



Edme Mariotte (* um 1620 wahrscheinlich in Dijon; † 12. Mai 1684 in Paris) war ein französischer Physiker.

Mariotte war zunächst katholischer Geistlicher in Dijon, wo er als Prior von St. Martin sous-Beaume wirkte. Seit der Gründung der Akademie der Wissenschaften 1666 lebte er in Paris und arbeitete zu Problemen der Flüssigkeiten und Gase. Mit seinem Namen sind das Boyle-Mariotte-Gesetz und die Mariottesche Flasche verbunden. Mariotte gilt auch als Erfinder des Kugelstoßpendels.



Blaise Pascal wurde am 19. Juni 1623 in Clermont als Sohn eines königlichen Rates geboren.

Blaise wurde von seinem Vater Etienne unterrichtet, wobei das Schwergewicht auf der sprachlichen Ausbildung lag. Bücher mit mathematischem Inhalt wurden nicht benutzt, ja sogar versteckt, obwohl sicher der Vater gerade auf diesem Gebiet durch die Entdeckung gewisser Kurven 4. Ordnung (Pascalsche Schnecken) einen Namen gemacht hatte.



Anders Celsius (* 7. Dezember 1701 in Uppsala; † 6. Mai 1744; julianischer Kalender) war ein schwedischer Astronom, Mathematiker und Physiker.



Daniel Gabriel Fahrenheit (* 24. Mai 1686 in Danzig; † 16. September 1736 in Den Haag) war ein deutscher Physiker und Erfinder von Messinstrumenten. Nach ihm wurde die Temperatureinheit „Grad Fahrenheit“ °F benannt.



Thomson Sir (seit 1866) **William**, seit 1892 **Lord Kelvin** of Largs, britischer Physiker, *26.6.1824 Belfast (Irland), + 17.12.1907 Nethergall (bei Largs, Schottland), in der Westminsterabtei neben I.Newton beigesetzt. Er war von 1846-99 Professor der Naturphilosophie und theoretischen Physik in Glasgow und gründete das erste britische Laboratorium für Physik. Kelvin war ein herausragender, ungewöhnlich vielseitiger Physiker. Er gilt als einer der Begründer der klassischen Thermodynamik. Er definierte den Begriff der absoluten Temperatur und des Wärmetods, stellte 1848 (vom Wirkungsgrad des Carnot-Prozesses ausgehend) die thermodynamische Temperaturskala (Kelvin-Temperaturskala mit der Temperatureinheit Kelvin) auf.



Joseph Louis Gay-Lussac (* 6. Dezember 1778 in Saint-Léonard-de-Noblat; † 9. Mai 1850 in Paris) war ein französischer Chemiker und Physiker. Er ist wegen seiner beiden Gasgesetze bis heute international bekannt



Robert Boyle (* 25. Januar 1626/ 4. Februar 1627 in [Lismore](#), Grafschaft [Waterford](#), Irland; † 31. Dezember 1691/ 10. Januar 1692 in London) war ein irischer Naturforscher. Er war Mitbegründer des modernen Elementbegriffs, der modernen Physik und Chemie, sowie der auf detailliert veröffentlichten Experimenten beruhenden Naturwissenschaften allgemein. Er entdeckte den nach ihm benannten Zusammenhang zwischen Druck und Volumen eines Gases



Uwe Rath

Eckleinjarten 13a . 27580 Bremerhaven

☎ 0471 34126 ✉ rath-u@t-online.de

Sonderfälle der Zustandsänderungen (Wärmeenergie, Arbeit, p-V-Diagramm)			
Bezeichnung:	isobare	isochore	isotherme
	Zustandsänderung		
Wärmeenergie:	$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T$	$Q = m \cdot c_v \cdot \Delta T$	$Q = -W$
Arbeit:	$W = -p \cdot \Delta V$ $= -m \cdot R \cdot \Delta T$	$W = 0$	$W = m \cdot R \cdot T \cdot \ln \frac{V_1}{V_2}$ $= m \cdot R \cdot T \cdot \ln \frac{p_2}{p_1}$ $= p_1 \cdot V_1 \cdot \ln \frac{V_1}{V_2}$ $= p_1 \cdot V_1 \cdot \ln \frac{p_2}{p_1}$ $= p_2 \cdot V_2 \cdot \ln \frac{V_1}{V_2}$ $= p_2 \cdot V_2 \cdot \ln \frac{p_2}{p_1}$
p - V - Diagramm:			

