**6. Wärmelehre**

**6.1. Einleitung**

Subjektives Empfinden der Temperatur (Wärmegrades, Wärmezustands) eines Körpers

Beispiele: 3 Schüsseln mit Wasser (heiß, lauwarm, kalt) je nachdem ob die Hand vorher im heißen oder kalten Wasser war, empfindet man das lauwarme als heiß oder kalt.

LN2 (-196°C!) wird nicht als kalt, sondern als heiß empfunden.

Die Temperatur ist aber auch eine Basisgröße im SI-Einheitensystem, d.h. sie wird nicht aus den anderen Basiseinheiten abgeleitet.

Die Temperatur ist ein Maß für den Bewegungszustand der Atome/Moleküle eines Materials

**6.2. Änderung physikalischer Größen mit der Temperatur**

* Bei Erwärmung dehnen sich Körper aus (Ausnahme: Anomalie des Wassers)
* Der Aggregatzustand eines Stoffes ist von seiner Temperatur abhängig (Fest, Flüssig, Gasförmig, Plasma)
* Der elektrische Widerstand von Metallen nimmt mit sinkender Temperatur ab (Aber nicht alle Metalle zeigen den Effekt der „Supraleitung“). Es gibt aber auch „Heißleiter“ (Legierungen).
* Eine elektrische Spannung entsteht, wenn eine Temperaturdifferenz zwischen den beiden Verbindungspunkten eines Drahtes mit zwei anderen Drähten aus versch. Material

(z.B.: Fe-Konstantan)

* Art und Stärke der von einem Körper ausgehenden Strahlung
* Sehr wichtig sind auch die Auswirkungen der Temperatur auf den Ablauf chemischer Reaktionen

**6.3. Temperaturskalen**

Celsius

Einheit der Temperaturdifferenz ist ein Grad (Kelvin K). Das ist 1/100 des Unterschiedes zwischen der Temperatur von schmelzendem Eis („Eispunkt“) und der Temperatur von siedendem Wasser („Siedepunkt“) unter Normalbedingungen (Luftdruck 1013mbar). Das sind die zwei Fundamentalpunkte der Temperaturmessung. Den beiden Punkten wurde nach Vorschlag von Celsius (1701-1744, schwedischer Astronom) 0°C bzw. 100°C zugeordnet.

Kelvin

Ist eine absolute Temperaturskala, wird auch thermodynamische Temperaturskala genannt. Es gibt eine nicht unterschreitbare tiefste Temperatur, den absoluten Nullpunkt der Temperatur. Dieser liegt bei -273,15°C = 0K

(Sir William Thomson, Baron Kelvin of Largs, 1824-1904; Gb)

Fahrenheit

(Gabriel Daniel Fahrenheit 1686-1736; Dt)

Wird spez. in USA/England noch verwendet.

Eispunkt=32°F (Kältegemisch aus Wasser und Salz; er dachte, es gibt kaum tiefere Temperaturen und wollte negative Werte vermeiden)

Siedepunkt=212°F (Körpertemperatur)

d.h. Abstand zwischen den Fundamentalpunkten=180 Fahrenheit-Grade

Réaumur

Wie Celsius, aber Siedepunkt ist 80°R

Rene-Antoine Ferchault de Réaumur (1683-1757; F)

Umrechungen

Celsius-Kelvin: T(°C)=T(K)-273,15; T(K)=T(°C)+273,15

Celsius-Fahrenheit: T(°C)=(T(°F)-32)/1,8 T(°F)=1,8\*T(°C)+32

Beispiele: Celsius-Kelvin

TC=20°C  TK=293,15K TC=100°C  TK=373,15K

TK=77,15K  TC=-196°C TK=933,15K  TC=660°C (TM-Al)

Celsius-Fahrenheit

TC=20°C  TF=68°F TC=80°C  TF=176°F

TF=0°F  TC=-17,8°C TF=-22°F  TC=-30°C

Einige ausgewählte Temperaturwerte

T=0K Absoluter Nullpunkt

T=0,1nK Tiefste erreichte Temperatur (2012)

T=4K Siedepunkt von He

T=77K Siedepunkt von N2 (LN2)

T=-89°C Wostok (Antarktis 21.7.1983)

T=273,15K=0°C Eispunkt von Wasser

T=293,15K=20°C Raumtemperatur

T=58°C El Azizia (Lybien 13.9.1922)

T=373,15K=100°C Siedepunkt von Wasser

T=1800K Schmelzpunkt von Eisen

T=3680K Schmelzpunkt von Wolfram

T=5830K Siedepunkt von Wolfram

T=6000K Temperatur auf der Sonnenoberfläche

T=15MK Temperatur in Sonneninneren

T=GK Temperatur in den heißesten Sternen

**6.4. Messung der Temperatur**

Prinzipiell kann jede Änderung einer physikalischen Größe (siehe Einleitung) mit der Temperatur für ein Temperaturmessverfahren verwendet werden.

