



EUROPA-FACHBUCHREIHE  
für FOS/BOS Bayern

# Technologie

## FOS/BOS Bayern

Jahrgangsstufe 12

Ausbildungsrichtung Technik

1. Auflage

VERLAG EUROPA-LEHRMITTEL · Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG  
Düsseldorfer Straße 23 · 42781 Haan-Gruiten

Europa-Nr.: 15129

**Autoren des Buches Technologie FOS/BOS Bayern, Jahrgangsstufe 12**

Hensel, Thomas	München
Koch, Matthias	München
Langgartner, Stefan	Rosenheim
Schittenhelm, Michael	Hof
Sickenberger, Erich	Grafrath
Werner, Heinz	Bad Alexandersbad
Werner, Thomas	Bad Alexandersbad

**Lektor**

Dillinger, Josef

**Bildbearbeitung**

Zeichenbüro des Verlags Europa-Lehrmittel, 73760 Ostfildern  
Grafische Produktionen Jürgen Neumann, 97222 Rimpar

1. Auflage 2018, korrigierter Nachdruck 2019

Druck 5 4 3 2

Alle Drucke derselben Auflage sind parallel einsetzbar, da sie bis auf die Behebung von Druckfehlern untereinander unverändert sind.

ISBN 978-3-8085-1512-9

Alle Rechte vorbehalten. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der gesetzlich geregelten Fälle muss vom Verlag schriftlich genehmigt werden.

© 2018 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 42781 Haan-Gruiten  
<http://www.europa-lehrmittel.de>

Satz und Layout: Grafische Produktionen Jürgen Neumann, 97222 Rimpar

Umschlag: braunwerbeagentur, 42477 Radevormwald

Umschlagfoto: Bildmaterial des Autorenkreises

Druck: mediaprint solutions GmbH, 33100 Paderborn

## Vorwort

Dieses Lehrbuch setzt das Kompetenzstrukturmodell des ab Schuljahr 2018/19 geltenden Lehrplan-PLUS um.

Die Inhalte sind exakt an den Lehrplan der 12. Jahrgangsstufe der Fachoberschule, Ausbildungsrichtung Technik, angepasst, enthalten aber auch zu jedem Lernbereich Vertiefungen für besonders interessierte Schüler und Lehrer.

Es werden alle Pflicht- und Wahl-Lernbereiche behandelt.

Die Lernbereiche sind in Pflicht- und Wahlmodule aufgeteilt. In der Jahrgangsstufe 12 müssen neben den Pflichtmodulen noch drei weitere Module (optional) gewählt werden.

### **Pflicht-Lernbereiche:**

- Thermodynamik
- Technische Mechanik
- Metallische Werkstoffe

### **Wahl-Lernbereiche (optional):**

- Allgemeine Energietechnik
- Erneuerbare Energien
- Umwelttechnik
- Elektronische Bauelemente
- Systeme und Prozesse
- Modellbildung und Simulation
- Verbrennungsmotoren
- Komplexe technische Systeme

Die Inhalte werden durch konkrete Beispiele anhand von technischen Systemen dargestellt und veranschaulicht. Alle im Lehrplan geforderten Kompetenzen werden durch entsprechende Aufgaben gefördert.

### **Aufbau der Kapitel**

- Jedes Hauptkapitel beginnt mit einer Übersicht, welche Kompetenzen der Leser sich beim Durcharbeiten des Kapitels aneignen wird.
- Nach jedem Teilkapitel oder auch nach einem logischen Lernabschnitt überprüft die Rubrik „Alles verstanden?“ ob der Leser die wesentlichen Fakten des Teilkapitels verstanden hat.
- In unregelmäßigen Abständen, aber immer wenn es sinnvoll ist, fordert die Rubrik „Arbeitsauftrag“ den Leser auf, kleinere Aufgaben zu lösen.
- In jedem Hauptkapitel gibt es ein oder mehrere Teilkapitel mit umfangreicheren Aufgabenstellungen.

### **Arbeiten mit dem Buch**

Das Konzept dieses Buches ist es, einen an Technik interessierten, selbstständig und eigenverantwortlich handelnden Leser anzusprechen, denn

- mit der Rubrik „Alles verstanden?“ kann jeder Leser einen kurzen Selbsttest durchführen,
- die Rubrik „Arbeitsauftrag“ fordert zur Umsetzung von gelesenen und gelernten Inhalten auf,
- die Aufgabenstellungen orientieren sich an modernen technischen Systemen und sind interessant, praxisnah und vielseitig.

Ausführliche Lösungen sind auf der Webseite des Verlags unter [www.europa-lehrmittel.de/15549/html](http://www.europa-lehrmittel.de/15549/html) zum kostenpflichtigen Download zu finden.

Wir wünschen Ihnen viel Freude mit unserem Buch und interessieren uns für Ihre Meinung!

Teilen Sie uns Verbesserungsvorschläge, Kritik – gerne auch Lob – mit:

[lektorat@europa-lehrmittel.de](mailto:lektorat@europa-lehrmittel.de)

Winter 2018/2019

Autoren und Verlag

<b>1 Thermodynamik</b> .....	<b>6</b>	<b>3.5 Zugfestigkeit und Zugversuch</b> .....	<b>130</b>
<b>1.1 Grundbegriffe der Thermodynamik</b> .....	<b>6</b>	3.5.1 Mechanische Spannung und Dehnung .....	130
1.1.1 Die Bedeutung der Thermodynamik .....	6	3.5.2 Beanspruchungsarten .....	131
1.1.2 Thermodynamische Systeme .....	8	3.5.3 Zugversuch .....	131
1.1.3 Zustandsgrößen und Prozessgrößen .....	11	3.5.4 Das Spannungs-Dehnungs-Diagramm .....	134
1.1.4 Aufgaben zu thermodynamischen Systemen und Prozessen	15	Berechnungen auf Grundlage des Spannungs-Dehnungs-Diagramms .....	136
<b>1.2 Die Gasgesetze</b> .....	<b>16</b>	3.5.6 Aufgaben Zugversuch, Streckgrenze, Zugfestigkeit und Spannungs-Dehnungs-Diagramm .....	138
1.2.1 Die Gesetze von <i>Boyle-Mariotte</i> , <i>Amontons</i> und <i>Gay-Lussac</i>	17	<b>3.6 Kerbschlagbiegeversuch</b> .....	<b>139</b>
1.2.2 Die thermische Zustandsgleichung für ideale Gase .....	19	<b>3.7 Zerstörungsfreie Prüfverfahren</b> .....	<b>140</b>
1.2.3 Aufgaben zu den Gasgesetzen .....	23	3.7.1 Farb eindringverfahren .....	140
<b>1.3 Der erste Hauptsatz der Thermodynamik</b> .....	<b>24</b>	3.7.2 Magnetische Rissprüfung .....	141
<b>1.4 Thermodynamische Zustandsänderungen</b> .....	<b>26</b>	3.7.3 Durchstrahlprüfung .....	142
1.4.1 Isochore Prozesse .....	26	3.7.4 Aufgaben zu zerstörungsfreien Prüfverfahren .....	143
1.4.2 Isobare Prozesse .....	30	<b>3.8 Aufbau und Eigenschaften von Metallen</b> .....	<b>143</b>
1.4.3 Isotherme Prozesse .....	34	3.8.1 Die Metallbindung .....	145
1.4.4 Adiabatische Prozesse .....	39	3.8.2 Elementarzellen und Nahordnung .....	146
1.4.5 Zusammenfassung Thermodynamische Prozesse .....	42	3.8.3 Bestimmung der Dichte mithilfe der Elementarzelle .....	149
1.4.6 Aufgaben zu thermodynamischen Prozessen .....	44	3.8.4 Einfluss der Elementarzelle auf die plastische Verformbarkeit	151
<b>1.5 Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik</b> .....	<b>46</b>	3.8.5 Das Gefüge eines Metalls .....	153
<b>1.6 Thermodynamische Kreisprozesse</b> .....	<b>49</b>	3.8.6 Gitterfehler und ihre Bedeutungen .....	155
1.6.1 Kennzeichen und Energiebilanz von Kreisprozessen .....	49	3.8.7 Aufgaben zu Aufbau von Metallen .....	156
1.6.2 Rechtsläufige und linksläufige Kreisprozesse .....	52	<b>3.9 Legierungen</b> .....	<b>157</b>
1.6.3 Beispielaufgabe: Berechnung eines Kreisprozesses .....	55	3.9.1 Grundtypen von Legierungen .....	158
1.6.4 Aufgaben zu Kreisprozessen .....	57	3.9.2 Abkühlkurven von Legierungen .....	159
<b>2 Technische Mechanik</b> .....	<b>58</b>	3.9.3 Binäre Zustandsdiagramme .....	161
<b>2.1 Einführung in die Technische Mechanik</b> .....	<b>58</b>	3.9.4 Aufgaben zu Legierungen .....	166
<b>2.2 Kräfte in der Statik</b> .....	<b>59</b>	<b>3.10 Das Eisen-Kohlenstoff-Diagramm</b> .....	<b>167</b>
2.2.1 Graphische Darstellung einer Kraft .....	59	3.10.1 Abkühlkurve von reinem Eisen .....	167
2.2.2 Axiome der Statik .....	59	3.10.2 Informationen aus dem Eisen-Kohlenstoff-Diagramm .....	168
2.2.3 Zerlegen von Kräften .....	61	3.10.3 Eutektoider Stahl .....	169
2.2.4 Zusammenfassen von Kräften .....	66	3.10.4 Untereutektoider Stähle .....	171
2.2.5 Aufgaben zu Kräften in der Statik .....	70	3.10.5 Übereutektoider Stähle .....	172
<b>2.3 Drehmomente in der Statik</b> .....	<b>71</b>	3.10.6 Aufgaben zum Eisen-Kohlenstoff-Diagramm .....	173
2.3.1 Drehmomente durch eine Einzelkraft .....	71	<b>3.11 Wärmebehandlung von Stählen</b> .....	<b>174</b>
2.3.2 Drehmomente durch ein Kräftepaar .....	72	3.11.1 Martensithärten .....	174
2.3.3 Drehmomente mit beliebiger Krafterichtung .....	72	3.11.2 Vergüten von Stählen .....	175
2.3.4 Aufgaben zu Drehmomenten in der Statik .....	73	3.11.3 Pendelglühen .....	176
<b>2.4 Freiheitsgrade eines Körpers</b> .....	<b>74</b>	3.11.4 Aufgaben zu Wärmebehandlung .....	176
<b>2.5 Zentrale Kräftesysteme</b> .....	<b>75</b>	<b>4 Allgemeine Energietechnik</b> .....	<b>177</b>
2.5.1 Berechnung der resultierenden Kraft in einem zentralen Kräftesystem .....	75	<b>4.1 Energieformen</b> .....	<b>177</b>
2.5.2 Gleichgewichtszustand eines zentralen Kräftesystems .....	78	<b>4.2 Energieumwandlung</b> .....	<b>179</b>
2.5.3 Aufgaben zu zentralen Kräftesystemen .....	80	4.2.1 Energieerhaltung .....	179
<b>2.6 Allgemeine Kräftesysteme</b> .....	<b>81</b>	4.2.2 Energiewandlermodell .....	180
2.6.1 Berechnung der resultierenden Kraft und des resultierenden Moments in einem allgemeinen Kräftesystem .....	81	4.2.3 Wirkungsgrad .....	181
2.6.2 Gleichgewichtszustand eines allgemeinen Kräftesystems .....	85	4.2.4 Energiewandlungskette .....	182
2.6.3 Aufgaben zu allgemeinen Kräftesystemen .....	89	4.2.5 Energieflussdiagramm .....	185
<b>2.7 Freimachen von Bauteilen</b> .....	<b>90</b>	<b>4.3 Energiewandler</b> .....	<b>186</b>
2.7.1 Grundlagen des Freimachens .....	90	4.3.1 Kraftwerke .....	186
2.7.2 Prinzipielle Vorgehensweise beim Freimachen .....	92	4.3.2 Antriebssysteme .....	190
2.7.3 Regeln der Kraftübertragung .....	93	<b>4.4 Physikalische Größen</b> .....	<b>194</b>
2.7.4 Musterbeispiele für das Freimachen von Bauteilen .....	96	4.4.1 Arbeit .....	194
2.7.5 Aufgaben zu Freischneiden .....	98	4.4.2 Energie .....	195
<b>2.8 Musterbeispiele für die Berechnung von äußeren Kräften</b>	<b>99</b>	4.4.3 Leistung .....	197
<b>2.9 Statische Bestimmtheit</b> .....	<b>106</b>	4.4.4 Einheiten der Energietechnik .....	199
<b>2.10 Schnittgrößen</b> .....	<b>107</b>	4.4.5 Aufgaben .....	200
2.10.1 Positives und negatives Schnittufer .....	107	<b>4.5 Energieversorgungssysteme</b> .....	<b>204</b>
2.10.2 Berechnung der inneren Kräfte und Momente .....	108	4.5.1 Arten von Energieträgern .....	204
2.10.3 Graphische Ermittlung des maximalen Biegemoments .....	111	4.5.2 Energieverbrauch .....	209
2.10.4 Aufgaben zu Schnittgrößen .....	114	4.5.3 Energietransport .....	211
<b>2.11 Bauteile mit Strecklasten</b> .....	<b>115</b>	4.5.4 Energiespeicherung .....	217
2.11.1 Resultierende Kraft einer Streckenlast .....	115	4.5.5 Aufgaben .....	222
2.11.2 Querkraftverlauf und Biegemoment bei einer konstanten Streckenlast .....	116	<b>4.6 Energieeffizienz</b> .....	<b>223</b>
2.11.3 Belastungen durch lineare Streckenlasten .....	119	4.6.1 Kraft-Wärme-Kopplung .....	223
2.11.4 Aufgaben zu Streckenlasten .....	120	4.6.2 Energieeffizienz von Gebäuden .....	225
<b>3 Metallische Werkstoffe</b> .....	<b>121</b>	4.6.3 Energiesparen – Verbraucherverhalten .....	228
<b>3.1 Einführung in die Werkstofftechnik</b> .....	<b>121</b>	4.6.4 Aufgaben .....	229
<b>3.2 Einteilung der Werkstoffe</b> .....	<b>122</b>	<b>5 Erneuerbare Energien</b> .....	<b>230</b>
<b>3.3 Eigenschaften von Werkstoffen</b> .....	<b>123</b>	<b>5.1 Fossile und atomare Energieträger</b> .....	<b>230</b>
<b>3.4 Härte und Härteprüfung</b> .....	<b>126</b>	5.1.1 Wärmekraftwerke und ihr technologisches Prinzip .....	230
3.4.1 Härteprüfung nach Vickers .....	126	5.1.2 Bedeutung fossiler und atomarer Energieträger .....	234
3.4.2 Härteprüfung nach Brinell .....	127	5.1.3 Ökonomie .....	235
3.4.3 Härteprüfung nach Rockwell .....	128	5.1.4 Ökologie .....	235
3.4.4 Mobile Härteprüfung .....	129	5.1.5 Aufgaben zu Fossile und atomare Energieträger .....	237
3.4.5 Aufgaben zu Härteprüfverfahren .....	129	<b>5.2 Anthropogener Treibhauseffekt und CO<sub>2</sub></b> .....	<b>238</b>
		5.2.1 Treibhauseffekt und CO <sub>2</sub> -Konzentration .....	238
		5.2.2 Verursacher von CO <sub>2</sub> - und Treibhausgas-Emission .....	241

