

WS18/19

THERMODYNAMIK UND THEORIE DER WÄRME

VORLESUNG #1

17.10.2018

Prof. Dr. Florian U. Bernlochner | IETP - KIT

TERMINE UND ÜBERBLICK

14 Vorlesungen: In der Regel Mittwochs von 8:00 - 9:30 (90 Minuten)

- 17.10
- 31.10
- 7.11
- 14.11
- 21.11
- 28.11
- 5.12
- 12.12 (Dr. Gernot Guigas)
- 19.12
- 9.1
- 16.1 (Dr. Gernot Guigas)
- 23.1
- 30.1
- 6.2

Die Vorlesung am **24.10 fällt aus!**; Im Dezember und Januar werden in der Vorlesung am Dienstag ausgewählte Experimente vorgeführt.

Sprechstunde: Mittwoch 14-15 Uhr, Physikhochhaus, 9. Stock (Büro 9.7)

TIPPS ZUR VORLESUNG

Fertigen sie sich aus den Folien ein Skript an:

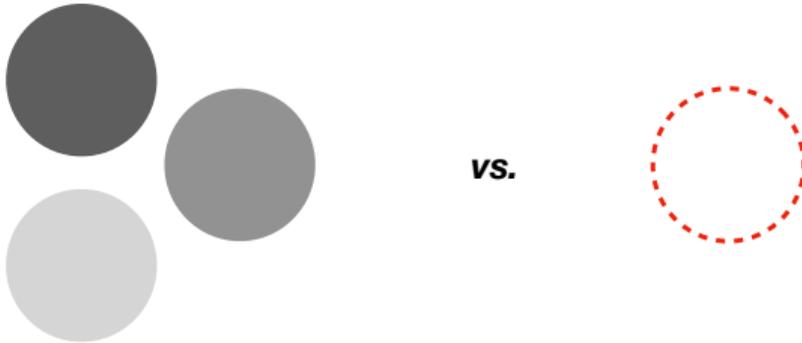


TIPPS ZUR VORLESUNG

Fertigen sie sich aus den Folien ein Skript an:



Arbeiten Sie in Lerngruppen und treffen Sie sich regelmässig um über den Stoff zu diskutieren:



VORLESUNGSSTRUKTUR



Einführung
und kurze Wiederholung

Vorlesung

Lösungen zu den Aufwärmübungen

Vorlesung

Verständnisfragen und
Aufwärmübungen

A large, solid green diagonal bar runs from the top-left towards the bottom-right, dividing the slide into a white upper-left section and a green lower-right section.

1.

EINLEITUNG

EINSTEIN'S SICHT AUF DIE THERMODYNAMIK

„Eine Theorie ist desto eindrucksvoller, je größer die Einfachheit ihrer Prämissen ist, je verschiedenartigere Dinge sie verknüpft und je weiter ihr Anwendungsbereich ist. Deshalb der tiefe Eindruck, den die klassische Thermodynamik auf mich machte. Es ist die einzige physikalische Theorie allgemeinen Inhaltes, von der ich überzeugt bin, daß sie im Rahmen der Anwendbarkeit ihrer Grundbegriffe niemals umgestoßen werden wird (zur besonderen Beachtung der grundsätzlichen Skeptiker).“

Albert Einstein

LEHRBÜCHER

- **P. Tipler:** Physik, Spektrum
- **W. Nolting:** Grundkurs Theoretische Physik 4/2, Thermodynamik, Springer Spektrum
- **R. Becker:** Theorie der Wärme, Springer
- **W. Demtröder:** Experimentalphysik 1, Springer Spektrum
- **D. Meschede:** Gerthsen-Physik, Springer

ÜBERBLICK ÜBER DIE VORLESUNG

Diese Vorlesung behandelt zwei grosse Gebiete: Die Thermodynamik und die statistische Mechanik.

ÜBERBLICK ÜBER DIE VORLESUNG

Diese Vorlesung behandelt zwei grosse Gebiete: **Die Thermodynamik und die statistische Mechanik.**

Mit ihrer Hilfe lassen sich **Vielteilchensysteme** beschreiben, welche so viele Freiheitsgrade haben, dass sie sich **nicht analytisch** innerhalb einer unterliegenden Theorie (z.B. Mechanik, Quantenmechanik, Elektrodynamik) behandeln lassen.

ÜBERBLICK ÜBER DIE VORLESUNG

Diese Vorlesung behandelt zwei grosse Gebiete: **Die Thermodynamik und die statistische Mechanik.**

Mit ihrer Hilfe lassen sich **Vielteilchensysteme** beschreiben, welche so viele Freiheitsgrade haben, dass sie sich **nicht analytisch** innerhalb einer unterliegenden Theorie (z.B. Mechanik, Quantenmechanik, Elektrodynamik) behandeln lassen.

In der **Thermodynamik** werden **makroskopische Grössen** betrachtet: insbesondere Energie in den Formen Arbeit und Wärme. Es wird **kein Bezug** auf die atomistische Struktur der Materie genommen. Insbesondere macht man sich keine Vorstellung über die Natur der Wärme.

ÜBERBLICK ÜBER DIE VORLESUNG

Die **Thermodynamik** erlaubt es, allgemeine **Eigenschaften von Arbeit und Wärme** zu beschreiben, ermöglicht es jedoch nicht, spezifische Eigenschaften konkreter Systeme (z.B. dass sich das Volumen von Wasser vergrößert, wenn es zu Eis gefriert) herzuleiten.

ÜBERBLICK ÜBER DIE VORLESUNG

Die **Thermodynamik** erlaubt es, allgemeine **Eigenschaften von Arbeit und Wärme** zu beschreiben, ermöglicht es jedoch nicht, spezifische Eigenschaften konkreter Systeme (z.B. dass sich das Volumen von Wasser vergrößert, wenn es zu Eis gefriert) herzuleiten.

Die **speziellen Eigenschaften** konkreter **makroskopischer Systeme** können erst von der **statistischen Mechanik** erklärt werden. Diese Theorie liefert auch eine atomistische Begründung der Thermodynamik.

ÜBERBLICK ÜBER DIE VORLESUNG

In der statistischen Mechanik werden die **mikroskopischen Freiheitsgrade** des Systems betrachtet. Wir werden einfache Rezepte kennenlernen, welche es uns ermöglichen, die **Thermodynamik** eines makroskopischen Systems herzuleiten. Es muss aber schon hier darauf hingewiesen werden, dass die Begründung dieser Rezepte unbefriedigend ist. Wir werden uns genötigt sehen, eine Reihe von Grundannahmen zu machen, welche sich nicht in überzeugender Weise aus der mikroskopischen Theorie ableiten lassen.

ÜBERBLICK ÜBER DIE VORLESUNG

In der statistischen Mechanik werden die **mikroskopischen Freiheitsgrade** des Systems betrachtet. Wir werden einfache Rezepte kennenlernen, welche es uns ermöglichen, die **Thermodynamik** eines makroskopischen Systems herzuleiten. Es muss aber schon hier darauf hingewiesen werden, dass die Begründung dieser Rezepte unbefriedigend ist. Wir werden uns genötigt sehen, eine Reihe von Grundannahmen zu machen, welche sich nicht in überzeugender Weise aus der mikroskopischen Theorie ableiten lassen.

Ziel aktueller Forschung Ziel ist es, die Verbindung zwischen Thermodynamik und statistischer Mechanik rigoroser zu machen.

ÜBERBLICK ÜBER DIE VORLESUNG

1. **Grundbegriffe und Hauptsätze**
2. Das ideale Gas
3. Die kinetische Gastheorie
4. Transportvorgänge
5. Phänomenologische Thermodynamik
6. Thermodynamische Prozesse
7. Thermodynamische Potentiale
8. Reale Gase
9. Das Plancksche Strahlungsgesetz

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

1.1 Basisgrößen

Worum geht es?

- Beschreibung von Systemen mit **vielen** Teilchen auf der Basis der klassischen Mechanik ($N \approx 10^{23}$ Teilchen)

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

1.1 Basisgrößen

Worum geht es?

- Beschreibung von Systemen mit **vielen** Teilchen auf der Basis der klassischen Mechanik ($N \approx 10^{23}$ Teilchen)

→ In der Praxis **nicht möglich**:

6 N Kenngrößen → ca. 4.8×10^{24} Byte = 4.8×10^{12} TB

(6 = 3 für den Ort, 3 für den Impuls jedes Teilchens, double point precision benötigt 8 Byte pro Komponente)

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

1.1 Basisgrößen

Worum geht es?

- Beschreibung von Systemen mit **vielen** Teilchen auf der Basis der klassischen Mechanik ($N \approx 10^{23}$ Teilchen)

→ In der Praxis **nicht möglich**:

6 N Kenngrößen → ca. 4.8×10^{24} Byte = 4.8×10^{12} TB

(6 = 3 für den Ort, 3 für den Impuls jedes Teilchens, double point precision benötigt 8 Byte pro Komponente)

- **Lösung**: Bildung neuer physikalischer Größen durch Mittelung aus der rein mechanischen Beschreibung.

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

1.1 Basisgrößen

Worum geht es?

- Beschreibung von Systemen mit **vielen** Teilchen auf der Basis der klassischen Mechanik ($N \approx 10^{23}$ Teilchen)

→ In der Praxis **nicht möglich**:

6 N Kenngrößen → ca. 4.8×10^{24} Byte = 4.8×10^{12} TB

(6 = 3 für den Ort, 3 für den Impuls jedes Teilchens, double point precision benötigt 8 Byte pro Komponente)

- **Lösung:** Bildung neuer physikalischer Größen durch Mittelung aus der rein mechanischen Beschreibung.
- **Voraussetzung:** Das zu beschreibende System ist im **thermodynamischen Gleichgewicht**, i.e. sein Zustand hängt nicht von der Zeit t ab.

