert werden

Kalibrierte Thermometer mit Garantieschein im Handel.

# 1.4 Arbeit und Wärme

## 1.4.1 Vorbemerkung



Arbeit und Wärme werden während einer Zustandsänderung eines Systems über die Systemgrenze hinweg übertragen. Sie sind Wechselwirkungen des Systems mit seiner Umgebung.

Vorzeichenvereinbarung:

$W, Q > 0$  dem System zugeführt

$W, Q < 0$  vom System abgeführt

Trivial aber wichtig

$$\begin{aligned} W_{System} + W_{Umgebung} &= 0 \\ Q_{System} + Q_{Umgebung} &= 0 \end{aligned}$$

In Worten: Wärme die dem System zugeführt wird, wird von der Umgebung abgegeben etc.

Einheiten:

$$[W] = [Q] = J = Nm$$

Spezifische Arbeit, Wärme bezogen auf Systemmassen in

$$w = \frac{W}{m}, \quad q = \frac{Q}{m}$$

$$[w] = [q] = \frac{J}{kg}$$

Anm.:

a) Arbeit und Wärme können den Zustand eines Systems in gleicher Weise verändern

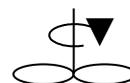
Bsp.:

$T_1 \rightarrow T_2$



Aufheizen  
(Wärme)

$T_1 \rightarrow T_2$



Rühren  
(Arbeit)

b) Grund für Unterscheidung?

Im Bsp.: Wird das System wieder in seinen Anfangszustand zurückgeführt ( $T_2 \rightarrow T_1$ , Abkühlen), so kann wieder Wärme abgegeben werden.

Es ist aber nicht möglich, die Arbeit vollständig zurück zu gewinnen

Arbeit kann stets vollständig in Wärme verwandelt werden. Die Umwandlung von Wärme in Arbeit unterliegt Beschränkungen

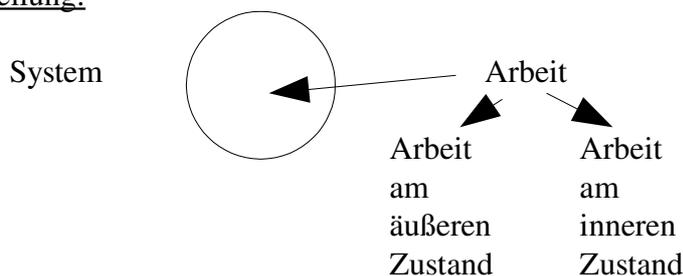
## 1.4.2 Arbeit

Arbeit

Ein System gibt während einer Zustandsänderung Arbeit ab, wenn die Veränderung der Umgebung allein auf das Heben eines Gewichts im Schwerfeld zurückgeführt werden kann. GIBBS (1906)

Anm.: Diese Definition umfasst alle gängigen Definitionen der Arbeit in Gebieten wie der Mecjanik, Elektronik, ...

Unterteilung:



-> Schwerpunktsmechanik

-> Ergebnisse aus der Physik

a) Beschleunigungsarbeit am System

$$W_{12} = \frac{1}{2} m * (c_2^2 - c_1^2)$$

1. Anfangszustand

2. Endzustand

b) Arbeit am System im Schwerfeld

$$W_{12} = m * g * (z_2 - z_1)$$

## Allgemeiner Zusammenhang Kraft – Arbeit

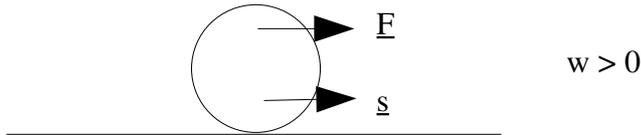
$$W_{12} = \int_1^2 \mathbf{F} * d\mathbf{s}$$

Kraft Weg

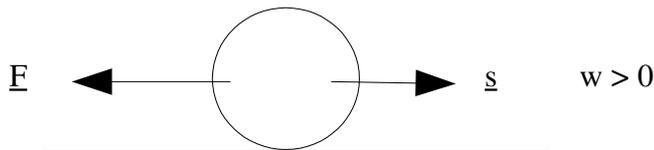
Vektorielle Größen

Arbeit zugeführt ( $w > 0$ ) wenn  $\mathbf{F}$ ,  $\mathbf{s}$  gleich gerichtet sind.