5.2.3 Aufgaben zu Anthropogener Treibhauseffekt und CO<sub>2</sub> . . . 244

**5.3 Folgen durch den Einsatz fossiler Energieträger und die damit verbundenen Konsequenzen . . . . . 245**

5.3.1 Regionale und globale Folgen von THG-Emission heute und in naher Zukunft . . . . . 245

5.3.2 Dekarbonisierung der Weltwirtschaft und nationale Ziele 250

5.3.3 Aufgaben zum Unterthema „Folgen durch den Einsatz fossiler Energieträger und die damit verbundenen Konsequenzen“ . . . . . 252

**5.4 Bereiche der erneuerbaren Energien. . . . . 253**

5.4.1 Verfügbarkeit der EE-Quellen . . . . . 253

5.4.2 Globale und nationale Entwicklung der EE . . . . . 255

5.4.3 Windkraft. . . . . 256

5.4.4 Photovoltaik . . . . . 260

5.4.5 Biomasse . . . . . 269

5.4.6 Aufgaben zum Unterthema Erneuerbare Energien . . . 273

**5.5 Vergleich von konventionellen Energieträgern und erneuerbaren Energien . . . . . 275**

5.5.1 Gesamtwirkungsgrade und Energiebilanz. . . . . 275

5.5.2 Kosten-Nutzen-Aufwand . . . . . 278

5.5.3 Ökobilanz, Umweltverträglichkeit und Ökologie . . . 281

5.5.4 Graue Energie und energetische Amortisation . . . 283

5.5.5 Zeitliche Nutzbarkeit . . . . . 283

5.5.6 Standortwahl von Erneuerbare-Energie-Anlagen . . . 285

5.5.7 Versorgungssicherheit im Stromnetz . . . . . 286

5.5.8 Konzeptansätze . . . . . 288

5.5.9 Aufgaben . . . . . 290

**6 Umwelttechnik . . . . . 291**

**6.1 Umweltschutz und Umwelttechnik . . . . . 291**

6.1.1 Allgemeine Einführung . . . . . 291

6.1.2 Umweltkonzepte und Umweltziele . . . . . 294

6.1.3 Aufgaben . . . . . 296

**6.2 Anthropogene Schadstoffe . . . . . 296**

6.2.1 Die Entwicklung im 20. Jahrhundert. . . . . 296

6.2.2 Ökosysteme Boden und Wasser . . . . . 298

6.2.3 Anthropogene Boden- und Wasserschadstoffe . . . 300

6.2.4 Anthropogene Luftschadstoffe . . . . . 305

6.2.5 Lärmbelastung . . . . . 311

6.2.6 Aufgaben . . . . . 315

**6.3 Nachweis- und Messverfahren – Analytik . . . . . 316**

6.3.1 Zweck der Nachweis- und Messverfahren . . . 316

6.3.2 Qualitative und halbquantitative Nachweismethoden . . 317

6.3.3 Instrumentelle Umweltanalytik . . . . . 320

6.3.4 Aufgaben . . . . . 327

**6.4 Maßnahmen zur Reduzierung der Umweltbelastungen 328**

6.4.1 Vermeidung von Umweltbelastungen . . . . . 328

6.4.2 Abfallvermeidung durch geschlossene Produktkreisläufe 331

6.4.3 Abfalltrennung und Wiederverwertung . . . . . 334

6.4.4 Maßnahmen zur Luftreinhaltung . . . . . 337

6.4.5 Maßnahmen zur Gewässerreinhaltung . . . . . 342

6.4.6 Aufgaben . . . . . 348

**7 Elektronische Bauelemente . . . . . 349**

**7.1 Grundlagen der Gleichstromtechnik. . . . . 349**

7.1.1 Der einfache Gleichstromkreis . . . . . 350

7.1.2 Grundgrößen der Elektrotechnik . . . . . 351

**7.2 Allgemeines zu elektronischen Schaltungen . . . . . 356**

**7.3 Bauelement Widerstand R . . . . . 358**

7.3.1 Bauarten von Widerständen . . . . . 358

7.3.2 Physikalische Eigenschaften von Widerständen . . . 360

7.3.3 Aufgaben . . . . . 363

7.3.4 Exkurs: Computersimulation von elektronischen Schaltungen . . . . . 364

**7.4 Bauelement Kondensator . . . . . 367**

7.4.1 Aufbau und Bauarten von Kondensatoren. . . . . 367

7.4.2 Physikalische Eigenschaften eines Kondensators . . . 368

7.4.3 Aufgaben . . . . . 374

**7.5 Bauelement Spule . . . . . 375**

7.5.1 Bauarten von Spulen . . . . . 375

7.5.2 Physikalische Eigenschaften von Spulen . . . . . 375

7.5.3 Schaltungen mit Spule, Kondensator und Widerstand . . 379

7.5.4 Aufgaben . . . . . 382

**7.6 Bauelement Diode . . . . . 382**

7.6.1 Grundwissen Halbleiter . . . . . 382

7.6.2 Halbleiterdioden . . . . . 386

7.6.3 Schaltungen mit Dioden . . . . . 388

**7.7 Bauelement Transistor . . . . . 393**

7.7.1 Bipolare Transistoren . . . . . 393

7.7.2 Feldeffekt-Transistoren (FET). . . . . 399

**7.8 Elektronische Schaltungen und Aufgaben . . . . . 401**

7.8.1 Transistor als Schalter . . . . . 401

7.8.2 Verschiedene Kipperschaltungen . . . . . 402

7.8.3 Einstufiger NF-Verstärker in Emitterschaltung. . . . . 404

7.8.4 Gleichrichterschaltung mit Glättung der Ausgangsspannung 405

**8 Systeme und Prozesse . . . . . 406**

**8.1 Grundlagen der Systemtheorie . . . . . 406**

8.1.1 Der Systembegriff . . . . . 406

8.1.2 System und Prozess . . . . . 410

8.1.3 Aufgaben . . . . . 412

**8.2 Darstellungsmethoden. . . . . 414**

8.2.1 Kontinuierliche Prozesse . . . . . 414

8.2.2 Diskrete Prozesse . . . . . 416

**8.3 Modellbildung mit Petri-Netzen . . . . . 417**

8.3.1 Die Struktur von Petri-Netzen . . . . . 417

8.3.2 Dynamik der Petri-Netze – Schaltregeln . . . . . 421

8.3.3 Ablaufstrukturen und spezielle Situationen . . . . . 423

8.3.4 Beispielaufgabe mit Lösung . . . . . 427

8.3.5 Mathematische Darstellung von Petri-Netzen . . . . . 429

**8.4 Beispielaufgaben, Lösungen und Arbeitsaufträge. . . . . 431**

8.4.1 Netzanalyse. . . . . 431

8.4.2 Montageroboter . . . . . 432

8.4.3 Verkehrsampeln . . . . . 433

8.4.4 Transportprobleme. . . . . 435

8.4.5 Keksautomaten. . . . . 437

8.4.6 Glücksspiele . . . . . 437

**8.5 Aufgaben . . . . . 438**

**9 Modellbildung und Simulation . . . . . 440**

**9.1 Einführung in die Modellbildung. . . . . 440**

9.1.1 Begriffe und Anwendungsbereiche. . . . . 440

9.1.2 Arbeitsschritte der Modellbildung . . . . . 442