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Dieser Gleichgewichtszustand wird charakterisiert durch:

- Mechanische Zustandsgrößen: Druck P , Volumen V

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Dieser Gleichgewichtszustand wird charakterisiert durch:

- Mechanische Zustandsgrößen: Druck P , Volumen V
- Thermische Zustandsgrößen: Temperatur T , Entropie S

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Dieser Gleichgewichtszustand wird charakterisiert durch:

- Mechanische Zustandsgrößen: Druck P , Volumen V
- Thermische Zustandsgrößen: Temperatur T , Entropie S
- Chemische Zustandsgrößen: Teilchenzahl N , chemisches Potential μ

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Dieser Gleichgewichtszustand wird charakterisiert durch:

- Mechanische Zustandsgrößen: Druck P , Volumen V
- Thermische Zustandsgrößen: Temperatur T , Entropie S
- Chemische Zustandsgrößen: Teilchenzahl N , chemisches Potential μ

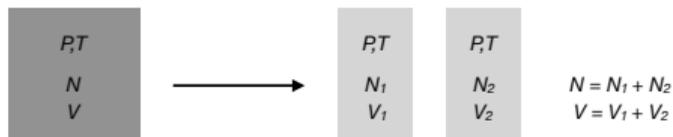
Wir unterscheiden zwischen **extensiven** und **intensiven** Größen bzgl. der Teilung eines Systems:

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Dieser Gleichgewichtszustand wird charakterisiert durch:

- Mechanische Zustandsgrößen: Druck P , Volumen V
- Thermische Zustandsgrößen: Temperatur T , Entropie S
- Chemische Zustandsgrößen: Teilchenzahl N , chemisches Potential μ

Wir unterscheiden zwischen **extensiven** und **intensiven** Größen bzgl. der Teilung eines Systems:

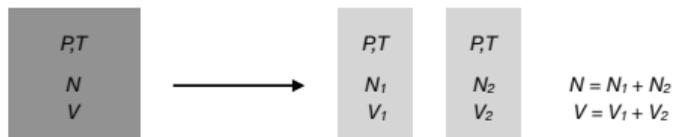


1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Dieser Gleichgewichtszustand wird charakterisiert durch:

- Mechanische Zustandsgrößen: Druck P , Volumen V
- Thermische Zustandsgrößen: Temperatur T , Entropie S
- Chemische Zustandsgrößen: Teilchenzahl N , chemisches Potential μ

Wir unterscheiden zwischen **extensiven** und **intensiven** Größen bzgl. der Teilung eines Systems:



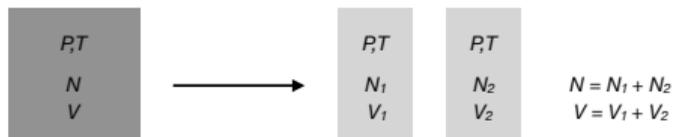
- P und T sind **intensiv** und ändern sich **nicht** im Einzelsystem

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Dieser Gleichgewichtszustand wird charakterisiert durch:

- Mechanische Zustandsgrößen: Druck P , Volumen V
- Thermische Zustandsgrößen: Temperatur T , Entropie S
- Chemische Zustandsgrößen: Teilchenzahl N , chemisches Potential μ

Wir unterscheiden zwischen **extensiven** und **intensiven** Größen bzgl. der Teilung eines Systems:



- P und T sind **intensiv** und ändern sich **nicht** im Einzelsystem
- V und N sind **extensiv** und ändern sich im Einzelsystem

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

In vielen Fällen reicht die Angabe von **3 Zustandsgrößen** (z.B. P , V , T) um den Zustand eines Systemes **eindeutig** zu **charakterisieren**.

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

In vielen Fällen reicht die Angabe von **3 Zustandsgrößen** (z.B. P , V , T) um den Zustand eines Systemes **eindeutig** zu **charakterisieren**.

3 Freiheitsgrade statt 10^{24} !

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

In vielen Fällen reicht die Angabe von **3 Zustandsgrößen** (z.B. P , V , T) um den Zustand eines Systemes **eindeutig** zu **charakterisieren**.

3 Freiheitsgrade statt 10^{24} !

Die **Stoffmenge** wird in Mol angegeben:

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

In vielen Fällen reicht die Angabe von **3 Zustandsgrößen** (z.B. P , V , T) um den Zustand eines Systemes **eindeutig** zu **charakterisieren**.

3 Freiheitsgrade statt 10^{24} !

Die **Stoffmenge** wird in Mol angegeben:

Definition:

Die Basiseinheit **1 Mol** ist die **Stoffmenge** eines Systemes bestimmter Zusammensetzung, das aus ebenso vielen Teilchen besteht wie Atome in **12 g** des Nuklids ^{12}C enthalten sind

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Diese Zahl wird als *Avogadrozahl* N_A bezeichnet:

$$N_A = 6.023 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1} . \quad (1)$$

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Diese Zahl wird als **Avogadrozahl** N_A bezeichnet:

$$N_A = 6.023 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1} . \quad (1)$$

Für die **Teilchenzahl** N gilt

$$N = N_A \times n , \quad (2)$$

mit **Molzahl** n und $[n] = \text{mol}$.

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Diese Zahl wird als **Avogadrozahl** N_A bezeichnet:

$$N_A = 6.023 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1} . \quad (1)$$

Für die **Teilchenzahl** N gilt

$$N = N_A \times n , \quad (2)$$

mit **Molzahl** n und $[n] = \text{mol}$.

Die Basiseinheit der **Temperatur** ist Kelvin (K):

Definition:

Die Basiseinheit 1 Kelvin ist der 273.16te Teil der thermodynamischen Temperatur des Tripelpunkts des Wassers.

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

1.2 Temperatur und Wärme

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

1.2 Temperatur und Wärme

Die auffälligste Eigenschaft der Temperatur ist es, sich anzugleichen.

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

1.2 Temperatur und Wärme

Die auffälligste Eigenschaft der Temperatur ist es, sich anzugleichen.

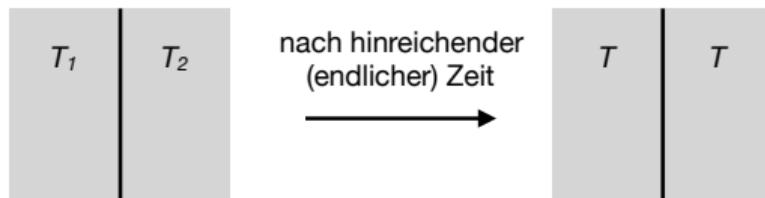
Zwei Körper (Systeme) verschiedener Temperatur $T_1 \geq T_2$ nehmen nach hinreichend langem thermischem Kontakt die gleiche Temperatur T mit $T_1 \geq T \geq T_2$ an.

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

1.2 Temperatur und Wärme

Die auffälligste Eigenschaft der Temperatur ist es, sich anzugleichen.

Zwei Körper (Systeme) verschiedener Temperatur $T_1 \geq T_2$ nehmen nach hinreichend langem thermischem Kontakt die gleiche Temperatur T mit $T_1 \geq T \geq T_2$ an.

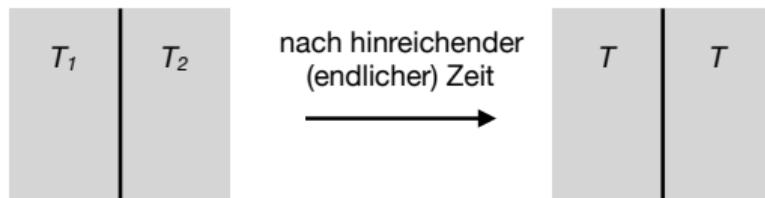


1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

1.2 Temperatur und Wärme

Die auffälligste Eigenschaft der Temperatur ist es, sich anzugleichen.

Zwei Körper (Systeme) verschiedener Temperatur $T_1 \geq T_2$ nehmen nach hinreichend langem thermischem Kontakt die gleiche Temperatur T mit $T_1 \geq T \geq T_2$ an.



Diese Eigenschaft kann daher als **Definition** dienen.

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Definition:

Es gibt eine Zustandsgröße, die Temperatur T . Ihre Gleichheit ist Bedingung des thermischen Gleichgewichts zweier Systeme oder zweier Teile desselben Systems ([Sommerfeld](#))

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

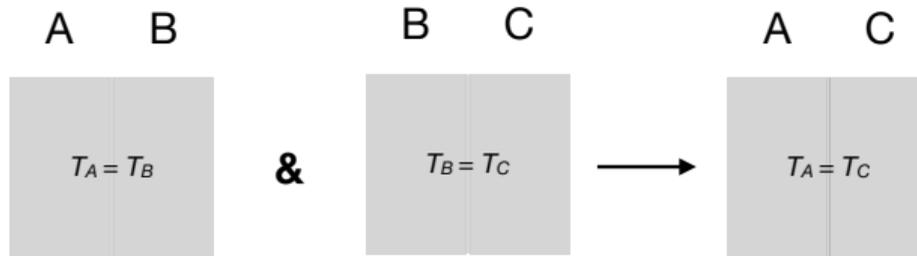
Definition:

Es gibt eine Zustandsgröße, die Temperatur T . Ihre Gleichheit ist Bedingung des thermischen Gleichgewichts zweier Systeme oder zweier Teile desselben Systems (Sommerfeld)

Nullter Hauptsatz:

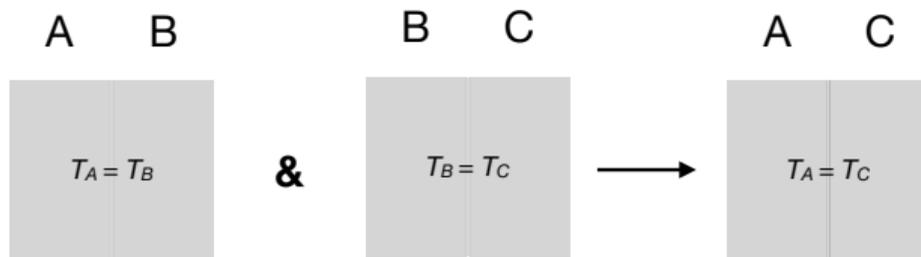
Wenn sich ein System A mit einem System B im thermischen Gleichgewicht befindet, d.h. $T_A = T_B$, und System B im thermischen Gleichgewicht mit einem System C steht, $T_B = T_C$, dann ist auch A mit C im thermischen Gleichgewicht und es gilt $T_A = T_C$.

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE



T ist eine skalare, intensive Größe.

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE



T ist eine skalare, intensive Größe.

Zur **Messung der Temperatur** kann jede Eigenschaft dienen, die sich stetig und reproduzierbar mit ihr ändert.

z.B. Volumen, Länge, Druck, elektrischer Widerstand

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Einschub: Temperaturmessungen und Thermometer

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Einschub: Temperaturmessungen und Thermometer

Wir sind von Natur aus durch unseren Tastsinn mit einem "Thermometer" ausgestattet. Das hilft uns im Alltag, aber wie lässt sich ein verlässliches Thermometer konstruieren, welches uns erlaubt die Temperatur zuverlässig zu messen?

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Einschub: Temperaturmessungen und Thermometer

Wir sind von Natur aus durch unseren Tastsinn mit einem "Thermometer" ausgestattet. Das hilft uns im Alltag, aber wie lässt sich ein verlässliches Thermometer konstruieren, welches uns erlaubt die Temperatur zuverlässig zu messen?

Wie schon besprochen: Im Prinzip kann man zur Konstruktion jede **temperaturabhängige** Eigenschaft nutzen:

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Einschub: Temperaturmessungen und Thermometer

Wir sind von Natur aus durch unseren Tastsinn mit einem "Thermometer" ausgestattet. Das hilft uns im Alltag, aber wie lässt sich ein verlässliches Thermometer konstruieren, welches uns erlaubt die Temperatur zuverlässig zu messen?