In der Zustandsgleichung 1. Form ist der Ausdruck $p \cdot V / T$ proportional der Masse des eingeschlossenen Gases, also $\frac{p \cdot V}{T} \sim m$. Den Proportionalitätsfaktor bezeichnet man

als **(spezifische) Gaskonstante R** , deren Zahlenwert vom Gas abhängt. Nach Umstellung ergibt sich als

Zustandsgleichung (2. Form)

$\frac{p \cdot V}{T} = m \cdot R$ $p \cdot V = m \cdot R \cdot T$	SI	<table style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <td style="border-top: 1px solid black; border-bottom: 1px solid black;">p</td> <td style="border-top: 1px solid black; border-bottom: 1px solid black;">V</td> <td style="border-top: 1px solid black; border-bottom: 1px solid black;">m</td> <td style="border-top: 1px solid black; border-bottom: 1px solid black;">R</td> <td style="border-top: 1px solid black; border-bottom: 1px solid black;">T</td> </tr> <tr> <td style="border-right: 1px solid black; padding: 5px;">Pa</td> <td style="padding: 5px;">m³</td> <td style="padding: 5px;">kg</td> <td style="padding: 5px;">$\frac{J}{kg \cdot K}$</td> <td style="padding: 5px;">K</td> </tr> </table>	p	V	m	R	T	Pa	m ³	kg	$\frac{J}{kg \cdot K}$	K
p	V	m	R	T								
Pa	m ³	kg	$\frac{J}{kg \cdot K}$	K								

Beachte:

- Die beiden Zustandsgleichungen (Form 1 und Form 2) sind zwei verschiedene Formen der Zustandsgleichung der Gase. Welche man anwendet, ergibt sich aus der jeweiligen Aufgabenstellung.
- Zahlenwerte für die Gaskonstante R sind in Tabellen (s. u.) aufgeführt. Die spezielle Gaskonstante ist die von 1 kg des speziellen Gases bei der Erwärmung um 1 K bei konstantem Druck geleistete Arbeit.
- Für p ist der absolute Druck einzusetzen.
- Beide Seiten der Zustandsgleichungen haben die Dimension einer Arbeit.

Gaskonstante R / $\frac{J}{kg \cdot K}$			
Ammoniak	481	Luft	287
Argon	208	Methan	518
Butan	137	Methylechlorid	161
Chlor	115	Neon	412
Chlorwasserstoff	226	Ozon	173
Distickstoffmonoxid	188	Phosgen	82
Ethan	273	Propan	185
Ethen	294	Propylen (Propen)	194
Ethin	316	Sauerstoff	260
Frigen 12	67	Schwefeldioxid	127
22	96	Schwefelwasserstoff	241
Helium	2078	Stickstoff	297
Kohlendioxid	188	Stickstoffoxid	277
Kohlenmonoxid	297	Wasserstoff	4127
Krypton	99	Xenon	63

13.4 Zustandsgleichung des idealen Gases

Für alle Gase gilt, dass das Gasvolumen druck- und temperaturabhängig ist.

Wenn

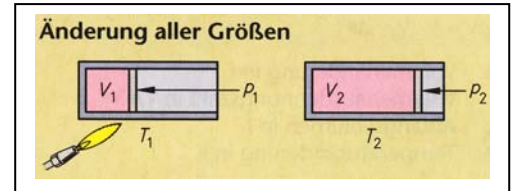
p_1, T_1, V_1 Druck, Temperatur und Volumen am Anfang (Zustand 1),

p_2, T_2, V_2 Druck, Temperatur und Volumen am Ende (Zustand 2),

dann gilt

Zustandsgleichung (1. Form)

$$\frac{p_2 \cdot V_2}{T_2} = \frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} \quad \text{oder} \quad \frac{p \cdot V}{T} = \text{konstant}$$



Bei einer bestimmten Masse eines Gases ist das Produkt aus Druck und Volumen, dividiert durch die absolute Temperatur, konstant.

Beachte:

- Für p ist der absolute Druck einzusetzen.
- Die Zustandsgleichung gilt exakt nur für das ideale Gas, für die realen Gase mit guter Näherung, nicht aber für Dämpfe.
- Die Zustandsgleichung beinhaltet drei Sonderfälle – siehe Übersicht:

Übersicht:

Sonderfälle der Zustandsgleichung			
Bezeichnung:	isobare	isochore	isotherme
	Zustandsänderung		
Bedingung:	$p = \text{konstant}$		$T = \text{konstant}$
	<p style="text-align: center;">$V = \text{konstant}$</p>		
Formel:	$\frac{p_2 \cdot V_2}{T_2} = \frac{p_1 \cdot V_1}{T_1}$ $\frac{V_2}{T_2} = \frac{V_1}{T_1}$ $\frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1}$	$\frac{p_2 \cdot V_2}{T_2} = \frac{p_1 \cdot V_1}{T_1}$ $\frac{p_2}{T_2} = \frac{p_1}{T_1}$ $\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1}$	$\frac{p_2 \cdot V_2}{T_2} = \frac{p_1 \cdot V_1}{T_1}$ $p_2 \cdot V_2 = p_1 \cdot V_1$ $\frac{p_2}{p_1} = \frac{V_1}{V_2}$
Gesetz:	GAY-LUSSAC		BOYLE-MARIOTTE

13.3 Ausdehnung der Gase

Auch Gase haben das Bestreben, sich bei einer Temperaturerhöhung auszudehnen. Allerdings lässt sich hier ein kubischer Ausdehnungskoeffizient entsprechend dem γ der Formeln für Flüssigkeiten lediglich für eine bestimmte Ausgangstemperatur definieren. Für ein **ideales Gas**² bei einer Ausgangstemperatur von 0 °C ist

$$\gamma = \frac{1}{273,15 \text{ K}} = 0,003661 \text{ K}^{-1} = \frac{1}{T_0}$$

Beachte:

- γ bezieht sich auf das Volumen bei 0 °C und den Normdruck von $p_n = 101,325 \text{ kPa} = 1013,25 \text{ hPa}$ (Normzustand für Gase).

Wenn

- V_t Gasvolumen bei beliebiger Temperatur t ,
- V_0 Gasvolumen bei 0 °C und p_n ,
- t Temperatur, bei der das Gas das Volumen V_t besitzt,
- γ Volumenausdehnungskoeffizient,

dann gilt

$$V_t = V_0 (1 + \gamma \Delta t)$$

	γ	Δt
SI	$\frac{1}{K}$	°C; K

Beachte:

- Der Volumenausdehnungskoeffizient des idealen Gases kann auch für Edelgase, Wasserstoff und Sauerstoff verwendet werden. Bei anderen Gasen ergeben sich Abweichungen.
- **Die Anwendung dieses Gesetzes setzt voraus, dass bei einer Temperaturänderung der Gasdruck konstant bleibt.**

²Als **ideales Gas** bezeichnet man in der Physik und Physikalischen Chemie eine bestimmte idealisierte Modellvorstellung eines Gases. Obwohl es eine starke Vereinfachung darstellt, lassen sich mit diesem Modell bereits viele thermodynamische Prozesse von Gasen verstehen und mathematisch beschreiben.

Im Modell des idealen Gases werden alle Gasteilchen als ausdehnungslose Massepunkte angenommen, welche sich frei durch das ihnen zur Verfügung stehende Volumen bewegen können. Mit *frei* ist gemeint, dass die Teilchen keinerlei Kräfte verspüren. Allerdings dürfen (und müssen) sich die Teilchen untereinander und an der Wand des Volumens stoßen. Ein Gasteilchen bewegt sich also geradlinig mit einer konstanten Geschwindigkeit, bis ein Stoß (ein elastischer) es in eine andere Richtung lenken und dabei beschleunigen oder abbremsen kann.

13.2 Ausdehnung von Flüssigkeiten

Flüssigkeiten können nur in Gefäßen, d.h. als Volumen, aufbewahrt werden. Deshalb gibt es nur eine Berechnungsformel für die Volumenänderung.

In den für die Volumenänderung fester Stoffe hergeleiteten Formeln wird das Produkt 3α durch das Formelzeichen γ (Volumenausdehnungskoeffizient) ersetzt.

Wenn

- V_1 Anfangsvolumen des Körpers,
- V_2 Endvolumen des Körpers,
- ΔV Volumenänderung = $V_2 - V_1$,
- Δt Temperaturdifferenz = $t_2 - t_1$,
- γ Volumenausdehnungskoeffizient,

dann gilt

$$\Delta V = V_1 \gamma \Delta t$$

$$\text{SI} \left[\begin{array}{l} \gamma \quad \Delta t \\ \hline \frac{1}{K} \quad \text{°C; K} \end{array} \right.$$

und wegen $V_2 = V_1 + \Delta V = V_1 + V_1 \gamma \Delta t$

$$V_2 = V_1 (1 + \gamma \Delta t)$$

Beachte:

- Der Volumenausdehnungskoeffizient γ ist gering temperaturabhängig. Im Bereich von 0 °C bis 40 °C gelten die Tabellenwerte mit genügender Genauigkeit.
- Bei Abkühlung ist Δt negativ.
- **Wasser bildet eine Ausnahme. Sein Volumenausdehnungskoeffizient ist stark veränderlich, im Bereich von 0 °C bis 4 °C sogar negativ. (Anomalie des Wassers)¹**

¹ Wasser hat unter Normaldruck seine größte Dichte von 1000 Kilogramm pro Kubikmeter bei 3,98 C und zeigt damit eine Dichteanomalie. Diese besteht darin, dass sich Wasser unterhalb von 3,98 C bei weiterer Temperaturverringerng, auch beim Wechsel zum festen Aggregatzustand, wieder ausdehnt, was man nur von wenigen Stoffen kennt. Die derzeit genauesten publizierten Werte liegen für die maximale Dichte bei $(999,974950 \pm 0,00084)$ kg/m³ und bei $(3,983 \pm 0,00067)$ C für die Temperatur, bei der dieser Wert erreicht wird. Die Werte stellen einen Mittelwert der von verschiedenen physikalischen Instituten veröffentlichten Zahlen dar (Stand 2001).

13.2.3 Volumenänderung durch Erwärmung

Sie lässt sich für die Berechnung als eine Längenänderung in drei Dimensionen deuten.

Wenn

V_1 Anfangsvolumen des Körpers,

V_2 Endvolumen des Körpers,

ΔV Volumenänderung = $V_2 - V_1$,

Δt Temperaturdifferenz = $t_2 - t_1$,

α Längenausdehnungskoeffizient,

dann gilt

$$\begin{aligned} \Delta V &= V_2 - V_1 \\ &= l_2^3 - l_1^3 \\ &= l_1^3 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t)^3 - l_1^3 \\ &= l_1^3 \cdot \left[1 + 3 \cdot \alpha \cdot \Delta t + 3 \cdot \alpha^2 \cdot (\Delta t)^2 + \alpha^3 \cdot (\Delta t)^3 \right] - l_1^3 \end{aligned}$$

Wegen der Kleinheit des Zahlenwertes von α können die Glieder 2. und 3. Grades vernachlässigt werden. Dann ergibt sich

$$\Delta V = V_1 3\alpha \Delta t$$

	α	Δt
SI	$\frac{1}{K}$	$^{\circ}\text{C}; K$

und wegen $V_2 = V_1 + \Delta V = V_1 + V_1 3\alpha \Delta t$

$$V_2 = V_1 (1 + 3\alpha \Delta t)$$

Beachte:

- Die mit der Volumenänderung verbundene Dichteänderung kann berechnet werden:

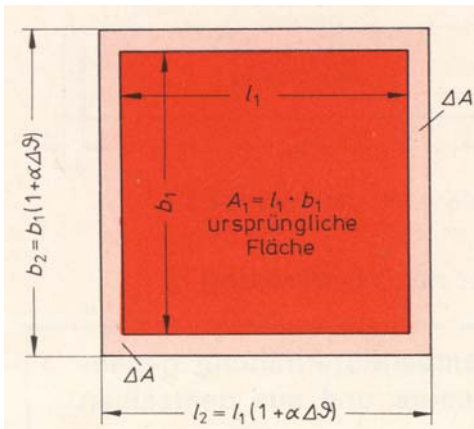
$$m = V_1 \cdot \rho_1$$

$$m = V_2 \cdot \rho_2$$

$$\rho_2 = \frac{V_1 \cdot \rho_1}{V_2} = \frac{V_1 \cdot \rho_1}{V_1 \cdot (1 + 3\alpha \Delta t)} = \frac{\rho_1}{1 + 3\alpha \Delta t}$$

- Bei Abkühlung ist Δt negativ.
- Die Ausdehnung von **Hohlräumen** erfolgt nach den gleichen Gesetzmäßigkeiten.