**9.2 System Dynamics Notation . . . . . 446**

9.2.1 Darstellungsweise, Software und Anwendungen . . . 446

9.2.2 Berechnung der Zustandsgrößen . . . . . 450

9.2.3 Modelltyp 1: Einfache Akkumulation . . . . . 451

9.2.4 Modelltyp 2: Zweistufige Akkumulation . . . . . 452

9.2.5 Modelltyp 3: Einfacher Regelkreis. . . . . 453

9.2.6 Modelltyp 4: Zweistufig rückgekoppelter Regelkreis . . . 454

9.2.7 Modelltyp 5: Gekoppelte Regelkreise . . . . . 455

9.2.8 Modellierungsbeispiel mit ausführlicher Lösung . . . 456

**9.3 Rechenverfahren (Integrationsverfahren). . . . . 460**

9.3.1 Das Euler-Cauchy-Verfahren . . . . . 460

9.3.2 Das Runge-Kutta-Verfahren 4. Ordnung (RK4). . . . . 461

9.3.3 Simulationsfehler und Fehlerquellen . . . . . 465

**9.4 Wachstumsgrenzen . . . . . 466**

9.4.1 Begrenztes Wachstum . . . . . 466

9.4.2 Logistisches Wachstum . . . . . 468

**9.5 Modellierungsaufgaben . . . . . 471**

**10 Verbrennungsmotoren . . . . . 475**

**10.1 Kreisprozess der Wärmekraftmaschinen . . . . . 475**

10.1.1 Entwicklung und Prinzip . . . . . 475

10.1.2 Theorie der Wärmekraftmaschinen . . . . . 481

**10.2 Kreisprozesse von Otto- und Dieselmotor . . . . . 487**

10.2.1 Idealer Kreisprozess des Ottomotors . . . . . 487

10.2.2 Idealer Kreisprozess des Dieselmotors . . . . . 491

10.2.3 Vergleich der Konzepte . . . . . 495

**10.3 Technik der Motoren. . . . . 496**

10.3.1 Das Viertakterverfahren. . . . . 497

10.3.2 Steuerdiagramm, Indikatordiagramm und Kenngrößen . 501

10.3.3 Potential für Optimierungen . . . . . 504

**10.4 Maßnahmen zur Steigerung des Wirkungsgrades, der Wirtschaftlichkeit und der Umweltverträglichkeit 507**

10.4.1 Drehmoment und Leistung . . . . . 507

10.4.2 Wirkungsgrad und Wirtschaftlichkeit . . . . . 510

10.4.3 Ökologie . . . . . 515

**11 Komplexe technische Systeme . . . . . 518**

**11.1 Beispiel 1: E-Bike oder Pedelec . . . . . 518**

**11.2 Beispiel 2: Kraftfahrzeug mit Verbrennungsmotor . . . . . 521**

**11.3 Beispiel 3: Windenergieanlagen (WEA). . . . . 523**

**11.4 Beispiel 4: Heizkraftwerk . . . . . 525**

**11.5 Beispiel 5: Blockheizkraftwerk (BHKW) . . . . . 528**

**11.6 Beispiel 6: Mobile Krane. . . . . 529**

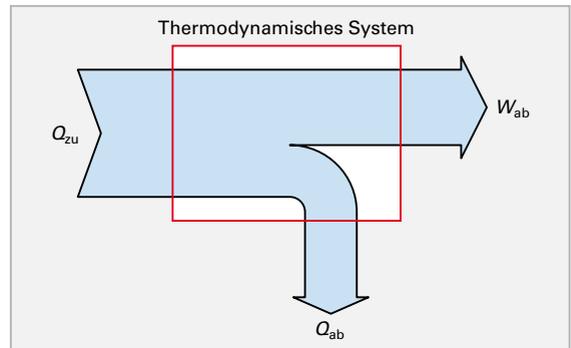
**Bildquellenverzeichnis . . . . . 531**

**Sachwortverzeichnis . . . . . 533**



Die heutige Bedeutung als Grundlagenfach der Ingenieurwissenschaften beschreibt jedoch sehr viel umfassender und treffender der Ausdruck „**Allgemeine Energielehre**“. Es gibt eine Besonderheit bei der Nutzung der Energieform Wärme, die sie von allen anderen Energieformen unterscheidet. Elektrische Energie ( $E_{el}$ ) und mechanische Energie ( $E_{kin}$ ,  $E_{pot}$ ) beispielsweise lassen sich ohne Einschränkung in andere Energieformen umwandeln, sie sind vollständig nutzbar. Aber immer wenn bei technischen Energieumwandlungsprozessen in einer Zwischenstufe die Energieform Wärme auftritt, bedeutet dies Einschränkungen in der Umwandelbarkeit und Nutzbarkeit. Diese Einschränkung wird durch die physikalisch exakte Bedeutung der Nutzung von Wärmeenergie klar, bei der ein Energiestrom bzw. ein Energietransport stattfindet, der jedoch nur zwischen Körpern mit unterschiedlichen Temperaturen möglich ist. Es ist zur Nutzung von Wärmeenergie also eine Temperaturdifferenz notwendig. Folgendes einfache Beispiel soll dies verdeutlichen:

Wenn wir einer Person, die ohne Handschuhe aus der Kälte kommt, unsere warme Hand geben und sie festhalten, so beginnt ein Energiestrom von der warmen zur kalten Hand zu fließen und zwar so lange, bis beide Hände die gleiche Temperatur haben. Danach ist zwar in beiden Händen Wärmeenergie vorhanden, aber der Energiestrom hat aufgehört. Die dann vorhandene Wärmeenergie ist nicht mehr nutzbar.

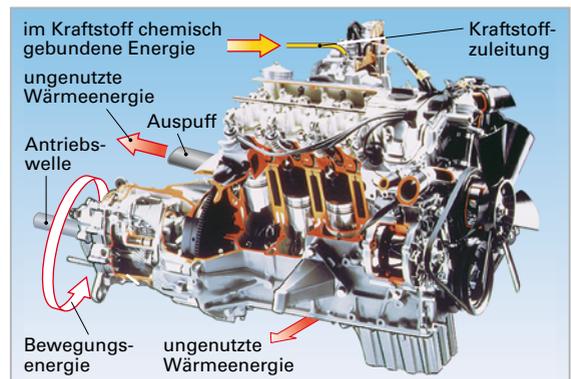


**Bild 1: Energieflussbild, wird auch Sankey-Diagramm genannt**

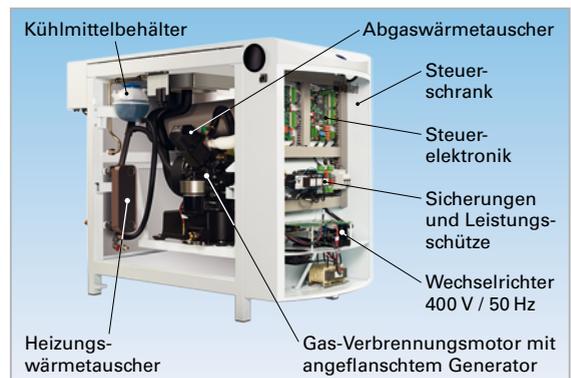
Die Ziele der Ingenieurwissenschaft Thermodynamik sind folgende:

- Analyse und Optimierung von Energie-Umwandlungsprozessen
- Minimierung der Energieentwertung, d. h. hochwertige, nutzbare Energie (Exergie) zu minderwertiger, nicht nutzbarer Energie (Anergie)
- Erstellung von Energiebilanzen und Energieflussbildern (**Bild 1**)
- Entwicklung, Untersuchung, Beschreibung, Berechnung und Optimierung von technischen Prozessen, z. B. in
  - Verbrennungsmotoren (**Bild 2**)
  - Wärmekraftwerken und Block-Heizkraftwerken (BHKW) (**Bild 3**)
  - Wärmepumpen und Klimaanlage
  - Heizungssystemen
  - Gasturbinen und Strahltriebwerken
  - Thermischen Energiespeichern
  - ...

Aufgrund der Bedeutung für das Leben der Menschen in der heutigen Zeit gehören die Kenntnisse der Grundlagen der Thermodynamik zur technischen Allgemeinbildung junger Menschen.



**Bild 2: Energieumwandlungen im Otto-Motor**



**Bild 3: Mini-Block-Heizkraftwerk (BHKW)**

**Alles verstanden?**

1. Nennen Sie mindestens drei moderne technische Systeme der Thermodynamik und beschreiben Sie, mit welchen Zielen sich Ingenieure und Physiker damit beschäftigen!
2. Erläutern Sie an einem selbstgewählten Beispiel, warum die Nutzung von Wärmeenergie nur zwischen Körpern mit unterschiedlichen Temperaturen möglich ist!
3. Erklären Sie, warum die Thermodynamik als Grundlagenfach der Ingenieurwissenschaften auch in der heutigen Zeit noch von großer Bedeutung ist!