Wie schon besprochen: Im Prinzip kann man zur Konstruktion jede **temperaturabhängige** Eigenschaft nutzen:

Quecksilberthermometer: Glaskolben an dem eine enger Kapillare angesetzt ist. Entscheidend ist, dass sich das Quecksilber **stärker** ausdehnt als Glas.



1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Die **Fixpunkte** für zwei bestimmte Temperaturen können mit Eis und Wasser eingestellt werden: Dazu wird das Thermometer zunächst in Wasser gehängt, das beim Druck von einer Atmosphäre mit Eis im Gleichgewicht steht.

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Die **Fixpunkte** für zwei bestimmte Temperaturen können mit Eis und Wasser eingestellt werden: Dazu wird das Thermometer zunächst in Wasser gehängt, das beim Druck von einer Atmosphäre mit Eis im Gleichgewicht steht.

In dieser Mischung herrscht eine konstante Temperatur: Wenn Eis ins Wasser gegeben wird, so schmilzt ein Teil des Eises, und das Wasser wird kälter, bis schließlich thermisches Gleichgewicht erreicht wird und kein Eis mehr schmilzt. Führt man der Mischung Wärme zu, dann schmilzt wieder etwas Eis, aber die Temperatur ändert nicht, solange Eis vorhanden ist.

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Die **Fixpunkte** für zwei bestimmte Temperaturen können mit Eis und Wasser eingestellt werden: Dazu wird das Thermometer zunächst in Wasser gehängt, das beim Druck von einer Atmosphäre mit Eis im Gleichgewicht steht.

In dieser Mischung herrscht eine konstante Temperatur: Wenn Eis ins Wasser gegeben wird, so schmilzt ein Teil des Eises, und das Wasser wird kälter, bis schließlich thermisches Gleichgewicht erreicht wird und kein Eis mehr schmilzt. Führt man der Mischung Wärme zu, dann schmilzt wieder etwas Eis, aber die Temperatur ändert nicht, solange Eis vorhanden ist.

Ist das Thermometer zu Beginn wärmer als das Wasser, so wird nach dem Eintauchen die Quecksilbersäule kürzer, bis sich ihre Länge nach einer Weile nicht mehr ändert \Rightarrow **Markierung für den Gefrierpunkt des Wassers.**

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Die **Fixpunkte** für zwei bestimmte Temperaturen können mit Eis und Wasser eingestellt werden: Dazu wird das Thermometer zunächst in Wasser gehängt, das beim Druck von einer Atmosphäre mit Eis im Gleichgewicht steht.

In dieser Mischung herrscht eine konstante Temperatur: Wenn Eis ins Wasser gegeben wird, so schmilzt ein Teil des Eises, und das Wasser wird kälter, bis schließlich thermisches Gleichgewicht erreicht wird und kein Eis mehr schmilzt. Führt man der Mischung Wärme zu, dann schmilzt wieder etwas Eis, aber die Temperatur ändert nicht, solange Eis vorhanden ist.

Ist das Thermometer zu Beginn wärmer als das Wasser, so wird nach dem Eintauchen die Quecksilbersäule kürzer, bis sich ihre Länge nach einer Weile nicht mehr ändert ⇒ **Markierung für den Gefrierpunkt des Wassers.**

Analog tauchen wir das Thermometer in siedendes Wasser ⇒ **Markierung für den Siedepunkt des Wassers.**

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Diese beiden Temperatur-Fixpunkte werden zur Definition der [Celsius-Skala](#) verwendet

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Diese beiden Temperatur-Fixpunkte werden zur Definition der **Celsius-Skala** verwendet

Nach einem Vorschlag des schwedischer Mathematiker und Geodäten Celsius aus dem Jahre 1742, wird das Temperaturintervall zwischen Gefrierpunkt (0°C) und Siedepunkt des Wassers (100°C) in 100 gleiche Teile unterteilt.

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Diese beiden Temperatur-Fixpunkte werden zur Definition der **Celsius-Skala** verwendet

Nach einem Vorschlag des schwedischer Mathematiker und Geodäten Celsius aus dem Jahre 1742, wird das Temperaturintervall zwischen Gefrierpunkt (0°C) und Siedepunkt des Wassers (100°C) in 100 gleiche Teile unterteilt.

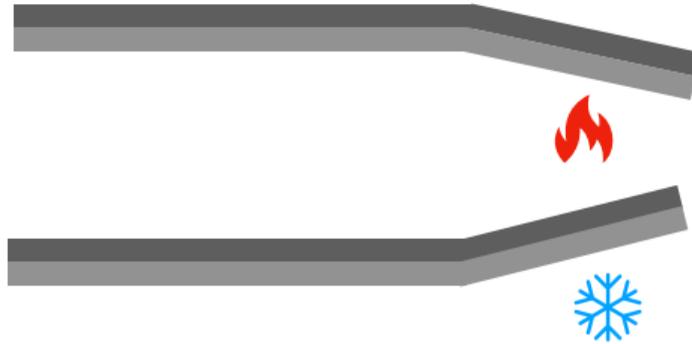
Sei l die **Länge der Queckslibersäule**, so beträgt die **Temperatur**

$$T_C = \frac{l_T - l_0}{l_{100} - l_0} \cdot 100^{\circ}\text{C}$$

mit $l_{0/100/T}$ die Längen bei $0/100/T^{\circ}\text{C}$.

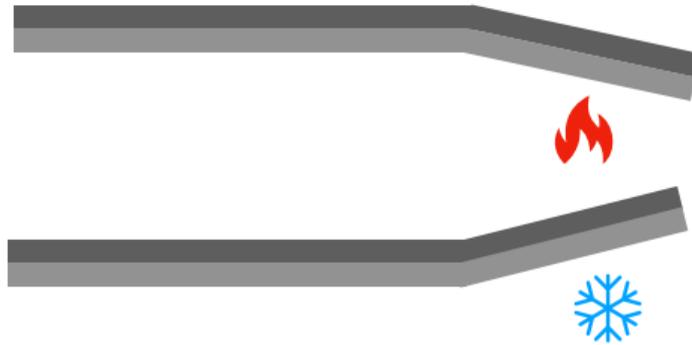
1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Zum Aufstellen von Temperaturskalen können auch andere thermometrische Eigenschaften ausgenutzt werden. Z.B. [Bimetallstreifen](#)



1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Zum Aufstellen von Temperaturskalen können auch andere thermometrische Eigenschaften ausgenutzt werden. Z.B. [Bimetallstreifen](#)



Ändert sich die Temperatur des Bimetallstreifens, dann krümmt er sich, weil die beiden Metalle sich unterschiedlich ausdehnen (Erwärmung) oder kontrahieren (Abkühlung).

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE



Glaskolben mit
Quecksilberschalter



Bimetall-
spirale

Verstell-
hebel

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

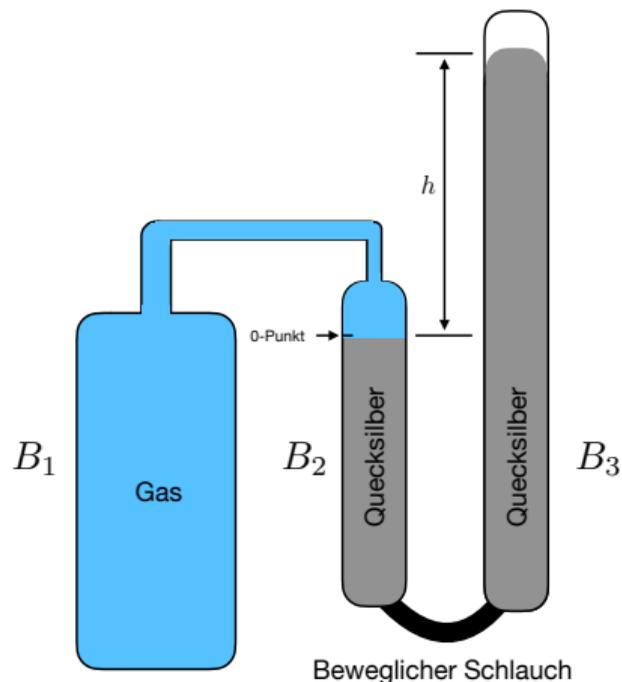
Gasthermometer mit konstantem Volumen: $T_C = \frac{P_T - P_0}{P_{100} - P_0} \cdot 100^\circ\text{C}$

$P_{0/100/T}$ = Druck bei $0/100/T^\circ\text{C}$.

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Gasthermometer mit konstantem Volumen: $T_C = \frac{P_T - P_0}{P_{100} - P_0} \cdot 100^\circ\text{C}$

$P_{0/100/T}$ = Druck bei $0/100/T^\circ\text{C}$.

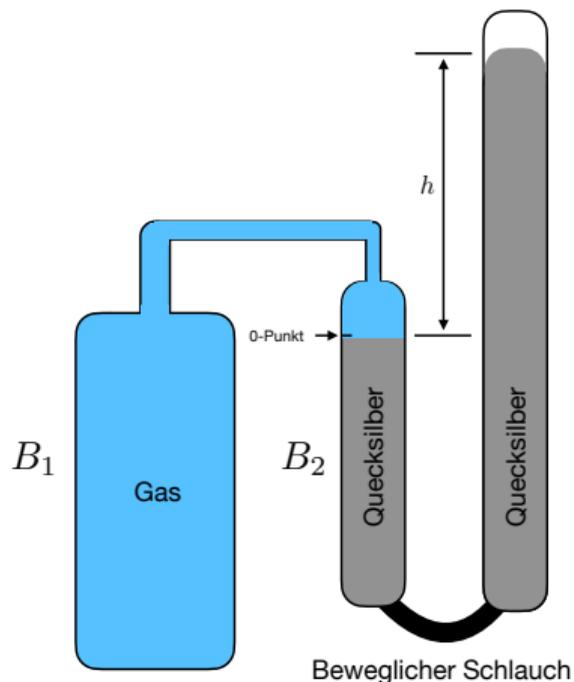


Höhe der Quecksilbersäule in Gefäß B_3 ein Maß für den Druck im Gefäß B_1 :

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Gasthermometer mit konstantem Volumen: $T_C = \frac{P_T - P_0}{P_{100} - P_0} \cdot 100^\circ\text{C}$

$P_{0/100/T}$ = Druck bei $0/100/T^\circ\text{C}$.