Flüssigkeitsthermometer

Zur Messung dienen ein Vorratsgefäß und eine Kapillare (Thermometerrohr) mit einer Skala, die an den Fundamentalpunkten geeicht und dann unterteilt wird *(Zeichnung).*

*Quecksilber:* -30 bis +200°C (Schmelzpunkt: -39°C, mit Gasfüllung u. Spezialglas bis 750°C)

*Alkohol:* -110 bis +50°C

*Pentan:* bis -190°C

Bimetallthermometer

Zwei Metalle mit unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten (z.B. Eisen und Messing) werden miteinander verschweißt *(Zeichnung).* Bei Temperaturänderungen dehnen sich die Materialien unterschiedlich stark aus, wodurch sich die Krümmung des Bi-Metallstreifens ändert. Anwendungen: Thermostate in Bügeleisen, Heizkörpern. Kann gleich als Schalter verwendet werden (z.B. Leitungsschutz-Schalter)

Widerstandsthermometer

Der elektrische Widerstand von Metallen steigt mit steigender Temperatur an (ca. 0,4%/°C) und wird über Widerstandsbrückenschaltungen (oft mit OPV) gemessen. Oft wird Platin verwendet, weil chemisch inert und der T-Koeffizient genau bekannt ist. Kleine Baugrößen sind möglich, daher sehr schnelles Ansprechverhalten.

Thermoelemente

Bestehen aus einer Serienschaltung von zwei unterschiedlichen Metallen *(Zeichnung).* Befinden sich die zwei Schweißstellen auf versch. Temperatur, so entsteht die sog. Thermospannung (µV bzw. mV-Bereich). Eine Stelle muss als Referenz bekannt sein (Raumtemperatur oder Eispunkt).

Strahlungsmessgeräte

Speziell für die Messung hoher Temperaturen (z.B. Schmelzen) werden oft Strahlungsmessgeräte (Infrarot) verwendet („Thermografie“), weil berührungslos. Früher wurden sog. „Seger-Kegel“ verwendet.

Halbleitermessgeräte

Halbleiterelement (z.B. Si-Dioden) zeigen eine ausgeprägte Temperaturabhängigkeit, die zur Messung verwendet wird (KTY10).

**6.5. Wärmeausdehnung fester und flüssiger Körper**

Längenausdehnung (feste Körper)

Erwärmt man einen Stab, so erfährt dieser (in der Regel) einen Längenzuwachs, dessen Betrag je nach Material verschieden ist (Materialkonstante, Materialeigenschaft). So dehnt sich z.b. Aluminium ca. 2x so stark aus wie Eisen. Ist die Temperaturänderung T nicht zu groß, so ist die Längenänderung l proportional zur ursprünglichen Länge l0 und zu T:

*l = l0T*

Die Gesamtlänge lT eines Stabes bei einer Temperaturänderung von T

*lT = l0 + l = l0 + l0T = l0(1 + T)*

* = l/(l0T)*  []=K-1

Längenausdehnungskoeffizienten  im Bereich von 0 bis 100°C

|  |  |
| --- | --- |
| **Material** | ** [10-6K-1]** |
| Zink | 30 |
| Aluminum | 23,9 |
| Eisen, Stahl | 9,5...12 |
| Stahlbeton | 14 |
| Platin | 9,1 |
| Glas | 5-10 |
| Invar (Ni-Stahl) | 0,9 |
| Quarz | 0,5 |
| Zerodur (Ceran) | 0,1 |

Beispiel: Eisenbahnschiene (Stahl) l0=20m, =10.10-6 K-1, T=60K (-20 bis +40°C)

lT=20(1+60.10-5)=20(1+0,0006)=20,012m  l=12mm

Praktische Anwendungen:

Aufschrumpfen von Bauteilen im Maschinenbau, Rollenlager und Dehnungsfuge bei Brücken *(Zeichnung),* Schwindmaß beim Gießen von Formteilen, Längenmaße gelten nur bei einer best. Temperatur, Metalldurchführungen durch Glas (Glühlampe) u.a.