**Arbeitsauftrag:**

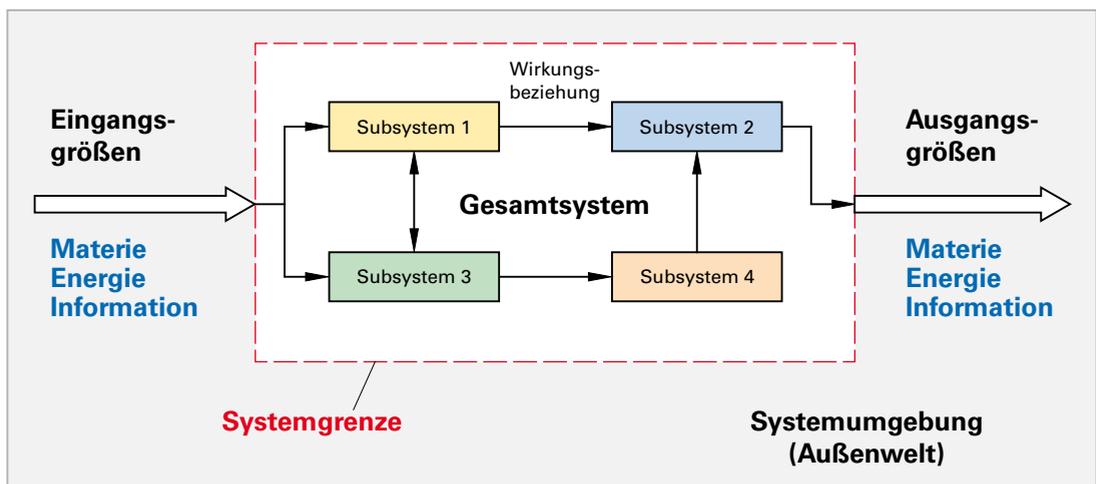
1. Überprüfen Sie rechnerisch die im Text genannten Prozentzahlen zu den Verbesserungen der Dampfmaschine von *James Watt* und stellen Sie dazu Überlegungen an, welche wirtschaftliche Bedeutung seine Erfindungen in der damaligen Zeit hatten!
2. Berechnen Sie die prozentuale Verbesserung der Effizienz von Wärmekraftmaschinen, die zwischen der Dampfmaschine von James Watt und der modernen Gasturbine von Siemens liegen!

**1.1.2 Thermodynamische Systeme**

Technische Geräte und Anlagen sind in den letzten Jahrzehnten immer komplexer und damit unübersichtlicher geworden. Deshalb müssen bei der Planung, Produktentwicklung und Inbetriebnahme von technischen Objekten und Anlagen viele Spezialisten aus unterschiedlichen Fachgebieten zusammenarbeiten. Dies ist einer der Gründe, warum sich das systemtechnische Denken und Handeln in allen Bereichen der Technik und somit auch in der Thermodynamik immer stärker durchgesetzt hat. Technische Systeme werden bestimmt durch

- ihre Abgrenzung von der Umgebung, d. h. durch ihre Systemgrenzen
- ihre Eingangs- und Ausgangsgrößen, auch Operanden genannt
- die Funktion, die den Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen beschreibt
- ihren Aufbau aus Subsystemen oder Teilsystemen
- ihre innere Struktur, d. h. durch das Anordnungs- und Beziehungsgefüge der Subsysteme

Aus dieser Beschreibung ergibt sich, dass das Modell eines technischen Systems deshalb wie folgt aussehen könnte (**Bild 1**):

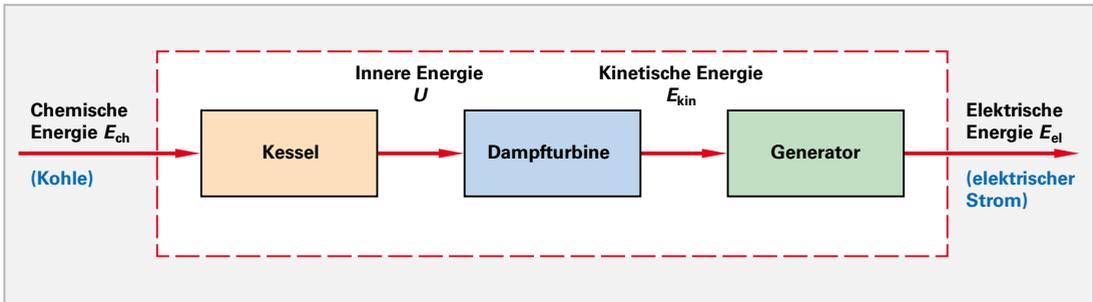


**Bild 1: Modell eines technischen Systems**

Die Systemgrenzen können tatsächlich materiell vorhandene Grenzen sein, z. B. die Zylinderwand eines Ottomotors, es können aber auch gedachte, sogenannte fiktive Hüllen sein, die sich während eines Prozesses verändern.

Um das Konzept der Systemanalyse und Systemdarstellung zu verdeutlichen, betrachten wir zwei typische thermodynamische Systeme, in denen Energieumwandlungsprozesse ablaufen.

Beispiel 1: Stark vereinfachtes Gesamtsystem Kohlekraftwerk, das in drei Subsysteme aufgegliedert wurde (**Bild 1**):



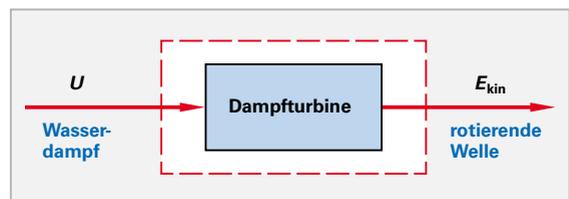
**Bild 1: Thermodynamisches technisches Gesamtsystem Kohlekraftwerk**

Das Gesamtsystem Kohlekraftwerk wandelt die Eingangsgröße chemische Energie  $E_{ch}$ , die in der Kohle enthalten ist, in mehreren Umwandlungsschritten in die Ausgangsgröße elektrische Energie  $E_{el}$  um.

- Im Kessel wird das Wasser verdampft und der Dampf überhitzt. Danach liegt die gesamte Energie als innere Energie  $U$  des überhitzten Wasserdampfes vor.  
(Die Bedeutung der Energieform innere Energie  $U$  wird später noch genauer erklärt.)
- Der unter hohem Druck stehende und überhitzte Wasserdampf strömt durch die Dampfturbine und bringt sie auf eine hohe Drehzahl. Danach liegt die gesamte Energie als Rotationsenergie  $E_{kin}$  der Turbinenwelle vor.
- Mit der Turbinenwelle gekoppelt ist die Welle des Generators, sodass in diesem Subsystem die kinetische Energie in elektrische Energie  $E_{el}$  umgewandelt wird.
- Bei diesem mehrstufigen Gesamtwandlungsprozess treten in jedem Subsystem Verluste auf.

Beispiel 2: Das Subsystem Dampfturbine des Gesamtsystems Kohlekraftwerk kann auch als eigenes System dargestellt werden (**Bild 2**).

Das Sub- oder Teilsystem Dampfturbine des Kohlekraftwerks wandelt die im Wasserdampf enthaltene innere Energie  $U$  in die kinetische Energie der rotierenden Turbinenwelle um.



**Bild 2: Subsystem Dampfturbine**

### Charakterisierung von technischen Systemen

Die Einteilung von thermodynamischen Systemen erfolgt üblicherweise danach, welche Stoff- und Energieströme durch sie hindurchfließen. Nach der Art ihres Umsatzes und damit nach der Beschaffenheit ihrer Systemgrenzen unterscheidet man vier verschiedene Typen:

- Typ 1: Offene Systeme
- Typ 2: Geschlossene Systeme
- Typ 3: Adiabate Systeme
- Typ 4: Abgeschlossene Systeme

Die Charakterisierung der vier Systemtypen wird an den folgenden Beispielen exemplarisch erläutert:

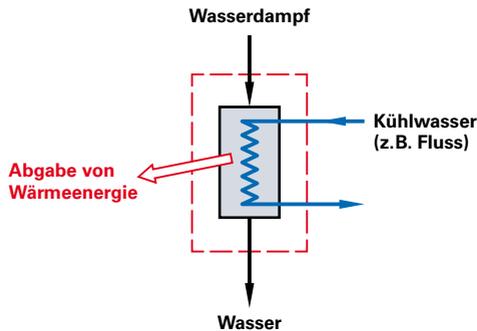
#### Typ 1: Offenes System

Charakterisierung:

**Die Systemgrenze ist durchlässig für Masse und durchlässig für Energie.**

Beispiel:

Kondensator (Verflüssiger) in einem Dampfkraftwerk



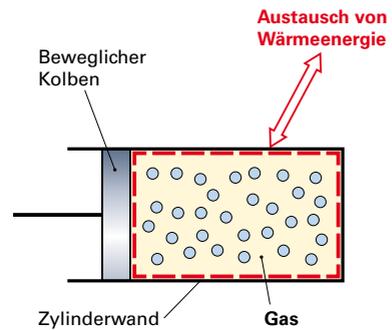
#### Typ 2: Geschlossenes System

Charakterisierung:

**Systemgrenze ist undurchlässig für Masse, aber durchlässig für Energie.**

Beispiel:

Gasmenge in einem gasdichten Zylinder mit beweglichem Kolben



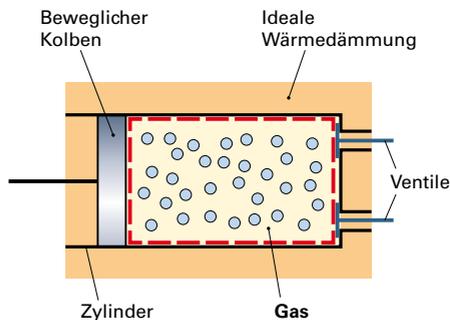
#### Typ 3: Adiabatisches System

Charakterisierung:

**Systemgrenze undurchlässig für Wärme, aber durchlässig für Masse und durchlässig für mechanische Energie.**

Beispiel:

Schnelle Kompression eines Gases im Zylinder eines Otto-Motors bei geschlossenen Ventilen.



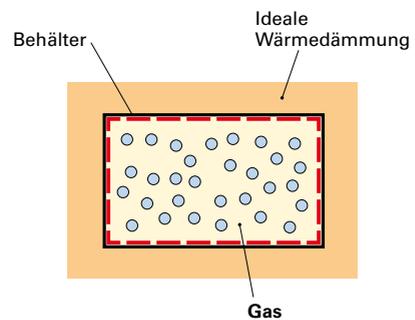
#### Typ 4: Abgeschlossenes System

Charakterisierung:

**Systemgrenze undurchlässig für Energie und Masse, d. h. keinerlei Wechselwirkung mit der Umgebung.**

Beispiel:

Behälter mit starren Wänden und einer sehr gut wärmegeprägten Ummantelung, z. B. eine ideale Thermoskanne.



#### Alles verstanden?

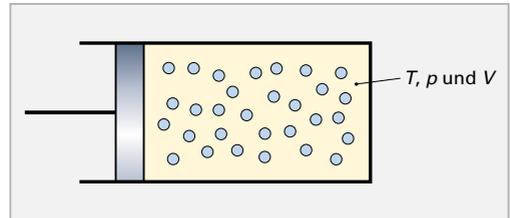
1. Erläutern Sie, aus welchem Grund man die Modellvorstellung von technischen Systemen eingeführt hat und welche Merkmale diese kennzeichnen!
2. Fassen Sie zusammen, nach welchen Kriterien die vier thermodynamischen Systemtypen eingeteilt werden!
3. Erläutern Sie an einem selbstgewählten Beispiel die Besonderheit eines adiabatischen Systems!
4. Geben Sie für jeden Systemtyp mindestens ein weiteres technisches Beispiel an! Warum sind technische Beispiele für Typ 4 besonders schwierig zu finden?