Höhe der Quecksilbersäule in Gefäß B_3 ein Maß für den Druck im Gefäß B_1 :

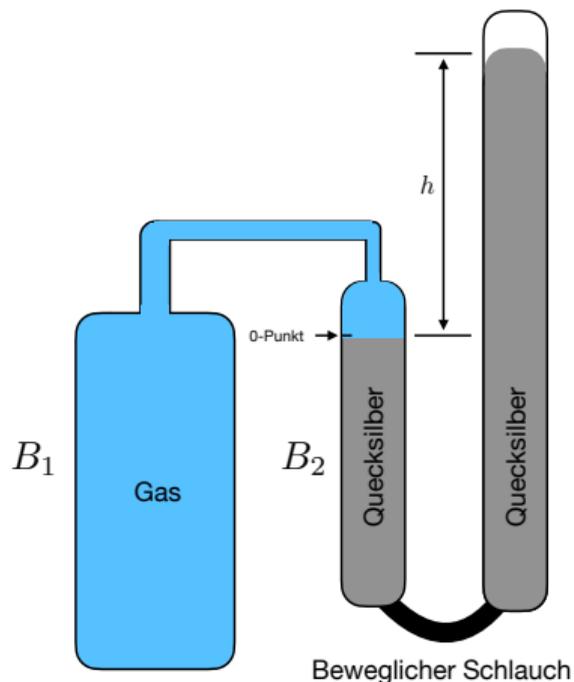
B_1 ist mit einem Gas gefüllt und in $B_{2/3}$ sind Quecksilber. Das Volumen im Gefäß B_1 wird durch Anheben oder Absenken von B_3 konstant gehalten, so dass das Quecksilber in B_2 stets auf gleicher Höhe bleibt.

$$\Rightarrow T \sim P \sim h$$

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Gasthermometer mit konstantem Volumen: $T_C = \frac{P_T - P_0}{P_{100} - P_0} \cdot 100^\circ\text{C}$

$P_{0/100/T}$ = Druck bei $0/100/T^\circ\text{C}$.



Höhe der Quecksilbersäule in Gefäß B_3 ein Maß für den Druck im Gefäß B_1 :

B_1 ist mit einem Gas gefüllt und in $B_{2/3}$ sind Quecksilber. Das Volumen im Gefäß B_1 wird durch Anheben oder Absenken von B_3 konstant gehalten, so dass das Quecksilber in B_2 stets auf gleicher Höhe bleibt.

$$\Rightarrow T \sim P \sim h$$

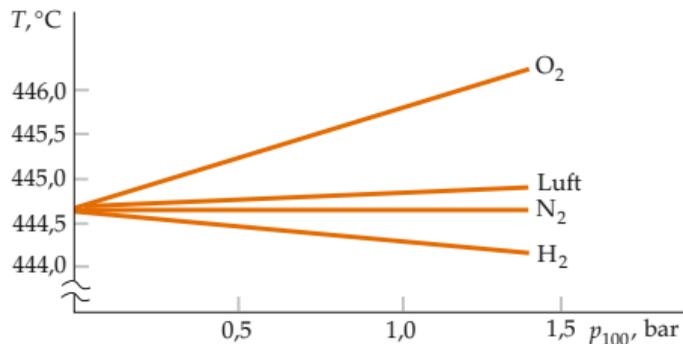
Wie unabhängig vom Füllgas sind solche Messungen?

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Betrachten wir nun eine **Reihe von Temperaturmessungen**, die mit verschiedenen Gasthermometern mit konstantem Volumens durchgeführt wurden für die **Siedetemperatur von Schwefel**:

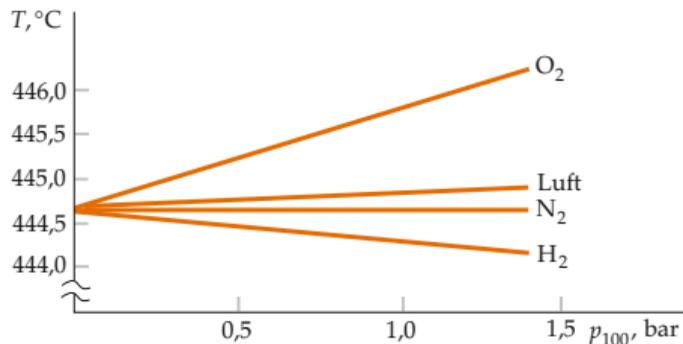
1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Betrachten wir nun eine **Reihe von Temperaturmessungen**, die mit verschiedenen Gasthermometern mit konstantem Volumens durchgeführt wurden für die **Siedetemperatur von Schwefel**:



1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

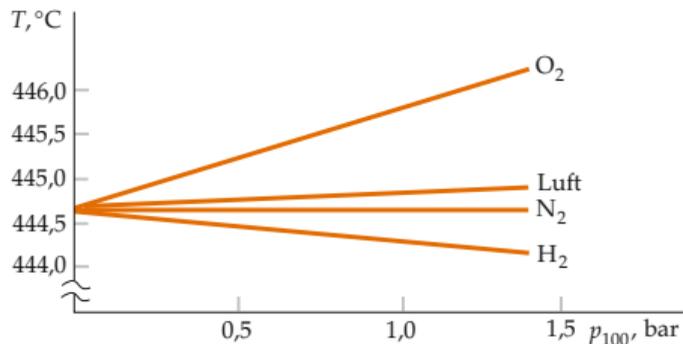
Betrachten wir nun eine **Reihe von Temperaturmessungen**, die mit verschiedenen Gasthermometern mit konstantem Volumens durchgeführt wurden für die **Siedetemperatur von Schwefel**:



Gezeigt ist der **gemessene Siedepunkt** der verschiedenen Gasthermometern mit unterschiedlichen Füllgasen.

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Betrachten wir nun eine **Reihe von Temperaturmessungen**, die mit verschiedenen Gasthermometern mit konstantem Volumens durchgeführt wurden für die **Siedetemperatur von Schwefel**:

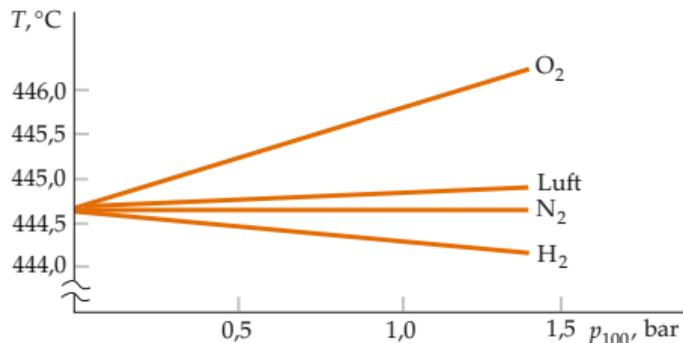


Gezeigt ist der **gemessene Siedepunkt** der verschiedenen Gasthermometern mit unterschiedlichen Füllgasen.

Der Gasdruck P_{100} bei 100°C wurde durch Änderung der Füllmenge an Gas variiert.

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Betrachten wir nun eine **Reihe von Temperaturmessungen**, die mit verschiedenen Gasthermometern mit konstantem Volumens durchgeführt wurden für die **Siedetemperatur von Schwefel**:



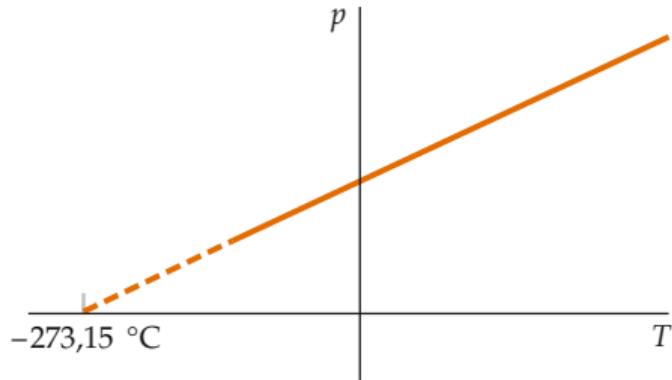
Gezeigt ist der **gemessene Siedepunkt** der verschiedenen Gasthermometern mit unterschiedlichen Füllgasen.

Der Gasdruck P_{100} bei 100°C wurde durch Änderung der Füllmenge an Gas variiert.

Bei kleinen Gasdichten wird die Messung des Siedepunktes **nahezu unabhängig** vom genutzten Gas. \Rightarrow In der Praxis: Extrapolation zu Gasdichten von Null

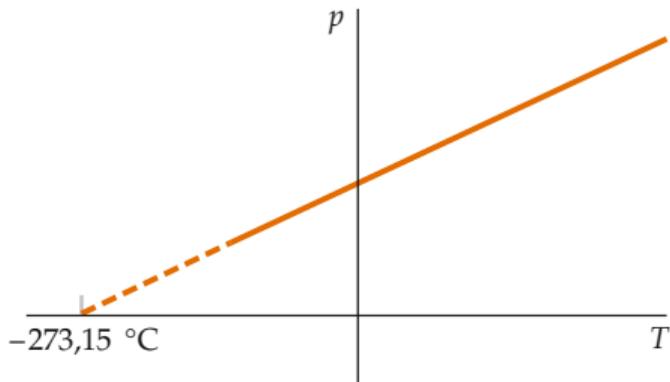
1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Betrachten wir nun eine **Reihe von Temperaturmessungen**, die mit einem Gasthermometer durchgeführt wurde, welches eine kleine, fest eingestellte Gasmenge enthält:



1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

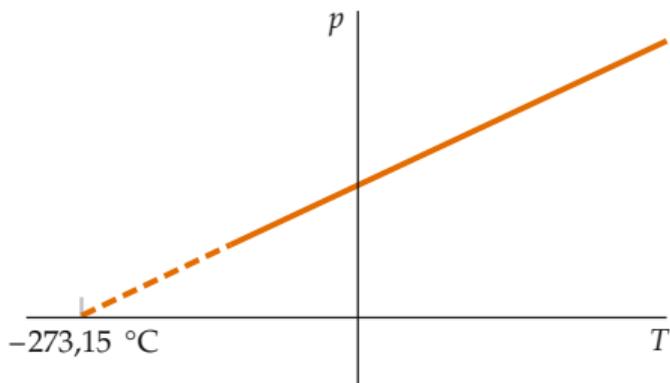
Betrachten wir nun eine **Reihe von Temperaturmessungen**, die mit einem Gasthermometer durchgeführt wurde, welches eine kleine, fest eingestellte Gasmenge enthält:



- Gasdruck P hängt linear von der Temperatur T ab.

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

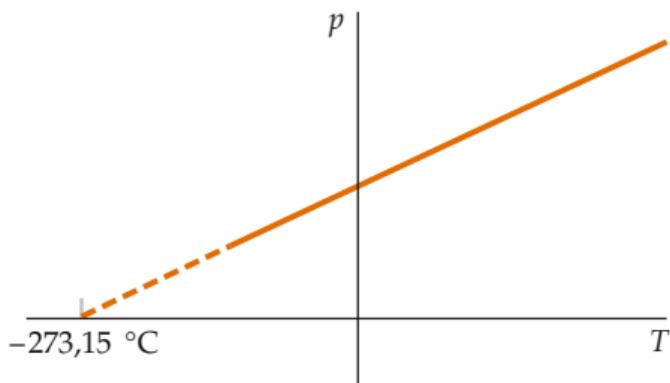
Betrachten wir nun eine **Reihe von Temperaturmessungen**, die mit einem Gasthermometer durchgeführt wurde, welches eine kleine, fest eingestellte Gasmenge enthält:



- Gasdruck P hängt linear von der Temperatur T ab.
- Können mit den gemessenen Werten nach $P = 0$ extrapolieren!

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

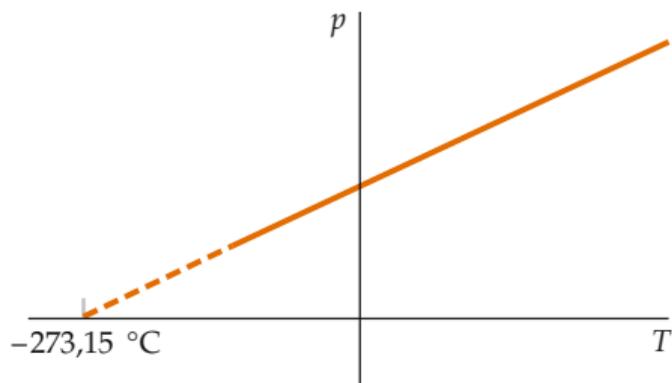
Betrachten wir nun eine **Reihe von Temperaturmessungen**, die mit einem Gasthermometer durchgeführt wurde, welches eine kleine, fest eingestellte Gasmenge enthält:



- Gasdruck P hängt linear von der Temperatur T ab.
- Können mit den gemessenen Werten nach $P = 0$ extrapolieren!
- Die extrapolierte Gerade schneidet die Abszisse stets bei -273.15°C , unabhängig vom gewählten Gas.

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Betrachten wir nun eine **Reihe von Temperaturmessungen**, die mit einem Gasthermometer durchgeführt wurde, welches eine kleine, fest eingestellte Gasmenge enthält:



- Gasdruck P hängt linear von der Temperatur T ab.
- Können mit den gemessenen Werten nach $P = 0$ extrapolieren!
- Die extrapolierte Gerade schneidet die Abszisse stets bei -273.15°C , unabhängig vom gewählten Gas.

In der Praxis weicht dieser Wert zuweilen ab, da es schwierig ist Thermometer absolut präzise zu kalibrieren. Der Siedepunkt ändert sich mit dem äusseren Luftdruck, der seinerseits von der Höhenlage und dem Wetter abhängt.

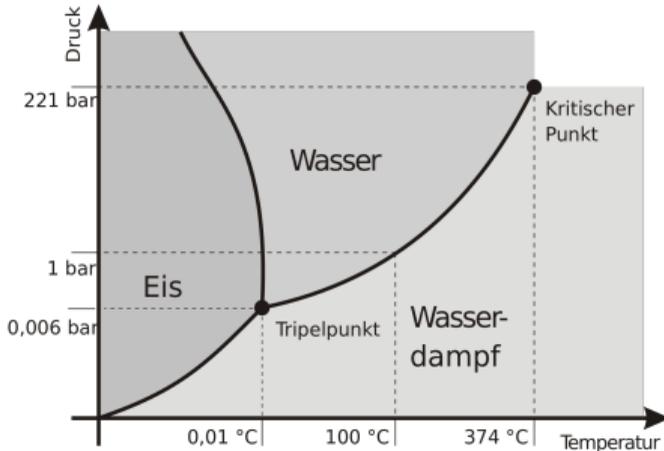
1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

1954, Comité International des Poids et Mesures: Temperaturskala mit nur einem Fixpunkt: [Dem Tripelpunkt des Wassers](#)

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

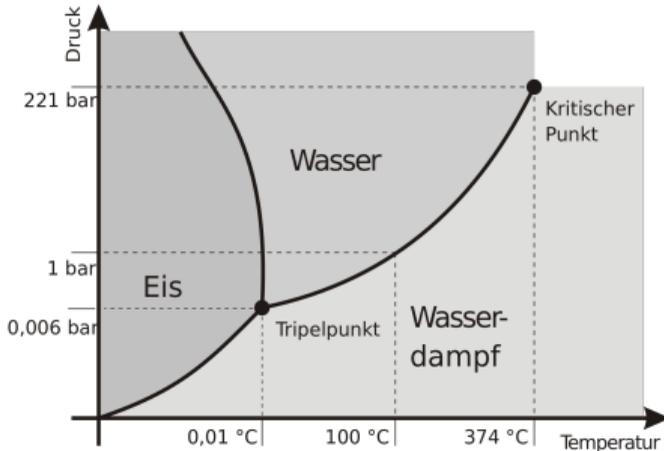
1954, Comité International des Poids et Mesures: Temperaturskala mit nur einem Fixpunkt: [Dem Tripelpunkt des Wassers](#)

Tripelpunkt: Alle drei Phasen präsent ($P = 6.105 \text{ mbar}$, $T = 0.01^\circ\text{C}$)



1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

1954, Comité International des Poids et Mesures: Temperaturskala mit nur einem Fixpunkt: [Dem Tripelpunkt des Wassers](#)



Tripelpunkt: Alle drei Phasen präsent ($P = 6.105 \text{ mbar}$, $T = 0.01^\circ\text{C}$)

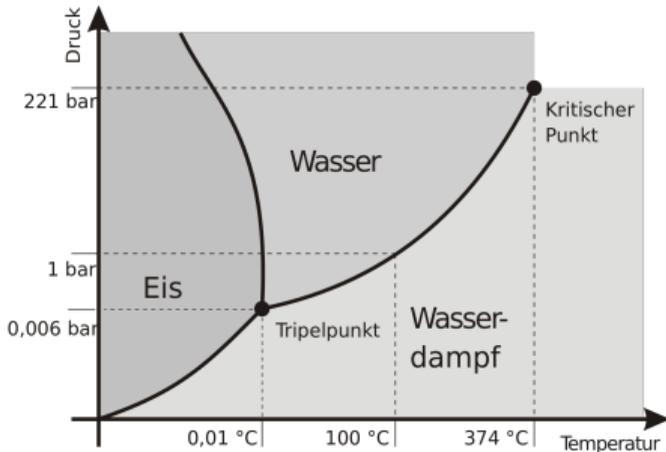
Kelvin-Skala:

$$T = \frac{273.16 \text{ K}}{P_3} P$$

P = gemessenen Druck; P_3 = gemessener Druck am Tripelpunkt.

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

1954, Comité International des Poids et Mesures: Temperaturskala mit nur einem Fixpunkt: [Dem Tripelpunkt des Wassers](#)



Tripelpunkt: Alle drei Phasen präsent ($P = 6.105 \text{ mbar}$, $T = 0.01^\circ\text{C}$)

Kelvin-Skala:

$$T = \frac{273.16 \text{ K}}{P_3} P$$

P = gemessenen Druck; P_3 = gemessener Druck am Tripelpunkt.

Es gilt: $T(\text{in } ^\circ\text{C}) = T(\text{in K}) - 273.15 \text{ K}$

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Die **Wärme Q** ist diejenige Größe, die zwischen Systemen verschiedener Temperatur ausgetauscht wird und damit den Gleichgewichtszustand herbeiführt.

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Die **Wärme Q** ist diejenige Größe, die zwischen Systemen verschiedener Temperatur ausgetauscht wird und damit den Gleichgewichtszustand herbeiführt.

Sie fließt ausschließlich in die Richtung niedriger Temperatur, ist also immer mit einem **Temperaturgradienten** verbunden.

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Die **Wärme Q** ist diejenige Größe, die zwischen Systemen verschiedener Temperatur ausgetauscht wird und damit den Gleichgewichtszustand herbeiführt.

Sie fließt ausschließlich in die Richtung niedriger Temperatur, ist also immer mit einem **Temperaturgradienten** verbunden.

Da sie eine **Zustandsänderung** bewirkt, nennt man sie eine **Prozessgröße** (im Gegensatz zu Zustandsgrößen).

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Die **Wärme** Q ist diejenige Größe, die zwischen Systemen verschiedener Temperatur ausgetauscht wird und damit den Gleichgewichtszustand herbeiführt.

Sie fließt ausschließlich in die Richtung niedriger Temperatur, ist also immer mit einem **Temperaturgradienten** verbunden.

Da sie eine **Zustandsänderung** bewirkt, nennt man sie eine **Prozessgröße** (im Gegensatz zu Zustandsgrößen).

Die Wärme Q ist eine **extensive Größe** und hat die Einheit einer Energie, $[Q] = \text{Joule}$.

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Die **Wärme** Q ist diejenige Größe, die zwischen Systemen verschiedener Temperatur ausgetauscht wird und damit den Gleichgewichtszustand herbeiführt.

Sie fließt ausschließlich in die Richtung niedriger Temperatur, ist also immer mit einem **Temperaturgradienten** verbunden.

Da sie eine **Zustandsänderung** bewirkt, nennt man sie eine **Prozessgröße** (im Gegensatz zu Zustandsgrößen).

Die Wärme Q ist eine **extensive Größe** und hat die Einheit einer Energie, $[Q] = \text{Joule}$.

Aber Vorsicht! Wärme transportiert nicht alleine (thermische) Energie, sondern auch **Entropie** (dazu später mehr).

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Die **klassische Einheit** der Wärme ist die **Kalorie (cal)**:

Definition:

1 cal ist definiert als die Wärme Q , welche man einer Probe von 1 g H_2O unter dem Druck $P = 760 \text{ torr} = 1013 \text{ hPa}$ zuführen muss, um sie von $14.5 \text{ }^\circ\text{C}$ auf $15.5 \text{ }^\circ\text{C}$ zu erwärmen.

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Die **klassische Einheit** der Wärme ist die **Kalorie (cal)**:

Definition:

1 cal ist definiert als die Wärme Q , welche man einer Probe von 1 g H_2O unter dem Druck $P = 760 \text{ torr} = 1013 \text{ hPa}$ zuführen muss, um sie von $14.5 \text{ }^\circ\text{C}$ auf $15.5 \text{ }^\circ\text{C}$ zu erwärmen.

Die Beziehung von cal und J ist gegeben durch das **mechanische Wärmeäquivalent**

$$1 \text{ cal} = 4.185 \text{ J} \quad (3)$$

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Die **klassische Einheit** der Wärme ist die **Kalorie (cal)**:

Definition:

1 cal ist definiert als die Wärme Q , welche man einer Probe von 1 g H_2O unter dem Druck $P = 760 \text{ torr} = 1013 \text{ hPa}$ zuführen muss, um sie von $14.5 \text{ }^\circ\text{C}$ auf $15.5 \text{ }^\circ\text{C}$ zu erwärmen.

Die Beziehung von cal und J ist gegeben durch das **mechanische Wärmeäquivalent**

$$1 \text{ cal} = 4.185 \text{ J} \quad (3)$$

Dieses wird experimentell bestimmt anhand der **Reibungswärme** (Joule, 1843-1849)

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Wie hängt nun die zugeführte Wärme δQ mit einer bewirkten Temperaturdifferenz dT zusammen?

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Wie hängt nun die zugeführte Wärme δQ mit einer bewirkten Temperaturdifferenz dT zusammen?