Bsp.: Beschleunigung



Abbremsen



## Arbeit am inneren Zustand

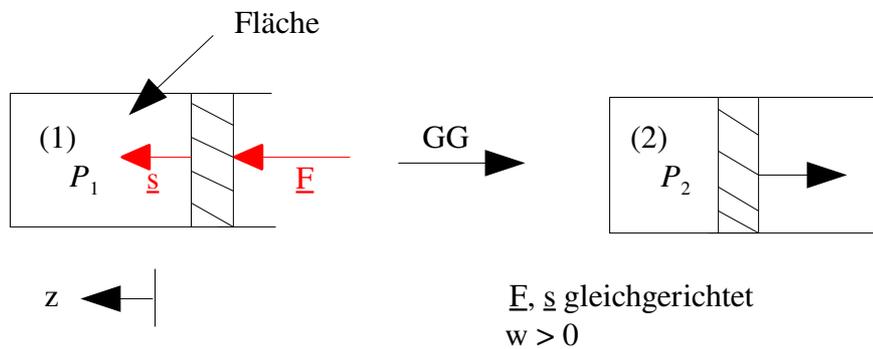
Unterscheider hier  
Zustandsänderung

durch Gleichgewicht  
(GG) ?hindurch?  
-> Arbeit kann bei  
Kenntnis der Zustands-  
änderung einfach  
berechnet werden

nicht GG ?hindurch?  
-> Zustandsänderung  
nicht genau bestimmt  
-> Arbeit kann  
nicht einfach  
berechnet werden

c) Volumenänderungsarbeit bei Zustandsänderungen durch Gleichgewichte (GG)

Bsp.: Kompression



Bei Zustandsänderung durch GG

- $P(z)$  bekannt
- $|F| = P(z) * A$

$$W_{12} = \int_1^2 F * ds = \int_1^2 P(z) * A * dz = \int_1^2 P * d(\underbrace{t}_{-dV}) \quad F = \underline{F}; \quad s = \underline{s}$$

$W_{12} = - \int_1^2 P * dV$

$dV > 0$  wenn  $dz < 0$   
 Volumenänderungsarbeit bei Zustandsänderung durch GG

integrale Form

$dW_{12} = -pdV$

differentielle Form

Anm.:  $-dV < 0 \Rightarrow dW > 0$

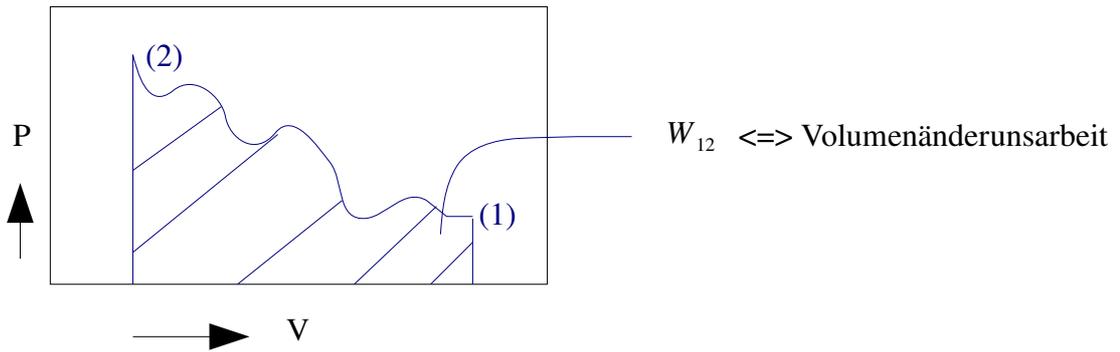
Kompression Arbeit zugeführt -> OK...

- Falls nicht durch GG

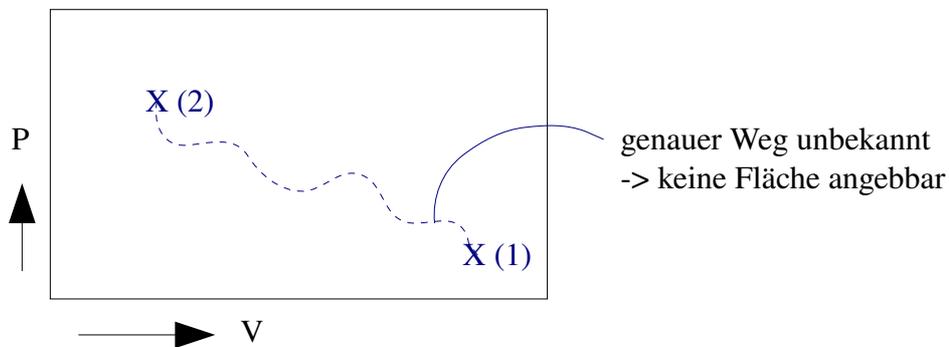
$W_{12} = \int_1^2 F * ds$  gilt immer noch aber  $P(s)$  und damit  $F(s)$  i.a. nicht mehr bekannt  
 -> Integral nicht mehr auswertbar.