### 1.1.3 Zustandsgrößen und Prozessgrößen

Der Zustand eines Systems ist definiert durch die Werte physikalischer Eigenschaften des Systems, den sogenannten Systemzustand. Der Zustand von thermodynamischen Systemen wird bestimmt durch die Bedingungen, die im Inneren des Systems herrschen. Deshalb wird der thermodynamische Zustand eines Systems auch innerer Systemzustand genannt (**Bild 1**). Definiert wird der innere Systemzustand durch die sogenannten thermischen Zustandsgrößen. Die wichtigsten thermischen Zustandsgrößen sind:

- Temperatur  $T$  in K
- Druck  $p$  in  $\text{N/m}^2 = \text{Pa}$
- Volumen  $V$  in  $\text{m}^3$

Der innere oder thermodynamische Zustand eines Systems beschreibt die Gesamtheit der inneren Eigenschaften einer Materiemenge und ist von seinen äußeren Eigenschaften, wie z. B. seiner äußeren Form oder seiner Geschwindigkeit  $v$  völlig unabhängig.



**Bild 1: Innerer Systemzustand**

#### Die thermischen Zustandsgrößen

Die **Temperatur  $T$**  ist die wichtigste thermische Zustandsgröße und wird gemessen in der Einheit Kelvin K. Für thermodynamische Berechnungen muss immer die Kelvinskala verwendet werden, die beim absoluten Nullpunkt beginnt d. h. bei  $-273,15\text{ °C}$  (Celsius). Am Gefrierpunkt von Wasser bei  $0\text{ °C}$  hat die Kelvinskala den Wert  $273,15\text{ K}$ . Für die meisten thermodynamischen Berechnungen genügt eine Genauigkeit von drei gültigen Ziffern, also  $273\text{ K}$ . Man rechnet die Temperaturskalen auf folgende Weise ineinander um:

$$\text{Von } \vartheta \text{ in } ^\circ\text{C} \text{ nach } T \text{ in K: } T = \left( \frac{\vartheta}{^\circ\text{C}} + 273 \right) \text{ K} \quad \text{Von } T \text{ in K nach } \vartheta \text{ in } ^\circ\text{C: } \vartheta = \left( \frac{T}{\text{K}} - 273 \right) ^\circ\text{C}$$

#### Anmerkung 1:

Für Temperaturdifferenzen sind die Zahlenwerte in der Kelvin- und Celsiuskala identisch. Bei thermodynamischen Berechnungen ist dennoch immer die Einheit K zu verwenden, da sonst die Einheitsgleichungen nicht mehr stimmen.

#### Anmerkung 2:

In der Alltagssprache werden die physikalischen Größen „Temperatur“ und „Wärme“ häufig verwechselt oder gar synonym verwendet. In der Thermodynamik ist die Unterscheidung äußerst wichtig:

**Temperatur ist eine Zustandsgröße mit dem Formelzeichen  $T$  und der Einheit K!**

**Wärme ist eine Energieform mit dem Formelzeichen  $Q$  und der Einheit J!**

Wegen der besonderen Eigenschaften der Energieform Wärme wird nicht das Formelzeichen  $E$  wie für andere Energieformen, sondern der Buchstabe  $Q$  verwendet!

Der **Druck  $p$**  ist definiert als der Quotient einer senkrecht auf eine Fläche wirkende Kraft  $F$  und der Größe  $A$  der beanspruchten Fläche (**Bild 2**). Er wird gemessen in Pa (Pascal). Es gilt:

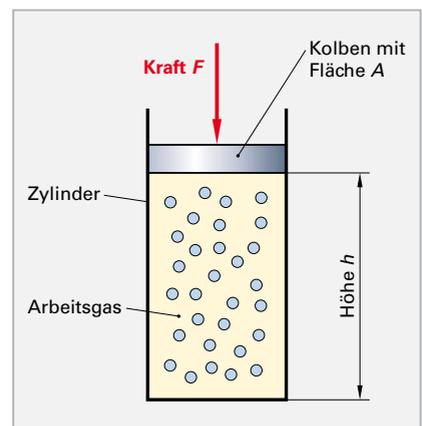
$$p = \frac{F}{A} \quad \text{mit: } [p] = \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = \text{Pa}$$

In der Technik verwendet man bei großen Drücken häufig statt der Einheit Pa die Einheit bar.

Für die Umrechnung gilt:  $1\text{ bar} = 10^5\text{ Pa}$

**Das Volumen  $V$**  ist die dritte wichtige Zustandsgröße. Bei thermodynamischen Systemen handelt es sich meist um Maschinen, bei denen das Arbeitsmittel in gasförmigem Zustand vorliegt. Der Raum, der dem Arbeitsgas zur Verfügung steht, ist das Volumen  $V$  in  $\text{m}^3$ . Für das Volumen des Gases in einem Zylinder gilt (**Bild 2**):

$$V = A \cdot h \quad \text{in } \text{m}^3$$

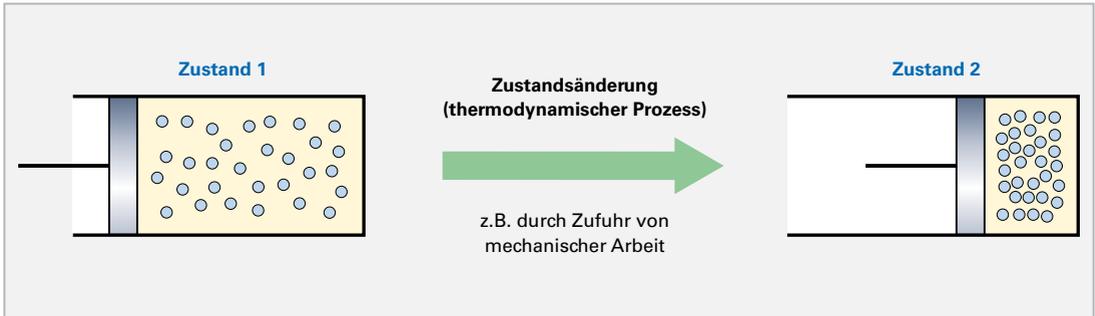


**Bild 2: Druck  $p$  und Volumen  $V$**

Häufig wird das Volumen auch in  $\text{dm}^3 \triangleq \text{l}$  (Liter) oder in  $\text{cm}^3$  angegeben. Dann muss die Umrechnung in die Basiseinheit  $\text{m}^3$  erfolgen. Es gilt:  $1 \text{ m}^3 = 10^3 \text{ dm}^3 = 10^6 \text{ cm}^3$ .

### Thermodynamische Prozesse → Zustandsänderungen

Ein thermodynamisches System befindet sich im Gleichgewicht, wenn sich seine Zustandsgrößen zeitlich nicht verändern und räumlich nicht verschieden sind. Für das Gas in **Bild 1**, das sich im Zustand 1 befindet, bedeutet dies, dass es genau dann in einem Gleichgewichtszustand ist, wenn die Zustandsgrößen Temperatur  $T$ , Druck  $p$  und Volumen  $V$  konstant sind und wenn die Temperatur  $T$  und der Druck  $p$  im gesamten System an jeder Stelle den gleichen Wert haben. Beobachtungen zeigen, dass jedes thermodynamische System einem solchen Gleichgewichtszustand zustrebt und in diesem auch verbleibt, solange es von außen nicht beeinflusst wird.



**Bild 1: Zustandsänderung oder thermodynamischer Prozess durch Zufuhr von  $W_{\text{mech}}$**

Das System bleibt also im Gleichgewichtszustand, bis man von außen in das System eingreift. Der Übergang eines thermodynamischen Systems von einem Zustand 1 in einen anderen Zustand 2 wird Zustandsänderung oder thermodynamischer Prozess genannt (Bild 1). Zustandsänderungen werden durch mechanische oder energetische Einwirkung auf das System hervorgerufen, indem physikalische Größen die Systemgrenzen überschreiten und dadurch Zustandsänderungen auslösen. Solche physikalischen Größen, die in der Lage sind, Systemgrenzen zu überwinden, nennt man Prozessgrößen (**Tabelle 1**).

Zustandsänderungen oder thermodynamische Prozesse sind dynamische Vorgänge, die durch Prozessgrößen ausgelöst werden, d. h. durch Zu- oder Abfuhr von mechanischer Arbeit oder von Wärme.

**Tabelle 1: Zustandsgrößen und Prozessgrößen**

Zustandsgrößen im Zustand 1:	Prozessgrößen:	Zustandsgrößen im Zustand 2:
$p_1, T_1, V_1$	$Q_{12}$ Austausch von Wärmeenergie $W_{12}$ Zu- bzw. Abfuhr von mechanischer Arbeit	$p_2, T_2, V_2$
<b>Stationärer Zustand</b> → <b>Gleichgewicht 1</b>	<b>Dynamischer Vorgang</b>	<b>Stationärer Zustand</b> → <b>Gleichgewicht 2</b>

- Prozessgrößen treten nur während einer Zustandsänderung bzw. eines Prozesses auf.
- Die Indizierung der Prozessgrößen ( $Q_{12}$  bzw.  $W_{12}$ ) bedeutet, dass diese Wärmeenergie oder mechanische Arbeit notwendig ist, um das System vom Zustand 1 in den Zustand 2 zu bringen.
- Prozessgrößen sind richtungsabhängig, d. h. für ihren Wert ist es entscheidend, ob sie dem System zugeführt oder vom System abgegeben werden.

Dabei gelten folgende Definitionen:

- Alle Prozessgrößen, die in das System hineinfließen, werden positiv gezählt.
- Alle Prozessgrößen, die aus dem System herausfließen, werden negativ gezählt.

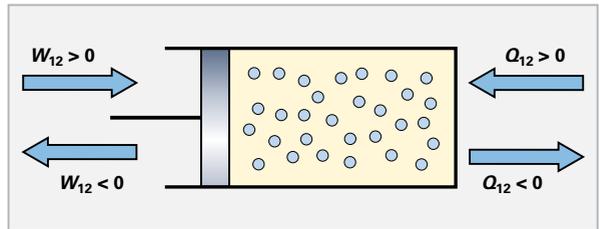
In **Bild 1** ist die Vorzeichenregelung für thermodynamische Prozessgrößen anschaulich dargestellt.