13.2.2 Flächenänderung durch Erwärmung



Bei der Temperatur t_1 ist die Fläche $A_1 = l_1 b_1$. Nach Erwärmung auf t_2 wird

$$\begin{aligned} A_2 &= l_2 \cdot b_2 \\ &= l_1 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t) \cdot b_1 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t) \\ &= l_1 \cdot b_1 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t)^2 \\ &= A_1 \cdot [1 + 2 \cdot \alpha \cdot \Delta t + \alpha^2 \cdot (\Delta t)^2] \end{aligned}$$

Wegen der Kleinheit des Zahlenwertes von α können die Glieder 2. Grades vernachlässigt werden. Dann ergibt sich

$$A_2 = A_1 \cdot (1 + 2 \cdot \alpha \cdot \Delta t)$$

Für die Flächenänderung durch Erwärmung ergibt sich damit

$$\begin{aligned} \Delta A &= A_2 - A_1 \\ &= A_1 \cdot (1 + 2 \cdot \alpha \cdot \Delta t) - A_1 \\ &= A_1 + A_1 \cdot 2 \cdot \alpha \cdot \Delta t - A_1 \\ &= A_1 \cdot 2 \alpha \cdot \Delta t \end{aligned}$$

Das Produkt 2α wird auch als Flächenausdehnungskoeffizient β definiert.

13.2 Ausdehnung fester Körper

Bei Erwärmung nimmt die Amplitude der schwingenden Moleküle zu, ihr gegenseitiger Abstand vergrößert sich, und der Körper erfüllt einen größeren Raum. Feste Körper dehnen sich bei Erwärmen nach allen Richtungen aus. Bei Stäben und Drähten wirkt sich die Ausdehnung vor allem in der Länge aus, die Ausdehnung senkrecht zur Länge kann in der Regel vernachlässigt werden.

13.2.1 Längenänderung durch Erwärmung

Wenn

l_1 Anfangslänge des Körpers (vor der Temperaturänderung),

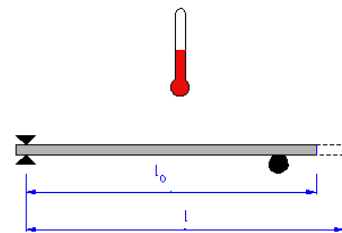
l_2 Endlänge des Körpers (nach der Temperaturänderung),

Δl Längenänderung = $l_2 - l_1$,

Δt Temperaturänderung = $t_2 - t_1$,

α Längenausdehnungskoeffizient (thermischer),

dann gilt in guter Näherung



$$\Delta l = l_1 \alpha \Delta t$$

$$\text{SI} \quad \left[\frac{\alpha \Delta t}{\frac{1}{K} \text{ } ^\circ\text{C}; \text{K}} \right]$$

und wegen $l_2 = l_1 + \Delta l = l_1 + l_1 \alpha \Delta t$

$$l_2 = l_1 (1 + \alpha \Delta t)$$

Der Längenausdehnungskoeffizient α ist der Quotient aus relativer Längenänderung $\Delta l/l_1$ und Temperaturänderung Δt :

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_1 \cdot \Delta t}$$

Beachte:

- Der Längenausdehnungskoeffizient α ist gering temperaturabhängig. Im Bereich von $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ bis $100 \text{ } ^\circ\text{C}$ gelten die Tabellenwerte mit genügender Genauigkeit.
- Bei Abkühlung ist Δt negativ.

13.1 Temperaturmessung

13.1.1 Temperaturskalen

Die Einheit der Temperatur ist im Internationalen Einheitensystem (SI) eine Basiseinheit.

SI-Einheit der Temperatur: [T] = Kelvin (K).

Daneben ist der Grad Celsius (°C) gesetzliche Einheit. In Großbritannien und Nordamerika ist ferner der Grad Fahrenheit gebräuchlich.

Zur Eichung dienen in allen Temperaturskalen international vereinbarte Fixpunkte (Festpunkte).

Übersicht:

Fixpunkt		°C	K	°F
Sauerstoff	Siedepunkt	-182,96	90,19	
Wasser	Erstarrungspunkt	0,00	273,15	32
Wasser	Siedepunkt	100,00	373,15	212
Schwefel	Siedepunkt	444,60	717,75	
Silber	Erstarrungspunkt	961,93	1235,08	
Gold	Erstarrungspunkt	1064,43	1337,58	

Die angegebenen Werte gelten für den Normdruck von $p_n = 101,325 \text{ kPa} = 1013,25 \text{ hPa}$.

- Die Kelvin Skala hat ihren Nullpunkt bei der tiefsten Temperatur, die theoretisch denkbar ist (absoluter Nullpunkt). Bei gleicher Gradgröße liegt der Nullpunkt der Celsius-Skala beim Erstarrungspunkt des Wassers. Tiefere Temperaturen sind negativ, Kelvin- und Celsius-Skala sind demnach lediglich gegeneinander versetzbar.

Wenn

T Temperatur in Kelvin (K), absolute Temperatur,

t Temperatur in Grad Celsius (°C),

T_0 Nullpunkt der Celsius-Skala = 273,15 K (Erstarrungspunkt des Wassers)

dann gilt

$$t = T - T_0 \quad \text{oder} \quad T = t + T_0$$

Beachte:

- Die Temperatur ist die einzige physikalische Größe mit zwei Formelzeichen (T , t) je nach zu verwendender Einheit (K, °C). Sollten beide Formelzeichen in einer Gleichung vorkommen, so dürfen sie nicht gegeneinander gekürzt werden.
- Temperaturdifferenzen ΔT und Δt werden in K (K) angegeben. Für Differenzen von Celsius-Temperaturen Δt ist auch die Benennung Grad Celsius (°C) zulässig.

Als Einheit für Temperaturdifferenzen seit 1978 unzulässig: Grad (grad).

- Als Einheiten der **Temperaturdifferenz** sind Kelvin und Grad Celsius gegeneinander kürzbar.
- Dezimale Vielfache und Teile dürfen von Grad Celsius nicht gebildet werden.

Technische Wärmelehre

Info:

http://bio.physik.uni-wuerzburg.de/fileadmin/vorlesungen/thermo/Thermodynamik_01_.pdf

http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web_ph08_g8/grundwissen/05volumenaender/volumenaend.htm

<http://de.wikipedia.org/wiki/Temperatur>

Die Wärmelehre (Thermodynamik) fußt auf den Gesetzmäßigkeiten der Mechanik. Es muss unterschieden werden zwischen dem *Wärmezustand* (der Temperatur) eines Körpers und der *Wärmeenergie*. Letztere unterliegt wie alle Energiearten dem Energieerhaltungssatz. Änderung der Temperatur und Zufuhr oder Abgabe von Wärmeenergie sind *nicht* identisch!

13. Temperatur

Die Temperatur eines Körpers ist ein Maß für die mittlere Bewegungsenergie je Molekül (Kinetische Wärmetheorie).

In *Festkörpern* schwingen die Moleküle um ihre feste Gleichgewichtslage. Sie besitzen potentielle und kinetische Energie in allen drei Raumrichtungen,

Die Moleküle der *Flüssigkeiten* schwingen ebenfalls, führen aber zusätzlich Stöße aus.

In *gasförmigen Stoffen* bewegen sich die Moleküle mit zum Teil erheblichen Geschwindigkeiten (Größenordnung 10^3 m/s).

- Das Volumen der Körper (und damit sämtliche Abmessungen) nimmt in der Regel mit steigender Temperatur zu.
- Flüssiger und gasförmiger Aggregatzustand existieren bei allen Stoffen bei jeweils höherer Temperatur als der feste Zustand.
- Der spezifische Widerstand steigt bei Metallen mit wachsender Temperatur, bei Halbleitern sinkt er dagegen.
- Die von einem erhitzten Körper ausgehende Strahlung (Temperaturstrahlung) wird mit steigender Temperatur kurzwelliger.
- Die Spannung eines Thermoelements wächst mit der Temperatur.
- Viele Stoff"konstanten" (Materialwerte) sind Funktionen der Temperatur (Dichte, Schallgeschwindigkeit, spezifische Wärmekapazität, spezifischer Widerstand, Ausdehnungskoeffizient usw.).

Die meisten der temperaturabhängigen Größen werden zur Temperaturmessung verwendet.

Die Temperatur kennzeichnet einen Zustand des Körpers, der von seiner Masse und stofflichen Zusammensetzung unabhängig ist. Man bezeichnet die Temperatur deshalb als **Zustandsgröße**.