Darstellung im p, V – Diagramm

a) Beliebiger Weg durch GG -> P(V) bekannt



b) Weg nicht durch GG

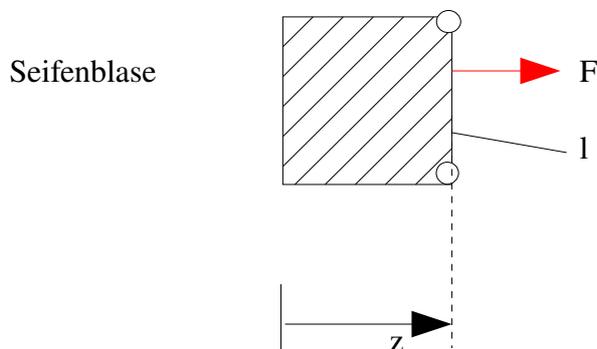


nur ein weiteres Beispiel für anderen Typ von Arbeit

c) Oberflächenarbeit

-> Arbeit die aufzuwenden ist, um Oberflächen zu schaffen

Bsp.: „Seifenblasenexperiment“



Anm.:  $dA = 2 l dz$   
l-> zwei Oberflächen (vorne, hinten)

$$W_{12} = \sigma (A_2 - A_1)$$

integral

$$dW_{12} = \sigma dA$$

Oberflächenarbeit bei Zustandsänderung durch GG

$\sigma \Leftrightarrow$  Oberflächenspannung (des betrachteten Fluids)  
-> Stoffeigenschaft  $[\sigma] = \text{N/m}$

Anm.:

differentielle Form :  $dW = -pdV$   
 $dW = \sigma dA$

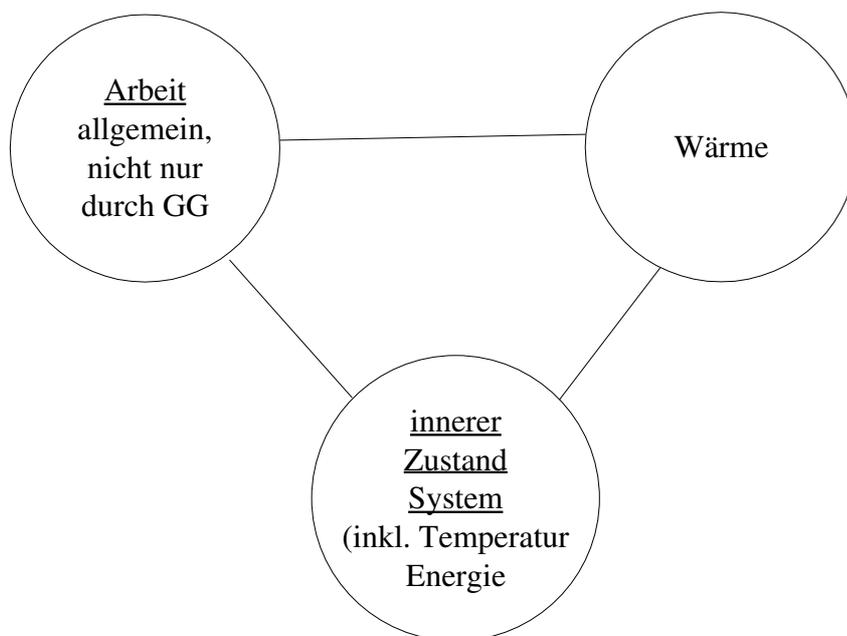
intensive Zustandsgröße      extensive Zustandsgröße



Liste ließe sich fortsetzen. Weiter hier im wesentlichen nur mit Volumenänderungsarbeit

### Zusammenfassung:

Alle bekannten Arbeitbegriffe sind in der Thermodynamik zugelassen.  
Die Thermodynamik beschäftigt sich insbesondere mit dem Verhältnis.



### 1.4.3 Wärme

Wärme ist diejenige Wechselwirkung die auftritt, wenn zwei Systeme verschiedene Temperatur miteinander in Kontakt gebracht werden.

Anm.:

Molekulares Bild:

Hohe Temperatur -> hohe kinetische Energie der Molekularbewegung

Niedrige Temperatur -> niedrige kinetische Energie

Wärmeübertragung

-> Impulstransport auf der Molekularen Ebene

Anm.:

- Übertragung der Wärme bewirkt nicht immer eine Temperaturerhöhung  
(z.B. beim Verdampfen, Schmelzen)

- Nicht jede Temperaturänderung ist eine Folge der Wärmeübertragung  
(z.B. Kompression eines Gases in einem wärmeisolierten Kolben)

-> Temperatur steigt

Zustandsänderungen ohne Wärmeübertragung ( $Q = 0$ ) heißen  
adibate oder adiabatische Zustandsänderungen