Wärme bzw. mechanische Arbeit wird dem System zugeführt:

$$Q_{12} > 0 \quad W_{12} > 0$$

Wärme bzw. mechanische Arbeit wird vom System abgegeben:

$$Q_{12} < 0 \quad W_{12} < 0$$



**Bild 1: Vorzeichenregelung für Prozessgrößen**

## Die Prozessgrößen

### Wärmeenergie $Q_{12}$

Dass die Wärmeenergie eine ganz spezielle Energieform ist, wurde zu Beginn dieses Kapitels schon erläutert. Die Berechnung einer Wärmeenergie, die von einem Körper aufgenommen oder abgegeben wird, ist jedoch relativ einfach, solange sich dieser Körper im festen oder flüssigen Aggregatzustand befindet. Für feste und flüssige Körper gilt für die zu- bzw. abgeführte Wärmeenergie  $\Delta Q$  oder besser  $Q_{12}$ :

$$Q_{12} = m \cdot c \cdot \Delta T$$

$$Q_{12} = m \cdot c \cdot (T_2 - T_1)$$

In dieser Formel bedeuten:

- $Q_{12}$ : einem Körper zugeführte oder vom Körper abgegebene Wärmeenergie
- $m$ : Masse des Körpers in kg
- $T_2$ : Endtemperatur des Körpers in K
- $T_1$  = Anfangstemperatur des Körpers in K
- $\Delta T = (T_2 - T_1)$  = Temperaturdifferenz in K
- $c$ : Spezifische Wärmekapazität eines Materials

Die spezifische Wärmekapazität  $c$  ist eine thermodynamische Eigenschaft, die angibt, welche Fähigkeit dieser Stoff besitzt thermische Energie zu speichern. Löst man die Gleichung der Wärmeenergie nach  $c$  auf, so lässt sich die Einheitengleichung aufstellen.

$$c = \frac{Q_{12}}{m \cdot (T_2 - T_1)} \rightarrow \text{Einheitengleichung: } [c] = \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

**Tabelle 1** zeigt einige ausgewählte Beispiele für feste und flüssige Körper:

<b>Tabelle 1: Beispiele für feste und flüssige Körper</b>			
<b>Feste Materialien:</b>	<b><math>c</math> in <math>\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}</math></b>	<b>Flüssige Materialien:</b>	<b><math>c</math> in <math>\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}</math></b>
Eis (bei $-10\text{ °C}$ )	2 220	Wasser (bei $20\text{ °C}$ )	4 182
Aluminium Al	899	Ethanol	2 430
Eisen Fe	466	Petroleum	2 140
Kupfer Cu	386	Quecksilber	139

Etwas komplizierter ist es, wenn die Wärmeenergie einem thermodynamischen System mit gasförmigem Arbeitsmittel zugeführt oder entzogen wird, denn für Gase gibt es zwei verschiedene spezifische Wärmekapazitäten, nämlich  $c_p$  und  $c_v$ . Man muss deshalb beachten, auf welche Weise der Wärmeaustausch abläuft:

- Läuft der Wärmeaustausch bei gleichem Druck ab, so muss zur Berechnung der zu- oder abgeführten Wärme  $Q_{12}$  die Größe  $c_p$  verwendet werden.
- Läuft der Wärmeaustausch bei gleichem Volumen ab, so muss zur Berechnung der zu- oder abgeführten Wärme  $Q_{12}$  die Größe  $c_v$  verwendet werden.

Die Berechnung von Wärmeenergien in thermodynamischen Systemen mit gasförmigen Arbeitsmitteln wird in den folgenden Kapiteln ausführlich behandelt!

### Mechanische Arbeit $W_{12}$

Was man unter der mechanischen Arbeit  $W$  versteht und wie man diese Größe berechnet ist bereits aus der Mechanik bekannt. Sie ist das Produkt aus einer Kraft  $F$ , die entlang einer Wegstrecke  $\Delta s$  ausgeübt wird. Dies gilt selbstverständlich auch in einem thermodynamischen System (**Bild 1**). Damit das System vom Zustand 1 in den Zustand 2 übergeführt wird, muss die mechanische Arbeit  $W_{12}$  zugeführt werden. Diese mechanische Arbeit kann in allgemeiner Form somit wie folgt berechnet werden:

$$W_{12} = F \cdot \Delta s \quad (\text{Gl. 1})$$

Für die Zustandsgröße Druck  $p$  wurde schon gezeigt, dass sie als der Quotient aus Kraft und Fläche definiert ist.

$$p = \frac{F}{A} \rightarrow F = p \cdot A \quad (\text{Gl. 2})$$

In Bild 1 kann man erkennen, dass die Kraft  $F$  den Kolben mit der Querschnittsfläche  $A$  verschiebt und so eine Volumenänderung  $\Delta V = V_2 - V_1$  bewirkt. Diese Volumenänderung kann auch aus der Querschnittsfläche des Kolbens und der zurückgelegten Strecke  $\Delta s$  berechnet werden.

$$\Delta V = A \cdot \Delta s \rightarrow \Delta s = \frac{\Delta V}{A} \quad (\text{Gl. 3})$$

Setzt man Gleichung 2 und Gleichung 3 in Gleichung 1 ein, so ergibt sich:

$$W_{12} = p \cdot A \cdot \frac{\Delta V}{A} = p \cdot \Delta V = p \cdot (V_2 - V_1)$$

Diese Gleichung liefert zwar den richtigen Zahlenwert für die umgesetzte mechanische Arbeit  $W_{12}$ , aber das falsche Vorzeichen. Weil das Volumen  $V_2$  kleiner ist als das Volumen  $V_1$  ergibt sich für die Differenz  $\Delta V = V_2 - V_1$  ein negativer Wert und dadurch ebenfalls ein negativer Wert für  $W_{12}$ . Das Volumen des Systems kann sich jedoch nur verkleinern, wenn an dem System von außen Arbeit verrichtet wird, d. h. dem System mechanische Arbeit zugeführt wird.

Die Definition der Prozessgrößen wurde jedoch so festgelegt, dass alle von außen in das System fließenden Größen ein positives Vorzeichen haben. Damit Zahlenwert und Vorzeichen stimmen, muss der Gleichung deshalb noch ein negatives Vorzeichen zugefügt werden. Es ergibt sich somit für die mechanische Arbeit  $W_{12}$ :

$$W_{12} = -p \cdot \Delta V = -p \cdot (V_2 - V_1)$$

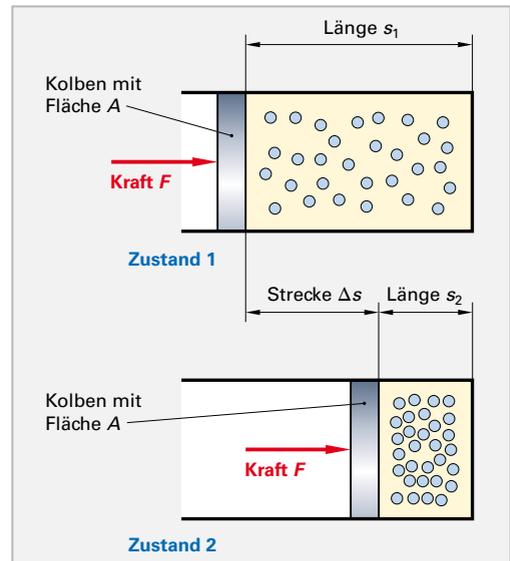


Bild 1: Mechanische Arbeit  $W_{12}$

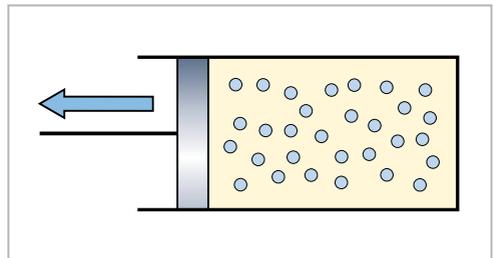
**Anmerkung**

Die Gleichung gilt in der vorliegenden Form nur für den Fall, dass der Druck  $p$  konstant bleibt, also für isobare Prozesse. Wie wir später sehen werden, muss diese Gleichung für andere thermodynamische Prozesse jeweils angepasst werden.

**Alles verstanden?**

- Nennen Sie die drei wichtigsten thermischen Zustandsgrößen und geben Sie deren Formelbuchstaben und Basiseinheiten an!
- Erläutern Sie die Bedingungen, unter denen sich ein thermodynamisches System im Gleichgewicht befindet!
- Formulieren Sie mit eigenen Worten, welche Aussage mit Hilfe der spezifischen Wärmekapazität für einen bestimmten Stoff getroffen werden kann!
- Vergleichen Sie die Tabellenwerte aus Tabelle 1 von Seite 13 und geben Sie jeweils den festen und den flüssigen Stoff an, der sich am besten zur Speicherung von Wärmeenergie eignet!

5. Das in **Bild 1** dargestellte thermodynamische System mit beweglichem Kolben gibt mechanische Arbeit an die Umgebung ab, indem sich der Kolben nach links bewegt. (Fachmännisch ausgedrückt sagt man: Es verrichtet Arbeit an der Umgebung!)



**Bild 1: Thermodynamisches System**

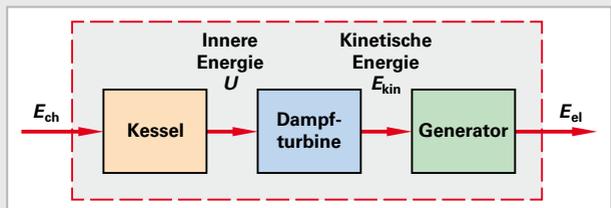
- Geben Sie an, welches Vorzeichen  $W_{12}$  haben muss!
- Stellen Sie Hypothesen auf, welche Veränderungen die thermischen Zustandsgrößen in diesem System erfahren werden! Begründen Sie Ihre Hypothesen!

Volumen $V$ wird größer:	<input type="radio"/>	Volumen $V$ bleibt gleich:	<input type="radio"/>	Volumen $V$ wird kleiner:	<input type="radio"/>
Druck $p$ steigt:	<input type="radio"/>	Druck $p$ bleibt gleich:	<input type="radio"/>	Druck $p$ sinkt:	<input type="radio"/>
Temperatur $T$ steigt:	<input type="radio"/>	Temperatur $T$ bleibt gleich:	<input type="radio"/>	Temperatur $T$ sinkt:	<input type="radio"/>

(Wir werden später sehen, dass bei dieser Aufgabe für  $p$  und  $T$  verschiedene Lösungen möglich sind!)

**1.1.4 Aufgaben zu thermodynamischen Systemen und Prozessen**

1. In **Bild 2** ist stark vereinfacht ein Kohlekraftwerk in Systemdarstellung zu sehen. Klassifizieren Sie sowohl das Gesamtsystem als auch die Subsysteme nach der Art ihres Durchsatzes!



