



EUROPA-FACHBUCHREIHE  
für FOS/BOS Bayern

# Technologie

## FOS/BOS Bayern

**Jahrgangsstufe 12**

**Ausbildungsrichtung Technik**

**1. Auflage**

VERLAG EUROPA-LEHRMITTEL · Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG  
Düsselberger 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 anschaulich. 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 ansprechen, 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)

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

<b>5.2.3 Aufgaben zu Anthropogener Treibhauseffekt und CO<sub>2</sub> . . . . .</b>	<b>244</b>
<b>5.3 Folgen durch den Einsatz fossiler Energieträger und die damit verbundenen Konsequenzen . . . . .</b>	<b>245</b>
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
<b>5.4 Bereiche der erneuerbaren Energien. . . . .</b>	<b>253</b>
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
<b>5.5 Vergleich von konventionellen Energieträgern und erneuerbaren Energien. . . . .</b>	<b>275</b>
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 Konzeptsätze . . . . .	288
5.5.9 Aufgaben . . . . .	290
<b>6 Umwelttechnik . . . . .</b>	<b>291</b>
<b>6.1 Umweltschutz und Umwelttechnik . . . . .</b>	<b>291</b>
6.1.1 Allgemeine Einführung . . . . .	291
6.1.2 Umweltkonzepte und Umweltziele . . . . .	294
6.1.3 Aufgaben . . . . .	296
<b>6.2 Anthropogene Schadstoffe . . . . .</b>	<b>296</b>
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
<b>6.3 Nachweis- und Messverfahren – Analytik . . . . .</b>	<b>316</b>
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
<b>6.4 Maßnahmen zur Reduzierung der Umweltbelastungen . . . . .</b>	<b>328</b>
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 Gewässerreinhalterung . . . . .	342
6.4.6 Aufgaben . . . . .	348
<b>7 Elektronische Bauelemente . . . . .</b>	<b>349</b>
<b>7.1 Grundlagen der Gleichstromtechnik. . . . .</b>	<b>349</b>
7.1.1 Der einfache Gleichstromkreis . . . . .	350
7.1.2 Grundgrößen der Elektrotechnik . . . . .	351
<b>7.2 Allgemeines zu elektronischen Schaltungen . . . . .</b>	<b>356</b>
<b>7.3 Bauelement Widerstand R . . . . .</b>	<b>358</b>
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
<b>7.4 Bauelement Kondensator . . . . .</b>	<b>367</b>
7.4.1 Aufbau und Bauarten von Kondensatoren . . . . .	367
7.4.2 Physikalische Eigenschaften eines Kondensators . . . . .	368
7.4.3 Aufgaben . . . . .	374
<b>7.5 Bauelement Spule . . . . .</b>	<b>375</b>
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
<b>7.6 Bauelement Diode . . . . .</b>	<b>382</b>
7.6.1 Grundwissen Halbleiter . . . . .	382
7.6.2 Halbleiterdioden . . . . .	386
7.6.3 Schaltungen mit Dioden . . . . .	388
<b>7.7 Bauelement Transistor . . . . .</b>	<b>393</b>
7.7.1 Bipolare Transistoren . . . . .	393
7.7.2 Feldeffekt-Transistoren (FET) . . . . .	399
<b>7.8 Elektronische Schaltungen und Aufgaben . . . . .</b>	<b>401</b>
7.8.1 Transistor als Schalter . . . . .	401
7.8.2 Verschiedene Kippschaltungen . . . . .	402
7.8.3 Einstufiger NF-Verstärker in Emitterschaltung . . . . .	404
7.8.4 Gleichrichterschaltung mit Glättung der Ausgangsspannung . . . . .	405
<b>8 Systeme und Prozesse . . . . .</b>	<b>406</b>
<b>8.1 Grundlagen der Systemtheorie . . . . .</b>	<b>406</b>
8.1.1 Der Systembegriff . . . . .	406
8.1.2 System und Prozess . . . . .	410
8.1.3 Aufgaben . . . . .	412
<b>8.2 Darstellungsmethoden . . . . .</b>	<b>414</b>
8.2.1 Kontinuierliche Prozesse . . . . .	414
8.2.2 Diskrete Prozesse . . . . .	416
<b>8.3 Modellbildung mit Petri-Netzen . . . . .</b>	<b>417</b>
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
<b>8.4 Beispielaufgaben, Lösungen und Arbeitsaufträge . . . . .</b>	<b>431</b>
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
<b>8.5 Aufgaben . . . . .</b>	<b>438</b>
<b>9 Modellbildung und Simulation . . . . .</b>	<b>440</b>
<b>9.1 Einführung in die Modellbildung . . . . .</b>	<b>440</b>
9.1.1 Begriffe und Anwendungsbereiche . . . . .	440
9.1.2 Arbeitsschritte der Modellbildung . . . . .	442
<b>9.2 System Dynamics Notation . . . . .</b>	<b>446</b>
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: Gekoppelter Regelkreise . . . . .	455
9.2.8 Modellierungsbeispiel mit ausführlicher Lösung . . . . .	456
<b>9.3 Rechenverfahren (Integrationsverfahren) . . . . .</b>	<b>460</b>
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
<b>9.4 Wachstumsgrenzen . . . . .</b>	<b>466</b>
9.4.1 Begrenztes Wachstum . . . . .	466
9.4.2 Logistisches Wachstum . . . . .	468
<b>9.5 Modellierungsaufgaben . . . . .</b>	<b>471</b>
<b>10 Verbrennungsmotoren . . . . .</b>	<b>475</b>
<b>10.1 Kreisprozess der Wärmekraftmaschinen . . . . .</b>	<b>475</b>
10.1.1 Entwicklung und Prinzip . . . . .	475
10.1.2 Theorie der Wärmekraftmaschinen . . . . .	481
<b>10.2 Kreisprozesse von Otto- und Dieselmotor . . . . .</b>	<b>487</b>
10.2.1 Idealer Kreisprozess des Ottomotors . . . . .	487
10.2.2 Idealer Kreisprozess des Dieselmotors . . . . .	491
10.2.3 Vergleich der Konzepte . . . . .	495
<b>10.3 Technik der Motoren . . . . .</b>	<b>496</b>
10.3.1 Das Viertaktverfahren . . . . .	497
10.3.2 Steuerdiagramm, Indikatordiagramm und Kenngrößen . . . . .	501
10.3.3 Potential für Optimierungen . . . . .	504
<b>10.4 Maßnahmen zur Steigerung des Wirkungsgrades, der Wirtschaftlichkeit und der Umweltverträglichkeit . . . . .</b>	<b>507</b>
10.4.1 Drehmoment und Leistung . . . . .	507
10.4.2 Wirkungsgrad und Wirtschaftlichkeit . . . . .	510
10.4.3 Ökologie . . . . .	515
<b>11 Komplexe technische Systeme . . . . .</b>	<b>518</b>
<b>11.1 Beispiel 1: E-Bike oder Pedelec . . . . .</b>	<b>518</b>
<b>11.2 Beispiel 2: Kraftfahrzeug mit Verbrennungsmotor . . . . .</b>	<b>521</b>
<b>11.3 Beispiel 3: Windenergieanlagen (WEA) . . . . .</b>	<b>523</b>
<b>11.4 Beispiel 4: Heizkraftwerk . . . . .</b>	<b>525</b>
<b>11.5 Beispiel 5: Blockheizkraftwerk (BHKW) . . . . .</b>	<b>528</b>
<b>11.6 Beispiel 6: Mobile Krane . . . . .</b>	<b>529</b>
<b>Bildquellenverzeichnis . . . . .</b>	<b>531</b>
<b>Sachwortverzeichnis . . . . .</b>	<b>533</b>

## 1 Thermodynamik

In diesem Kapitel lernen Sie

- die verschiedenen Arten von thermodynamischen Systemen zu unterscheiden und deren Eigenarten zu erläutern.
- Zustands- und Prozessgrößen zu unterscheiden und deren Bedeutung für thermodynamische Systeme und Prozesse fachgerecht zu erklären.
- die unterschiedlichen Zustandsänderungen, die in thermodynamischen Systemen ablaufen können, zu analysieren, zu beschreiben, graphisch darzustellen und deren Kennzeichen zu erläutern.
- mit Hilfe der allgemeinen Gasgleichung und des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik die Prozesse in thermodynamischen Systemen zu berechnen.
- thermodynamische Kreisprozesse zu analysieren, zu zeichnen und zu berechnen.

### 1.1 Grundbegriffe der Thermodynamik

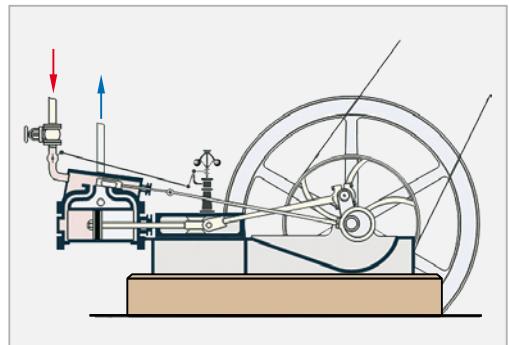
#### 1.1.1 Die Bedeutung der Thermodynamik

Die Energieversorgung der Bundesrepublik Deutschland befindet sich seit Beginn der 2000er Jahre in einem gewaltigen Umbruch, denn die regenerativen Energieträger Wind und Photovoltaik decken immer größere Anteile an der Stromversorgung ab. Dennoch wurde auch im Jahre 2017 die elektrische Energie der BRD zu über 70 Prozent in **Wärmekraftwerken** produziert. Ebenso ist ein Wandlungsprozess in der Kraftfahrzeugtechnik im Gange, der in den nächsten zwei Jahrzehnten die **Verbrennungsmotoren** allmählich durch Elektromotoren ersetzen wird. Trotz dieser epochalen technischen Umwälzungen wird die **Umwandlung von Wärme in mechanische Arbeit** noch für lange Zeit der wichtigste technische Prozess bleiben.

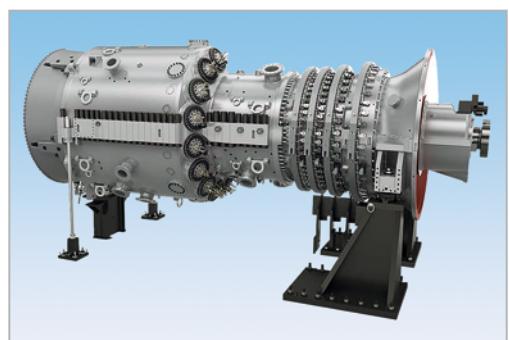
Mit der Untersuchung von energetischen Vorgängen bei der technischen Nutzung von Wärmeenergie haben sich Ingenieure und Physiker schon lange vor den Zeiten von James Watt beschäftigt. Ihm gelang es, durch seine Erfindungen in den 1780er Jahren den Wirkungsgrad der damaligen Dampfmaschinen (**Bild 1**) von 1 % auf über 3 % zu erhöhen. Diese Zahlen sind in unserer heutigen Zeit sehr bescheiden, aber in der damaligen Zeit verhalf diese revolutionäre Verbesserung von 200 % und die damit verbundene Einsparung von 66 % des Brennstoffes Kohle dem thermodynamischen System Dampfmaschine zum endgültigen Durchbruch. Letztlich wurde dadurch auch der Beginn der ersten industriellen Revolution ermöglicht.

Mehr als 220 Jahre nach James Watt bauen die Ingenieure von Siemens hocheffiziente Gasturbinen mit einer Leistung von 450 MW und einem kombinierten Gesamtwirkungsgrad von 61 % (**Bild 2**) und die Weiterentwicklung von thermodynamischen Systemen ist noch lange nicht zu Ende.

Die theoretischen Grundlagen für solche Forschungen liefert der Wissenschaftszweig der **Thermodynamik**. Der Begriff kommt aus dem altgriechischen und setzt sich zusammen aus den Wortteilen *thermós* (gr: θερμός), das bedeutet „warm“, und *dýnamis* (gr: δύναμις), das heißt „Kraft“. In die deutsche Sprache wurde er lange Zeit mit **Wärmelehre** übersetzt.



**Bild 1:** Doppelt wirkende Dampfmaschine mit Fliehkraftregler



**Bild 2:** Siemens Gasturbine 450 MW

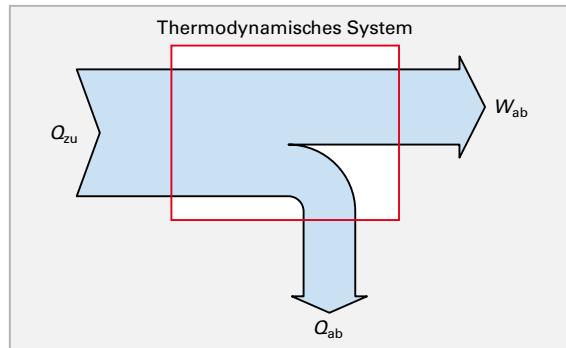
Die heutige Bedeutung als Grundlagenfach der Ingenieurwissenschaften beschreibt jedoch sehr viel umfassender und treffender der Ausdruck „**Allgemeine Energielehre**“. Es gibt eine Besonderheit bei der Nutzung der Energieform Wärme, die sie von allen anderen Energieformen unterscheidet. Elektrische Energie ( $E_{el}$ ) 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.

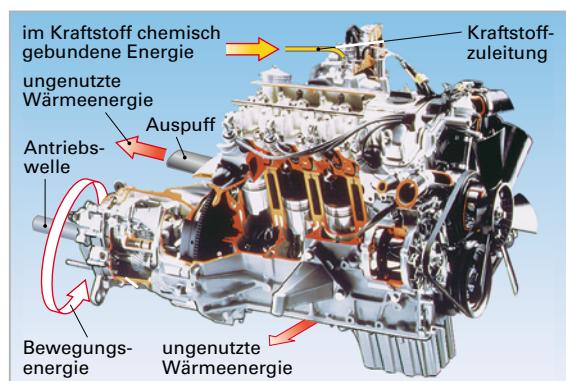
Die Ziele der Ingenieurwissenschaft Thermo-dynamik sind folgende:

- 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 Klimaanlagen
  - Heizungssystemen
  - Gasturbinen und Strahltriebwerken
  - Thermischen Energiespeichern
  - ...

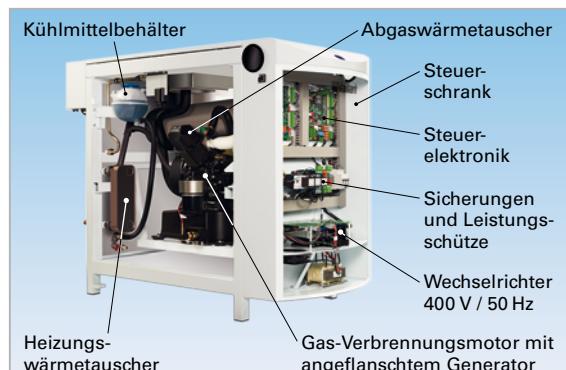
Aufgrund der Bedeutung für das Leben der Menschen in der heutigen Zeit gehören die Kenntnisse der Grundlagen der Thermodynamik zur technischen Allgemeinbildung junger Menschen.



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



**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:

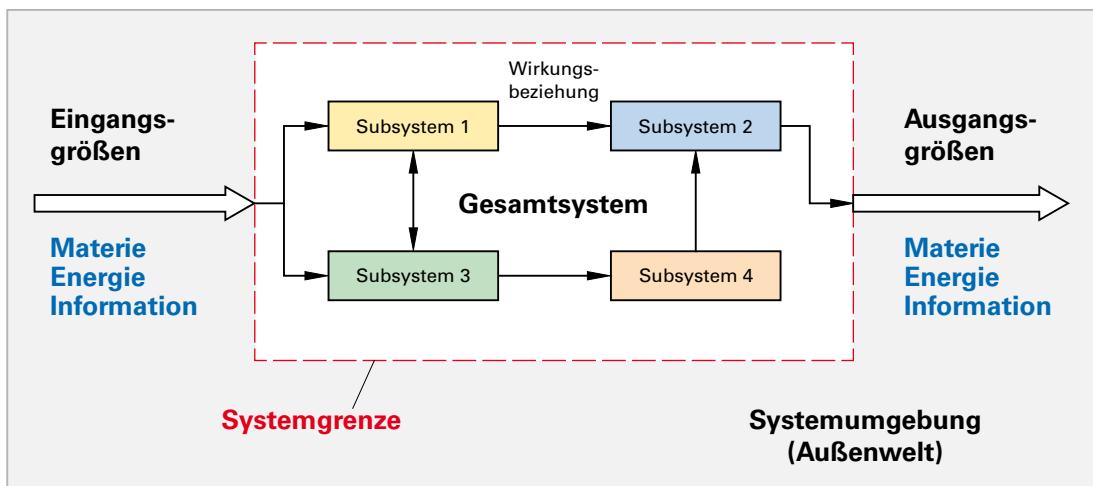
1. Überprüfen Sie rechnerisch die im Text genannten Prozentzahlen zu den Verbesserungen der Dampfmaschine von James Watt und stellen Sie dazu Überlegungen an, welche wirtschaftliche Bedeutung seine Erfindungen in der damaligen Zeit hatten!
2. Berechnen Sie die prozentuale Verbesserung der Effizienz von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

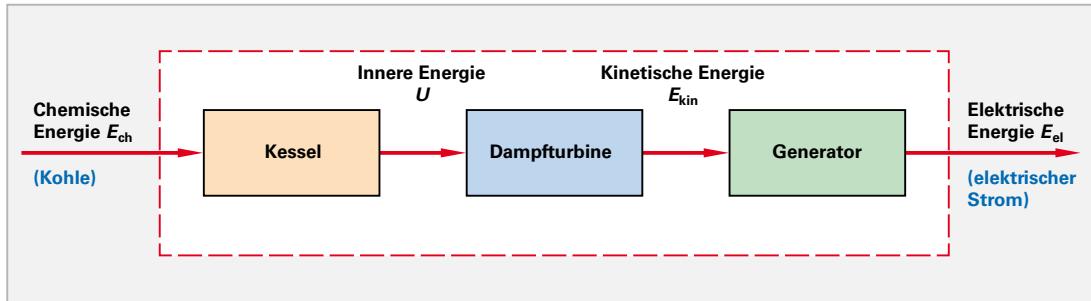


**Bild 1:** Modell eines technischen Systems

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**):



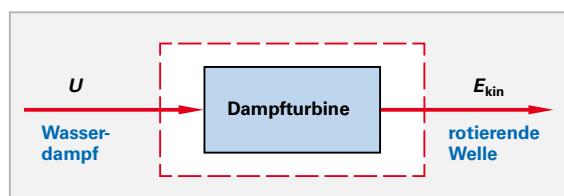
**Bild 1: Thermodynamisches technisches Gesamtsystem Kohlekraftwerk**

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 Gesamtumwandlungsprozess 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:

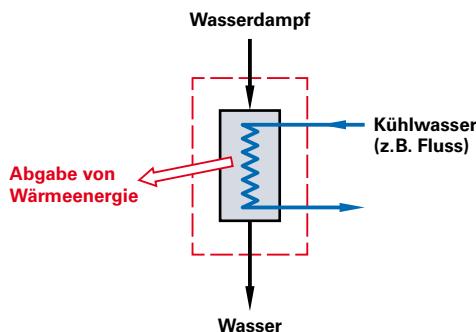
- Typ 1: Offene Systeme
- Typ 2: Geschlossene Systeme
- Typ 3: Adiabate Systeme
- Typ 4: Abgeschlossene Systeme

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.**

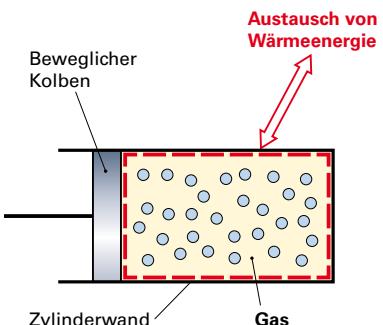
Beispiel:  
 Kondensator (Verflüssiger) in einem Dampfkraftwerk



#### Typ 2: Geschlossenes System

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

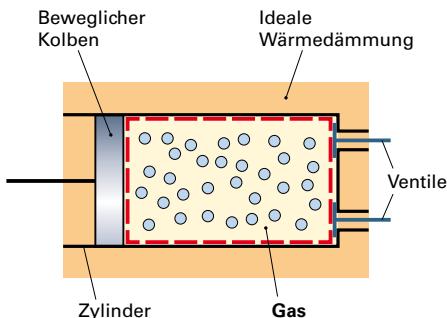
Beispiel:  
 Gasmenge in einem gasdichten Zylinder mit beweglichem Kolben



#### Typ 3: Adiabatisches System

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

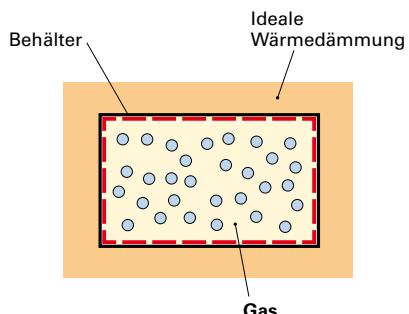
Beispiel:  
 Schnelle Kompression eines Gases im Zylinder eines Otto-Motors bei geschlossenen Ventilen.



#### 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 wärmegedämmten 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?