Volumsausdehnung (feste und flüssige Körper)

Unter der Volumsausdehnungszahl VVT versteht man die relative Volumsänderung bei einer Temperaturänderung von 1K. Es gilt:

**

VT=l0(1+T) b0(1+T) h0(1+T)= l0b0h0(1+T)3= l0b0h0(1+3T+3T2T3)

VT= l0b0h0(1+3T)=V0(1+T)

Wichtige Ausnahme: Anomalie des Wassers (größte Dichte bei +4°C; Zufrieren von Gewässern: Wichtig für biologische Vorgänge in der Natur); *(Zeichnung)*

Volumsausdehnungszahl  von Flüssigkeiten (p=1bar)

|  |  |
| --- | --- |
| **Flüssigkeit** | ** [10-3K-1]** |
| Alkohol | 1,12 |
| Benzin | 1,05 |
| Quecksilber | 0,182 |
| Wasser 20°C | 0,21 |
| Wasser 50°C | 0,46 |

Beispiel: Auto-Benzintank mit 50Liter wird bei 20°C versehentlich voll gefüllt. Wie viel Benzin rinnt nach Erwärmung in der Sonne auf 40°C aus?

VT=V0(1+T)=50(1+20.1,05.10-3)=50(1+0,02)=51Liter  1Liter

**6.6 Spezifische Wärme**

Soll ein Körper erwärmt oder abgekühlt werden, so muss ihm Energie zugeführt werden. Q ist prop. zu T und prop. zur Masse (= Anzahl der Moleküle = Bewegungszustand! Translation und Rotationsenergie) und hängt vom Material ab

*Q = cp m T*

Q...Wärme(energie) [J]

cp...Spezifische Wärme [kJkg-1K-1]

m...Masse [kg]

T...Temperatur [K]

Die spezifische Wärme ist eine Materialeigenschaft. Sie gibt an, welche Energie (Wärme) notwendig ist, um 1kg dieses Stoffes bei konstantem Druck um 1K zu erwärmen.

Gilt für T<! Werte für cp siehe Kopie!

Rechenbeispiele:

* Wie viel Energie ist nötig, um 1kg (1l) Wasser um 1K zu erwärmen?

Q = cpmT = 4,18.1.1 = 4,2kJ

* Nudeln für Spaghetti: 6l Wasser von 10°c auf 100°C zu erwärmen?

Q = cpmT = 4,18.6.90 = 2257kJ = 2,3MJ

* Wie hoch könnte man mit der Energie, mit der man 1Liter Wasser um 1K erwärmt, dieses Wasser hochheben?

Wpot = mgh = Q  h= Q/mg = 4200/1.9,81 = 427m (!!!)

* Auf welche Geschwindigkeit könnte man damit 1kg Wasser beschleunigen?

Wkin = mv2/2 = Q  v= SQRT(2Q/m) = 91,5m/s = 329 km/h (!!!)

* Nudelwasser:

v= SQRT(2Q/m) = 867m/s = 3122 km/h (!!!)

Die Energien, um Stoffe zu erwärmen, sind enorm. Diese „inneren Energien“ werden im täglichen Leben gegenüber den „äußeren“ Energien (Wpot, Wkin) oft weit unterschätzt.

Zum Erwärmen (Heizung im Haus!) ist sehr viel Energie erforderlich  ENERGIESPAREN!

Auswirkungen und Anwendungen aufgrund der Tatsache, dass Wasser eine sehr hohe spezifische Wärme hat:

1. Verwendung als Kühlmedium

(nur manche Gase sind besser; z.B. H2, aber großes Volumen und brennbar)

1. Klimatische Auswirkungen

(Das Festland hat nur ca. 1/5 der spezifischen Wärme von Wasser, Meere=Temp/Energiespeicher/Wärmepuffer; Golfstrom 100Mio.m3, 9km/h transportiert enorme Energiemengen; sonst wären England und Skandinavien im Winter vollständig vereist!)

1. Eis ist leichter zu erwärmen als Wasser (2x)

Weitere Rechenbeispiele:

* Heißwasserspeicher soll 100Liter Wasser in 3h von 10 auf 60°C erwärmen. Welche Leistung ist dazu notwendig?

W = Q = cpmT = 4,2.100.50 = 21MJ  P = W/t = 21.106/10800 = 1944W ca. 2kW

* In welcher Zeit erwärmt ein Tauchsieder mit einer Leistung von 500W ein Liter Wasser von 10 auf 100°C?

Q = cpmT = 4,2.1.90 = 756s = 13 min

 Keine elektrischen Durchlauferhitzer verwenden, sondern nur mit Gas!

**6.7. Wärmequellen**

Wichtigste Wärmequelle ist die Sonne. Permanent trifft ca. 1,34kW pro m2 auf die äußere Atmosphäre (ca. 1kW am Boden!)  Solarkonstante. Nahezu alle Energie (speziell Erdöl und Erdgas) kommt letztlich aus Sonnenenergie (Pflanzen, Tiere, Absterben, Sedimentation usw.). Weitere Quellen sind Kernspaltung und Kernfusion.

Die bei der vollständigen Verbrennung von 1kg eines Brennstoffes frei werdende Wärmeenergie nennt man Heizwert.

Die Heizwerte für flüssige und feste Brennstoffe liegen bei ca. 5-50MJ pro kg:

|  |  |
| --- | --- |
| **Material** | **Heizwert** |
| Holz | 7 MJ/kg |
| Holzpellets | 18 MJ/kg |
| Braunkohle | 20 MJ/kg |
| Steinkohle | 28 MJ/kg |
| Benzin | 41 MJ/Liter |
| Diesel | 43 MJ/Liter |
| Erdgas | 38 MJ/kg |
| Methan | 50 MJ/kg |
| Wasserstoff | 120 MJ/kg |

Die Kernspaltung von 1kg Uran liefert aber 100TJ (1014J)!  3 Mio. mal mehr!

Kernfusion (Verschmelzung) von 1kg Wasserstoff liefert 1PJ (1015J)!  30 Mio. mal mehr!

Aber Problematik der Kernenergie!

Beispiele:

* Wie viel Energie liefert die Sonne in einer Sekunde an die Erde?

Oberfl. einer Kugel O=4r2 (r=6370km) Halbkugel

O=2(6,37.106)2=2,55.1014m2  3,44.1017Ws = 3,44.1017J

(entspricht ca. 300kg Wasserstoff bei Kernfusion; ges. einige hundert Mio. t pro s!!)

* Wie viel Benzin braucht man, um ein Auto mit 1000kg von 0 auf 100km/h

zu beschleunigen? Wirkungsgrad = 25%.

Wkin = mv2/2 = 1000 = 385kJ HW=43MJ/kg  0,036kg=36g

* Wie viel Liter Wasser kann man mit 1m3 Erdgas von 20 auf 100°C erwärmen?

Q = cmT = 4,2.1.80 = 336kJ pro Liter

HW = 40MJ/m3  120 Liter

**6.8. Hauptsätze der Wärmelehre**

1. HS

In einem abgeschlossenen System ist die Gesamtenergie konstant.

*Q=U+W*

Wärme ist eine Energieform (erst seit ca. 1850 bekannt). Energie kann nicht verloren gehen und auch nicht erzeugt werden. Energieformen können nur ineinander umgewandelt werden. (z.B.: „Reibungsverluste“, „Wärmeverluste“ beim Heizen von Gebäuden)

Die innere Energie eines Körpers kann durch Zufuhr von Energie erhöht werden.

Q=Wärmemenge (Wärmeenergie, molekulare Bewegungsenergie)

U=Innere Energie (gesamte in einem Körper gespeicherte kinetische und potentielle Energie)

W=Abgegebene äußere Arbeit

1. HS

Wärme fließt von selbst immer nur von einem Körper mit höherer Temperatur zu einem Körper mit niedrigerer Temperatur.

 kein Perpetuum Mobile möglich!

Die Entropie S nimmt in einem abgeschlossenem System immer zu (S>=0).

Die Entropie ist ein Maß für den Grad der Unordnung (Zufälligkeit) eines Systems.

*S=Q/T*

(*Zeichnung* mit Zuständen von 2 Teilchen => N Teilchen 2-N Wahrscheinlichkeit)

Von selbst ablaufende Vorgänge sind irreversible Vorgänge (nicht umkehrbar; Zumindest sehr unwahrscheinlich; Einige Milliarden mal Lebensdauer des Universums reicht nicht aus, damit eintritt; kann aber im nächsten Moment auftreten)

1. HS

Der absolute Nullpunkt kann nur asymptotisch erreicht werden

**6.9. Wärmetransport**

Wärme kann von selbst nur von höherer zu tieferer Temperatur fließen. Damit wird aber jeder Temperaturunterschied stets zur Ursache eines Wärmetransportes. Die drei grundlegenden Mechanismen des Wärmetransportes sind Wärmeleitung, Wärmeströmung („Konvektion“) und Wärmestrahlung.

6.9.1. Wärmeströmung

Dabei erfolgt ein Materietransport (geht daher im Vakuum nicht!) in Form einer Strömung, die von selbst (Temp.- oder Dichteunterschied) oder durch Energiezufuhr (zB. Pumpe) erzeugt wird.

Die übertragende Wärmemenge ist der Temperaturdifferenz proportional. Eine genaue Beschreibung ist kompliziert.

Beispiele: Heizkörper, Luft- und Meeresströmungen (Golfstrom!)

6.9.2. Wärmestrahlung

Hier erfolgt die Energieübertragung durch elektromagnetische Wellen und ist daher nicht an das Vorhandensein eines Mediums gebunden und erfolgt damit im Vakuum am besten (ohne Verluste). Dies kann auch über große Entfernungen (z.B. Erde-Sonne) geschehen.

*AT4* mit =5,67.10-8 Wm-2K-4

Da die Abstrahlung mit T4 ansteigt, wird bei hohen Temperaturen wesentlich mehr Energie durch Strahlung als durch die anderen Transportmechanismen abgegeben.

Beispiele:

1. Um wie viel Leistung strahlt ein Heizkörper mit 60°C bzw. 80°C und einer Fläche von 4m2 mehr ab als ein Mensch (A ca. 2m2; =1 für beide angenommen)?

H=5,67.10-8.4.(273+60)4=2,8kW

H=5,67.10-8.4.(273+80)4=3,5kW

=5,67.10-8.2.(273+34)4=1007W

=5,67.10-8.2.(273+25)4=894W

=1007-894=113W

2. Ein Quarzstrahler gibt bei 700°C 800W an Strahlungsleistung ab. Wie viel würde er bei 800°C abgeben?

=800\*((800+273)/(700+273))^4=1183W

1. Wie viel Leistung strahlt Eis bei 0°C pro m2 ab (=0,6) ?

=5,67.10-8.0,6.(273)4=188W (wenn rundum T=0K!)

=5,67.10-8.0,6.((273)4 - (263)4)=26W (wenn rundum T=-10°C)

6.9.3. Wärmeleitung

Hier erfolgt die Energieübertragung durch gegenseitige Beeinflussung (durch Stöße) unmittelbar benachbarter Atome/Moleküle. Die Materialabhängigkeit wird durch die Wärmeleitfähigkeit  beschrieben. Je größer der Querschnitt A und die Temperaturdifferenz T bzw. je kleiner die Distanz d ist:

*L=AT/d*

|  |  |
| --- | --- |
| **Material** | ** [Wm-1K-1]** |
| Zink | 110 |
| Aluminum | 209 |
| Eisen, Stahl | 74 |
| Platin | 70 |
| Quarz-Glas | 1,4 |
| Invar (Ni-Stahl) | 11 |
| Holz | 0,17 |
| Glaswolle u.ä. | <0,04 |

6.9.4. Wärmeübergang

Ein Spezialfall der Wärmeleitung ist der Wärmeübergang von einer festen Oberfläche auf einen angrenzenden flüssigen oder gasförmigen Stoff. Kleinräumige Strömungen (ca. 1mm) sorgen für einen Temperaturausgleich, wobei aber immer ein Temperatursprung bleibt (*Zeichnung).* Beschreibung durch erfolgt durch die Wärmeübergangszahl .

*=AT*

Beispiel: Wieviel Leistung geht durch eine Glasscheibe mit A=0,8m2 bei einem Temperatursprung von 16K und =8Wm-2K-1? (keine Strahlung berücksichtigt!)

=8.0,8.16=102,4W

 liegt zwischen wenigen Wm-2K-1 für ruhende Gase bis zu etlichen tausend Wm-2K-1 für strömende Flüssigkeiten.

6.9.5. Wärmedurchgang

Als Wärmedurchgang bezeichnet man den Wärmetransport durch eine feste Wand. Dabei spielen zweimal ein Wärmeübergang und die Wärmeleitung eine Rolle. Beschreibung erfolgt durch die Wärmedurchgangszahl k.

*=kAT*

*(Zeichnung, Analogie zur Serienschaltung von Widerständen und Leitwerten)*

*1/k = 1/i + d/ + 1/a*

Beispiel:

1. Wie viel Energie geht pro Tag durch die Wände (A=250m2) eines Hauses bei Ti=20°C und Ta=-10°C (Ziegelmauer k=1,5Wm-2K-1)

 = k.A.T = 1,5.250.(20-(-10)) = 11,25kW

W = F.t = 11,25.3600.24 = 972MJ

2. Wie hoch könnte man das gesamte Haus damit heben?

V = A.d = 250.0,4 = 100m3  m =V. = 100.2000 = 2.105 kg

W = m.g.h  h = W/m.g = 495m

6.9.6. Wärmedämmung

Sehr wichtig speziell im persönlichen Bereich hinsichtlich Energiesparen, Umweltverschmutzung und Treibhauseffekt. Der „Energieverlust“ also das nutzlose Abfließen von Energie aus einem Gebäude ins Freie sollte durch entsprechende wärmedämmende Maßnahmen möglichst gering gehalten werden. Damit können Heizkosten gesenkt werden und alle damit verbundenen schädlichen Auswirkungen auf die Umwelt vermieden werden.

*1/k = 1/i + d/ + 1/a*

d.h. k sollte möglichst klein sein:  ebenfalls klein und d groß!!

**Maßnahmen**

1. Dicke Wände d>>
2. Geringe Wärmeleitfähigkeit  << (Holz, Ziegel aber nicht Metalle, Beton)
3. Gase isolieren gut  Hohlwände, Hohlziegel, Doppel- & Mehrfachscheiben, Geschäumte Stoffe, Glaswolle (Zwischenräumen dürfen aber weder zu klein, weil sonst Wärmeleitung auftritt, oder zu groß sein, weil sonst Konvektionsströmungen auftreten)
4. Mittlerer Raumtemperatur senken (Nachtabsenkung!). Pro °C ca. 5-10% Ersparnis!!
5. Strahlungsheizung (Subjektives Wärmeempfinden: T4 Strahlungsaustausch!)

**6.10. Kinetische Gastheorie**

Die kinetische Gastheorie erklärt das Verhalten der Gase durch die Bewegung der Atome und Moleküle, aus denen ein Gas besteht. Sie bietet die Erklärung für die Gasgesetze und ein mikroskopisches Modell für die Begriffe „Wärme“ und „Temperatur“.

6.10.1. Das ideale Gas

Das „ideale Gas“ ist ein stark vereinfachtes Modell des realen Gases. Dennoch lässt sich sehr gut damit arbeiten.

Folgende Annahmen kennzeichnen ein „ideales Gas“:

Die Teilchen sind klein im Vergleich zu ihrem mittleren Abstand.

Die Wechselwirkung zwischen den Teilchen erfolgt nur durch elastische Stöße.

Die Wechselwirkung zwischen den Teilchen und den Gefäßwänden erfolgt nur durch elastische Stöße.

Der Druck eines idealen Gases beträgt:

*N*…Anzahl der Teilchen

*V*…Volumen

…Mittlere kinetische Energie der Teilchen

Die **Zustandsgleichung** des idealen Gases lautet:

Mit der sog. Boltzmann-Konstante k=1,38.10-23 J/K

Daraus folgt das Gesetz von Avogadro:

„Ein Mol (=6,022.1023 Teilchen) eines idealen Gases nimmt bei Normaldruck p=1013hPa und T=0°C ein Volumen von 22,4dm3 ein!“

6.10.2. Gasgesetze

Der Zustand eines idealen Gases ist bei fest vorgegebener Stoffmenge von Druck, Volumen und Temperatur bestimmt. Daher bezeichnet man diese Größen als Zustandsgrößen.

Beim Gesetz von **Boyle-Mariotte** gilt: T=konstant & N=konstant!

è p und V sind zueinander indirekt proportional bzw. p.V=konst.

Beim Gesetz von **Gay-Lussac** gilt: p=konstant & N=konstant!

è T und V sind zueinander direkt proportional bzw. V/T=konst.

Beim Gesetz von **Amontons** gilt: V=konstant & N=konstant!

è T und p sind zueinander direkt proportional bzw. p/T=konst.