**Bild 2: Kohlekraftwerk in Systemdarstellung**

2. Analysieren Sie die im Folgenden angegebenen technischen Systeme, definieren Sie die Systemgrenzen und klassifizieren Sie sie nach der Art des Durchsatzes:

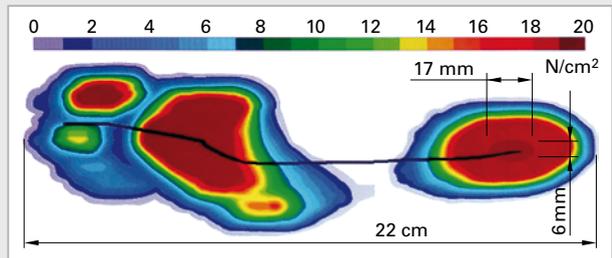
Windenergieanlage (WEA) – Kfz mit Verbrennungsmotor – Kfz mit Elektroantrieb – Heizkörper – Kühlschrankschrank – Turbine eines Wasserkraftwerks – Akkupack eines Pedelects – Raumstation ISS

3. Führen Sie folgende Umrechnungen durch:

- alle Volumina in  $m^3$ :  $125\text{ cm}^3$ ;  $4500\text{ mm}^3$ ;  $0,35\text{ dm}^3$ ;  $5,2 \cdot 10^3\text{ cm}^3$ ;  $1,5\text{ l}$
- alle Drücke in Pa:  $2,2\text{ bar}$ ;  $150\text{ bar}$ ;  $4,6 \cdot 10^6\text{ N/m}^2$ ;  $1,3\text{ N/mm}^2$ ;  $1013\text{ hPa}$
- alle Temperaturen in K:  $-25\text{ °C}$ ;  $412\text{ °C}$ ;  $273\text{ °C}$ ;  $0\text{ °C}$

4. Die **Ganganalyse** ist ein technisch-wissenschaftliches Verfahren zur Untersuchung der natürlichen Fortbewegungsart des Menschen. Dabei misst man unter anderem die Druckverteilung unter der Fußsohle. **Bild 1** zeigt die Druckverteilung unter dem linken Fuß einer Frau beim langsamen Gehen.

- 4.1 Identifizieren Sie aus dem Bild die Bereiche der höchsten Druckbelastung und rechnen Sie die auftretenden Drücke in Pa und in bar um!
- 4.2 Vergleichen Sie diese Werte mit dem Bodendruck eines Krans, dessen Masse von 18 t sich auf eine Auflagefläche von 1,5 m<sup>2</sup> verteilt!
- 4.3 Schätzen Sie ab, welche Kraft auf den höchstbelasteten Flächenbereich an der Ferse wirkt!



**Bild 1: Druckverteilung an einer Fußsohle**

5. Ein Schnellkochtopf (**Bild 2**) wird auf einem Induktionskochfeld aufgeheizt.

- 5.1 Geben Sie an, um welchen Systemtyp es sich dabei handelt!
- 5.2 Begründen Sie, warum sich das System während der Aufheizphase nicht im Gleichgewichtszustand befindet!
- 5.3 Erläutern Sie, welche Systemveränderungen stattfinden, wenn das Überdruckventil öffnet!
- 5.4 Beschreiben Sie eine Situation, in der sich das System im Gleichgewicht befindet!



**Bild 2: Schnellkochtopf**

6. Mit einem hydraulischen Wagenheber (**Bild 3**) soll eine Masse von  $m = 1,8 \text{ t}$  angehoben werden. Der zulässige Maximaldruck im Wagenheber ist mit  $p_{\text{max}} = 45 \text{ bar}$  angegeben, der Durchmesser des hydraulischen Kolbens beträgt 85 mm und der maximale Hub  $\Delta h = 190 \text{ mm}$ .

- 6.1 Überprüfen sie rechnerisch, ob der Wagenheber für diese Belastung ausgelegt ist!
- 6.2 Berechnen Sie die maximale Arbeit  $W_{\text{max}}$ , die pro Hubvorgang verrichtet werden kann!



**Bild 3: Hydraulischer Wagenheber**

## 1.2 Die Gasgesetze

Die Systeme der Thermodynamik arbeiten in den allermeisten Fällen mit gasförmigen Stoffen. Damit die Gasgesetze möglichst einfach zu beschreiben sind, setzen wir im Folgenden voraus, dass sich unsere Arbeitsgase wie ein *ideales Gas* verhalten. *Reale Gase*, wie beispielsweise Luft, Sauerstoff, Stickstoff oder Wasserdampf verhalten sich in weiten Temperatur- und Druckbereichen in guter Näherung wie ein ideales Gas.

Der Begriff *ideales Gas* beschreibt eine Modellvorstellung, in der man von folgenden Annahmen ausgeht:

- Alle Gasteilchen sind ausdehnungslose, starre und voll-elastische Massepunkte.
- Es existiert in einem Volumen eine sehr große Zahl von Teilchen, d.h. viele Zehnerpotenzen.
- Auf diese Teilchen wirken keinerlei Kräfte, weder von außen noch untereinander.
- Jedes Gasteilchen bewegt sich mit konstanter Geschwindigkeit geradlinig in eine beliebige Richtung, bis es mit einem anderen Teilchen zusammen- oder an die Wand des Behälters stößt.
- Durch die Zusammenstöße mit anderen Teilchen oder der Behälterwand wird das Teilchen in eine andere Richtung abgelenkt und dabei beschleunigt oder abgebremst.

Dieses Modell ist zwar eine starke Vereinfachung, aber es lassen sich mit ihm viele thermodynamische Prozesse von Gasen verstehen und mathematisch beschreiben.

### Wichtig:

Die folgenden Gasgesetze gelten nicht für offene Systeme, d. h. die Masse  $m$  bzw. die Stoffmenge  $n$  des im System vorhandenen Gases darf sich nicht verändern!

## 1.2.1 Die Gesetze von Boyle-Mariotte, Amontons und Gay-Lussac

Ab der Mitte des 17. Jahrhunderts begannen viele Wissenschaftler weltweit daran, das Verhalten von gasförmiger Materie unter verschiedenen Bedingungen zu erforschen.

### Gesetz von Boyle-Mariotte

Die erste Entdeckung machten unabhängig voneinander der Ire *Robert Boyle* (1627 – 1692) und der Franzose *Edme Mariotte* (ca. 1620 – 1684). Sie untersuchten, wie sich der Druck  $p$  einer bestimmten Gasmenge verhält, wenn man das Volumen  $V$  verändert und dabei die Temperatur  $T$  konstant hält. Sie fanden heraus, dass  $p$  und  $V$  sich zueinander umgekehrt proportional verhalten, d. h. wenn man das Volumen halbiert, verdoppelt sich der Druck und umgekehrt. Das bedeutet, dass das Produkt aus Druck mal Volumen immer den gleichen Wert hat, solange die Temperatur dabei konstant ist.

Haben zu Beginn eines Versuchs im Zustand 1 die Zustandsgrößen Druck  $p$  und Volumen  $V$  die Werte  $p_1$  und  $V_1$  und am Ende des Experiments im Zustand 2 die Werte  $p_2$  und  $V_2$ , so gilt:

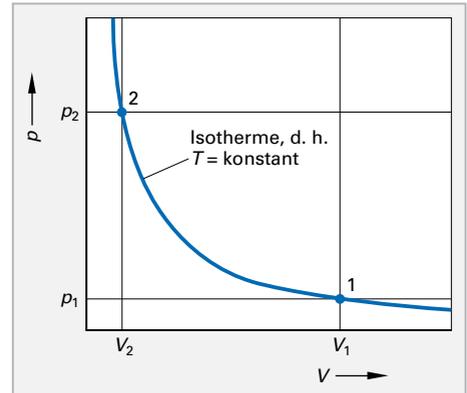
$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2 \quad \text{oder} \quad p \cdot V = \text{konstant (wenn } T = \text{konstant)}$$

Zeichnet man die Ergebnisse einer Messreihe in ein  $V$ - $p$ -Diagramm ein, so ergibt sich ein Hyperbelast (**Bild 1**). Da alle Punkte auf diesem Hyperbelast die gleiche Temperatur haben, nennt man diesen Kurvenzug *Isotherme*<sup>1</sup>.

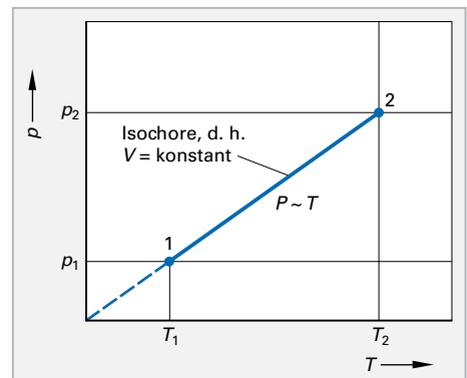
### Gesetz von Amontons

Nur wenige Jahre nach der Entdeckung von *Boyle* und *Mariotte* fand der Franzose *Guillaume Amontons* (1663 – 1705) ein weiteres wichtiges Gesetz. Er führte einer bestimmten Gasmenge in einem Behälter mit konstantem Volumen Wärmeenergie zu, so dass sich die Temperatur des Gases in diesem Behälter erhöhte. Durch die Messung des Druckes  $p$  und der Temperatur  $T$  konnte er mit seinen Experimenten eine direkte Proportionalität zwischen diesen beiden Größen nachweisen, solange man das Volumen  $V$  nicht verändert. Zur graphischen Auswertung einer solchen Versuchsreihe überträgt man die Messwerte in ein  $T$ - $p$ -Diagramm und erhält durch Verbindung der Messpunkte eine Gerade (**Bild 2**), die *Isochore*<sup>2</sup> genannt wird. Aus der Proportionalität  $p \sim T$  lässt sich folgende Gleichung erstellen:

$$p = k \cdot T$$



**Bild 1:**  $V$ - $p$ -Diagramm einer isothermen Zustandsänderung



**Bild 2:**  $T$ - $p$ -Diagramm einer isochoren Zustandsänderung

<sup>1</sup> Iso (griechisch): gleich; Therme (griechisch): Temperatur.

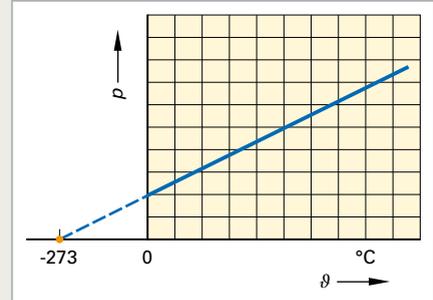
<sup>2</sup> Chore (griechisch): Raum.