→ das δ kennzeichnet die infinitesimale Änderung einer Prozessgröße, dT die infinitesimale Änderung der Zustandsgröße Temperatur

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Wie hängt nun die zugeführte Wärme δQ mit einer bewirkten Temperaturdifferenz dT zusammen?

→ das δ kennzeichnet die infinitesimale Änderung einer Prozessgröße, dT die infinitesimale Änderung der Zustandsgröße Temperatur

Wir definieren

$$\delta Q = C dT, \quad (4)$$

mit der Wärmekapazität C

$$C = \frac{\delta Q}{dT}, \quad [C] = \frac{\text{J}}{\text{K}}. \quad (5)$$

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Diese Definition ist **nicht eindeutig**: Das Ergebnis einer Messung hängt von den **gewählten Randbedingungen** ab, z.B. $V = \text{const.}$ oder $P = \text{const.}$

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Diese Definition ist **nicht eindeutig**: Das Ergebnis einer Messung hängt von den **gewählten Randbedingungen** ab, z.B. $V = \text{const.}$ oder $P = \text{const.}$

Die gewählte Bedingung wird mit einem Index gekennzeichnet:

$$C_V = \left(\frac{\delta Q}{dT} \right)_V, \quad C_P = \left(\frac{\delta Q}{dT} \right)_P. \quad (6)$$

Die Schreibweise $\frac{\delta Q}{dT}$ ist nicht als Ableitung zu verstehen!

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Die **Wärmekapazität** C ist proportional zur **Stoffmenge** oder **Masse** des Systems.

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Die **Wärmekapazität** C ist proportional zur **Stoffmenge** oder **Masse** des Systems. Wir definieren daher weiter:

die spezifische Wärmekapazität:

$$c_s := \frac{C}{m} \quad ; \quad [c_s] = \frac{\text{J}}{\text{kg} \times \text{K}} . \quad (7)$$

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Die **Wärmekapazität** C ist proportional zur **Stoffmenge** oder **Masse** des Systems. Wir definieren daher weiter:

die spezifische Wärmekapazität:

$$c_s := \frac{C}{m} \quad ; \quad [c_s] = \frac{\text{J}}{\text{kg} \times \text{K}} . \quad (7)$$

die molare Wärmekapazität:

$$c_m := \frac{C}{n} \quad ; \quad [c_m] = \frac{\text{J}}{\text{mol} \times \text{K}} . \quad (8)$$

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Die **Wärmekapazität** C ist proportional zur **Stoffmenge** oder **Masse** des Systems. Wir definieren daher weiter:

die spezifische Wärmekapazität:

$$c_s := \frac{C}{m} \quad ; \quad [c_s] = \frac{\text{J}}{\text{kg} \times \text{K}} . \quad (7)$$

die molare Wärmekapazität:

$$c_m := \frac{C}{n} \quad ; \quad [c_m] = \frac{\text{J}}{\text{mol} \times \text{K}} . \quad (8)$$

Als $c_{m,P}$ würden wir dann die molare Wärmekapazität bei konstantem Druck P bezeichnen.

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Zeit für ein Beispiel: Welche Wärmemenge ist nötig um 3 kg Kupfer um 20°C zu erwärmen? $c_{s,P} = 0.386 \text{ kJ}/(\text{kg} \times \text{K})$ bei konstantem Druck von 1 atm.

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Zeit für ein Beispiel: Welche Wärmemenge ist nötig um 3 kg Kupfer um 20°C zu erwärmen? $c_{s,P} = 0.386 \text{ kJ}/(\text{kg} \times \text{K})$ bei konstantem Druck von 1 atm.

$$\begin{aligned} Q &= \int_{T_0}^{T_1} C dT = m c_{s,P} (T_1 - T_0) = m c_{s,P} \Delta T \\ &= 3 \text{ kg} \cdot 0.386 \text{ kJ}/(\text{kg} \times \text{K}) \cdot 20 \text{ K} = 23.16 \text{ kJ} \end{aligned}$$

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

1.2.1 Phasenübergänge und latente Wärme

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

1.2.1 Phasenübergänge und latente Wärme

Wird einer Substanz bei konstantem Druck Wärme zugeführt, so steigt im Allgemeinen die Temperatur. Manchmal kommt es aber trotz Wärmezufuhr zu keiner Temperaturerhöhung, nämlich wenn ein [Phasenübergang](#) stattfindet.

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

1.2.1 Phasenübergänge und latente Wärme

Wird einer Substanz bei konstantem Druck Wärme zugeführt, so steigt im Allgemeinen die Temperatur. Manchmal kommt es aber trotz Wärmezufuhr zu keiner Temperaturerhöhung, nämlich wenn ein **Phasenübergang** stattfindet.

- Schmelzen, Verdampfen, Gefrieren sind ihnen ein Begriff.

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

1.2.1 Phasenübergänge und latente Wärme

Wird einer Substanz bei konstantem Druck Wärme zugeführt, so steigt im Allgemeinen die Temperatur. Manchmal kommt es aber trotz Wärmezufuhr zu keiner Temperaturerhöhung, nämlich wenn ein **Phasenübergang** stattfindet.

- Schmelzen, Verdampfen, Gefrieren sind ihnen ein Begriff.
- **Sublimieren** (fest \rightarrow gasförmig), Kondensieren (gasförmig \rightarrow fest **oder** flüssig)

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

1.2.1 Phasenübergänge und latente Wärme

Wird einer Substanz bei konstantem Druck Wärme zugeführt, so steigt im Allgemeinen die Temperatur. Manchmal kommt es aber trotz Wärmezufuhr zu keiner Temperaturerhöhung, nämlich wenn ein **Phasenübergang** stattfindet.

- Schmelzen, Verdampfen, Gefrieren sind ihnen ein Begriff.
- **Sublimieren** (fest \rightarrow gasförmig), Kondensieren (gasförmig \rightarrow fest **oder** flüssig)

Weitere Vielfalt bei z.B. Festkörpern wo Änderungen in der Kristallstruktur vorkommen können.

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

1.2.1 Phasenübergänge und latente Wärme

Wird einer Substanz bei konstantem Druck Wärme zugeführt, so steigt im Allgemeinen die Temperatur. Manchmal kommt es aber trotz Wärmezufuhr zu keiner Temperaturerhöhung, nämlich wenn ein **Phasenübergang** stattfindet.

- Schmelzen, Verdampfen, Gefrieren sind ihnen ein Begriff.
- **Sublimieren** (fest \rightarrow gasförmig), Kondensieren (gasförmig \rightarrow fest **oder** flüssig)

Weitere Vielfalt bei z.B. Festkörpern wo Änderungen in der Kristallstruktur vorkommen können.

Die für einen Phasenübergang notwendige Wärmemenge nennt man latente Wärme (**latent = verborgen**).

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Zum Schmelzen oder Verdampfen einer **Masse** m einer bestimmten Substanz werden beispielsweise die Wärmemengen

$$Q = m \times Q_S, \quad Q = m \times Q_V,$$

benötigt.

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Zum Schmelzen oder Verdampfen einer **Masse** m einer bestimmten Substanz werden beispielsweise die Wärmemengen

$$Q = m \times Q_S, \quad Q = m \times Q_V,$$

benötigt. Q_S und Q_V nennt man die latente Schmelz- und Verdampfungswärme mit Einheiten von J / kg.

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Zum Schmelzen oder Verdampfen einer **Masse** m einer bestimmten Substanz werden beispielsweise die Wärmemengen

$$Q = m \times Q_S, \quad Q = m \times Q_V,$$

benötigt. Q_S und Q_V nennt man die latente Schmelz- und Verdampfungswärme mit Einheiten von J / kg.

Quiz: Wieviel Wärme wird benötigt um 1 kg Eis mit einer Temperatur von -20°C zu verdampfen?

Die Wärmekapazitäten von Eis und Wasser sind $c_{S,P} = 2.05 \text{ kJ}/(\text{kg} \times \text{K})$ und $c_{S,P} = 4.18 \text{ kJ}/(\text{kg} \times \text{K})$. Weiter sind $Q_S = 334 \text{ kJ}/\text{kg}$ und $Q_V = 2257 \text{ kJ}/\text{kg}$.

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

1.3 Druck und Arbeit

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

1.3 Druck und Arbeit

Gegeben sein ein **Quader** mit Volumen V und Querschnittsfläche A , auf die eine Kraft F wirkt.

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

1.3 Druck und Arbeit

Gegeben sein ein **Quader** mit Volumen V und Querschnittsfläche A , auf die eine Kraft F wirkt.

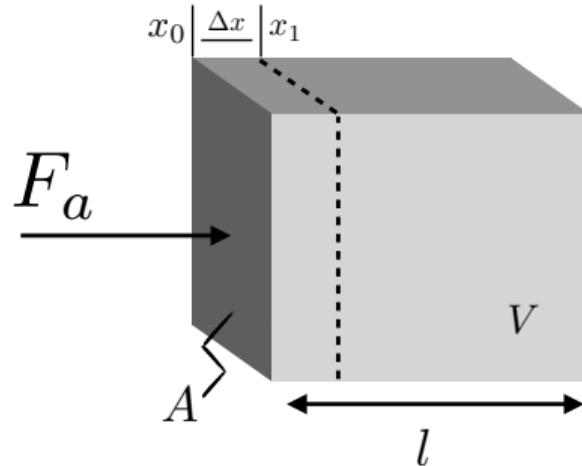
Dann ist der **Druck** P_a auf A : $P_a = \frac{F_a}{A}$

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

1.3 Druck und Arbeit

Gegeben sein ein **Quader** mit Volumen V und Querschnittsfläche A , auf die eine Kraft F wirkt.

Dann ist der **Druck** P_a auf A : $P_a = \frac{F_a}{A}$



1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

1.3 Druck und Arbeit

Gegeben sein ein **Quader** mit Volumen V und Querschnittsfläche A , auf die eine Kraft F wirkt.

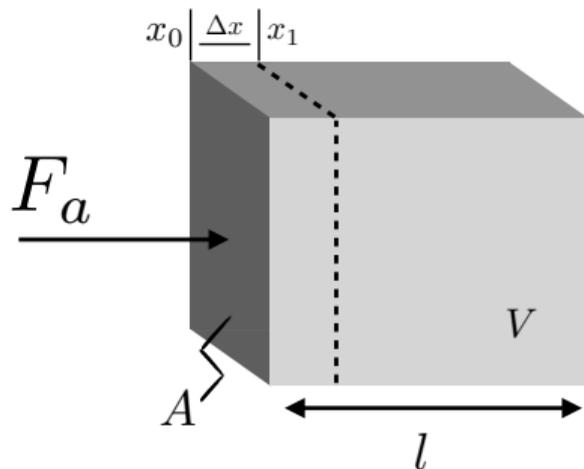
Dann ist der **Druck** P_a auf A : $P_a = \frac{F_a}{A}$

Bei Kompression des Körpers um Δx wird die **Arbeit** dW geleistet:

$$dW = F_a dx = P_a dV \quad ; dV = A \cdot dx$$

und

$$W = \int_{V_0}^{V_1} P_a(V) dV$$



1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Die an einem thermodynamischen System geleistete Arbeit ist **keine** Zustandsgröße des Systems.

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Die an einem thermodynamischen System geleistete Arbeit ist **keine** Zustandsgröße des Systems.

⇒ Wir kennzeichnen in Zukunft die diff. Änderung mit "δ", also δW statt dW .

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Die an einem thermodynamischen System geleistete Arbeit ist **keine** Zustandsgröße des Systems.

⇒ Wir kennzeichnen in Zukunft die diff. Änderung mit "δ", also δW statt dW .

Vorzeichenkonvention:

- $W > 0$, wenn **am** System Arbeit geleistet wird.
- $Q > 0$, wenn Wärme **in** das System fließt.

Merkregel: das System ist "egoistisch"

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Die an einem thermodynamischen System geleistete Arbeit ist **keine** Zustandsgröße des Systems.

⇒ Wir kennzeichnen in Zukunft die diff. Änderung mit "δ", also δW statt dW .

Vorzeichenkonvention:

- $W > 0$, wenn **am** System Arbeit geleistet wird.
- $Q > 0$, wenn Wärme **in** das System fließt.

Merkregel: das System ist "egoistisch"

1.4 Der Erste Hauptsatz

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Die an einem thermodynamischen System geleistete Arbeit ist **keine** Zustandsgröße des Systems.

⇒ Wir kennzeichnen in Zukunft die diff. Änderung mit "δ", also δW statt dW .

Vorzeichenkonvention:

- $W > 0$, wenn **am** System Arbeit geleistet wird.
- $Q > 0$, wenn Wärme **in** das System fließt.

Merkregel: das System ist "egoistisch"

1.4 Der Erste Hauptsatz

Wir nennen ein System **abgeschlossen**, wenn es mit anderen Systemen nicht in Wechselwirkung steht. Es enthält dann eine bestimmte, zeitlich unveränderliche **innere Energie** U . (Energieerhaltungsgesetz)

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Die **innere Energie U** ist eine **Zustandsgröße**. Sie ist gegeben durch

$$U = E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}} . \quad (9)$$

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Die **innere Energie U** ist eine **Zustandsgröße**. Sie ist gegeben durch

$$U = E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}} . \quad (9)$$

Sie kann sich nur dadurch **ändern**, dass dem System von außen Energie **zugeführt** oder **entnommen** wird.

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Die **innere Energie U** ist eine **Zustandsgröße**. Sie ist gegeben durch

$$U = E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}} . \quad (9)$$

Sie kann sich nur dadurch **ändern**, dass dem System von außen Energie **zugeführt** oder **entnommen** wird.

Der Wärmelehre eigentümlich ist die Unterscheidung der zug. Energie in **zugeführte Wärme Q** und der **am System geleisteten Arbeit W**.

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Die **innere Energie U** ist eine **Zustandsgröße**. Sie ist gegeben durch

$$U = E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}} . \quad (9)$$

Sie kann sich nur dadurch **ändern**, dass dem System von außen Energie **zugeführt** oder **entnommen** wird.

Der Wärmelehre eigentümlich ist die Unterscheidung der zug. Energie in **zugeführte Wärme Q** und der **am System geleisteten Arbeit W**.

Demgemäß ist:

$$\begin{aligned} \Delta U &= Q + W \\ &\text{bzw.} \\ dU &= \delta Q + \delta W \end{aligned}$$

1. Hauptsatz (HS)

Meyer, Joule, Helmholtz
(1842-47)

Der 1. HS ist also eine spezielle Formulierung des Energieerhaltungssatzes.

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

1.5 Irreversible Prozesse und der zweite Hauptsatz

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

1.5 Irreversible Prozesse und der zweite Hauptsatz

Zwei Körper mit verschiedenen Temperaturen gleichen unter Wärmetausch ihre Temperatur einander **spontan** an.

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

1.5 Irreversible Prozesse und der zweite Hauptsatz

Zwei Körper mit verschiedenen Temperaturen gleichen unter Wärmetausch ihre Temperatur einander **spontan** an.

Der **umgekehrte Vorgang**, die spontane Entstehung einer Temperaturdifferenz, kommt in der Natur nach aller Erfahrung **nicht** vor, obwohl der 1. HS das nicht verbietet.

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

1.5 Irreversible Prozesse und der zweite Hauptsatz

Zwei Körper mit verschiedenen Temperaturen gleichen unter Wärmetausch ihre Temperatur einander **spontan** an.

Der **umgekehrte Vorgang**, die spontane Entstehung einer Temperaturdifferenz, kommt in der Natur nach aller Erfahrung **nicht** vor, obwohl der 1. HS das nicht verbietet.

Damit gilt:

Jeder **Temperaturausgleich durch direkten Wärmekontakt** ist **irreversibel** (unumkehrbar) und kann nur durch Änderung der Umgebung (z.B. Energieentzug) wieder rückgängig gemacht werden.

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

1. Formulierung des 2. Hauptsatzes

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

1. Formulierung des 2. Hauptsatzes

Es gibt **keine** Zustandsänderung deren einziges Ergebnis die Übertragung von Wärme von einem Körper niederer Temperatur auf einen Körper höherer Temperatur ist.

(Clausius, 1850)

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

1. Formulierung des 2. Hauptsatzes

Es gibt **keine** Zustandsänderung deren einziges Ergebnis die Übertragung von Wärme von einem Körper niedriger Temperatur auf einen Körper höherer Temperatur ist.
(Clausius, 1850)

1.6 Zustandsgrößen und Integrabilitätsbedingung

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

1. Formulierung des 2. Hauptsatzes

Es gibt **keine** Zustandsänderung deren einziges Ergebnis die Übertragung von Wärme von einem Körper niedriger Temperatur auf einen Körper höherer Temperatur ist.

(Clausius, 1850)

1.6 Zustandsgrößen und Integrabilitätsbedingung

Der **thermodynamische Zustand** soll durch einen Satz weniger Zustandsgrößen **eindeutig** festgelegt werden. Insbesondere sollen die Zustandsgrößen **unabhängig** davon sein, über welchen Prozess der Zustand herbeigeführt wurde.

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Aus dieser Forderung können wir eine mathematische Bedingung formulieren:

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Aus dieser Forderung können wir eine mathematische Bedingung formulieren:

Gegeben sei eine Größe $F(x, y)$, die vom Ort (x, y) abhängt:

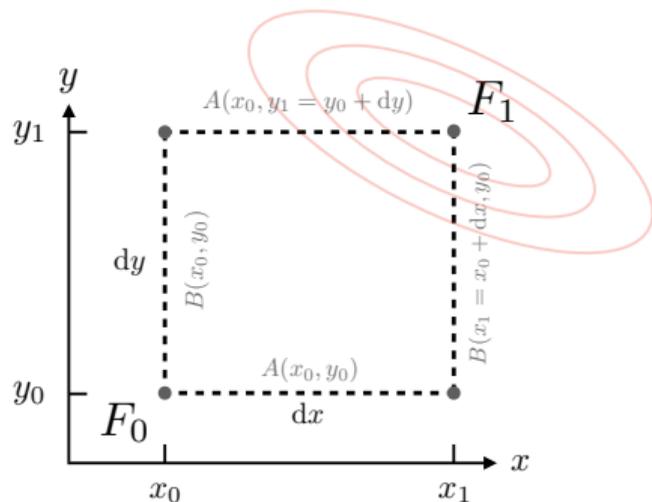
$$F_0 = F(x_0, y_0), F_1 = F(x_1, y_1)$$

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Aus dieser Forderung können wir eine mathematische Bedingung formulieren:

Gegeben sei eine Größe $F(x, y)$, die vom Ort (x, y) abhängt:

$$F_0 = F(x_0, y_0), F_1 = F(x_1, y_1)$$

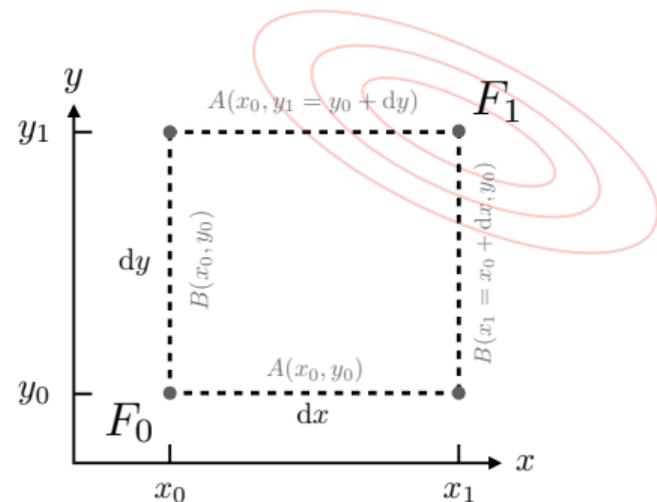


1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Aus dieser Forderung können wir eine mathematische Bedingung formulieren:

Gegeben sei eine Größe $F(x, y)$, die vom Ort (x, y) abhängt:

$$F_0 = F(x_0, y_0), F_1 = F(x_1, y_1)$$



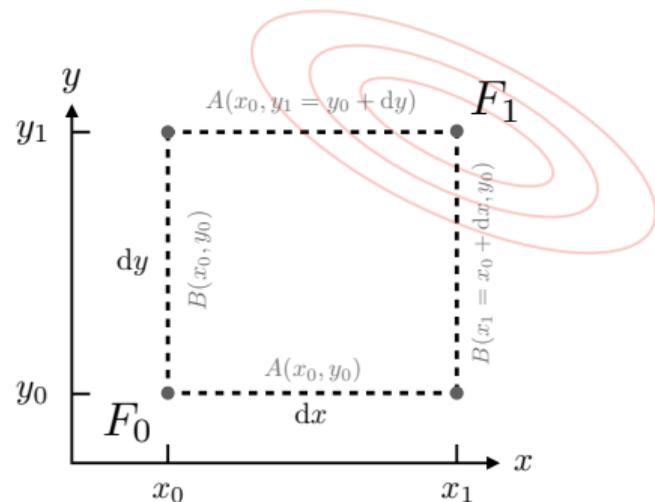
Forderung: $F_1 - F_0$ ist unabhängig vom Weg.

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Aus dieser Forderung können wir eine mathematische Bedingung formulieren:

Gegeben sei eine Größe $F(x, y)$, die vom Ort (x, y) abhängt:

$$F_0 = F(x_0, y_0), F_1 = F(x_1, y_1)$$



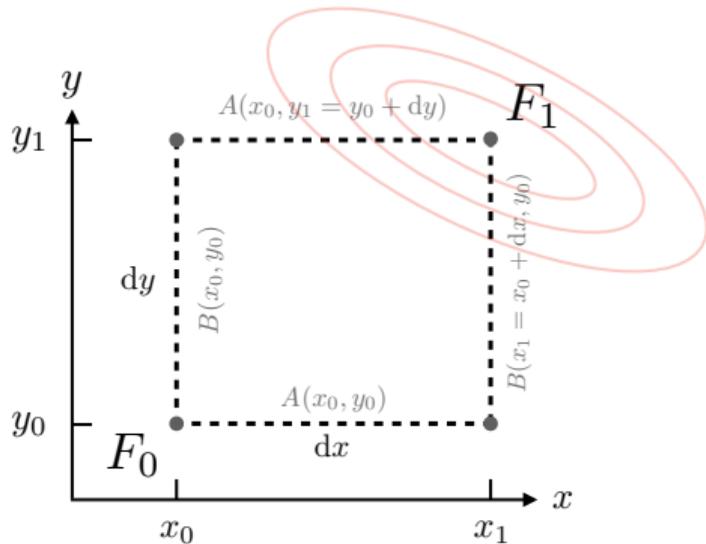
Forderung: $F_1 - F_0$ ist unabhängig vom Weg.

Es sei

$$dF = A(x, y)dx + B(x, y)dy$$

mit A, B sind die von x, y abh. Steigungen entlang des Weges.

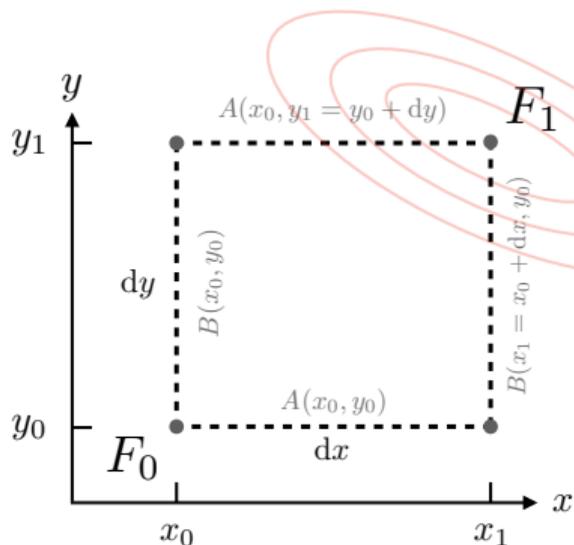
1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE



Aus der Forderung folgt:

$$\begin{aligned} A(x_0, y_0) dx + B(x_0 + dx, y_0) dy \\ = \\ B(x_0, y_0) dy + A(x_0, y_0 + dy) dx \end{aligned}$$

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

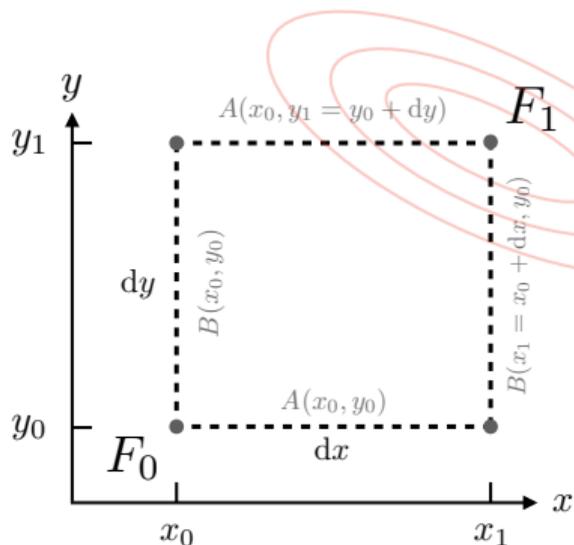


Aus der Forderung folgt:

$$\begin{aligned} A(x_0, y_0) dx + B(x_0 + dx, y_0) dy \\ = \\ B(x_0, y_0) dy + A(x_0, y_0 + dy) dx \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \frac{B(x_0 + dx, y_0) - B(x_0, y_0)}{dx} = \frac{A(x_0, y_0 + dy) - A(x_0, y_0)}{dy}$$

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE



Aus der Forderung folgt:

$$\begin{aligned} A(x_0, y_0) dx + B(x_0 + dx, y_0) dy \\ = \\ B(x_0, y_0) dy + A(x_0, y_0 + dy) dx \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \frac{B(x_0 + dx, y_0) - B(x_0, y_0)}{dx} = \frac{A(x_0, y_0 + dy) - A(x_0, y_0)}{dy}$$

bzw. **Integrabilitätsbedingung:**

$$\frac{\partial B(x, y)}{\partial x} = \frac{\partial A(x, y)}{\partial y}$$

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Wir können diese Bedingung auch ableiten mittels einer Funktion $F(x, y)$, von der wir wissen, dass sie integrabel ist.

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Wir können diese Bedingung auch ableiten mittels einer Funktion $F(x, y)$, von der wir wissen, dass sie integrierbar ist.

Dann lässt sich für sie das **vollständige Differential** formulieren:

$$dF = \underbrace{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)_y}_{=A(x,y)} dx + \underbrace{\left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)_x}_{=B(x,y)} dy .$$

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Wir können diese Bedingung auch ableiten mittels einer Funktion $F(x, y)$, von der wir wissen, dass sie integrierbar ist.

Dann lässt sich für sie das **vollständige Differential** formulieren:

$$dF = \underbrace{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)_y}_{=A(x,y)} dx + \underbrace{\left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)_x}_{=B(x,y)} dy .$$

Aus der Unabhängigkeit vom Weg folgt, dass **zwei hintereinander durchgeführter Ableitungen unabhängig** von der **Reihenfolge** zum selben Ergebnis führt,

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Wir können diese Bedingung auch ableiten mittels einer Funktion $F(x, y)$, von der wir wissen, dass sie integrierbar ist.

Dann lässt sich für sie das **vollständige Differential** formulieren:

$$dF = \underbrace{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)_y}_{=A(x,y)} dx + \underbrace{\left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)_x}_{=B(x,y)} dy.$$

Aus der Unabhängigkeit vom Weg folgt, dass **zwei hintereinander durchgeführter Ableitungen unabhängig** von der **Reihenfolge** zum selben Ergebnis führt, also

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial F}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial F}{\partial y} \right) \rightarrow \frac{\partial}{\partial y} A = \frac{\partial}{\partial x} B$$

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Konsequenz für die mathematische Gestalt der Thermodynamik:

¹Nur hierfür sind T und P definiert

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Konsequenz für die mathematische Gestalt der Thermodynamik:

U , T , V sind Zustandsgrößen eines Gases, T , V legen den Zustand eindeutig fest, $U(T, V)$.

¹Nur hierfür sind T und P definiert

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Konsequenz für die mathematische Gestalt der Thermodynamik:

U , T , V sind Zustandsgrößen eines Gases, T , V legen den Zustand eindeutig fest, $U(T, V)$. Dann kann man schreiben

$$dU = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V dT + \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T dV. \quad (10)$$

¹Nur hierfür sind T und P definiert

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Konsequenz für die mathematische Gestalt der Thermodynamik:

U , T , V sind Zustandsgrößen eines Gases, T , V legen den Zustand eindeutig fest, $U(T, V)$. Dann kann man schreiben

$$dU = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V dT + \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T dV. \quad (10)$$

Diese Beziehung gilt **immer**, unabhängig vom tatsächlichen Prozess.

¹Nur hierfür sind T und P definiert

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Konsequenz für die mathematische Gestalt der Thermodynamik:

U , T , V sind Zustandsgrößen eines Gases, T , V legen den Zustand eindeutig fest, $U(T, V)$. Dann kann man schreiben

$$dU = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V dT + \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T dV. \quad (10)$$

Diese Beziehung gilt **immer**, unabhängig vom tatsächlichen Prozess.

Das Differential beschreibt Übergänge zwischen Gleichgewichtszuständen¹ und gilt für Systeme im **permanenten** Temperatur- und Druckgleichgewicht.

¹Nur hierfür sind T und P definiert

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Beispiel: 1. HS

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Beispiel: 1. HS

$$dU = \delta Q + \delta W_A$$

$$\delta W_A = -P_a dV.$$

δW_A ist die am (–!) System geleistete (Volumen-)Arbeit durch äußeren Druck P_a (keine Zustandsgröße).

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Beispiel: 1. HS

$$dU = \delta Q + \delta W_A$$

$$\delta W_A = -P_a dV.$$

δW_A ist die am (–!) System geleistete (Volumen-)Arbeit durch äußeren Druck P_a (keine Zustandsgröße). Wenn die Prozessführung sehr langsam geschieht, gilt für den Druck P im System (vgl. 2.4)

$$P \simeq P_a$$

$$\Rightarrow dU = \delta Q - P dV \quad (11)$$

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Beispiel: 1. HS

$$dU = \delta Q + \delta W_A$$

$$\delta W_A = -P_a dV.$$

δW_A ist die am (–!) System geleistete (Volumen-)Arbeit durch äußeren Druck P_a (keine Zustandsgröße). Wenn die Prozessführung sehr langsam geschieht, gilt für den Druck P im System (vgl. 2.4)

$$P \simeq P_a$$

$$\Rightarrow dU = \delta Q - P dV \quad (11)$$

Für $dV = 0$ gilt also $dU = \delta Q \stackrel{!}{=} C_V dT$. Vergleich mit [Differential](#) ergibt unmittelbar

$$C_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V. \quad (12)$$

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Beispiel: 1. HS

$$dU = \delta Q + \delta W_A$$

$$\delta W_A = -P_a dV.$$

δW_A ist die am (–!) System geleistete (Volumen-)Arbeit durch äußeren Druck P_a (keine Zustandsgröße). Wenn die Prozessführung sehr langsam geschieht, gilt für den Druck P im System (vgl. 2.4)

$$P \simeq P_a$$

$$\Rightarrow dU = \delta Q - P dV \quad (11)$$

Für $dV = 0$ gilt also $dU = \delta Q \stackrel{!}{=} C_V dT$. Vergleich mit [Differential](#) ergibt unmittelbar

$$C_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V. \quad (12)$$

Wir haben die Wärmekapazität C_V durch eine Zustandsgröße ausgedrückt!

1. GRUNDBEGRIFFE UND HAUPTSÄTZE

Verständnisfragen: (Diskutieren Sie mit ihrem Sitznachbar)

- Was sind die Kernaussagen des 0. / 1. / 2. Hauptsatzes?
- Was ist der Unterschied zwischen Zustandsgrößen und Prozessgrößen?

Aufwärmübung:

Wieviel Wärme wird benötigt um 1 kg Eis mit einer Temperatur von -20°C zu verdampfen?

Die Wärmekapazitäten von Eis und Wasser sind $c_{s,P} = 2.05 \text{ kJ}/(\text{kg} \times \text{K})$ und $c_{s,P} = 4.18 \text{ kJ}/(\text{kg} \times \text{K})$. Weiter sind $Q_S = 334 \text{ kJ}/\text{kg}$ und $Q_V = 2257 \text{ kJ}/\text{kg}$.