Umgeformt nach der Konstanten  $k$  ergibt sich das Gesetz von *Amontons*:

$$\frac{p}{T} = k \quad \text{oder:} \quad \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \quad (\text{wenn } V = \text{konstant})$$

**Anmerkung:**

Durch Verlängerung der experimentell ermittelten Geraden bis in den Ursprung des Diagramms kann auf graphische Weise gezeigt werden, dass es einen absoluten Temperaturnullpunkt geben muss. Skaliert man die Temperaturachse statt in  $K$  mit  $^{\circ}C$ , so kann auch der Wert des absoluten Temperaturnullpunktes auf der Celsius-Skala abgeschätzt werden (**Bild 1**). Dieser Nullpunkt kann jedoch niemals erreicht werden.

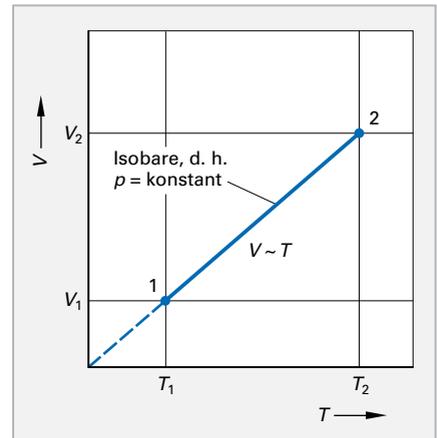


**Bild 1: Abschätzung des absoluten Temperaturnullpunktes**

**Gesetz von Gay-Lussac**

Wiederum unabhängig voneinander entdeckten zwei weitere französische Forscher ein drittes wichtiges Gasgesetz. Im Jahr 1787 veröffentlichten *Jacques Charles* (1746 – 1823) und im Jahre 1802, also 15 Jahre nach *Jacques Charles*, auch *Joseph Louis Gay-Lussac* (1778 – 1850) den Zusammenhang von Volumen  $V$  und Temperatur  $T$  bei konstantem Druck  $p$ . Sie stellten fest, dass auch die Temperatur  $T$  und das Volumen  $V$  zueinander direkt proportional sind, solange man den Druck  $p$  nicht verändert.

In einem Zylinder mit beweglichem Kolben befindet sich eine bestimmte Menge Gas. Erhöht man durch Zufuhr von Wärmeenergie die Temperatur des Gases im System, so bleibt der Druck nur konstant, wenn sich proportional zur Temperatur  $T$  auch das Volumen  $V$  vergrößert. Trägt man die Messwerte der Versuchsreihe in ein  $T$ - $V$ -Diagramm ein, so ergibt sich auch bei diesem Experiment eine Gerade (**Bild 2**), eine sogenannte Isobare<sup>1</sup>. Aus der Proportionalität  $V \sim T$  lässt sich folgende Gleichung erstellen:



**Bild 2: T-V-Diagramm einer isobaren Zustandsänderung**

$$V = k \cdot T$$

Umgeformt nach der Konstanten  $k$  ergibt sich das Gesetz von *Gay-Lussac*:

$$\frac{V}{T} = k \quad \text{oder:} \quad \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (\text{wenn } p = \text{konstant})$$

**Anmerkung:**

Auch in diesem Diagramm kann durch Verlängerung der experimentell ermittelten Geraden bis zum Volumen Null (ein negatives Volumen ist nicht möglich!) und Skalierung der Temperaturachse mit der  $^{\circ}C$ -Skala auf graphische Weise der absolute Temperaturnullpunkt abgeschätzt werden.

<sup>1</sup> Baros (griechisch): Druck.

**Alles verstanden?**

1. Formulieren Sie für das physikalische Modell „ideales Gas“ die Annahmen, die in diesem Modell getroffen wurden!
2. Stellen Sie in einer Tabelle die Formeln der Gasgesetze von *Boyle-Mariotte*, *Amontons* und *Gay-Lussac* zusammen und lösen das Gesetz von *Boyle-Mariotte* nach  $V_2$  auf, die Gleichung von *Amontons* nach  $p_2$  und die Gleichung von *Gay-Lussac* nach  $T_2$ !
3. Begründen Sie, warum man aus den Gesetzen von *Amontons* und *Gay-Lussac* folgern kann, dass es einen absoluten Temperaturnullpunkt geben muss und dass man diesen Wert in °C auch mit relativ guter Genauigkeit ermitteln kann.

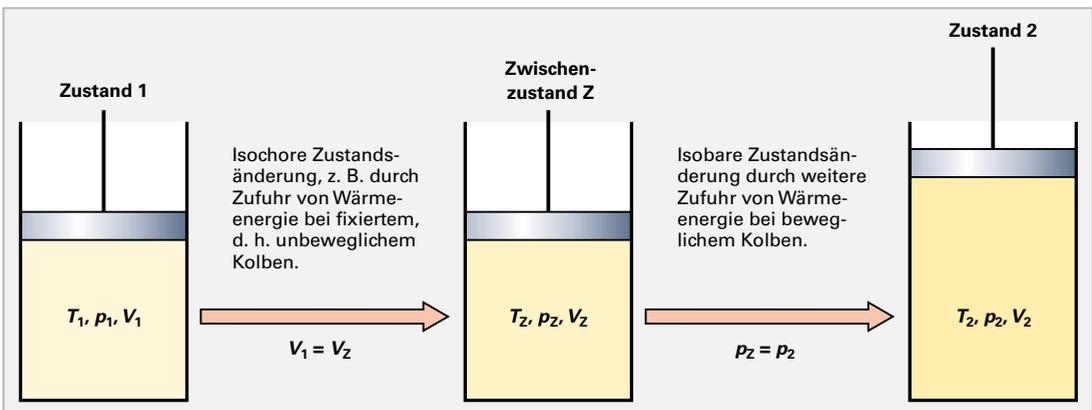
**1.2.2 Die thermische Zustandsgleichung für ideale Gase**

Die Entdeckung der drei im vorigen Abschnitt dargestellten Gasgesetze waren wichtige Meilensteine bei der Erforschung des Verhaltens von gasförmiger Materie. Aber keines dieser Gesetze ist allgemeingültig, denn für ihre Gültigkeit muss jeweils eine der drei thermischen Zustandsgrößen konstant gehalten werden. Eine allgemein gültige Zustandsgleichung muss jedoch so formuliert sein, dass sie jede beliebige Zustandsänderung beschreiben kann, auch wenn sich dabei alle drei thermischen Zustandsgrößen ändern. Allerdings kann aus den drei bereits behandelten Spezialfällen die thermische Zustandsgleichung für ideale Gase, häufig auch allgemeine Gasgleichung genannt, hergeleitet werden.

Der einfachste Weg, diese Herleitung durchzuführen, eröffnet sich, wenn man in einer Zustandsänderung zwei der drei Spezialfälle kombiniert. Wir benutzen hierzu die Gesetze von *Amontons* und *Gay-Lussac* und führen gedanklich eine zweistufige Zustandsänderung durch. Dabei muss allerdings sichergestellt werden, dass die Masse des Gases in dem betrachteten System konstant bleibt.

Wir führen die Zustandsänderung vom Zustand 1 in den Zustand 2 also in zwei Schritten durch (**Bild 1**).

- 1. Schritt: Isochore Zustandsänderung (*Amontons*) vom Zustand 1 in einen Zwischenzustand Z
- 2. Schritt: Isobare Zustandsänderung (*Gay-Lussac*) in den Endzustand 2



**Bild 1: Zweistufige Zustandsänderung von Zustand 1 über Zustand Z nach Zustand 2**

Im ersten Schritt dieser zweistufigen Zustandsänderung, also der isochoren Wärmezufuhr von Zustand 1 zum Zwischenzustand Z, gilt das Gesetz von *Amontons*:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_z}{T_z} \quad \text{mit: } V_1 = V_z$$

Umgeformt nach  $T_z$  ergibt sich daraus Gleichung 1:

$$T_z = \frac{p_z \cdot T_1}{p_1} \quad \text{(Gl.1)}$$

Nun folgt im zweiten Schritt die isobare Zustandsänderung von Zustand Z nach Zustand 2:

$$\frac{V_Z}{T_Z} = \frac{V_2}{T_2} \quad \text{mit: } p_Z = p_2$$

Löst man diese Gleichung nach  $T_Z$  auf, so ergibt sich Gleichung 2:

$$T_Z = \frac{V_Z \cdot T_2}{V_2} \quad (\text{Gl.2})$$

Durch Gleichsetzen von Gleichung 1 und Gleichung 2 erhält man:

$$\frac{p_Z \cdot T_1}{p_1} = \frac{V_Z \cdot T_2}{V_2}$$

In dieser Gleichung kann man  $p_Z$  und  $V_Z$  wie folgt ersetzen:  $p_Z = p_2$  und  $V_Z = V_1$

$$\frac{p_2 \cdot T_1}{p_1} = \frac{V_1 \cdot T_2}{V_2}$$

Nach einer weiteren Umformung erhält man die erste Form der thermischen Zustandsgleichung für ideale Gase.

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

Diese Gleichung besagt, dass der Wert  $p \cdot V/T$  für ein ideales Gas immer den gleichen Wert hat, unabhängig davon, in welchem Zustand sich dieses Gas befindet.

Es lässt sich jedoch experimentell feststellen, dass der Wert dieser Konstanten von den Systembedingungen abhängig ist, nämlich:

- direkt proportional von der Masse  $m$  des im System vorhandenen Gases.
- der Art des untersuchten Gases, d. h. von der spezifischen Gaskonstanten  $R_i$ .

Setzt man diese beiden Größen in die allgemeine Gasgleichung ein, so ergibt sich:

$$\frac{p \cdot V}{T} = m \cdot R_i$$

Durch Umformung erhält man die zweite Form der thermischen Zustandsgleichung für ideale Gase:

$$p \cdot V = m \cdot R_i \cdot T$$

Aus dieser Gleichung kann man durch Umformung und Aufstellung der Einheitengleichung die Einheit der spezifischen Gaskonstanten  $R_i$  ermitteln.

$$R_i = \frac{p \cdot V}{m \cdot T} \quad \text{Die Einheit von } R_i \text{ ist somit: } [R_i] = \frac{\text{Pa} \cdot \text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{K}} = \frac{\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot \text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{K}} = \frac{\text{Nm}}{\text{kg} \cdot \text{K}} = \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Möchte man die zweite Form der allgemeinen Gasgleichung in eine Form bringen, die von der jeweiligen Art des Gases unabhängig ist, so muss man in dieser Gleichung die physikalische Größe Masse  $m$  in kg eliminieren und durch die Größe der Stoffmenge  $n$  in Mol ersetzen. Dazu benötigt man das aus der Chemie bekannte Gesetz von *Avogadro*. Der italienische Wissenschaftler *Amadeo Avogadro* (1776 – 1856) leitete dieses Gesetz aus den Forschungsarbeiten von *Gay-Lussac* ab. Er fasste Atome und Moleküle als „kleinste Teilchen“ zusammen und formulierte: