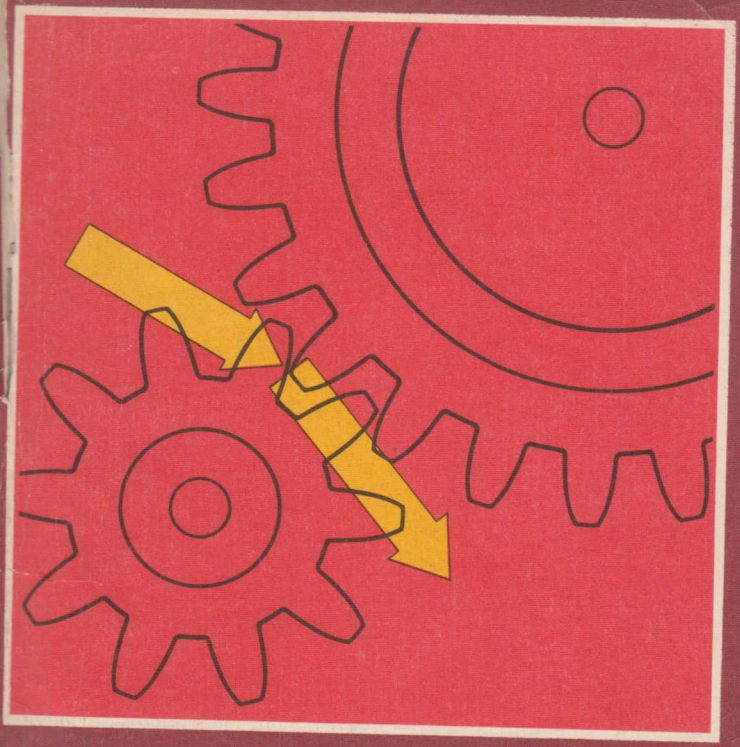
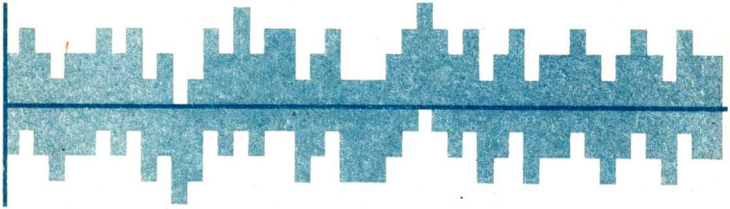


PHYSIK 11

PHYSIK

Lehrbuch für Klasse 11



Volk und Wissen
Volkseigener Verlag Berlin
1980

Autoren:

Dr. rer. nat. Wolfgang Scholz	Mechanik
Dr. paed. Hermann Armbrüster	Thermodynamik Kinetisch-statistische Betrachtungen
Dr.-Ing. Ulrich Müller	Thermodynamik Hauptsätze der Thermodynamik Thermodynamisches Verhalten der Stoffe
Dr. habil. Wolfgang Manthei	Optik Strahlenoptik Wellenoptik
Dr. sc. Hans-Joachim Wilke	Quantenhafte Absorption und Emission des Lichtes Welle – Teilchen – Verhalten bei Mikroobjekten

Redaktion: Günter Meyer

Vom Ministerium für Volksbildung der Deutschen Demokratischen Republik als Schulbuch bestätigt.

© Volk und Wissen Volkseigener Verlag, Berlin 1980
2. Auflage
Ausgabe 1980
Lizenz-Nr. 203/1000/80 (DN 02 11 63-2)
LSV 0681
Zeichnungen: Heinrich Linkwitz · Waltraud Schmidt · Rita Schüler
Einband: Manfred Behrend
Typografische Gestaltung: Hansmartin Schmidt
Printed in the German Democratic Republic
Gesamtherstellung: Grafischer Großbetrieb Völkerfreundschaft Dresden
Schrift: 9/10 p Gill Monotype
Redaktionsschluß: 15. 10. 1980
Bestell-Nr. 730 752 8
Schulpreis DDR: 3,10

Inhalt

Mechanik 7

Arbeit, Energie und Energieerhaltungssatz 8

1 Grundbegriffe der Kinematik und Dynamik 8
Kraft als Wechselwirkungsgröße 8
Das Wechselwirkungsgesetz 8
Statisches Gleichgewicht 9
Geschwindigkeit und Beschleunigung 10
Geschwindigkeit und Beschleunigung als Vektorgrößen 13
Das Grundgesetz der Dynamik 13

2 Mechanische Systeme 14

3 Mechanische Arbeit und Energie 15
Potentielle Energie 16
Kinetische Energie 16
Mechanische Gesamtenergie 16

4 Mechanische Arbeit 18

5 Arbeit bei veränderlicher Kraft 20
Spannarbeit 20
6 Kinetische Energie und Beschleunigungsarbeit 21

7 Potentielle Energie 22
Potentielle Energie eines Körpers im Gravitationsfeld 22
Potentielle Energie einer Feder 23

8 Der Energieerhaltungssatz der Mechanik 25

9 Zusammenfassung 26

Kraftstoß, Impuls, Impulserhaltungssatz 28

10 Kraftstoß und Impuls 28
Schubkraft eines Raketentriebwerks 31
Anwendung der Raketentechnik 32

11 Impulserhaltungssatz 34
Überprüfung des Impulserhaltungssatzes 35

12 Zusammenfassung 36

Stoßprozesse 38

13 Einteilung der Stoßprozesse 38

14 Der unelastische Stoß 40
Das Stoßpendel 41

15 Der elastische Stoß 42
Kraftstoß bei elastischer Reflexion 43

Thermodynamik 45

Kinetisch-statistische Betrachtungen 46

16 Das thermodynamische System 46

17 Thermodynamische Zustandsgrößen 47

18 Betrachtungsweisen der Thermodynamik 48

19 Modell des idealen Gases 49
Ideales Gas 49
Statistische Betrachtungen 50

20 Die räumliche Verteilung der Teilchen 50
Häufigkeit und Wahrscheinlichkeit zufälliger Ereignisse 50
Wahrscheinlichster Zustand eines Teilchensystems 53
Gesetz der räumlichen Verteilung der Teilchen des idealen Gases 54
Denk- und Arbeitsschritte bei statistischen Betrachtungen 55

21 Irreversibilität 56
Irreversible Vorgänge 56
Diffusion als irreversibler Vorgang 56

22 Die Energieverteilung für Teilchen des idealen Gases 57
Geschwindigkeits- und Energieverteilung 57
Mittlere kinetische Energie 58
Innere Energie des idealen Gases 59

23 Statistische Schwankungserscheinungen 59

24 Das Druck-Volumen-Gesetz 60
Das Druck-Volumen-Gesetz 62
Mittlere kinetische Energie und Temperatur 62
Mittlere Geschwindigkeit von Gasmolekülen 63

25 Zusammenfassung 65

Hauptsätze der Thermodynamik 66

26 Phänomenologische Thermodynamik 66

27 Innere Energie als Zustandsgröße 67

28 Prozeßgrößen 67
Arbeit 67
Wärme 70

29 Der Energieerhaltungssatz 72

30 Erster Hauptsatz der Thermodynamik 72

31 Der erste Hauptsatz der Thermodynamik aus historischer Sicht 75

32 Energiebilanz in Verbindung mit kalorischen Zustandsgleichungen 77

33 Isobare Wärmeübertragung 79
Kalorimetrische Messungen 80

34 Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik 80
Quasistatische Zustandsänderungen 82
Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik 83
Thermischer Wirkungsgrad 84
Gültigkeitsbereich des zweiten Hauptsatzes 85

35 Zusammenfassung 86

Thermodynamisches Verhalten der Stoffe 87

36 Thermodynamisches Verhalten der Stoffe 87

37 Verhalten von Wasser bei isobarer Wärmezufuhr 88
Schmelz- und Verdampfungswärme 91

38 Verhalten der Stoffe in Gebieten ohne Phasenumwandlung 92
Längenänderung 92
Volumenänderung 94
39 Verhalten des idealen Gases 95
Die thermische Zustandsgleichung des idealen Gases 96
Zustandsänderung des idealen Gases 96
40 Isotherme Zustandsänderung 97
41 Isochore Zustandsänderung 98
42 Isobare Zustandsänderung 99
43 Adiabatische Zustandsänderung 100
44 Energieumwandlungsprozesse als Folge spezieller Zustandsänderungen 101
Der Gasturbinenprozeß 101
Der Kraftwerksprozeß 104
45 Zusammenfassung 105

Optik 107

Strahlenoptik 108
46 Lichtausbreitung 108
47 Reflexion und Brechung des Lichtes 109
Reflexionsgesetz 109
Brechungsgesetz 109
Totalreflexion 112
Lichtleitstab 112
48 Bildpunktentstehung 114
49 Strahlengang und Bildentstehung 115
50 Reelle und virtuelle Bilder 116
51 Abbildungsgleichung für dünne Linsen 116
52 Optische Geräte 118
Lupe 118
Kamera 119
Bildwerfer 119
Fernrohr 119
Mikroskop 120
Werkzeugmikroskop 120
53 Zusammenfassung 121

Wellenoptik 122
54 Grundbegriffe der Wellenlehre 122
Schwingung 122
Welle 123
Eigenschaften der Welle 124
55 Interferenz des Lichtes 125
Kohärentes Licht 126
56 Interferenz durch Reflexion und Brechung 128
57 Interferenz durch Beugung am Doppelspalt 128
Maxima 129

Interferenzgleichung 130
58 Interferenz durch Beugung am Gitter 130
Gitterspektralapparate 132
Interferometer 132
59 Zusammenfassung 133

Quantenhafte Absorption von Licht 134
60 Der äußere lichtelektrische Effekt 134
Energie der Fotoelektronen 136
Grenzfrequenz 138
61 Lichtquanten 138
62 Das Plancksche Wirkungsquantum 141
63 Das komplizierte Verhalten von Licht 142
64 Zusammenfassung 143

Quantenhafte Emission des Lichtes 145
65 Linienspektren 145
Die Spektralanalyse 149
66 Das Elektronenstoßexperiment 150
Die thermische Anregung 151
Die Anregung durch Licht 151
Die Anregung durch die kinetische Energie von Elektronen 151
James Franck und Gustav Hertz 154
Die historische Entwicklung der Vorstellungen vom Licht 155
67 Der Laser 156
68 Welle-Teilchen-Verhalten bei Mikroobjekten 160
Das Elektronenmikroskop 162
69 Zusammenfassung 163

Aufgaben 164
Mechanik 164
Thermodynamik 166
Optik 168

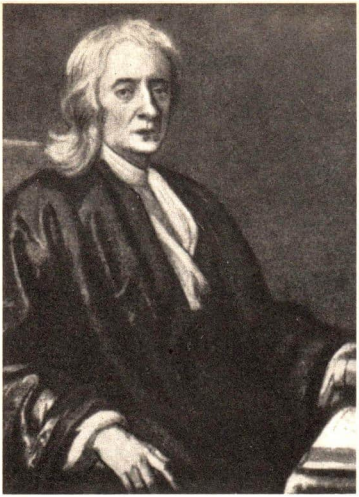
Lösungen 172
Mechanik 172
Thermodynamik 172
Optik 173

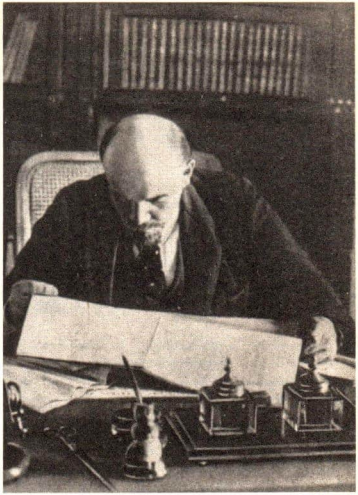
Register 174

Im Lehrbuch verwendete Symbole

▼ Experimente
► Merksätze
■ Beispiele
① Fragen
↗ siehe

Bei den Bildnummern bedeutet die erste Zahl die Seite. Die zweite Zahl gibt an, das wievielte Bild von oben gemeint ist.
Im Abschnitt Aufgaben sind die Nummern der Fragen und Aufträge farbig gedruckt, für die eine Lösung angegeben ist.





MECHANIK

Der Mathematiker und Physiker Isaac Newton (1643 bis 1727) begründete mit seinem Werk „Mathematische Prinzipien der Naturphilosophie" die klassische Mechanik. Newton betonte bei der Erläuterung seiner Arbeitsweise mehrfach, die Beobachtung und das Experiment seien die Quelle seiner Erkenntnisse: „In der Experimentalphysik muß man die aus den Erscheinungen durch Induktion geschlossenen Sätze, wenn nicht entgegengesetzte Voraussetzungen vorhanden sind, entweder genau oder sehr nahe für wahr halten, bis andere Erscheinungen eintreten, durch welche sie entweder größere Genauigkeit erlangen oder Ausnahmen unterworfen werden." Diese Auffassung vom Wesen des Erkenntnisprozesses hat materialistische Züge und entspricht dem von Lenin geprägten Grundsatz „Von der lebendigen Anschauung zum abstrakten Denken und von diesem zur Praxis – das ist der dialektische Weg der Erkenntnis der Wahrheit, der Erkenntnis der objektiven Realität".

Dieser Grundsatz wird im Physiklehrgang, aber auch in den anderen Lehrgängen der Abiturstufe in vielfältiger Weise angewandt.

Arbeit, Energie und Energieerhaltungssatz

Mit zunehmender Technisierung der Produktion hat auch der innerbetriebliche Transport größere Aufgaben zu bewältigen. Eine wichtige Einrichtung, mit der Lasten gehoben, geschwenkt und in horizontaler Richtung transportiert werden, ist der Kran. Mobilkräne werden hauptsächlich auf kurzzeitig eingerichteten Bau- und Montagestellen eingesetzt.

Bei der Konstruktion und beim Betrieb von Kränen sind viele technische Probleme zu lösen und Einflüsse zu berücksichtigen: Standfestigkeit, Beanspruchung der Bauelemente, Schwingung der Last, Windkraft. Ausgangspunkt aller Betrachtungen ist hierbei immer folgender Sachverhalt: Auf einen Körper wirken Kräfte; dadurch werden im allgemeinen Lage, Bewegungszustand und Form des Körpers beeinflußt. Diese Prozesse und Zustände sind physikalisch-mathematisch zu erfassen.
Anhand einer Analyse von Bewegungsvorgängen werden in diesem Stoffabschnitt zunächst die Begriffe Kraft, Geschwindigkeit und Beschleunigung sowie das Grundgesetz der Dynamik wiederholt. Anschließend wird untersucht, welche Arbeit bei mechanischen Vorgängen verrichtet wird und welche Energieumwandlung damit verbunden ist. Die hierbei gültigen allgemeinen Gesetze, besonders der Energieerhaltungssatz der Mechanik, können für die Lösung von physikalischen und technischen Problemen angewendet werden.

Grundbegriffe der Kinematik und Dynamik 1

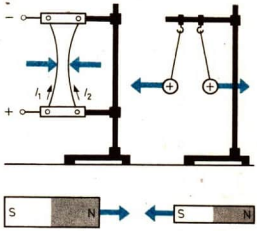
Kraft als Wechselwirkungsgröße. Bei der Untersuchung mechanischer Vorgänge wurden bereits wesentliche Merkmale des Kraftbegriffes herausgearbeitet. Dabei wurde gezeigt:

Kräfte äußern sich in der Beschleunigung und in der Verformung von Körpern.

In allen Fällen (Bild 8/2) ist zu erkennen, daß sich jeweils zwei Körper wechselseitig durch Kräfte beeinflussen: ①

Kräfte sind Ausdruck von Wechselwirkungen zwischen Körpern.

Das Wechselwirkungsgesetz. In diesem Gesetz sind die Erfahrungen über die Kräfte zusammengefaßt, die bei Wechselwirkungen auftreten. ②



8/2 Wechselwirkungen zwischen stromführenden Leitern, elektrischen Ladungsträgern und magnetischen Körpern

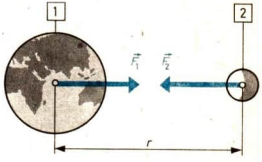
► **Bei einer Wechselwirkung wird auf jeden der beiden Körper eine Kraft ausgeübt. Die beiden Kräfte haben gleiche Beträge, eine gemeinsame Wirkungslinie und sind entgegengesetzt gerichtet.**

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2 \qquad (1)$$

■ Mit Hilfe des Gravitationsgesetzes ist es möglich, den Betrag beider Kräfte zu berechnen. Es gilt

$$F_1 = F_2 = \gamma \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}.$$

m_1 und m_2 sind die Massen beider Körper, r ist der Abstand der beiden Körpermittelpunkte.



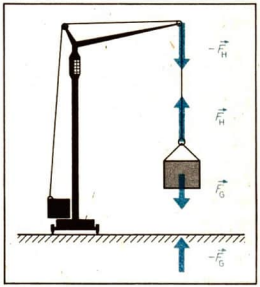
9/1 Kräfte bei der Wechselwirkung zwischen Erde (1) und Mond (2)

Bei vielen Problemen aus der Praxis ist es schwierig, oft aber auch unnötig, alle vorhandenen Wechselwirkungen zu analysieren und zu kennzeichnen. In solchen Fällen genügt es häufig, bei jeder Wechselwirkung nur *eine* der beiden Kräfte zu berücksichtigen (Bild 9/2).

■ Von einem Kran wird ein Großblock gehoben. Für diesen Körper treten die folgenden Wechselwirkungen auf:

Großblock – Erde mit den Kräften $\vec{F}_G$ und $-\vec{F}_G$,

Großblock – Kran mit den Kräften $\vec{F}_H$ und $-\vec{F}_H$.



9/2

Wenn z. B. die Bewegung des Großblocks untersucht wird, dann ist es ausreichend, allein die Kräfte zu betrachten, die an diesem Körper angreifen. Hierbei handelt es sich um $\vec{F}_G$ und $\vec{F}_H$.

Statisches Gleichgewicht. Der Bewegungszustand eines Körpers bleibt erhalten, wenn auf ihn keine Kräfte einwirken. Das gilt besonders auch für den Ruhezustand des Körpers. Da es nicht möglich ist, einen Körper von allen Wechselwirkungen zu isolieren, ist dieser Ruhezustand nur erreichbar, wenn sich die Wirkungen von zwei oder mehreren Kräften aufheben.

In diesem Falle besteht **statisches Gleichgewicht**. Durch Bild 10/1 wird die Gleichgewichtsbedingung für zwei Kräfte erläutert.

Allgemein gilt: ③ ④

► **Ein Körper befindet sich im statischen Gleichgewicht, wenn die Summe aller angreifenden Kräfte null ist.**

$$\sum_{k=1}^{n} \vec{F}_k = 0 \qquad (2)$$

---

① Nennen Sie Beispiele für Wechselwirkungen, die beim Sport auftreten!

② Ein Körper ruht auf einer waagerechten Unterlage. Diskutieren Sie die hierbei vorhandenen Wechselwirkungen!

③ Diskutieren Sie die statische Gleichgewichtsbedingung für eine Stahlkugel, die auf horizontaler Unterlage ruht!

④ Wie verändert sich die Gleichgewichtsbedingung in Aufgabe 2 (S. 164), wenn die Kugel in einem mit Wasser gefüllten Gefäß liegt?

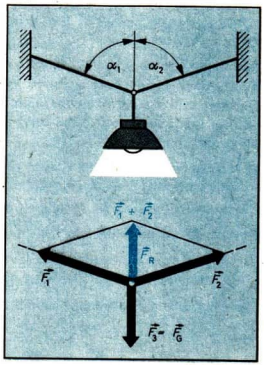
Der am Kran hängende Großblock soll sich in Ruhe befinden. In diesem Falle muß die Gewichtskraft $\vec{F}_G$ durch die vom Seil übertragene Kraft $\vec{F}_H$ aufgehoben werden:
Die Gleichgewichtsbedingung lautet:
$\vec{F}_G + \vec{F}_H = 0.$

10/1

■ Eine Leuchte hängt an einem Seil (Bild 10/2), dessen beide Abschnitte mit der Vertikalen die gleichen Winkel $\alpha_1 = \alpha_2 = 70°$ einschließen.
Die Leuchte soll sich im statischen Gleichgewicht befinden. Wie groß sind die Kräfte $\vec{F}_1$ und $\vec{F}_2$, die vom Seil auf die Leuchte übertragen werden, wenn die Gewichtskraft den Betrag $F_3 = 120$ N hat?
Die Gleichgewichtsbedingung lautet $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 = 0$. Sie kann in der Form interpretiert werden, daß die Gewichtskraft $\vec{F}_3$ von der Resultierenden der beiden Seilkräfte $\vec{F}_R = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$ aufgehoben werden muß. Es gilt deshalb $\vec{F}_R = -\vec{F}_3$.
Auf Grund der Symmetrie des Kräfteparallelogramms haben die beiden Seilkräfte den gleichen Betrag $F_1 = F_2 = F_S$.
Aus Bild 10/2 ist zu entnehmen

$F_S = \dfrac{F_3}{2 \cos 70°}$. Mit den gegebenen Größen erhält man

$\underline{F_S = 175 \text{ N.}}$ ① ②



10/2

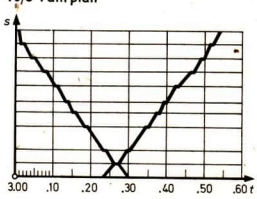
Geschwindigkeit und Beschleunigung. Die Bewegung eines Körpers wird beschrieben, indem man angibt, wie sich die Lage des Körpers in Abhängigkeit von der Zeit verändert. Hierfür gibt es verschiedenartige Möglichkeiten:

- Wertetabellen für Weg und Zeit (z. B. Fahrpläne, Bild 10/3),
- Weg-Zeit-Diagramm (z. B. graphische Fahrpläne der Reichsbahn, Bild 10/4),
- Weg-Zeit-Gesetze (z. B. $s = \frac{1}{2} a \cdot t^2$ bei der gleichmäßig beschleunigten Bewegung).

In allen Fällen wird die Lageänderung des Körpers in bezug auf einen anderen Körper betrachtet. Oftmals wird die Erde als Bezugskörper gewählt. Außerdem muß eine Vereinbarung über die Zeitmessung getroffen werden. Bezugskörper und Zeitmeßgerät bilden gemeinsam das **Bezugssystem**.
Die Bewegung eines Körpers wird in verschiedenen Bezugssystemen auch verschiedenartig beurteilt:

.55	▼	Warschauer Str.	101	113	▲	.57
.57	an	Ostkreuz 140. 141. 142			ab	.55
3.01	ab				an	.54
.02	▼	Rummelsburg			▲	.52
.05		Betriebsbf Rummelsburg				.50
.08		Bln-Karlshorst 120				.47
.11		Wuhlheide				.43
.14		Bln-Köpenick				.40
.16		Hirschgarten				.38
.19		Bln-Friedrichshagen				.35
.24		Rahnsdorf				.30
.27		Wilhelmshagen				.27
3.30	an	Erkner 106. 180			ab	3.23

10/3 Fahrplan



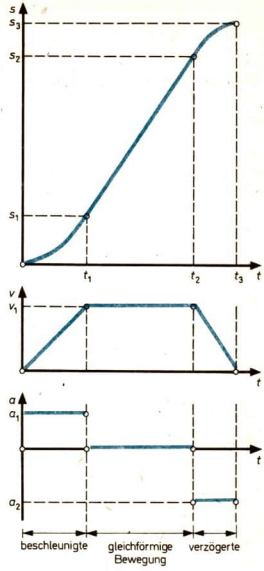
10/4 Graphischer Fahrplan

■ Ein Fahrgast sitzt in einem D-Zug, der mit einer Geschwindigkeit von 100 km · h⁻¹ fährt. Ein entgegenkommender Güterzug hat die Geschwindigkeit 60 km · h⁻¹. Der Fahrgast befindet sich in bezug auf den Eisenbahnwagen in Ruhe. In bezug auf den Bahndamm hat er die Geschwindigkeit 100 km · h⁻¹. In bezug auf den Güterzug hat er die Geschwindigkeit 160 km · h⁻¹.

Die physikalische Größe **Geschwindigkeit** spiegelt den Bewegungszustand eines Körpers wider; Änderungen dieses Zustandes werden mit der Größe **Beschleunigung** erfaßt. Um die Merkmale beider Größen zu wiederholen, soll in vereinfachter Form die Bewegung eines Großblocks untersucht werden, der von einem Kran gehoben wird.
Aus dem Weg-Zeit-Diagramm (Bild 11/1) können Informationen über die Geschwindigkeit und die Beschleunigung des Körpers entnommen werden. Diese Größen sind im *v-t*- bzw. *a-t*-Diagramm dargestellt, die im folgenden noch erläutert werden.

Die Bewegung hat folgenden Ablauf:

Zeit	Vorgang
$0 \cdots t_1$	Der anfangs ruhende Körper wird beschleunigt. Die Geschwindigkeit nimmt zu und erreicht am Ende dieses Zeitabschnitts den Wert v_1.
$t_1 \cdots t_2$	Der Körper wird mit konstanter Geschwindigkeit v_1 gehoben.
$t_2 \cdots t_3$	Der Körper wird noch weiter gehoben, dabei aber entgegen der Bewegungsrichtung beschleunigt. Die Geschwindigkeit nimmt ab und erreicht am Ende des Zeitabschnittes den Wert Null; der Körper befindet sich wieder in Ruhe.



11/1 Weg-Zeit-Diagramm, Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm Beschleunigung-Zeit-Diagramm (für einen Hubvorgang)
$t_1 = 3\,s$, $s_1 = 2{,}7\,m$
$t_2 = 8\,s$, $s_2 = 11{,}7\,m$
$t_3 = 10\,s$, $s_3 = 13{,}5\,m$

An diesem Bewegungsvorgang kann die Präzisierung der Geschwindigkeitsdefinition in drei Stufen verfolgt werden:

$$\text{1. Stufe: } v = \frac{s}{t} \qquad (3)$$

Diese Definitionsgleichung gilt nur für gleichförmige Bewegungen. Beim Hubvorgang handelt es sich im ganzen um eine ungleichförmige Bewegung. Für diese folgt aus der Definitionsgleichung ein **Mittelwert der Geschwindigkeit** während der betrachteten Zeit. Für den gesamten Hubvorgang erhält man z. B.

$$v_m = \frac{s_3}{t_3},\ v_m = \frac{13{,}5\ m}{10\ s},\ v_m = 1{,}35\ m \cdot s^{-1},\ v_m \approx 1{,}4\ m \cdot s^{-1}.$$

---

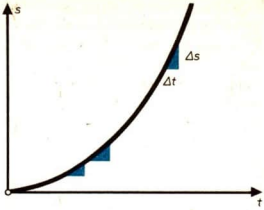
① An einem Körper greifen die Kräfte $F_1 = 300$ N und $F_2 = 400$ N an, deren Wirkungslinien aufeinander senkrecht stehen. Bestimmen Sie Betrag und Richtung einer weiteren Kraft F_3, durch die das statische Gleichgewicht hergestellt wird!

② Wie verändert sich die Seilkraft im Bild 10/2, wenn die Winkel α_1 und α_2 vergrößert werden? Diskutieren Sie, ob der Fall $\alpha_1 = \alpha_2 = 90°$ erreichbar ist!

2. Stufe: $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$ (4)

Auch diese Definitionsgleichung gilt zunächst nur für gleichförmige Bewegungen. Sie erlaubt es aber, den Bewegungsvorgang in einzelne Abschnitte zu zerlegen und die Geschwindigkeit für jeden Abschnitt gesondert zu bestimmen. Das kann mit Hilfe von Steigungsdreiecken geschehen (Bild 12/1).
Während der Zeitdauer $\Delta t = t_2 - t_1$ ist im s-t-Diagramm der Graph für den Hubvorgang eine Gerade. Daran ist zu erkennen, daß während dieser Zeitdauer eine gleichförmige Bewegung stattfindet. Die Geschwindigkeit beträgt hierbei

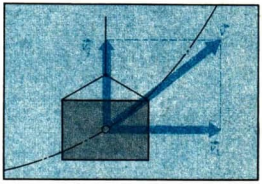
$$v_1 = \frac{s_2 - s_1}{t_2 - t_1}, \quad v_1 = \frac{9\ \text{m}}{5\ \text{s}}, \quad v_1 = 1{,}8\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}.$$



12/1 Die Geschwindigkeit kann aus dem s-t-Diagramm mit Hilfe von Steigungsdreiecken entnommen werden.

3. Stufe:

Am Beginn und am Ende des Hubvorganges finden **beschleunigte Bewegungen** statt. Bei diesen ändert sich die Geschwindigkeit des Körpers mit der Zeit.
Wenn die Zeitdauer Δt und damit zugleich auch der Wegabschnitt Δs hinreichend klein gewählt werden, führt die Definitionsgleichung zur **Momentangeschwindigkeit** des Körpers.
Beim Hubvorgang wurde zur Vereinfachung angenommen, daß am Anfang und am Ende **gleichmäßig beschleunigte Bewegungen** ablaufen. Bei diesen Bewegungen sind die Geschwindigkeit-Zeit-Funktionen lineare Funktionen.
Bei gleichmäßig beschleunigten Bewegungen gilt die folgende Definitionsgleichung für die



12/2 Ein Kran transportiert einen Körper zugleich in horizontaler und vertikaler Richtung. Die resultierende Geschwindigkeit v des Körpers kann durch Vektoraddition aus der Horizontalgeschwindigkeit v_1 und der Vertikalgeschwindigkeit v_2 ermittelt werden. v hat die Richtung der Tangente an die Bahn des Körpers.

► Beschleunigung

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (5)$$

Einheit der Beschleunigung ist $1\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Bei Auswertung des Geschwindigkeit-Zeit-Diagramms (Bild 11/1) erhält man folgende Beschleunigungen:

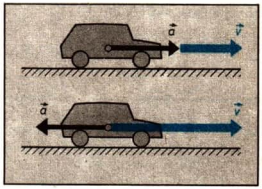
Beginn des Hubvorganges $a_1 = \frac{1{,}8\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}}{3\ \text{s}}$

$a_1 = 0{,}6\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$

Ende des Hubvorganges $a_2 = \frac{1{,}8\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}}{2\ \text{s}}$,

$a_2 = 0{,}9\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$

Da am Ende des Hubvorganges eine Abnahme der Geschwindigkeit stattfindet, spricht man auch von einer Verzögerung. Diese kann durch ein negatives Vorzeichen der Beschleunigung gekennzeichnet werden. ① ②



12/3

Geschwindigkeit und Beschleunigung als Vektorgrößen. Der Geschwindigkeitsvektor gibt die momentane Bewegungsrichtung für den betrachteten Körper an. Der Betrag der Geschwindigkeit wird durch die Länge des Pfeils veranschaulicht, der zur Darstellung des Geschwindigkeitsvektors verwendet wird. Wenn ein Körper mehrere Bewegungen gleichzeitig ausführt, gewinnt man die resultierende Geschwindigkeit durch Vektoraddition der Einzelgeschwindigkeiten (Bild 12/2).

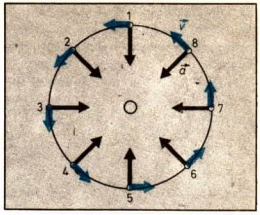
Die Richtung des Beschleunigungsvektors soll hier nur für zwei Spezialfälle angegeben werden:

1. Wenn sich bei einer Bewegung nur der **Betrag** der Geschwindigkeit verändert, sind Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektor gleich- oder entgegengesetzt gerichtet (Bild 12/3).
2. Bei der gleichförmigen Kreisbewegung eines Massepunktes hat die Geschwindigkeit ständig den gleichen Betrag. Da sich aber die Richtung der Geschwindigkeit verändert, handelt es sich um eine beschleunigte Bewegung (Bild 13/1).

Der Geschwindigkeitsvektor dreht sich bei jedem Umlauf des Massepunktes um 360°. Die Beschleunigung ist zum Mittelpunkt des Kreises gerichtet und hat den konstanten Betrag

$$a_r = \frac{v^2}{r}. \qquad (6)$$

Sie wird als Radialbeschleunigung bezeichnet.



13/1 Geschwindigkeit und Beschleunigung eines Massepunktes bei gleichförmiger Kreisbewegung.

Das Grundgesetz der Dynamik. Die Erfahrungen über den Einfluß von Kräften auf den Bewegungszustand von Körpern werden im Grundgesetz der Dynamik zusammengefaßt und verallgemeinert:

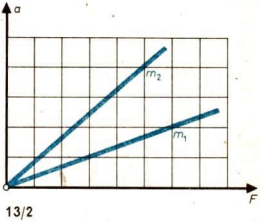
► **Ein Körper wird nur dann beschleunigt, wenn auf ihn eine Kraft einwirkt.**
Kraft und Beschleunigung haben die gleiche Richtung.

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} \qquad (7)$$

Einheit der Kraft ist $1\ \mathrm{N} = 1\ \mathrm{kg} \cdot \mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-2}$.

Bei konstanter Masse besteht nach dem Grundgesetz der Dynamik Proportionalität zwischen Kraft und Beschleunigung (Bild 13/2).

Durch das Grundgesetz wird zugleich die **Masse** definiert. Mit dieser physikalischen Größe werden Trägheit und Schwere eines Körpers quantitativ erfaßt. ③ ④



13/2

---

① Beim Anfahren eines Pkw wächst die Geschwindigkeit in 20 s auf 100 km · h⁻¹. Berechnen Sie die mittlere Beschleunigung bei diesem Vorgang!

② Beim freien Fall ohne Luftwiderstand beträgt die Beschleunigung 9,81 m · s⁻². Wie hängen bei diesem Vorgang die Geschwindigkeit und der zurückgelegte Weg von der Zeit ab? Zeichnen Sie das Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm und das Weg-Zeit-Diagramm für diesen Vorgang!

③ Ein Körper hat die Masse 1 kg. Welche Gewichtskraft wirkt auf ihn in der Nähe der Erdoberfläche?

④ Bestimmen Sie anhand von Bild 13/2 das Massenverhältnis $m_1 : m_2$!

■ Die Geschwindigkeit eines Fahrzeuges der Masse 1 t soll innerhalb von 5 Sekunden von $v_1 = 100\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$ auf $v_2 = 30\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$ vermindert werden. Welche Kraft ist hierzu erforderlich?

Gegeben:

$m = 10^3\ \mathrm{kg}$

$v_1 = 100\ \mathrm{km \cdot h^{-1}} = 27{,}8\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$

$v_2 = 30\ \mathrm{km \cdot h^{-1}} = 8{,}3\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$

$t = 5\ \mathrm{s}$

Gesucht:

F

Lösung:

$F = m \cdot a$

$a = \frac{v_2 - v_1}{t}$

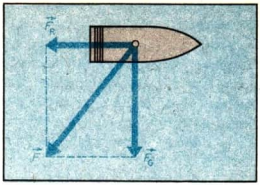
$a = \frac{(8{,}3 - 27{,}8)\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}}{5\ \mathrm{s}}$

$a = -3{,}9\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$

$F = 10^3\ \mathrm{kg}\ (-3{,}9\ \mathrm{m \cdot s^{-2}})$

$\underline{\underline{F = -3{,}9\ \mathrm{kN}}}$

Das negative Vorzeichen drückt aus, daß die Kraft entgegen der Bewegungsrichtung wirkt.

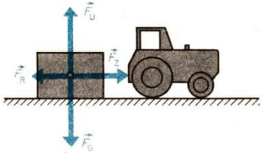


14/1 Kräfte am Geschoß

Wenn auf einen Körper zugleich mehrere Kräfte einwirken, ist im Grundgesetz der Dynamik die resultierende Kraft anzusetzen. Diese gewinnt man durch vektorielle Addition der Einzelkräfte. In den Beispielen (Bilder 14/1 und 14/2) wird der Körper zur Vereinfachung als Massepunkt betrachtet, so daß alle Kräfte in einem Punkte angreifen. ① ②

■ Beim Abschuß erhält das Geschoß die Anfangsgeschwindigkeit v_0. Danach wirken auf das Geschoß die Gewichtskraft F_G und die Reibungskraft $\vec{F_R}$ ein.

Unter dem Einfluß der resultierenden Kraft $\vec{F} = \vec{F_G} + \vec{F_R}$ ändern sich Betrag und Richtung der Geschwindigkeit. Das Geschoß durchläuft dabei eine gekrümmte Bahn, die als ballistische Kurve bezeichnet wird.



14/2 Kräfte beim Beschleunigen eines Körpers auf horizontaler Ebene
Die Gewichtskraft wird durch die Stützkraft der Unterlage aufgehoben. Damit eine Beschleunigung auftritt, muß die Zugkraft größer als die Reibungskraft sein.

■ Das Grundgesetz der Dynamik soll auf den Beschleunigungsprozeß am Beginn des Hubvorganges (Bild 11/1) angewendet werden. Auf den Großblock wirken die Gewichtskraft F_G und die Hubkraft F_H ein. Die Hubkraft muß größer als die Gewichtskraft sein, damit eine nach oben gerichtete Beschleunigung vorhanden ist. Das Grundgesetz der Dynamik lautet für diesen Vorgang $m \cdot a = F_H - F_G$. Diese Gleichung kann verwendet werden, um die Zugkraft zu berechnen:

Gegeben:

$m = 10^3\ \mathrm{kg}$

$a = 0{,}6\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$

Gesucht:

F_H

Lösung:

$F_H = m\,(a + g)$

$F_H = 10^3\ \mathrm{kg}\ (0{,}6 + 9{,}8)\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$

$F_H = 10{,}4 \cdot 10^3\ \mathrm{kg \cdot m \cdot s^{-2}}$

$\underline{\underline{F_H = 10{,}4\ \mathrm{kN}}}$

14/3 System Erde – Raumstation
Als „Umgebung" ist hier vor allem der Mond in Betracht zu ziehen. Sein Einfluß ist aber vernachlässigbar klein, wenn sich die Station auf einer erdnahen Bahn befindet.

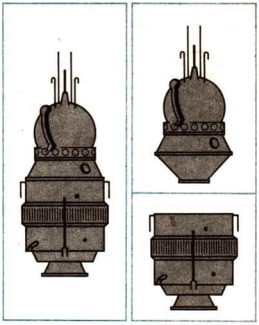
Mechanische Systeme 2

Das Grundgesetz der Dynamik beschreibt, wie sich der Bewegungszustand eines einzelnen Körpers unter dem Einfluß von Kräften verändert. Da diese Kräfte auf Wechselwirkungen beruhen, ändern im allgemeinen alle beteiligten Körper ihre Lage und ihren Bewegungszustand. Ein Beispiel hierfür ist das Sonnensystem mit seinen Planeten und Monden.
Um die Untersuchungsobjekte zu kennzeichnen und abzugrenzen, ist es zweckmäßig, den Begriff **mechanisches**

System einzuführen. Ein solches System besteht im allgemeinen aus mehreren Körpern, deren Lage- und Bewegungszustand im Zusammenhang betrachtet wird. Die zum System gehörigen Körper werden als **Systemelemente** bezeichnet. Körper, die nicht dem System angehören, aber für eine Wechselwirkung in Frage kommen, bilden die **Umgebung** des Systems. Mechanische Systeme spiegeln nur jene Eigenschaften des realen Objektes wider, die für die mechanischen Vorgänge wesentlich sind. Insofern sind mechanische Systeme Modelle. Wenn man das Sonnensystem als mechanisches System behandelt, wird z. B. von den Strahlungsprozessen abgesehen.

Die Abgrenzung eines mechanischen Systems und die notwendigen Idealisierungen müssen dem zu bearbeitenden Problem angepaßt werden. Hierzu sind Erfahrung und Übung notwendig.

Sobald ein System von seiner Umgebung abgegrenzt worden ist, können zwei Arten von Kräften unterschieden werden: Ein Teil der Kräfte beruht auf Wechselwirkungen zwischen den Systemelementen, ein anderer Teil auf Wechselwirkungen mit der Umgebung. Man spricht in diesem Zusammenhang von inneren und äußeren Kräften.



15/1 Eine Zweistufenrakete kann nach Brennschluß des Triebwerkes der ersten Stufe als mechanisches System betrachtet werden. Beim Absprengen der ausgebrannten Stufe sind innere Kräfte wirksam. Danach besteht das System aus zwei voneinander getrennten Elementen. Die Gravitationskraft und – solange sich die Rakete noch in der Atmosphäre befindet – der Luftwiderstand sind äußere Kräfte.

Abgeschlossene mechanische Systeme sind frei von mechanischen Wechselwirkungen mit ihrer Umgebung. Zum Beispiel kann das System Erde-Raumstation in guter Näherung als abgeschlossen betrachtet werden.

Mechanische Arbeit und Energie 3

Mechanische Arbeit wird verrichtet, wenn sich Körper unter dem Einfluß von Kräften bewegen. Welche Besonderheiten hierbei zu beachten sind, wird im folgenden noch untersucht. Wenn vorausgesetzt wird, daß auf einen Körper eine konstante Kraft in Richtung der Bewegung wirkt, gilt die elementare Definition:

► **Die mechanische Arbeit ist gleich dem Produkt aus der Kraft und dem zurückgelegten Weg.**

$$W = F \cdot s \qquad (8)$$

Einheit der Arbeit ist $1\ \mathrm{J} = 1\ \mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}^2 \cdot \mathrm{s}^{-2}$.

Drei wichtige Formen der mechanischen Arbeit werden durch die Bilder 16/2, 16/3 und 16/4 erläutert.

Man erkennt, daß beim Verrichten einer Arbeit die Lage und der Bewegungszustand von Körpern einzeln oder gemeinsam verändert werden. Da man allgemein die Veränderung einer Erscheinung (Bewegung, Ruhe) als Prozeß bezeichnet, kann man sagen:

---

① Geben Sie Beispiele für die Verwendung des Modells „Massepunkt"!
② Wenden Sie das Grundgesetz der Dynamik auf einen Körper an, für den Kräftegleichgewicht besteht!

Das Verrichten einer Arbeit ist ein **Prozeß**, der zu einer **Zustandsänderung** des betrachteten Systems führt.
Alle Größen, die der Beschreibung eines Prozesses, also einer Veränderung dienen, bezeichnet man als Prozeßgrößen.

■ Prozeßgrößen: Arbeit W

Potentielle Energie. Es ist bereits bekannt, daß durch bestimmte Prozesse, wie z. B.
– das Heben eines Körpers im Schwerefeld,
– das Spannen einer Feder,
ein Zustand erreicht wird, in dem ein Körper auf Grund seiner Lage oder seiner elastischen Verformung ein Arbeitsvermögen besitzt. Dieses wird als potentielle Energie des betreffenden Systems bezeichnet. Bei einem neuen Prozeß kann das System veranlaßt werden, eine mechanische Arbeit zu verrichten; dabei verkleinert sich die potentielle Energie.

Kinetische Energie. In Natur und Technik gibt es zahlreiche Vorgänge, bei denen durch bewegte Körper Arbeit verrichtet wird: Der Rammbär treibt einen Pfahl in den Boden, strömendes Wasser wird zum Antrieb von Turbogeneratoren genutzt, bei Orkanen können Bäume umgebrochen und andere Zerstörungen angerichtet werden. An diesen und vielen weiteren Beispielen ist das Arbeitsvermögen bewegter Körper zu erkennen.

Das Arbeitsvermögen, das ein Körper oder ein mechanisches System auf Grund seines Bewegungszustandes besitzt, wird als kinetische Energie bezeichnet.

Die Beständigkeit einer Erscheinung (Bewegung, Ruhe) bezeichnet man als **Zustand**.

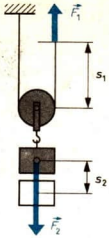
Alle Größen, die der Beschreibung eines Zustandes dienen, bezeichnet man als Zustandsgrößen.

■ Zustandsgrößen: kinetische Energie E_{kin},
potentielle Energie E_{pot}.

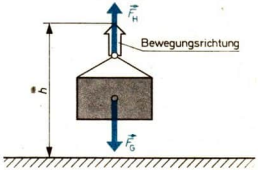
Mechanische Gesamtenergie. Potentielle und kinetische Energie sind Formen mechanischer Energie. Ihre Summe wird als mechanische Gesamtenergie bezeichnet.
Es ist bekannt, daß eine Umwandlung von potentieller Energie in kinetische Energie und umgekehrt möglich ist. Eine vollständige Umwandlung kann nur stattfinden, wenn keine Reibungskräfte auftreten; dann gilt der

Energieerhaltungssatz der Mechanik:
$$E_{pot} + E_{kin} = \text{konstant}.$$

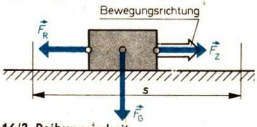
Die in diesem Abschnitt erläuterten Begriffe und Zusammenhänge können am Beispiel eines Pumpspeicherwerks, das aber bereits kein rein mechanisches System mehr darstellt, sowie an einem Pendelschwinger verdeutlicht werden,



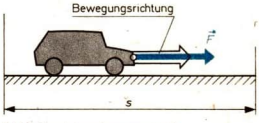
16/1 Mit Hilfe des Arbeitsbegriffes wurde ein allgemeines Gesetz formuliert, das bei allen reibungsfreien, kraftumformenden Einrichtungen gilt:
Die aufgenommene Arbeit ist gleich der abgegebenen Arbeit. $F_1 \cdot s_1 = F_2 \cdot s_2$



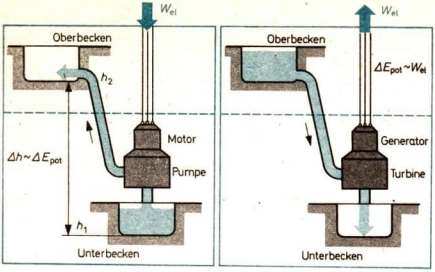
16/2 Hubarbeit
$F_H = F_G$, $F_G = m \cdot g$
Hubarbeit
$W_H = F_H \cdot h$, $W_H = m \cdot g \cdot h$



16/3 Reibungsarbeit
$F_Z = F_R$,
$F_R = \mu \cdot F_G$, $F_R = \mu \cdot m \cdot g$,
Reibungsarbeit
$W_R = F_R \cdot s$, $W_R = \mu \cdot F_G \cdot s$,
$W_R = \mu \cdot m \cdot g \cdot s$



16/4 Beschleunigungsarbeit
$W_B = F \cdot s$, $W_B = m \cdot a \cdot s$



17/1 Energieumwandlung beim Pumpspeicherwerk
Durch die elektrisch betriebenen Pumpen wird Hubarbeit verrichtet. Das Wasser erhält beim Transport vom Unterbecken in das Oberbecken potentielle Energie. Beim Hinabströmen des Wassers in der Spitzenbelastungszeit wird die potentielle Energie in kinetische Energie umgewandelt. Dabei gilt in guter Näherung der Energieerhaltungssatz der Mechanik.
In den Turbinen gibt das Wasser den größten Teil seiner kinetischen Energie ab und verrichtet dabei Arbeit beim Antrieb der Turbogeneratoren. Diese liefern elektrische Energie.

Abschließend soll mit Hilfe der Begriffe „Zustand" und „Prozeß" der Unterschied zwischen den eng miteinander verknüpften Größen mechanische Arbeit und Energie nochmals herausgestellt werden:

Die mechanische Energie und ihre Bestandteile potentielle und kinetische Energie sind Zustandsgrößen, mit denen das Arbeitsvermögen mechanischer Systeme erfaßt wird.

Die mechanische Arbeit ist eine Prozeßgröße, mit der Energieänderungen von Systemen erfaßt werden. ①

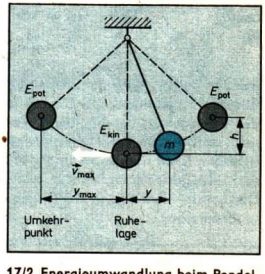
Zwischen mechanischer Arbeit und Energie besteht der Zusammenhang:

► **Die Änderung der mechanischen Energie ist gleich der verrichteten mechanischen Arbeit.**

$$\Delta (E_{kin} + E_{pot}) = W \qquad (9)$$

Auf Grund dieser Beziehung werden mechanische Energien berechnet. Um die Unterscheidung von Arbeit W und Energie E zu erleichtern, werden in diesem Lehrbuch die Formelzeichen W bzw. E verwendet.
Die gemeinsame Einheit von Arbeit und Energie ist das Joule $1\,J = 1\,N \cdot m = 1\,W \cdot s$.

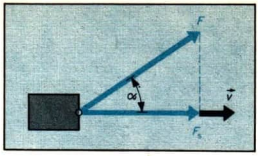
■ Der Pendelschwinger wird angeregt, indem er aus der Gleichgewichtslage herausgeführt wird. Bei diesem Vorgang muß Hubarbeit verrichtet werden. Diese wird in potentielle Energie des Systems umgesetzt. Bei der Schwingung findet eine ständige Umwandlung von potentieller Energie in kinetische Energie und wieder zurück in potentielle Energie statt.
Durch Luftreibung wird das Pendel gedämpft. Die mechanische Energie des Systems verkleinert sich, es wird dabei Reibungsarbeit verrichtet.



17/2 Energieumwandlung beim Pendelschwinger

① Welche Energieänderungen finden statt, wenn Hubarbeit und wenn Beschleunigungsarbeit verrichtet wird?

In diesem Abschnitt soll die Definition der Arbeit auch für den Fall erweitert werden, daß die Kraft nicht mehr in Bewegungsrichtung des Körpers wirkt. Dabei wird zunächst noch vorausgesetzt, daß diese Kraft konstant ist. In Klasse 9 wurde bereits gezeigt, daß die in Bewegungsrichtung wirkende Kraftkomponente F_s für die verrichtete Arbeit maßgebend ist. Diese kann durch den Betrag der Kraft F und den Winkel α ausgedrückt werden, den Kraft und Geschwindigkeit einschließen (Bild 18/1).
Auf dieser Grundlage kann die verallgemeinerte Definition formuliert werden:



18/1 Die Kraftkomponente in Bewegungsrichtung beträgt $F_s = F \cdot \cos\alpha$

► **Die an einem Körper verrichtete Arbeit W ist bestimmt durch die Kraft F, die auf den Körper wirkt, durch den zurückgelegten Weg s und den Winkel α, den die Kraft mit der Bewegungsrichtung bildet.**

$$W = F \cdot s \cdot \cos\alpha \qquad (10)$$

■ Ein Pflug wird mit der Kraft 26,5 kN gezogen. Diese wirkt unter dem Winkel 15° gegenüber der Horizontalen. Die Schälbreite des Pfluges beträgt 1,40 m. Wie groß ist die Arbeit, die beim Pflügen der Fläche 1 Hektar verrichtet wird?

Gegeben:
$F = 26{,}5$ kN
$\alpha = 15°$
$b = 1{,}40$ m
$A = 1$ ha $= 10^4$ m²

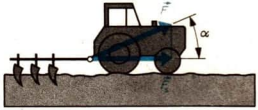
Gesucht:
W

Lösung:
Die gepflügte Fläche läßt sich als Rechteck mit den Seiten b und s betrachten.

$s = \frac{A}{b}$, $s = 7{,}1 \cdot 10^3$ m

$W = F \cdot s \cdot \cos\alpha$
$W = 26{,}5$ kN $\cdot\ 7{,}1 \cdot 10^3$ m $\cdot \cos 15°$;

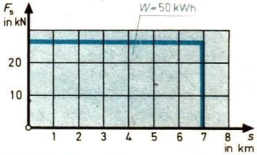
$W = 1{,}8 \cdot 10^8$ N $\cdot$ m
$W = 50$ kWh ① ②



18/2 Beim Pflügen bildet die auf den Pflug ausgeübte Zugkraft mit der Bewegungsrichtung des Pfluges den Winkel α.

Bei der Entwicklung der Definitionsgleichung (10) wurde in Bild 18/1 angenommen, daß die Kraft einen spitzen Winkel mit der Bewegungsrichtung des Körpers bildet. Es muß diskutiert werden, ob die Definitionsgleichung auch anwendbar ist, wenn Kraft und Bewegungsrichtung einen rechten, stumpfen oder gestreckten Winkel bilden. Als Grundlage für die Diskussion dient die in der folgenden Tabelle erfaßte Fallunterscheidung:

1. $\alpha = 0°$	$\cos\alpha = 1$	$W = F \cdot s$
2. $0° < \alpha < 90°$	$\cos\alpha > 0$	$W > 0$
3. $\alpha = 90°$	$\cos\alpha = 0$	$W = 0$
4. $90° < \alpha < 180°$	$\cos\alpha < 0$	$W < 0$
5. $\alpha = 180°$	$\cos\alpha = -1$	$W = -F \cdot s$



18/3 Die beim Pflügen verrichtete Arbeit kann als Flächeninhalt eines Rechtecks im F_s-s-Diagramm dargestellt werden.

Fall 1: Hier liegt wieder die elementare Definition der Arbeit vor.
Fall 2: Ein Beispiel für diesen Fall ist die Arbeit, die beim Ziehen des Pfluges verrichtet wird.
Fall 3: Wenn die Kraft senkrecht zur Bewegungsrichtung des Körpers wirkt, ist die verrichtete Arbeit null.
Beispiel: Bei der gleichförmigen Kreisbewegung eines Massepunktes wird von der Radialkraft keine Arbeit verrichtet.
Fall 4: Es muß untersucht werden, ob das zunächst überraschende Auftreten einer „negativen Arbeit" physikalisch interpretiert werden kann. Dazu wird nochmals an das Beispiel „Pflügen" angeknüpft. Bei diesem Vorgang besteht eine Wechselwirkung zwischen dem System Traktor und dem System Pflug. Nach dem Wechselwirkungsgesetz wirkt auf den Traktor über die Anhängekupplung die Gegenkraft F' zur Zugkraft (Bild 19/1). Diese Kraft F' bildet mit der Bewegungsrichtung den Winkel

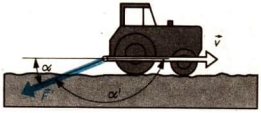
$\alpha' = 180° - \alpha = 165°$.

Am Traktor wird somit die Arbeit

$W' = F' \cdot s \cdot \cos\alpha'$

verrichtet. Wegen $\cos\alpha' = -\cos\alpha$ und $F' = F$ gilt

$W' = -W$.

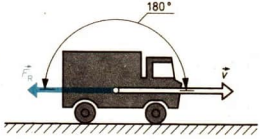


19/1 Auf den Traktor wird bei der Wechselwirkung mit dem Pflug die schräg nach unten gerichtete Kraft $\vec{F'}$ ausgeübt.

Es ist sinnvoll, dieses Ergebnis als Energieübertragung vom System Traktor auf das System Pflug zu erklären:
Die negative, am Traktor verrichtete Arbeit bedeutet, daß dieses System Energie abgibt; die positive, am Pflug verrichtete Arbeit bedeutet Aufnahme dieser Energie.
Fall 5: Die Kraft wirkt entgegengesetzt zur Bewegungsrichtung. Ein Beispiel dafür zeigt Bild 19/2.

Die von der Reibungskraft verrichtete Arbeit beträgt

$W = F_R \cdot s \cdot \cos 180°, \quad W = -F_R \cdot s.$



19/2 Beim Bremsen eines Fahrzeugs wirkt die Reibungskraft unter dem Winkel 180° gegenüber der Bewegungsrichtung.

Auch diese negative Arbeit kann als Abgabe von Energie gedeutet werden. Das wird an der Verkleinerung der kinetischen Energie des Fahrzeugs deutlich.
Als Ergebnis der vorangegangenen Untersuchung ist festzustellen: Bei konsequenter Anwendung der Definitionsgleichung $W = F \cdot s \cdot \cos\alpha$ ist es notwendig, positive und negative Arbeit zu unterscheiden. Das Vorzeichen der Arbeit kann beim Aufstellen von Energiebilanzen genutzt werden.
Es zeigt sich jedoch, daß in einfachen und übersichtlichen Fällen das Vorzeichen der Arbeit entbehrlich ist. Man benutzt dann den Betrag der verrichteten Arbeit. ③ ④

---

① Beschreiben Sie, wie man die Zeit zum Pflügen einer Fläche von 1 ha bei vorgegebener Geschwindigkeit errechnen kann!
② Erläutern Sie, wie unter den bei Aufgabe 1 gewählten Bedingungen die Leistung beim Ziehen des Pfluges errechnet werden kann!
③ Unter welchen Voraussetzungen gelten die Definitionsgleichungen für die Arbeit $W = F \cdot s$ und $W = F \cdot s \cdot \cos\alpha$?
④ Für welche von Kraft und Bewegungsrichtung gebildeten Winkel ist die verrichtete Arbeit negativ?

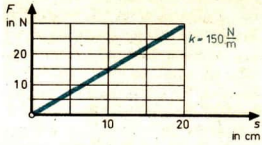
Die Definitionsgleichung $W = F \cdot s \cdot \cos \alpha$ ist nicht mehr anwendbar, wenn sich die Kraft auf dem vom Körper zurückgelegten Weg verändert. Im folgenden wird an zwei Beispielen die Arbeit für den Fall ermittelt, daß eine veränderliche Kraft in Bewegungsrichtung wirkt.

Spannarbeit. Beim Spannen einer Schraubenfeder ist innerhalb gewisser Grenzen die Kraft proportional der Strecke, die das bewegliche Ende der Feder zurücklegt.

Zwischen Kraft F und Federweg s besteht die Beziehung

$$F = k \cdot s. \qquad (11)$$

Die Konstante k wird **Federkonstante** genannt.
F ist die Kraft am Ende des Dehnungsvorganges.



20/1 Kraft-Weg-Diagramm für die Dehnung einer Schraubenfeder. Die Federkonstante ist

$$k = \frac{30\ \text{N}}{20\ \text{cm}},\ k = 1{,}5\,\frac{\text{N}}{\text{cm}},\ k = 150\,\frac{\text{N}}{\text{m}}.$$

Um die Arbeit zu berechnen, die beim Spannen der Feder verrichtet wird, kann F durch die mittlere Kraft F_m ersetzt werden, die beim Dehnungsvorgang wirksam ist. Wegen der Proportionalität zwischen Federkraft und Federweg gilt

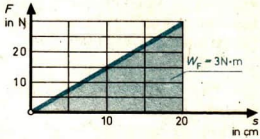
$$F_m = \frac{1}{2} F;\ F_m = \frac{1}{2} k \cdot s.$$

Damit erhält man die

► **Federspannarbeit**

$$W_F = \frac{1}{2} F \cdot s \qquad (12)$$

$$W_F = \frac{1}{2} k \cdot s^2 \qquad (13)$$



20/2 Die Spannarbeit kann im F-s-Diagramm als Inhalt einer Dreieckfläche bestimmt werden.

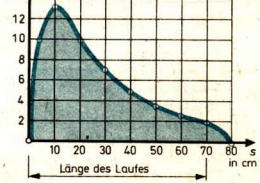
Zum gleichen Ergebnis führt die Auswertung des F-s-Diagramms (Bild 20/2). Die Spannarbeit entspricht dort dem Inhalt einer Dreieckfläche. Bei der Dehnung um $s = 20$ cm und der zugehörigen Endkraft $F = 30$ N erhält man

$$W_F = \frac{1}{2} \cdot 30\ \text{N} \cdot 0{,}20\ \text{m},\ W_F = 3\ \text{N} \cdot \text{m}.$$

Auch wenn sich die Kraft nicht proportional zum zurückgelegten Weg verändert, kann die Arbeit als Inhalt einer Fläche im F-s-Diagramm dargestellt werden.

■ Bild 20/3 veranschaulicht die Druckkraft, die beim Abfeuern eines Gewehrs auf das Geschoß wirkt. Während des Verbrennens der Pulverladung steigt die Kraft zunächst steil an. Bei der einsetzenden Bewegung des Geschosses nimmt das Volumen der Pulvergase zu, und die Druckkraft sinkt allmählich ab.
Von der Reibungskraft und der Luftwiderstandskraft, die das Geschoß außerdem beeinflussen, soll hier abgesehen werden. Die am Geschoß verrichtete Arbeit wird durch den Inhalt der farbigen Fläche im F-s-Diagramm dargestellt. ①

20/3 Kraft-Weg-Diagramm für ein Geschoß beim Abfeuern eines Gewehrs. Den quadratischen Flächeneinheiten entspricht die Arbeit $W_1 = 2\ \text{kN} \cdot 0{,}1\ \text{m}$, $W_1 = 200\ \text{N} \cdot \text{m}$, $W_1 = 0{,}2\ \text{kJ}$. Durch Auszählen der vollen Flächeneinheiten und Abschätzen von Bruchteilen findet man $A \approx 24{,}5$ Flächeneinheiten und $W \approx 4{,}9$ kJ.



Kinetische Energie und Beschleunigungsarbeit 6

Wenn ein Körper aus der Ruhelage heraus beschleunigt wird, ist die verrichtete Beschleunigungsarbeit gleich der erreichten kinetischen Energie. In Klasse 9 wurde auf dieser Grundlage bewiesen:

► **Die kinetische Energie eines Körpers ist durch seine Masse und seine Geschwindigkeit bestimmt.**

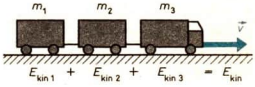
$$E_{kin} = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \qquad (14)$$

Wenn die Beschleunigungsarbeit an einem Körper verrichtet wird, der sich bereits bewegt, gilt die allgemeine Beziehung:

► **Die Änderung der kinetischen Energie ΔE_{kin} eines Körpers ist gleich der verrichteten Beschleunigungsarbeit W_B.**

$$E_{kin,e} - E_{kin,a} = W_B \qquad (15)$$

Die Indizes a und e bezeichnen die Zustände am Anfang und am Ende des Prozesses. ② ③



21/1 Die kinetische Energie eines Systems aus mehreren Körpern ist gleich der Summe der kinetischen Energie der einzelnen Körper.
$E_{kin} = E_{kin,1} + E_{kin,2} + E_{kin,3}$
Das gilt auch, wenn die Körper verschiedene Geschwindigkeiten haben.

■ Ein Kraftfahrzeug der Masse 1 t fährt mit der Geschwindigkeit 100 km · h⁻¹. Es soll auf einer Strecke von 80 m bis zum Stillstand abgebremst werden. Welche konstante Reibungskraft muß dafür zur Verfügung stehen?

Gegeben:

$m = 10^3$ kg
$v_a = 100$ km · h⁻¹ $= 27{,}8$ m · s⁻¹
$s = 80$ m

Gesucht:
F_R

Lösung:

Auf den Bremsvorgang wird die Arbeit-Energie-Beziehung
$E_{kin,e} - E_{kin,a} = W$
angewendet. Wegen $E_{kin,e} = 0$ gilt hier speziell

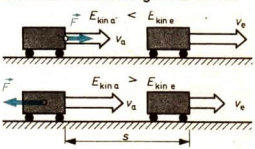
$$-\frac{1}{2} m \cdot v_a^2 = -F_R \cdot s.$$

Durch Umformen erhält man die Reibungskraft

$$F_R = \frac{m \cdot v_a^2}{2\,s}$$

$$\underline{F_R \doteq 4{,}8 \cdot 10^3 \text{ N}}$$

Die Reibungskraft beträgt 4,8 Kilonewton.



21/2 Bei positiver Beschleunigungsarbeit nimmt die kinetische Energie des Fahrzeugs zu:
$W > 0, \quad E_{kin,e} > E_{kin,a}$
Bei negativer Beschleunigungsarbeit (Bremsen) nimmt die kinetische Energie des Fahrzeugs ab
$W < 0, \quad E_{kin,e} < E_{kin,a}$

---

① Wie kann die an einem Körper verrichtete Arbeit bestimmt werden, wenn sich die Kraft auf dem zurückgelegten Weg verändert?
② Begründen Sie, daß die kinetische Energie eine Zustandsgröße ist!
③ Bei einem Bremsvorgang soll die kinetische Energie eines Fahrzeugs um die Hälfte verringert werden. Wie verändert sich hierdurch die Geschwindigkeit?

In diesem Abschnitt werden die Eigenschaften dieser komplizierten Größe genauer untersucht; hierbei wird für zwei wichtige Fälle die potentielle Energie berechnet.
Beim Verrichten von Hubarbeit, Spannarbeit und Reibungsarbeit gibt es ein gemeinsames Merkmal: Der Kraft, die den Prozeß herbeiführt, wirkt jeweils eine zweite Kraft entgegen – die Gravitationskraft, die Federkraft bzw. die Reibungskraft. Man sagt in diesen Fällen auch, daß Arbeit (Verschiebungsarbeit) **gegen** eine andere Kraft verrichtet wird.
Die Erfahrung zeigt, daß nur nach dem Hub- und dem Spannprozeß die verrichtete Arbeit – wenigstens teilweise – durch mechanische Prozesse rückgewinnbar ist. Wenn Reibungsarbeit verrichtet worden ist, besteht diese Möglichkeit nicht. In diesem Falle finden am Körper und seiner Umgebung Temperaturänderungen statt. Diese thermischen Zustandsänderungen und die damit verbundenen Energieumwandlungen werden im Abschnitt Thermodynamik untersucht. ①
Durch diese Gegenüberstellung tritt eine besondere Eigenschaft der Gravitationskräfte und der elastischen Kräfte hervor, die bei den Reibungskräften fehlt und die durch den Begriff potentielle Energie erfaßt wird:

► **Die potentielle Energie eines Systems wird erhöht, wenn Arbeit gegen eine Gravitationskraft oder gegen eine elastische Kraft verrichtet wird.**

$$\Delta E_{pot} = W \qquad (16)$$

Man erkennt, daß auf dieser Grundlage nur **Änderungen** der potentiellen Energie berechnet werden können. Damit jedem Zustand des Systems eine potentielle Energie zugeordnet werden kann, muß vereinbart werden, daß in einem bestimmten Systemzustand die potentielle Energie null sein soll.

Potentielle Energie eines Körpers im Gravitationsfeld.
Um diese zu berechnen, wird ein Hubvorgang betrachtet, bei dem die gesamte Hubarbeit in potentielle Energie umgesetzt wird. Dazu müssen folgende Bedingungen erfüllt sein:

– Es dürfen keine Reibungskräfte auftreten;

– Der Körper wird mit konstanter Geschwindigkeit gehoben, so daß Hubkraft und Gewichtskraft den gleichen Betrag $F_H = F_G = m \cdot g$ haben;

– Die Geschwindigkeit wird so klein gewählt, daß die kinetische Energie des Körpers vernachlässigt werden kann.

Mit dem Ausdruck für die Hubarbeit (8) gewinnt man zunächst die Änderung der potentiellen Energie beim Hubvorgang

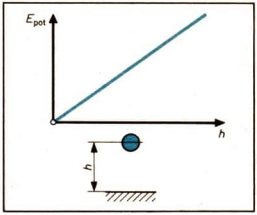
$$E_{pot,e} - E_{pot,a} = m \cdot g \cdot h.$$

Als Nullniveau der potentiellen Energie eines Körpers im Gravitationsfeld wird i. a. die tiefste Horizontalebene gewählt, die der Körper bei dem untersuchten mechanischen Vorgang erreichen kann. Auf dieses Niveau werden zugleich die Höhenangaben bezogen. ②
Unter dieser Voraussetzung erhält man die

► **Potentielle Energie eines Körpers im erdnahen Gravitationsfeld.**

$$E_{pot} = m \cdot g \cdot h \qquad (17)$$

Die potentielle Energie hängt nicht davon ab, auf welche Weise das betrachtete System in seinen Zustand gelangt ist. Zum Beispiel können die gleiche Lage eines Körpers im Gravitationsfeld und damit auch die gleiche potentielle Energie nicht nur durch Verrichten von Hubarbeit, sondern auch bei einem lotrechten oder schrägen Wurf erreicht werden.



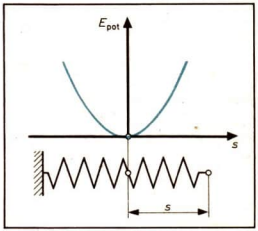
23/1 Die potentielle Energie eines Körpers im Gravitationsfeld ist proportional der Höhe über der gewählten Bezugsebene.

Potentielle Energie einer Feder. Wenn bei der elastischen Verformung einer Feder keine Reibungs- und Beschleunigungsvorgänge auftreten, wird die verrichtete Federspannarbeit vollständig in potentielle Energie der gespannten Feder umgesetzt. Hierbei ist es physikalisch sinnvoll, der entspannten Feder die potentielle Energie null zuzuordnen. Unter dieser Voraussetzung erhält man mit der Gleichung für die Spannarbeit (13) die

► **Potentielle Energie einer gespannten Schraubenfeder**

$$E_{pot} = \frac{1}{2} k \cdot s^2 \qquad (18)$$

Da die potentielle Energie proportional dem Quadrat der Verformung ist, hat auch die zusammengedrückte Feder ($s < 0$) eine positive potentielle Energie (Bild 23/2).



23/2 Potentielle Energie einer gespannten Feder

Die Eigenschaften der Zustandsgröße potentielle Energie können nunmehr in folgender Form zusammengefaßt werden:

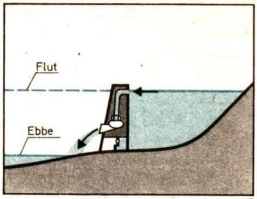
Die potentielle Energie
– ist das Arbeitsvermögen mechanischer Systeme, das auf Gravitationskräften und elastischen Kräften beruht;
– ist durch die Lage und die Verformung der beteiligten Körper bestimmt;
– wird in bezug auf einen Zustand des betrachteten Systems angegeben, dem der Wert $E_{pot} = 0$ zugeordnet wird;
– hängt nicht davon ab, auf welche Weise der zugehörige Zustand des Systems erreicht wurde.

---

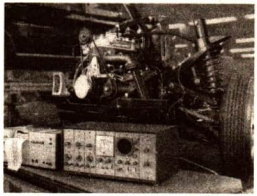
① Das Verrichten von Reibungsarbeit führt zu Temperaturänderungen der beteiligten Körper. Geben Sie Beispiele für solche Prozesse!
② Weshalb gilt die Gleichung $E_{pot} = m \cdot g \cdot h$ für die potentielle Energie nur nahe der Erdoberfläche?

Anwendungsbeispiele zur Energie

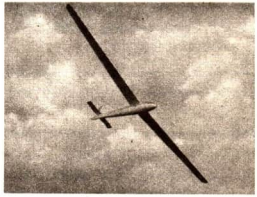
Gezeitenkraftwerk. Der Höhenunterschied des Meeresspiegels zwischen Ebbe und Flut beträgt an manchen Küsten mehr als 10 Meter. Die damit verbundenen Änderungen der potentiellen Energie können in Gezeitenkraftwerken genutzt werden.
Das bei Flut in eine Flußmündung oder Meeresbucht eingedrungene Wasser wird gestaut; es treibt bei Ebbe Turbinen an, die mit elektrischen Generatoren gekoppelt sind.



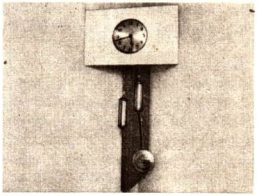
Federung an Fahrzeugen. Ein Fahrzeug wird bei seiner Fahrt auf unebener Bahn in unregelmäßiger Folge gehoben und gesenkt. Die Federung bewirkt, daß bei den Hubvorgängen auch Spannarbeit verrichtet wird. Dadurch verkleinern sich die Hubstrecken. An Vertiefungen der Fahrbahn entspannt sich die Feder und wirkt dabei der Abwärtsbewegung des Fahrzeugs entgegen.



Segelflugzeug. Durch einen Hochstart oder durch Ausnutzung aufsteigender Luftströme (Thermik) gewinnt ein Segelflugzeug potentielle Energie. Diese wird beim Gleitflug in Reibungsarbeit umgesetzt. Je kleiner der Gleitwinkel ist, desto weiter kann das Flugzeug mit der anfangs vorhandenen potentiellen Energie gleiten.



Gewichtsantrieb einer Uhr. Durch das „Aufziehen" der Gewichtskörper erhält das mechanische System Pendeluhr potentielle Energie. Beim Sinken der Gewichtskörper wird diese Energie wieder abgegeben. Dafür wird beim Drehen der Räder und Zeiger und zur Betätigung des Schlagwerkes Arbeit verrichtet.



Problemfragen

- Durch welche Prozesse erhalten die in den Beispielen betrachteten mechanischen Systeme potentielle Energie?
- Welche Energieumwandlungen finden bei den untersuchten Beispielen statt?
- Erläutern Sie weitere Beispiele für die technische Nutzung der potentiellen Energie von Körpern im Gravitationsfeld!
- Diskutieren Sie, welche mechanischen Energien durch meteorologische Vorgänge auftreten!
- Beschreiben Sie die technische Funktion der dargestellten Beispiele!

Ein wichtiger Spezialfall der Arbeit-Energie-Beziehung gilt für abgeschlossene Systeme, in denen keine Reibungskraft auftritt. Die mechanische Energie eines solchen Systems ändert sich nicht mit der Zeit, sie ist eine **Erhaltungsgröße**.
Erhaltungsgrößen eines Systems sind zeitlich konstante Zustandsgrößen.
Alle Prozesse in einem solchen mechanischen System führen zu einer Umverteilung zwischen potentieller und kinetischer Energie. Das ist der Inhalt des
Energieerhaltungssatzes der Mechanik:

► **Die mechanische Energie eines abgeschlossenen, reibungsfreien mechanischen Systems ist eine Erhaltungsgröße.**

$$E_a = E_e \qquad (19)$$
$$E_{pot,a} + E_{kin,a} = E_{pot,e} + E_{kin,e}$$
$$E = \text{konstant}$$

Mit Hilfe des Energieerhaltungssatzes können viele mechanische Probleme in übersichtlicher Form gelöst werden.

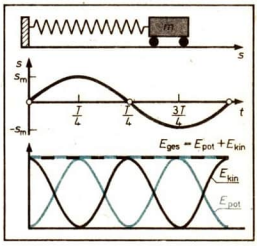
■ Ein Fadenpendel der Länge $l = 1{,}0$ m wird um 90° aus seiner senkrechten Gleichgewichtslage ausgelenkt und dort freigegeben. Mit welcher Geschwindigkeit geht der Pendelkörper bei der einsetzenden Schwingung durch die Gleichgewichtslage?
Wenn vorausgesetzt wird, daß keine Reibung vorhanden ist, gilt für dieses System der Energieerhaltungssatz der Mechanik. Mit den in Bild 25/2 angegebenen Größen erhält man

$$m \cdot g \cdot l = \frac{1}{2} m \cdot v_e^2$$

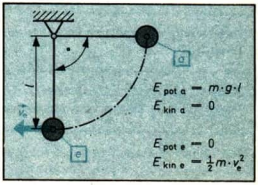
$$v_e = \sqrt{2\,g \cdot l}\,; \quad v_e = \sqrt{2 \cdot 9{,}81\ \mathrm{m \cdot s^{-2}} \cdot 1{,}0\ \mathrm{m}}$$
$$\underline{v_e = 4{,}4\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}}$$

Der Pendelkörper erreicht die gleiche Geschwindigkeit wie bei einem freien Fall über die Strecke l. ①

Aus diesem Beispiel sind die Arbeitsschritte abzulesen, die bei der Anwendung des Energieerhaltungssatzes zu durchlaufen sind: **Abgrenzung des Systems – Auswahl der Systemzustände,** in denen die gegebenen und gesuchten Größen auftreten – **Formulierung der Energiebilanz – Berechnung der gesuchten Größen.**
Auch wenn die Voraussetzungen für die Erhaltung der mechanischen Gesamtenergie nicht erfüllt sind, können auf Grund von Energiebilanzen Lösungen für Probleme der Mechanik entwickelt werden. Besonders wichtig ist die Berücksichtigung von Reibungsvorgängen, durch die eine Verringerung der mechanischen Gesamtenergie stattfindet.



25/1 Bei einem ungedämpften Federschwinger ändern sich die kinetische und die potentielle Energie zeitlich periodisch. Die Summe beider Energien ist konstant.



25/2

① Formulieren Sie den Energieerhaltungssatz für das Fadenpendel unter der Voraussetzung, daß der Pendelkörper in der Gleichgewichtslage die Höhe h_0 über der Bezugsebene hat, in der $E_{pot} = 0$ gilt.

■ Bei einer Fahrt mit dem Rennschlitten, die mit der Geschwindigkeit $v_0 = 3\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$ beginnt, wird die Geschwindigkeit $v_1 = 20\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$ erreicht. Die Länge der Bahn beträgt $s = 1000$ m, der Höhenunterschied von Start und Ziel $h = 90$ m. Schlitten und Fahrer haben zusammen die Masse $m = 80$ kg.
Wie groß ist die mittlere Kraft, die während der Fahrt auf Grund von Gleitreibung und Luftwiderstand auf den Schlitten wirkt?

Gegeben:

$v_0 = 3\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$
$v_1 = 20\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$
$h = 90\ \mathrm{m}$
$s = 1000\ \mathrm{m}$
$m = 80\ \mathrm{kg}$

Gesucht:

F

Lösung:

Die am Start vorhandene mechanische Gesamtenergie $E_{\mathrm{pot},0} + E_{\mathrm{kin},0}$ wird bei der Fahrt in die kinetische Energie $E_{\mathrm{kin},1}$ und in Reibungsarbeit $F \cdot s$ umgesetzt. Die Energiebilanz hat die Form $E_{\mathrm{pot},0} + E_{\mathrm{kin},0} = E_{\mathrm{kin},1} + F \cdot s$.

Durch Umformung erhält man

$$F = \frac{1}{s}(E_{\mathrm{pot},0} + E_{\mathrm{kin},0} - E_{\mathrm{kin},1})$$

In diese Gleichung werden die Ausdrücke (17) und (14) für die potentielle bzw. kinetische Energie eingesetzt:

$$F = \frac{1}{s}\left(m \cdot g \cdot h + \frac{1}{2} m \cdot v_0^2 - \frac{1}{2} m \cdot v_1^2\right)$$

$$F = \frac{m}{s}\left(g \cdot h + \frac{1}{2} v_0^2 - \frac{1}{2} v_1^2\right)$$

Mit den gegebenen Größen findet man

$$F = \frac{80\ \mathrm{kg}}{1000\ \mathrm{m}} \times$$

$$\times \left(9{,}8\ \mathrm{m \cdot s^{-2}} \cdot 90\ \mathrm{m} + \frac{9}{2}\ \mathrm{m^2 \cdot s^{-2}} - \frac{400}{2}\ \mathrm{m^2 \cdot s^{-2}}\right)$$

$$\underline{\underline{F = 55\ \mathrm{N}}}$$

Die mittlere Bremskraft beträgt etwa 50 N.

① ②

Zusammenfassung

9

Kinetische Energie, potentielle Energie und mechanische Gesamtenergie sind Zustandsgrößen mechanischer Systeme. Die mechanische Arbeit ist eine Prozeßgröße, durch die Energieänderungen erfaßt werden.
Für die allgemeine Arbeit-Energie-Beziehung $\Delta E = W$ wurden die folgenden Fälle untersucht:

Beschleunigungsarbeiten führen zu Änderungen der kinetischen Energie.	$\Delta E_{\mathrm{kin}} = W_{\mathrm{B}}$	(20)
Änderungen des Lagezustandes im Gravitationsfeld sowie elastische Verformungen führen zu Änderungen der potentiellen Energie.	$\Delta E_{\mathrm{pot}} = W_{\mathrm{H}}$ $\Delta E_{\mathrm{pot}} = W_{\mathrm{F}}$	(21) (22)
Für abgeschlossene reibungsfreie Systeme gilt der Energieerhaltungssatz der Mechanik. Für solche Systeme ist die mechanische Gesamtenergie eine Erhaltungsgröße.	$\Delta E = 0$ $\Delta(E_{\mathrm{pot}} + E_{\mathrm{kin}}) = 0$ $E = \text{konstant}$	(23) (24) (25)
Die mechanische Gesamtenergie eines mechanischen Systems wird beim Verrichten von Reibungsarbeit verringert.	$\Delta E = W$	(26)

Anwendung des Energieerhaltungssatzes der Mechanik

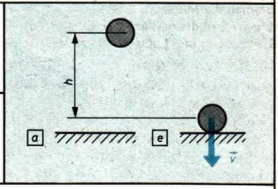
Berechnung der Endgeschwindigkeit beim freien Fall

$E_{pot,a} = m \cdot g \cdot h$ $\qquad$ $E_{pot,e} = 0$

$E_{kin,a} = 0$ $\qquad$ $E_{kin,e} = \frac{1}{2} m \cdot v^2$

$$m \cdot g \cdot h = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

$$v = \sqrt{2 g \cdot h}$$



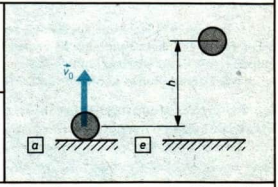
Berechnung der Steighöhe beim senkrechten Wurf nach oben

$E_{pot,a} = 0$ $\qquad$ $E_{pot,e} = m \cdot g \cdot h$

$E_{kin,a} = \frac{1}{2} m \cdot v_0^2$ $\qquad$ $E_{kin,e} = 0$

$$\frac{1}{2} m \cdot v_0^2 = m \cdot g \cdot h$$

$$h = \frac{v_0^2}{2 g}$$



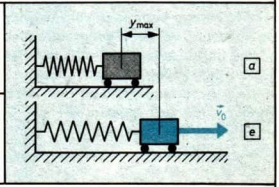
Berechnung der Geschwindigkeit eines Federschwingers beim Durchgang durch die Gleichgewichtslage

$E_{pot,a} = \frac{1}{2} k \cdot y^2_{max}$ $\qquad$ $E_{pot,e} = 0$

$E_{kin,a} = 0$ $\qquad$ $E_{kin,e} = \frac{1}{2} m \cdot v_0^2$

$$\frac{1}{2} k \cdot y^2_{max} = \frac{1}{2} m \cdot v_0^2$$

$$v_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \cdot y_{max}$$



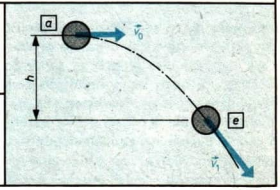
Berechnung der Endgeschwindigkeit beim horizontalen Wurf

$E_{pot,a} = m \cdot g \cdot h$ $\qquad$ $E_{pot,e} = 0$

$E_{kin,a} = \frac{1}{2} m \cdot v_0^2$ $\qquad$ $E_{kin,e} = \frac{1}{2} m \cdot v_1^2$

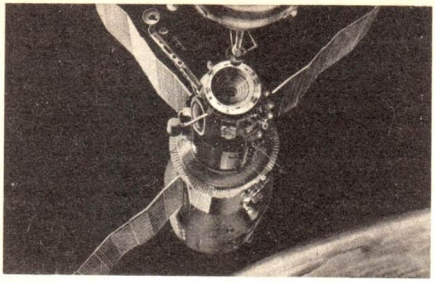
$$\frac{1}{2} m \cdot v_0^2 + m \cdot g \cdot h = \frac{1}{2} m \cdot v_1^2$$

$$v_1 = \sqrt{v_0^2 + 2 g \cdot h}$$



① Weshalb ist es bei dem Beispiel Rennschlitten nur sinnvoll, einen Mittelwert der Bremskraft abzuschätzen?

② Diskutieren Sie potentielle und kinetische Energie sowie die mechanische Gesamtenergie für einen Fallschirmspringer, der mit konstanter Geschwindigkeit sinkt!



Kraftstoß, Impuls, Impulserhaltungssatz

Am 11. Januar 1978 legte das Raumschiff Sojus 27 an den Orbitalkomplex Salut 6/Sojus 26 an. Zum ersten Male in der Geschichte der Raumfahrt bewegten sich drei miteinander gekoppelte Raumflugkörper auf einer Erdumlaufbahn. Mit dieser wissenschaftlich-technischen Pionierleistung der Sowjetunion begann der „kosmische Pendelverkehr". Raumstationen können regelmäßig versorgt und ihre Besatzungen ausgetauscht werden.

Bei den Ankopplungsmanövern müssen zwischen den zu koppelnden Systemelementen bestimmte Lagebeziehungen hergestellt werden. Außerdem muß die Geschwindigkeit des Raumschiffes sehr genau an die der Station angeglichen werden, damit beim Ankoppeln keine starken Erschütterungen oder sogar Beschädigungen auftreten.
Diese Manövrieraufgaben werden durch kurzzeitiges Einschalten von Triebwerken gelöst. Das führt zu einer wichtigen physikalischen Fragestellung: Wie wird der Bewegungszustand eines Körpers beeinflußt, wenn auf ihn eine Kraft während einer bestimmten Zeitdauer einwirkt?
Bei der Lösung kann man vom Grundgesetz der Dynamik ausgehen, in dem die Erfahrungen über die Änderung des Bewegungszustandes von Körpern durch Kräfte erfaßt wurden. Hierbei wird sich zeigen, daß es zweckmäßig ist, den Bewegungszustand eines Körpers durch eine neue physikalische Größe, den Impuls, zu beschreiben. Weiterhin ist zu klären, wie die Schubkraft eines Raketentriebwerks zustande kommt und durch welche Größen sie bestimmt ist. Der Gesamtimpuls eines Systems wird sich ebenso wie die Gesamtenergie unter bestimmten Voraussetzungen als eine Erhaltungsgröße erweisen.

Kraftstoß und Impuls 10

Die Änderungen der Geschwindigkeit eines Raumschiffs beim Kopplungsmanöver sind um so größer, je länger das Triebwerk arbeitet und je größer seine Schubkraft ist. Entsprechendes gilt auch beim Anfahren eines Kraftfahrzeugs und bei vielen anderen Prozessen. Es liegt deshalb nahe, das Produkt aus der Kraft und der Zeitdauer ihrer Einwirkung in seiner Beziehung zum Bewegungszustand des Körpers zu untersuchen. Man erkennt hier eine Analogie zur Einführung der Prozeßgröße mechanische Arbeit. Im folgenden soll deduktiv vorgegangen werden: Es gilt, aus dem Grundgesetz der Dynamik mit mathematischen Methoden weitere Gesetze abzuleiten. Hieran schließt sich eine experimentelle Überprüfung der gewonnenen Ergebnisse an.

Um das Produkt von Kraft und Zeit in die Rechnung einzuführen, werden beide Seiten der Gleichung $F = m \cdot a$ mit der Zeitdauer $\Delta t = t_2 - t_1$ der Krafteinwirkung multipliziert. Hierbei wird zunächst vorausgesetzt, daß die Kraft konstant ist.

$$F \cdot \Delta t = m \cdot a \cdot \Delta t. \qquad (27)$$

Nach der Definitionsgleichung der Beschleunigung gilt

$$a \cdot \Delta t = \Delta v = v_2 - v_1. \qquad (28)$$

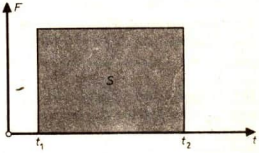
Damit folgt aus dem Grundgesetz die Beziehung (29):

► **Das Produkt aus der Kraft und der Zeitdauer ihrer Einwirkung auf einen Körper ist gleich dem Produkt aus der Masse und der Geschwindigkeitsänderung des Körpers.**

$$F \cdot \Delta t = m \cdot \Delta v \qquad (29)$$

Dieses Ergebnis bringt den im Grundgesetz der Dynamik erfaßten Zusammenhang von Kraft und Bewegung in neuer Form zum Ausdruck: Das Produkt $F \cdot \Delta t$ ist Merkmal eines Prozesses, der während einer Zeit Δt unter Wirkung der Kraft F stattfindet. Das Produkt $m \cdot \Delta v$ beschreibt das Ergebnis dieses Prozesses – die Änderung des Bewegungszustandes. Die hier gewonnene Erkenntnis kann auch in einer anderen Form dargestellt werden. Dazu dienen zwei neue physikalische Begriffe: Kraftstoß und Impuls, die den genannten Prozeß bzw. den Bewegungszustand des Körpers widerspiegeln.

29/1 Bei konstanter Kraft wird der Betrag des Kraftstoßes in einem F-t-Diagramm durch den Inhalt einer Rechteckfläche dargestellt.



Der **Kraftstoß** ist eine vektorielle Prozeßgröße, durch die der Einfluß einer Kraft auf den Bewegungszustand eines Körpers während einer gegebenen Zeitdauer erfaßt wird.
Unter der Voraussetzung konstanter Kraft wird das Produkt $F \cdot \Delta t$ als Kraftstoß bezeichnet. Da man mit dieser Größe vor allem bei zeitlich veränderlichen Kräften arbeitet, wird definiert:

► **Der Kraftstoß S ist das Produkt aus der mittleren Kraft $\overline{F}$ und der Zeitdauer ihrer Einwirkung Δt.**

$$S = \overline{F} \cdot \Delta t \qquad (30)$$

Einheit des Kraftstoßes ist $1\ \mathrm{N \cdot s} = 1\ \mathrm{kg \cdot m \cdot s^{-1}}$.

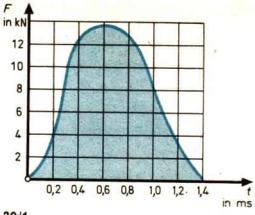
Bei veränderlicher Kraft kann der Betrag des Kraftstoßes in einem F-t-Diagramm durch den Inhalt einer Fläche bestimmt werden.

■ Beim Abfeuern eines Gewehrs ändert sich die Druckkraft der Pulvergase mit der Zeit (Bild 30/1). Der auf das Gewehr wirkende Kraftstoß wird durch den Inhalt der Fläche dargestellt, die von der Kurve und der t-Achse begrenzt wird. Den quadratischen Flächeneinheiten entspricht der Kraftstoß $S_1 = 0{,}4$ Newtonsekunden.

Durch Auszählen der vollen Flächeneinheiten und Abschätzen von Bruchteilen findet man $A \approx 27$ Flächeneinheiten und $S \approx 11\ \mathrm{N \cdot s}$.

Für die Zeitdauer eines Kraftstoßes bestehen keine Einschränkungen. Man benutzt diesen Begriff aber vorwiegend bei kurzer Dauer der Kraftwirkung. ①

Der **Impuls** ist eine vektorielle Zustandsgröße, die den Bewegungszustand eines Körpers in anderer Form als die Geschwindigkeit kennzeichnet, da auch die Masse des bewegten Körpers berücksichtigt wird.



30/1

► **Der Impuls p eines Körpers ist gleich dem Produkt von Masse m und Geschwindigkeit v.**

$$p = m \cdot v \qquad (31)$$

Einheit des Impulses ist $1\ \mathrm{kg \cdot m \cdot s^{-1}}$.

Aus dieser Definition ist abzuleiten, daß sich auch Änderungen der Masse eines Körpers auf den Impuls auswirken. Daher schreibt man Impulsänderungen in der Form $\Delta p = \Delta\,(m \cdot v)$.

Nachdem jetzt die Größen Kraftstoß und Impuls eingeführt worden sind, kann die aus Gleichung (29) folgende Beziehung

$F \cdot \Delta t = m \cdot v_2 - m \cdot v_1$

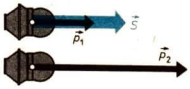
in der Form $S = p_2 - p_1$ dargestellt werden: ② ③

► **Der auf einen Körper ausgeübte Kraftstoß ist gleich der Impulsänderung des Körpers.**

$$S = \Delta p$$
$$\Delta p = \Delta(m \cdot v) \qquad (32)$$

Man erkennt, daß physikalische Zusammenhänge einfacher und übersichtlicher darstellbar sind, wenn geeignete neue Begriffe geprägt werden. Das geschieht oft im Laufe einer längeren historischen Entwicklung.

Zugleich tritt die Analogie hervor, die zur Beziehung zwischen Beschleunigungsarbeit und kinetischer Energie besteht; auch in diesem Falle wird die Änderung einer Zustandsgröße durch eine Prozeßgröße erfaßt.



30/2 Wenn der Kraftstoß in Richtung des anfangs vorhandenen Impulses wirkt, nimmt der Betrag des Impulses zu, seine Richtung bleibt unverändert.

■ Ein Raumschiff der Masse 1 Tonne bewegt sich mit der Geschwindigkeit $0{,}6\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$. Mit Hilfe des Triebwerks wird auf das Raumschiff 20 Sekunden lang die Kraft 7,5 kN in Bewegungsrichtung ausgeübt. Es sind der Kraftstoß und die Geschwindigkeitsänderung des Raumschiffs zu berechnen. Die Änderung der Masse des Raumschiffs ist zu vernachlässigen.

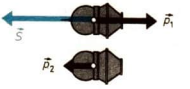
Gegeben:

$F = 7{,}5 \cdot 10^3\ \mathrm{N}$
$t = 20\ \mathrm{s}$
$m = 10^3\ \mathrm{kg}$
$v = 6 \cdot 10^2\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$

Lösung:

Da die Kraft konstant ist, gilt
$S = F \cdot t$

$S = 7{,}5 \cdot 10^3\ \mathrm{N} \cdot 20\ \mathrm{s}$
$S = 1{,}5 \cdot 10^5\ \mathrm{N \cdot s} = 1{,}5 \cdot 10^5\ \mathrm{kg \cdot m \cdot s^{-1}}$



30/3 Wenn der Kraftstoß entgegengesetzt zum Anfangsimpuls orientiert ist, nimmt der Betrag des Impulses ab. Bei genügend großem Kraftstoß kann der Impuls auch seinen Richtungssinn umkehren.

Gesucht:
S

Δv

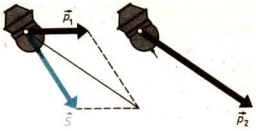
Aus $S = m \cdot \Delta v$ folgt für den Betrag der Geschwindigkeitsänderung

$$\Delta v = \frac{S}{m}$$

$$\Delta v = \frac{1{,}5 \cdot 10^5 \text{ kg} \cdot \text{m}}{10^3 \text{ kg} \cdot \text{s}}$$

$$\underline{\underline{\Delta v = 1{,}5 \cdot 10^2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}}$$

Der Betrag der Geschwindigkeitsänderung ist $150 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.



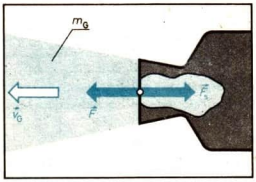
31/1 Wenn der Kraftstoß nicht die Richtung des anfangs vorhandenen Impulses hat, ändern sich im allgemeinen Betrag und Richtung des Impulses.

Im Gegensatz zu Arbeit und Energie sind Kraftstoß und Impuls ebenso wie Kraft und Geschwindigkeit Vektorgrößen. Die Impulsänderung hat nicht nur den gleichen Betrag, sondern auch die gleiche Richtung wie der Kraftstoß. Das soll an dem soeben behandelten Beispiel erläutert werden. Hierbei wird die Beziehung zwischen Kraftstoß und Impulsänderung in der Form $\vec{p}_2 = \vec{p}_1 + \vec{S}$ benutzt. In den Bildern 30/2, 30/3 und 31/1 wird die Addition der Vektorgrößen für drei verschiedene Richtungen des Kraftstoßes ausgeführt. ④

Schubkraft eines Raketentriebwerks. Die Wirkungsweise dieser Triebwerke wird auch durch die Bezeichnung „Rückstoßantrieb" gekennzeichnet. Man darf sich aber nicht vorstellen, daß sich eine Rakete an der umgebenden Luft „abstößt". Raketentriebwerke liefern bekanntlich auch außerhalb der irdischen Atmosphäre, im Weltraum, Schubkräfte. Diese entstehen allein durch die Wechselwirkung zwischen der Rakete und den ausströmenden Verbrennungsprodukten des Treibstoffs. Damit erweist sich das Wechselwirkungsgesetz als wichtige Grundlage für die Erklärung des Raketenprinzips.

Der Zusammenhang zwischen Kraftstoß und Impuls soll benutzt werden, um die Schubkraft eines Raketentriebwerks zu berechnen. Das Triebwerk sei in einem Prüfstand eingebaut. Die gasförmigen Verbrennungsprodukte des Treibstoffs strömen aus der Düse mit der Geschwindigkeit $\vec{v}_G$. Während der Zeit t werde vom Triebwerk die Treibstoffmasse m_G verbrannt und ausgestoßen.

31/2 Düse eines Raketentriebwerks mit ausströmendem Gasstrahl



Die ausgeströmten Gase haben den Impuls $m_G \cdot \vec{v}_G$. Von ihrer nachfolgenden Wechselwirkung mit der Luft kann abgesehen werden. Vor dem Ausströmen waren die Gase in Ruhe, und ihr Impuls war Null. Die Gase müssen daher vom Triebwerk den Kraftstoß

$$\vec{F} \cdot t = m_G \cdot \vec{v}_G$$

---

① Geben Sie Beispiele für kurzzeitige Kraftwirkungen, die in der mechanischen Produktion auftreten!

② Weisen Sie nach, daß Kraftstoß und Impuls die gleiche Einheit haben!

③ Berechnen Sie den Impuls eines Kraftfahrzeugs der Masse 1 Tonne, das sich mit der Geschwindigkeit $72 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ bewegt!

④ Durch Einwirkung eines Kraftstoßes soll sich der Impuls eines Körpers umkehren. Skizzieren Sie für einen solchen Vorgang die Impulse am Beginn und am Ende sowie den Kraftstoß! Bestimmen Sie den Betrag der Impulsänderung!

erhalten haben. Während dieser Zeit erfährt das Triebwerk nach dem Wechselwirkungsgesetz die Gegenkraft zu F

$\vec{F_S} = -\vec{F}$.

Das ist die Schubkraft. Für ihren Betrag gilt

$$F_S = \frac{m_G}{t} \cdot v_G \,. \qquad (33)$$

Aus dieser Gleichung geht hervor:

Die Schubkraft eines Triebwerks vergrößert sich, wenn der **Massestrom** $\frac{m_G}{t}$ und die Ausströmgeschwindigkeit v_G erhöht werden.

■ Die sowjetische Wostok-Trägerrakete ist in der 1. Antriebsstufe mit fünf Antriebssystemen ausgestattet. Jedes dieser Systeme besteht aus einem Bündel von vier gleichartigen Triebwerken. Die Ausströmgeschwindigkeit der Gase beträgt $3{,}2\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$. Jedes einzelne Triebwerk liefert einen Massestrom von $80\ \mathrm{kg \cdot s^{-1}}$.
Wie groß sind die Schubkräfte der einzelnen Triebwerke und der gesamten Rakete?

Gegeben:

$v_G = 3{,}2\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$

$= 3{,}2 \cdot 10^3\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$

$\frac{m_G}{t} = 80\ \mathrm{kg \cdot s^{-1}}$

$n = 4 \cdot 5 = 20$

Lösung:

Schubkraft für ein Einzeltriebwerk

$F_S = \frac{m_G}{t} \cdot v_G$

$F_S = 80\ \mathrm{kg \cdot s^{-1}} \cdot 3{,}2 \cdot 10^3\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$

$F_S = 256 \cdot 10^3\ \mathrm{N}$

$\underline{\underline{F_S = 256\ \mathrm{kN}}}$

Gesamtschubkraft

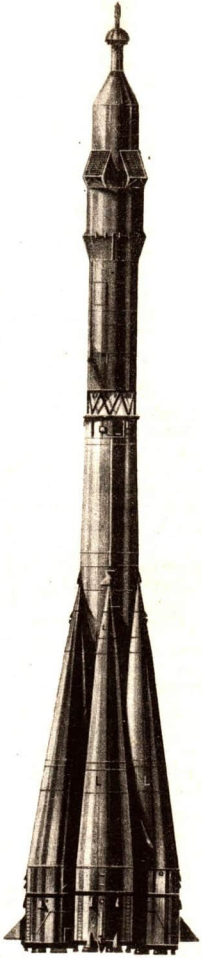
$F_{ges} = n \cdot F_S$

$F_{ges} = 20 \cdot 256\ \mathrm{kN}$

$\underline{\underline{F_{ges} = 5{,}12\ \mathrm{MN}}}$ ①

Die Schubkraft eines Einzeltriebwerks beträgt 260 kN, die gesamte Trägerrakete hat die Schubkraft 5 MN.

Anwendung der Raketentechnik. Im Jahre 1957 wurde der erste Sputnik auf eine Erdumlaufbahn gebracht; 1961 umkreiste erstmals ein Mensch, der sowjetische Kosmonaut Juri Gagarin, in einem Raumschiff die Erde. Heute verfügt die Sowjetunion über Raumstationen, in denen von wechselnden Besatzungen umfangreiche Forschungsprogramme ausgeführt werden. Diese Erfolge bei der Eroberung des Weltraums beruhen auf einer hochentwickelten Raketentechnik und zeigen die reichhaltigen Möglichkeiten, die der Menschheit durch eine friedliche Nutzung dieser Technik erschlossen werden.



32/1 „Wostok"/„Sojus"-Trägerrakete

Die Raketentechnik hat aber auch wichtige militärische Aspekte. Beim Schutz der sozialistischen Staatengemeinschaft haben in den letzten Jahrzehnten die Raketenwaffen entscheidende Funktionen erhalten.
Eine Einteilung der Raketenwaffen ist nach der Reichweite möglich (Tabelle 33/1).

Tabelle 33/1

Reichweite	Bezeichnung	Einsatzart
bis etwa 100 km	Kurzstreckenraketen	taktisch
100 km bis 3000 km	Mittelstreckenraketen	operativ
bis 13000 km	Interkontinentalraketen	strategisch
über 20000 km	Globalraketen	strategisch

Im Jahre 1960 wurden in der Sowjetunion die strategischen Raketentruppen als selbständige Teilstreitkraft gebildet. Ihre Kampfkraft beruht auf ballistischen Raketen. Diese bewegen sich nach Brennschluß außerhalb der Atmosphäre auf elliptischen Bahnen zum Zielgebiet. Dabei werden Gipfelhöhen von mehr als 1000 km erreicht.

Die Bedienung dieser modernen Waffentechnik erfordert eine gründliche Ausbildung, umfangreiche Kenntnisse auch auf physikalischem Gebiet und große Einsatzbereitschaft.
Zivile und militärische Einsatzmöglichkeiten von Raketen können nur bewertet werden, wenn man die gesellschaftlichen Verhältnisse beachtet, unter denen über Bau und Einsatz verfügt wird.
In den USA und den übrigen Ländern der NATO hat die Raketenrüstung aggressiven Charakter; sie verhilft vielen Monopolen zu Maximalprofiten.
Die Sowjetunion gewährleistet mit ihrer hochentwickelten Raketentechnik einen zuverlässigen Schutz der sozialistischen Staatengemeinschaft. Zugleich beteiligt sie viele Länder an ihren wissenschaftlichen Programmen zur Erforschung des Sonnensystems, des Weltraums und der Erde.
Damit wird die sozialistische ökonomische Integration auf

33/1 Fliegerabwehrraketen
Die Fla-Raketentruppen sind mit Raketen verschiedener Reichweite zur Bekämpfung von Luftangriffsmitteln des Gegners ausgerüstet. Während die Flakartillerie oft Hunderte von Geschossen benötigte, um ein Flugzeug zu vernichten, gelingt das jetzt mit einer einzigen lenkbaren Rakete. Zu diesem Verteidigungssystem gehören auch die raketenbestückten Abfangjäger.

33/2 Ballistische Rakete der sowjetischen Streitkräfte

① Durch welche Maßnahmen kann die Schubkraft eines Raketentriebwerks vergrößert werden?

einem besonderen Gebiet der Wissenschaft und Technik verwirklicht. Andererseits ist die Politik der Sowjetunion und ihrer Bruderländer darauf gerichtet, die Entwicklung immer neuer Raketenwaffen zu verhindern und auf diesem Gebiete Abrüstungsmaßnahmen durchzusetzen, um damit einen Beitrag zur Erhaltung des Friedens zu leisten und gleichzeitig neue Möglichkeiten zur Entwicklung der Raumfahrt erschließen zu können.

Impulserhaltungssatz 11

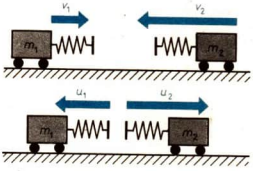
Bei der Berechnung der Schubkraft eines Raketentriebwerks wurde das Wechselwirkungsgesetz auch auf Kraftstöße angewendet.
Zwei Körper, die während der Zeit Δt miteinander wechselwirken, erfahren dabei Kraftstöße mit gleichen Beträgen und entgegengesetzten Richtungen.
Am Beispiel eines abgeschlossenen Systems nach Bild 34/1 soll auf deduktivem Wege untersucht werden, welche Folgerungen sich hieraus für die Impulse der beteiligten Körper ergeben. Es soll angenommen werden, daß auf die Wagen keine Reibungskräfte wirken. Da die beiden Gewichtskräfte durch Stützkräfte der Unterlage aufgehoben werden, ist das System dann frei von äußeren Kräften; es handelt sich um ein abgeschlossenes mechanisches System. Deshalb müssen ebenso wie die Kraftstöße auch die Impulsänderungen beider Körper gleiche Beträge haben und entgegengesetzt gerichtet sein:

$$\overrightarrow{\Delta p_1} = -\overrightarrow{\Delta p_2}$$

Die Impulsänderungen können durch die Massen und die Geschwindigkeiten der beteiligten Körper ausgedrückt werden:

$$m_1 \cdot \vec{u}_1 - m_1 \cdot \vec{v}_1 = -(m_2 \cdot \vec{u}_2 - m_2 \cdot \vec{v}_2). \qquad (34)$$

Durch Umformen dieser Gleichung gelangt man zum



34/1 Die beiden Wagen haben die Massen m_1 und m_2.
Sie rollen mit den Geschwindigkeiten $\vec{v}_1$ bzw. $\vec{v}_2$ aufeinander zu. Nach der Wechselwirkung durch die Federkräfte entfernen sich die Wagen voneinander mit den Geschwindigkeiten $\vec{u}_1$ bzw. $\vec{u}_2$. Das Formelzeichen u für die Geschwindigkeiten nach der Wechselwirkung wird verwendet, weil sich die Indizes 1 und 2 jetzt auf die beiden Körper und nicht die Bewegungszustände eines Körpers beziehen.

► Impulserhaltungssatz für ein abgeschlossenes System zweier Körper

$$m_1 \cdot \vec{v}_1 + m_2 \cdot \vec{v}_2 = m_1 \cdot \vec{u}_1 + m_2 \cdot \vec{u}_2 \qquad (35)$$

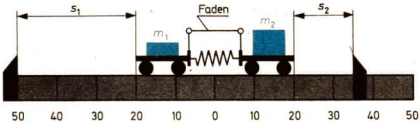
Die Vektorsumme der Impulse beider Körper wird als **Gesamtimpuls** $\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2$ des Systems bezeichnet. Mit dieser Größe erhält der Impulserhaltungssatz die Form

► Der Gesamtimpuls eines abgeschlossenen mechanischen Systems ist eine Erhaltungsgröße.

$$\vec{p} = \text{konstant}$$

Dieses Gesetz gilt auch für abgeschlossene Systeme mit mehr als zwei Körpern. Im Gegensatz zur mechanischen Gesamtenergie ist der Gesamtimpuls eine **vektorielle Erhaltungsgröße.** ① ②

Überprüfung des Impulserhaltungssatzes durch das Experiment. Zwei leicht bewegliche Wagen werden auf eine horizontale Glasplatte gestellt. Zwischen den Wagen befindet sich eine zusammengedrückte Schraubenfeder. Wenn der Faden durchgebrannt wird, bewegen sich die Wagen unter dem Einfluß der Federkräfte zunächst beschleunigt, nachdem die Feder entspannt ist, gleichförmig.
Die Prellböcke werden so aufgestellt, daß die Wagen gleichzeitig anschlagen.
Wenn die Reibungskräfte hinreichend klein sind, gilt für dieses System in guter Näherung der Impulserhaltungssatz.



35/1 Experiment zur Bestätigung des Impulserhaltungssatzes

Bei dem Versuch sind die Wagen zunächst in Ruhe; der Gesamtimpuls des Systems ist deshalb Null. Für die Impulse nach dem Entspannen der Feder gilt deshalb

$$m_1 \cdot \vec{u}_1 + m_2 \cdot \vec{u}_2 = 0. \qquad (36)$$

Diese Gleichung drückt aus, daß beide Wagen Impulse mit dem gleichen Betrag

$$m_1 \cdot u_1 = m_2 \cdot u_2 \qquad (37)$$

haben und daß diese Impulse entgegengesetzt gerichtet sind. ③

Wenn die kurze Beschleunigungsdauer vernachlässigt wird, legen die Wagen in der Zeitdauer Δt die Wege $s_1 = u_1 \cdot \Delta t$ bzw. $s_2 = u_2 \cdot \Delta t$ zurück. Hieraus folgt die Proportion

$$s_1 : s_2 = u_1 : u_2. \qquad (38)$$

Darin kann das Geschwindigkeitsverhältnis auf Grund des Impulserhaltungssatzes durch das Massenverhältnis der Wagen ausgedrückt werden:

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{m_2}{m_1}. \qquad (39)$$

Das Versuchsergebnis entspricht der abgeleiteten Beziehung zwischen den Massen und den zurückgelegten Wegen. Damit ist für das betrachtete System der Impulserhaltungssatz experimentell bestätigt worden.

---

① Wie lautet der Impulserhaltungssatz für einen einzelnen Körper?
② Diskutieren Sie, ob beim freien Fall eines Körpers für das System Erde—Körper der Impulserhaltungssatz gilt!
③ Interpretieren Sie Gleichung (37) in Form einer Proportion!

Zusammenfassung

12

1. Problemstellung

In der Natur und in der Technik vorkommende Beschleunigungsvorgänge und Rückstoßerscheinungen veranlassen zu der Frage, wie der Bewegungszustand eines Körpers verändert wird, wenn auf ihn eine Kraft F während einer Zeit Δt wirkt.

2. Lösung

Durch deduktive Herleitung folgt aus dem Grundgesetz der Dynamik:
$F \cdot \Delta t = m \cdot v_2 - m \cdot v_1$.

3. Einführung neuer Größen

Prozeßgröße Kraftstoß: $\overline{F} \cdot \Delta t = S$
Zustandsgröße Impuls: $m \cdot v = p$

4. Formulierung des Ergebnisses

Der auf einen Körper ausgeübte Kraftstoß ist gleich der Impulsänderung des Körpers
$S = \Delta p$.

5. Experimentelle Überprüfung

Das Ergebnis kann durch geeignete Experimente bestätigt werden. Dabei ist besonders der Vektorcharakter des Kraftstoßes und des Impulses zu beachten.

6. Anwendung

Die Schubkraft eines Raketentriebwerks läßt sich durch den Kraftstoß erklären, der von den ausströmenden Gasen ausgeübt wird.

$$F_S = \frac{m_G}{t} \cdot v_G$$

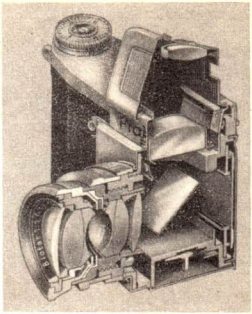
7. Verallgemeinerung des Ergebnisses (für abgeschlossene mechanische Systeme)

Der Gesamtimpuls ist in einem abgeschlossenen mechanischen System eine Erhaltungsgröße:
$\overrightarrow{p} =$ konstant.

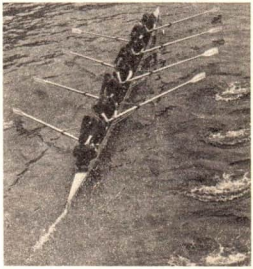
Anwendungsbeispiele zum Impuls

Fortbewegung im Weltraum. Der sowjetische Kosmonaut Leonow hielt sich im Jahre 1965 freischwebend längere Zeit im Weltraum auf. Inzwischen haben mehrere Experimente dieser Art stattgefunden. Der Kosmonaut muß für seine Manöver mit einem Triebwerk ausgestattet sein, z. B. mit einer Druckgaspistole. Besondere Schwierigkeiten bereitet der Sachverhalt, daß durch einen solchen Antrieb auch Drehbewegungen ausgelöst werden können.

Spiegelreflexkamera. Beim Betätigen des Auslösers wird zunächst durch eine Feder der Spiegel hochgeklappt, der das Bild auf die Mattscheibe lenkte. Dadurch wird dem Licht der Weg zum Film freigegeben, und der Verschluß kann geöffnet werden. Die plötzliche Bewegung des Spiegels bewirkt nach dem Impulserhaltungssatz eine entgegengerichtete Bewegung des Kameragehäuses. Damit kein Verwackeln beim Auslösen des Verschlusses und Belichten des Filmes eintritt, muß die Spiegelanordnung sehr leicht gebaut sein.



Rudern. Die Fortbewegung eines Ruderbootes kann durch Kraftstöße erklärt werden: Mit dem Ruderblatt wird bei jedem Schlag ein Kraftstoß ausgeübt. Ein Kraftstoß gleichen Betrages, entgegengesetzter Richtung wirkt auf das Ruder und wird auf das Boot übertragen. Hierdurch vergrößert sich der Impuls des Bootes; seine Geschwindigkeit nimmt zu. Bis zum nächsten Schlag wird das Boot durch Reibung gebremst.



Rückstoß bei Feuerwaffen. Während sich das Geschoß im Lauf befindet und durch die Kraft der Pulvergase beschleunigt wird, wirkt auf das Geschütz ein Kraftstoß, der als Rückstoß bezeichnet wird. Bei Maschinenwaffen wird der Rückstoß zum selbsttätigen Laden und Abfeuern ausgenutzt. Bei rückstoßfreien Geschützen strömt ein Teil der Pulvergase durch Düsen am hinteren Ende des Rohres aus und entlastet durch den Ausstoß des Gasstrahls das Geschützrohr und das Geschütz, das durch die Rückstoßwirkung zwischen Geschoß und Rohr sonst einer großen Stoßbelastung ausgesetzt wäre.

Problemfragen

- Wenden Sie den Impulserhaltungssatz an, um in qualitativer Form die Wirkungsweise eines Raketentriebwerks zu erklären!
- Grenzen Sie die mechanischen Systeme ab, die bei den Anwendungsbeispielen für den Impulserhaltungssatz betrachtet wurden!
- Erläutern Sie physikalisch die Vorgänge beim Gewichtheben (Stoßen, Reißen)!
- Welche nachteiligen Folgen hat der Rückstoß bei den verschiedenen Typen von Schußwaffen?

Stoßprozesse

Panzerabwehr – Lenkraketen werden über ein Flügelsteuerwerk während des „Fluges" gesteuert. Ein vom Steuerwerk auf die Rakete ausgeübter Stoß bewirkt eine Bahnänderung.

Die Steuerung einer Lenkrakete, aber auch der Schmiedevorgang z. B. beim Gesenkschmieden, wie auch alle anderen Stoßprozesse, besteht in einer jeweils kurzzeitigen mechanischen Wechselwirkung zwischen mehreren Körpern. Bei der Untersuchung dieser Prozesse in den folgenden Abschnitten werden zunächst aus einer Reihe von Beispielen wesentliche Merkmale herausgehoben. Als Untersuchungsgegenstand werden danach Stoßprozesse in abgeschlossenen Systemen mit zwei Elementen gewählt.
Für die Untersuchung werden die Zustandsgrößen Impuls und Energie sowie die Erhaltungssätze für Gesamtenergie und Gesamtimpuls herangezogen. Die gewonnenen Ergebnisse sind vielseitig anwendbar. Beim Beispiel des Schmiedens kann in diesem Zusammenhang das Problem gelöst werden, welcher Anteil der aufgewandten mechanischen Energie der Verformung des Werkstücks dient.

Einteilung der Stoßprozesse 13

Aus den Bildern 38/2, 39/1, 39/2, die weitere Stoßprozesse veranschaulichen, kann die folgende Definition abgeleitet werden:

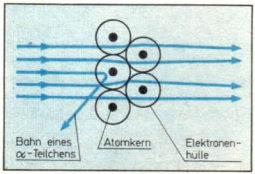
► **Als Stoß werden in der Physik alle jene Prozesse bezeichnet, bei denen zwei oder mehrere Körper während ihrer Bewegung kurzzeitig miteinander wechselwirken und dadurch ihren Bewegungszustand verändern.**

Der physikalische Prozeß Stoß darf nicht mit der physikalischen Größe Kraftstoß verwechselt werden.

■ Bei Stößen von α-Teilchen mit Atomkernen wechselwirken die Teilchen durch ihre elektrischen Felder, ohne daß eine Berührung wie bei makroskopischen Körpern stattfindet (Bild 38/2).

■ Auffahrunfälle (Bild 39/1) können zu erheblichen Zerstörungen an den Fahrzeugen führen. In physikalischer Sicht handelt es sich um unelastische Stöße zwischen zwei Körpern.

38/2



■ Beim Rangieren (Bild 39/2) kann z. B. durch den Stoß der Lokomotive der letzte, zuvor abgekoppelte Wagen eines Zuges abgestoßen werden, ohne daß der gesamte Zug in Bewegung gesetzt wird. Wenn vom Einfluß der Reibung abgesehen wird, ist dieser Stoß wegen der Federwirkung der Puffer elastisch.

39/1

Bei der nun folgenden Systematisierung werden nur Stoßprozesse zwischen zwei Körpern betrachtet, die ein abgeschlossenes mechanisches System bilden.

Unter dieser Voraussetzung gilt:

Der Gesamtimpuls ist bei allen Stoßprozessen eine Erhaltungsgröße.

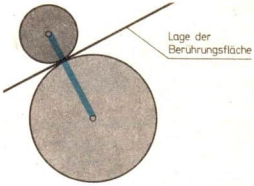
Als Merkmale für die Systematisierung der Stoßvorgänge eignen sich die **Energiebilanz** für das System und die **Bewegungsrichtungen**.
Damit sind zu unterscheiden:

Elastischer Stoß Die mechanische Energie des Systems bleibt erhalten.	**Unelastischer Stoß** Die mechanische Energie des Systems wird teilweise oder vollständig in andere Energieformen umgewandelt.

Gerader Stoß Die Körper bewegen sich vor und nach dem Stoß auf derselben Geraden.	**Schiefer Stoß** Die Körper verändern beim Stoßprozeß ihre Bewegungsrichtungen.

39/2

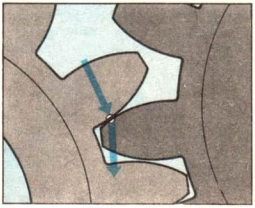
Die Bezeichnungen elastischer und unelastischer Stoß werden auch angewendet, wenn während des Stoßes keine Verformungen der beteiligten Körper stattfinden, wie z. B. bei Stößen zwischen Elementarteilchen. Bei makroskopischen Körpern bildet der elastische Stoß einen nur annähernd erreichbaren Grenzfall.
Ein weiteres Merkmal ist die gegenseitige Lage der Körper während der Wechselwirkung. Hiernach sind zentrale und nichtzentrale Stöße zu unterscheiden.



39/3

■ Bei zentralen Stößen steht die Verbindungsgerade der Schwerpunkte beider Körper senkrecht auf der Berührungsfläche, die sich beim Stoß ausbildet. Der Stoß zwischen zwei Kugeln ist stets zentral (Bild 39/3).

■ Der Stoß zwischen den Zähnen zweier ineinander kämmender Zahnräder ist ein Beispiel eines nichtzentralen Stoßes. Bei diesem Prozeß wird eine nicht stoßfreie Drehbewegung hervorgerufen, was sich als Getriebelärm bemerkbar macht. Diese unerwünschte Erscheinung kann durch die Wahl einer besonderen Verzahnung der Getrieberäder weitgehend beseitigt werden (Bild 39/4).



39/4

In den folgenden Abschnitten werden überwiegend gerade, zentrale Stöße untersucht.

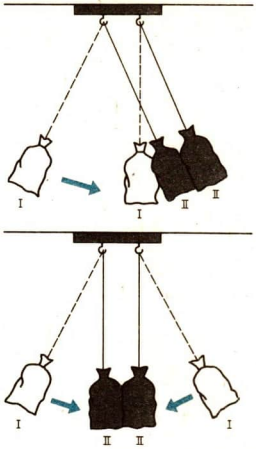
Dieser Vorgang soll mit dem folgenden Experiment untersucht werden: Zwei kleine Sandsäcke werden nebeneinander an langen Schnüren aufgehängt (Bild 40/1). Die Körper erhalten nacheinander mehrere verschiedene Geschwindigkeiten und stoßen zusammen. Der Sandsack (1) prallt mit unterschiedlich großen Geschwindigkeiten auf den Sandsack (2), der sich zunächst in Ruhe befindet. In einer weiteren Versuchsreihe wird auch dem Sandsack (2) eine Geschwindigkeit erteilt.
In allen Fällen bewegen sich die beiden Sandsäcke nach dem Stoß gemeinsam weiter. Unelastische Stöße zwischen makroskopischen Objekten können somit in folgender Weise gekennzeichnet werden:

Nach einem unelastischen Stoß bewegen sich beide Systemelemente gemeinsam mit der gleichen Geschwindigkeit, und es treten unelastische Verformungen auf.

Die gemeinsame Geschwindigkeit u der beiden Systemelemente nach dem Stoßprozeß kann durch Anwendung des Impulserhaltungssatzes bestimmt werden. Die Massen und die Geschwindigkeiten v vor dem Stoß werden als bekannt vorausgesetzt. Die Bewegungsrichtungen können bei Bedarf durch Vorzeichen gekennzeichnet werden.
Der Impulserhaltungssatz für das betrachtete System mit zwei Elementen lautet

$$m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2 = (m_1 + m_2)\, u. \qquad (40)$$

Hieraus folgt:



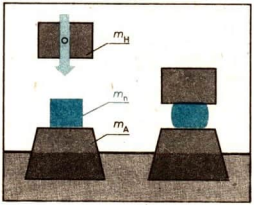
40/1 Stoßversuche mit zwei Sandsäcken

► **Gemeinsame Geschwindigkeit beider Systemelemente nach einem zentralen, geraden, unelastischen Stoß**

$$u = \frac{m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2}{m_1 + m_2} \qquad (41)$$

■ Ein Schmiedehammer (Masse 1,2 t) trifft mit der Geschwindigkeit 6,0 m · s^{-1} auf ein Werkstück (Masse 200 kg). Dieses liegt auf einem Amboß, der mit Unterbau die Masse 20 t hat. Die beteiligten Körper sollen vereinfachend als abgeschlossenes System betrachtet werden (Bild 40/2).
a) Berechnen Sie die gemeinsame Geschwindigkeit von Hammer, Schmiedestück und Amboß unmittelbar nach dem Stoß!
b) Vergleichen Sie die kinetischen Energien vor und nach dem Stoß!
c) Welche Energie steht für die Verformung des Werkstücks zur Verfügung?

40/2 Prinzip eines Schmiedehammers



Gegeben:

$m_H = 1{,}2 \cdot 10^3$ kg
$m_n = 0{,}2 \cdot 10^3$ kg
$m_A = 20 \cdot 10^3$ kg
$v_1 = 6{,}0$ m · s^{-1}

Lösung:

a) Der Schmiedevorgang wird vereinfachend als unelastischer Stoß im abgeschlossenen System zweier Körper mit den Massen
$m_1 = m_H$
$m_2 = m_n + m_A$
betrachtet.

Gesucht:
u
E_{kin1}
E_{kin}
ΔE_{kin}

In diesem Falle gilt

$$u = \frac{m_1 \cdot v_1}{m_1 + m_2}$$

$$\underline{\underline{u = 0{,}34\ m \cdot s^{-1}}}$$

b) Die kinetische Energie beträgt vor dem Schlag

$$E_{kin1} = \frac{1}{2} m_1 \cdot v_1^2$$

$$\underline{\underline{E_{kin1} = 21{,}6\ kJ}}$$

nach dem Schlag

$$E_{kin} = \frac{1}{2} (m_1 + m_2)\, u^2$$

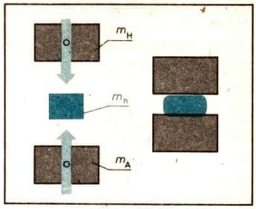
$$\underline{\underline{E_{kin} = 1{,}2\ kJ}}$$

c) Für die unelastische Verformung steht die Energie

$$\Delta E_{kin} = E_{kin1} - E_{kin}$$

$$\underline{\underline{\Delta E_{kin} = 20{,}4\ kJ}}$$

zur Verfügung.
Das sind 94% der Energie des auftreffenden Hammers. ①



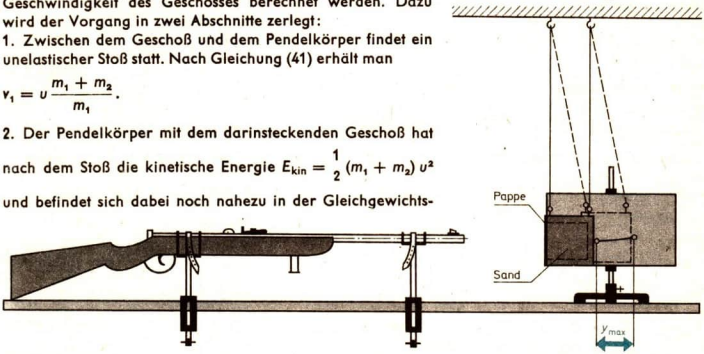
41/1 Prinzip eines Gegenschlaghammers

Das Stoßpendel (ballistisches Pendel). Mit diesem Gerät können in sehr einfacher Weise Geschoßgeschwindigkeiten bestimmt werden. Die Versuchsanordnung ist in Bild 41/2 dargestellt.
Es wird gemessen, welche Höhe über der Gleichgewichtslage der Pendelkörper mit dem eingedrungenen Geschoß erreicht. Außerdem werden die Massen des Geschosses und des Pendelkörpers bestimmt. Aus diesen Meßergebnissen kann die Geschwindigkeit des Geschosses berechnet werden. Dazu wird der Vorgang in zwei Abschnitte zerlegt:
1. Zwischen dem Geschoß und dem Pendelkörper findet ein unelastischer Stoß statt. Nach Gleichung (41) erhält man

$$v_1 = u \frac{m_1 + m_2}{m_1}.$$

2. Der Pendelkörper mit dem darinsteckenden Geschoß hat nach dem Stoß die kinetische Energie $E_{kin} = \frac{1}{2} (m_1 + m_2)\, u^2$ und befindet sich dabei noch nahezu in der Gleichgewichts-

41/2 Das Stoßpendel besteht aus einer mit Sand gefüllten Kiste, die an einem langen Seil aufgehängt ist und als Kugelfang dient. Das Geschoß wird in horizontaler Richtung abgefeuert. Es bleibt im Sande stecken und veranlaßt das Pendel zum Schwingen.



① Führen Sie die gleiche Berechnung für einen Gegenschlaghammer (Bild 41/1) mit $m_1 = m_2 = 600$ kg durch!

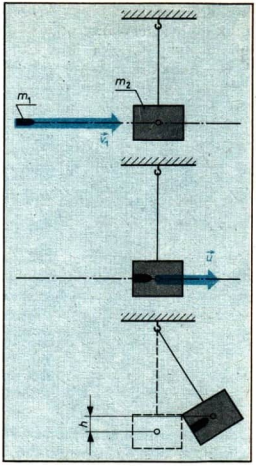
lage. Bei der einsetzenden Schwingung wird der Pendelkörper um die Strecke h gehoben. Mit Hilfe des Energieerhaltungssatzes gewinnt man die Beziehung zwischen der gemessenen Höhe und der nach dem Stoß vorhandenen kinetischen Energie.

$$\frac{1}{2}(m_1 + m_2)\, u^2 = (m_1 + m_2)\, g \cdot h$$

$$u = \sqrt{2\, g \cdot h}$$

Damit erhält man für die Geschoßgeschwindigkeit

$$v_1 = \frac{m_1 + m_2}{m_1} \cdot \sqrt{2\, g \cdot h}\ .$$



42/1 Stoßpendel
a) vor dem Einschlag des Geschosses
b) nach dem unelastischen Stoß
c) beim Erreichen der Maximalhöhe

Der elastische Stoß 15

Vorgänge dieser Art können im Experiment in guter Näherung mit elastischen Körpern realisiert werden (Bild 42/2). Während solcher Stoßprozesse wird kurzzeitig die kinetische Energie der Systemelemente teilweise oder sogar vollständig in potentielle Energie auf Grund elastischer Verformung umgewandelt. Hieran schließt sich die Rückwandlung in kinetische Energie an. Die Summen der kinetischen Energien beider Systemelemente sind vor und nach dem Stoß gleich. Das ist die spezielle Form des Energieerhaltungssatzes der Mechanik für den Fall des elastischen Stoßes.
Im folgenden soll die Geschwindigkeit der Systemelemente nach einem geraden elastischen Stoß berechnet werden. Dabei wird vorausgesetzt, daß die Massen beider Körper und ihre Geschwindigkeiten vor dem Stoß bekannt sind. Zur Vereinfachung wird angenommen, daß der Körper mit der Masse m_2 vor dem Stoß ruht.
Mit den in Bild 43/1 angegebenen Größen werden zunächst die beiden Erhaltungssätze formuliert:

Impulserhaltungssatz $m_1 \cdot v_1 = m_1 \cdot u_1 + m_2 \cdot u_2$ (42)

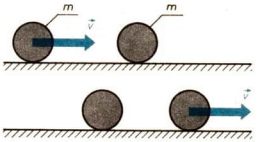
Energieerhaltungssatz $\frac{1}{2} m_1 \cdot v_1^2 = \frac{1}{2} m_1 \cdot u_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \cdot u_2^2$ (43)

Damit verfügt man über ein System von zwei Gleichungen mit den Variablen u_1 und u_2. Die physikalisch bedeutsame Lösung dieses Gleichungssystems wird hier ohne Ableitung angegeben: ①

► **Geschwindigkeiten der Systemelemente nach einem zentralen, geraden, elastischen Stoß unter der Bedingung $v_2 = 0$**

$$u_1 = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v_1 \qquad (44)$$

$$u_2 = \frac{2\, m_1}{m_1 + m_2} v_1 \qquad (45)$$



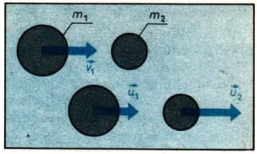
42/2 Elastischer Stoß zwischen zwei Kugeln mit gleicher Masse. Die anfangs ruhende Kugel übernimmt beim Stoß vollständig Impuls und kinetische Energie. Damit sind die Erhaltungssätze für beide Größen erfüllt.

Das Ergebnis dieser theoretischen Überlegungen soll jetzt experimentell überprüft werden. Hierzu betrachtet man spezielle Massenverhältnisse der Systemelemente.

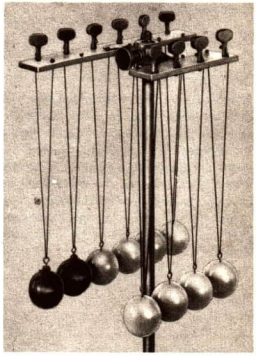
1. Die Massen der Körper sind gleich; $m_1 = m_2 = m$. Aus den Gleichungen (44) und (45) folgt in diesem Falle
$u_1 = 0$ und $u_2 = v_1$ (vgl. Versuch nach Bild 42/2).
2. Die Masse des anfangs ruhenden Körpers ist sehr klein im Vergleich zur Masse des anderen Körpers; $m_1 \gg m_2$. In diesem Falle gilt in guter Näherung $m_1 \pm m_2 = m_1$; d. h., die kleine Masse kann bei Addition oder Subtraktion gegenüber der großen Masse vernachlässigt werden. Aus den Gleichungen (44) und (45) folgt damit
$u_1 = v_1$ und $u_2 = 2\,v_1$.
Es entspricht der alltäglichen Erfahrung, daß der schwere Körper bei der Wechselwirkung mit dem sehr leichten seine Geschwindigkeit nicht ändert.
3. Der zweite, zunächst ruhende Körper hat eine viel größere Masse als der erste: $m_1 \ll m_2$.
In diesem Falle gilt die Näherungsbeziehung $m_2 \pm m_1 = m_2$.
Aus den Gleichungen (44) und (45) folgt jetzt

$$u_1 = -v_1 \text{ und } u_2 = \frac{2\,m_1}{m_2}\,v_1 \to 0.$$

Man kann hierbei von einer Reflexion des leichteren Körpers an dem schweren Körper sprechen. Dieser bleibt bei dem Stoß praktisch in Ruhe.



43/1 Geschwindigkeiten beim geraden, elastischen Stoß



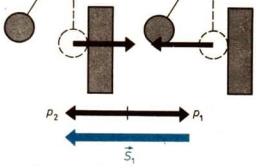
43/2 Versuche mit dem Kugelstoßapparat

Kraftstoß bei elastischer Reflexion. Der von einem Gas ausgeübte Druck läßt sich auf die Stöße der Gasmoleküle gegen die Wände des Gefäßes zurückführen. Das wird im Stoffgebiet Thermodynamik dieses Lehrbuchs ausführlich nachgewiesen. Um die dortigen Berechnungen vorzubereiten, wird im folgenden der Kraftstoß berechnet, den eine Kugel bei senkrechtem, elastischem Stoß gegen eine Wand ausübt. Hier liegt der bereits untersuchte Spezialfall $m_1 \ll m_2$ des elastischen Stoßes vor, wobei die Impulsänderung der Kugel den Betrag $2\,m_1 \cdot v_1$ hat.
Um diese Impulsänderung hervorzurufen, muß die Wand mit einem Kraftstoß $S_1 = 2\,m_1 \cdot v_1$ auf die Kugel einwirken, der von der Wand weggerichtet ist. Die Wand erfährt nach dem Wechselwirkungsgesetz einen entgegengesetzt gerichteten Kraftstoß mit dem gleichen Betrag $S_2 = S_1 = 2\,m_1 \cdot v_1$.

■ Die Kugel habe die Masse 20 Gramm und bewege sich mit der Geschwindigkeit $v_1 = 30\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}$ auf die Wand zu. In diesem Falle beträgt der Kraftstoß
$S_2 = 2 \cdot 2 \cdot 10^{-2}\,\mathrm{kg} \cdot 30\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}$; $\underline{\underline{S_2 = 1{,}2\,\mathrm{N \cdot s}}}$.

Bei bekannter Berührungszeit $\Delta t = 10^{-5}\,\mathrm{s}$ folgt für die Stoßkraft

$$\overline{F} = \frac{S_2}{\Delta t}; \quad \underline{\underline{\overline{F} = 1{,}2 \cdot 10^5\,\mathrm{N}}}.$$

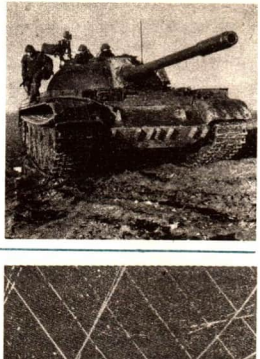


43/3 Impulsänderung einer Kugel beim senkrechten, elastischen Stoß gegen eine Wand

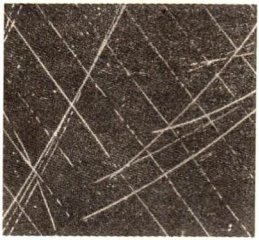
① Weisen Sie nach, daß die angegebenen Geschwindigkeiten u_1 und u_2 Lösungen des aus Impuls- und Energieerhaltungssatz bestehenden Gleichungssystems sind, indem Sie die Probe ausführen!

Anwendungsbeispiele zum Stoßprozeß

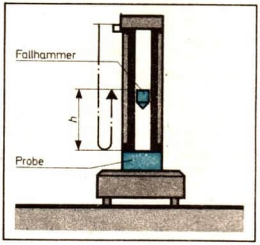
Elastische Reflexion. Beim schiefen Stoß eines Panzergeschosses (bewegter elastischer Körper) gegen die schräge Oberfläche eines Panzers (ruhender elastischer Körper) findet genähert eine elastische Reflexion statt, das auftreffende Geschoß prallt in diesem Fall ab; Einfalls- und Ausfallswinkel stimmen nahezu überein. Das ist zu erklären, indem der Impuls des einfallenden Körpers in Komponenten parallel und senkrecht zur Wand zerlegt wird. Die senkrechte Komponente kehrt bei der Reflexion ihre Richtung um, die parallele Komponente bleibt unverändert. Weil dieses Reflexionsgesetz auch in der Optik gültig ist, lag hier eine der Stützen des Korpuskelmodells des Lichts von Newton.



Nachweis von Neutronen. Diese elektrisch neutralen Elementarteilchen hinterlassen in einer Nebelkammer keine Spuren. Sie können dort aber durch ihre Wechselwirkung mit Protonen nachgewiesen werden. Da die Massen dieser beiden Elementarteilchen nahezu übereinstimmen, übertragen die Neutronen bei geraden elastischen Stößen ihre Energie und ihren Impuls fast vollständig auf die Protonen. Das Bild zeigt eine Nebelkammeraufnahme der Spuren von Protonen, die aus wasserstoffhaltigem Gas durch Neutronen freigesetzt werden. Die Neutronen fallen von oben links in die Kammer ein. Die Spuren der Protonen sind durch den Einfluß eines Magnetfeldes gekrümmt.

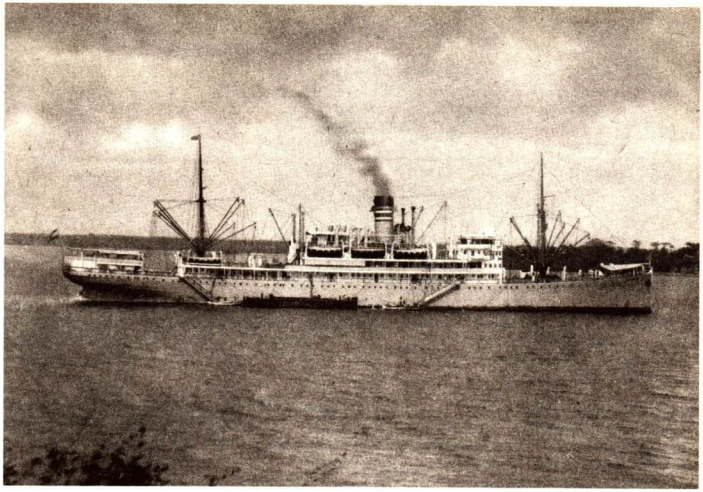


Dynamische Härteprüfung. Härte und Elastizität eines Werkstoffes stehen in Beziehung zueinander. Will man die Härte prüfen, so nutzt man die Elastizität, um eine meßbare Wirkung zu erzielen. Bei der Rücksprung-Härteprüfung fällt ein Prüfkörper mit abgerundeter Diamantspitze auf das Werkstück und prallt infolge der Elastizität des Werkstücks zurück. Bei diesem Stoß verringert sich die mechanische Energie des Systems. Der Vergleich von Ausgangshöhe und Rücksprunghöhe liefert die Information über die Härte.



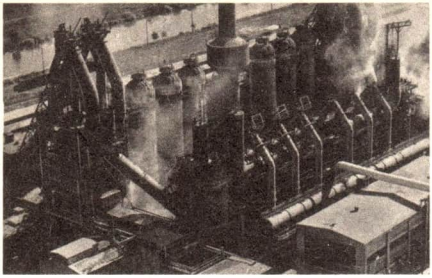
Problemfragen

- Grenzen Sie die mechanischen Systeme ab, die in den erläuterten Beispielen betrachtet werden, und geben Sie die Systemelemente an!
- In welchen Beispielen wird der elastische Stoß als Idealisierung eines realen Prozesses verwendet?
- Welche speziellen Fälle für das Massenverhältnis der Systemelemente treten bei den Beispielen auf?
- Welche Ursachen für Verluste an mechanischer Energie sind zu berücksichtigen?
- Beschreiben Sie weitere Beispiele für Stoßprozesse, die in den Ihnen bekannten Bereichen der Produktion auftreten!



THERMODYNAMIK

Typische Merkmale des Imperialismus sind die territoriale Aufteilung der Erde, der Kampf um die Neuaufteilung der Welt und die Ausbeutung kolonialer und halbkolonialer Gebiete. Dieser Sachverhalt hatte sich bis zur Jahrhundertwende herausgebildet. Für den Transport der Natur- und Bodenschätze sowie zur Durchführung neuer Raubzüge und zum Schutz der Transportwege wurden Handels- und Kriegsschiffe verwendet, deren Antriebsaggregate – Kohlekessel und Dampfmaschinen – einen sehr kleinen Wirkungsgrad hatten. Dadurch wurden Transportvolumen und Reichweite der Schiffe begrenzt. Diese und andere gesellschaftliche Bedingungen hatten großen Einfluß auf die Entwicklung der Thermodynamik als Grundlagenwissenschaft des Wärmekraftmaschinenbaus. Die ökonomischen Bedingungen führten schließlich zur Erfindung und Vervollkommnung des Dieselmotors, wodurch die Hochseeschiffahrt wesentliche Fortschritte erfuhr.



Kinetisch-statistische Betrachtungen

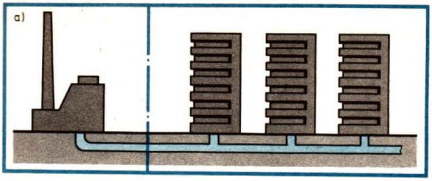
Einem Hochofen müssen täglich mehr als tausend Tonnen Luft zur Aufbereitung der Erze zugeführt werden. Um dabei einen hohen Wirkungsgrad zu erreichen, wird die Luft zuvor auf einen Druck von etwa 0,2 MPa komprimiert und auf eine Temperatur von etwa 1 400 K gebracht. Die Temperaturerhöhung findet im sogenannten „Winderhitzer" statt.

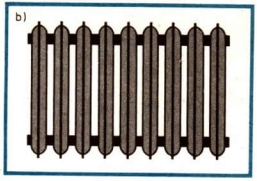
Der Zustand eines Gases, z. B. der Luft im Winderhitzer, wird durch den Druck, das Volumen und die Temperatur des Gases genau bestimmt. Es kann vermutet werden, daß zwischen diesen meßbaren Größen und solchen molekularen Größen wie Anzahl der Moleküle und kinetische Energie der Moleküle ein unmittelbarer Zusammenhang besteht.
Das Ziel der kinetisch-statistischen Betrachtungen im folgenden Abschnitt ist es, gesetzmäßige Zusammenhänge zwischen den Molekülen von Gasen und meßbaren Eigenschaften der Gase abzuleiten und das Verständnis für Begriffe und Gesetze der Thermodynamik zu vertiefen. Mit dem Druck-Volumen-Gesetz wird ein solcher Zusammenhang auch quantitativ abgeleitet. Angesichts der sehr großen Anzahl von Molekülen, ihrer fortwährenden gegenseitigen Beeinflussung und ihrer sehr unregelmäßigen Bewegung scheint es aber zunächst sehr aussichtslos zu sein, Gesetze der Molekülbewegung aufzudecken und Zusammenhänge zu meßbaren Eigenschaften der Gase herzustellen. Es gelingt, wenn man — wie im folgenden Abschnitt in vereinfachter Weise gezeigt wird — mit Modellen arbeitet und statistische Betrachtungen durchführt.
Zunächst jedoch werden einige Begriffe und Zusammenhänge wiederholt und die wesentlichen Grundlagen zur Behandlung der thermodynamischen Probleme bereitgestellt.

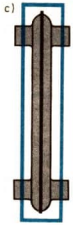
Das thermodynamische System 16

Die in der Thermodynamik zu untersuchenden realen Objekte heben sich durch bestimmte Eigenschaften von ihrer Umgebung ab, d. h., die Untersuchung richtet sich immer auf relativ abgeschlossene Bereiche wie z. B. die Luft in einem Winderhitzer, eine Hauswand, eine Maschine oder ein bestimmtes Maschinenteil. Solche realen, genau begrenzten Objekte bezeichnet man als **System**. (1)

Da in der Thermodynamik Systeme unter thermodynamischem Aspekt betrachtet werden, nennt man den Untersuchungsgegenstand der Thermodynamik **thermodynamisches System** (Bild 47/1).



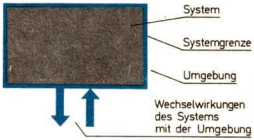




47/1 Thermodynamische Systeme
Die dargestellten Objekte – a) Heizungsanlage, b) Heizkörper, c) Heizkörperrippe – sind thermodynamische Systeme, bei denen z. B. vor allem Energieübertragungsprozesse interessieren.

In diesem System interessieren nur bestimmte, vor allem thermodynamische Eigenschaften der betrachteten Objekte, z. B. ihr Druck und ihre Temperatur. Bei der Modellbildung werden deshalb alle für die jeweilige Aufgabenstellung interessierenden Eigenschaften hervorgehoben und die unwesentlichen außer Betracht gelassen.
Das thermodynamische System, wie jedes andere auch, ist von seiner Umgebung durch die **Systemgrenze** getrennt (Bild 47/2).
Die Systemgrenzen entsprechen dabei im allgemeinen den Grenzflächen der realen Objekte. Bei der Festlegung der Systemgrenze geht man von der jeweiligen Problemstellung aus.

Die **Umgebung** ist die Gesamtheit aller Objekte, mit der das System unmittelbar in **Wechselwirkung** treten kann. Dabei treten verschiedene Wechselwirkungen auf. Durch die Wechselwirkung des Systems mit der Umgebung wird der **Zustand** des Systems verändert.



47/2 System, Systemgrenze und Umgebung. Die Systemgrenze trennt das System von seiner Umgebung.

Thermodynamische Zustandsgrößen 17

Jedes System befindet sich in einem Zustand, der durch bestimmte makroskopische Eigenschaften charakterisiert und durch **Zustandsgrößen** beschrieben wird. Diese Zustandsgrößen sind unabhängig von der Art und Weise, wie das System in diesen Zustand gelangt ist. Sie charakterisieren den Zustand des Systems eindeutig.

► **Zustandsgrößen sind solche physikalische Größen, mit denen der Zustand eines Systems beschrieben wird.**

T*; *p*; *V*; *U

Thermodynamische Zustandsgrößen sind die **Temperatur** ***T***, der **Druck** ***p***, das **Volumen** ***V*** und die **innere Energie** ***U*** des Systems. ② ③ ④

① Erläutern Sie, wie sich diese Objekte durch bestimmte Eigenschaften von ihrer Umgebung unterscheiden!
② Nennen Sie andere Zustandsgrößen, die Sie aus der Mechanik kennen!
③ Welche Form der Energie eines Systems kennen Sie außerdem?
④ Nennen Sie Temperaturmeßgeräte und deren Wirkungsprinzip!

Zur Angabe der Temperatur ist es notwendig, **Temperaturskalen** festzulegen. Bestimmte Zahlenwerte der Temperatur werden leicht reproduzierbaren Fundamentalpunkten von Stoffen zugeordnet (Tabelle 48/1). ①

Tabelle 48/1 Einheiten der Temperatur

Einheit der Temperatur ϑ **1 Grad Celsius (°C)**	Einheit der Temperatur T **1 Kelvin (K)**
Bei $\vartheta = 0\,°C$ (Schmelztemperatur des Wassers) ist $T = 273{,}15\,K$ $\left(\frac{T}{K} = \frac{\vartheta}{°C} + 273{,}15\right)$. Temperaturdifferenzen werden ebenfalls in Kelvin (K) angegeben.	

Die thermodynamische Zustandsgröße **Druck p** ist definiert als Quotient aus Kraft und Fläche (Tabelle 48/2). ②

Tabelle 48/2 Einheit des Drucks

Einheit des Druckes ist **1 Pascal (Pa).** Ein Pascal entspricht einem Newton je Quadratmeter: $1\,Pa = 1\,N \cdot m^{-2}$. Der Schweredruck der Luft beträgt in Meeresspiegelhöhe etwa 0,1 MPa (Megapascal).

Eine weitere thermodynamische Zustandsgröße ist das **Volumen V**, das errechenbar ist aus den Abmessungen des Systems. Zwischen dem Volumen V und der Masse m des Systems besteht ein unmittelbarer Zusammenhang. ③

Betrachtungsweisen der Thermodynamik 18

In der Thermodynamik werden zwei Betrachtungsweisen angewendet:
- die phänomenologische Betrachtungsweise,
- die kinetisch-statistische Betrachtungsweise.

Bei der kinetisch-statistischen Betrachtungsweise wird vom Aufbau der Stoffe aus Teilchen ausgegangen. Dabei werden die Eigenschaften der Stoffe und die ablaufenden Prozesse auf der Grundlage der Bewegung der Teilchen und ihrer Wechselwirkungen beschrieben. Der kinetisch-statistischen Betrachtungsweise liegt also das Teilchenmodell zugrunde.
Geschichtlich älter ist die phänomenologische Betrachtungsweise. Durch sie werden nur die makroskopischen Eigenschaften der Systeme erfaßt und beschrieben. Es werden makroskopisch meßbare Größen verwendet und keine Begriffe aus dem mikroskopischen Bereich verwendet. Die einzelnen Erscheinungen werden als gegeben vorausgesetzt. Makro-

skopische Eigenschaften sind z. B. Druck, Temperatur und innere Energie, sie werden unmittelbar gemessen oder aus meßbaren Größen bestimmt.
Besonders für die Lösung technischer Probleme hat die phänomenologische Betrachtungsweise große Bedeutung, während mit der kinetisch-statistischen Betrachtungsweise die theoretische Erklärung für die Vorgänge im makroskopischen Bereich gefunden werden kann.

Modell des idealen Gases 19

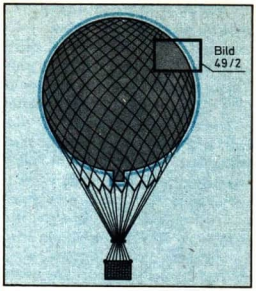
Ideales Gas. Die Bewegung der Gasmoleküle kann im allgemeinen recht kompliziert sein. Untersuchungen dieser Bewegung erleichtert man sich, indem man ein geeignetes Modell verwendet. Für eine erste Annäherung ist es dazu notwendig, die für die Betrachtung **wesentlichen Eigenschaften** der Gase und ihrer Moleküle zu erfassen. ④

Wesentlich ist, daß die Moleküle infolge der ständigen Bewegung kinetische Energie haben. Weiterhin muß in dem Modell auch die sehr große Anzahl von Molekülen, aus denen ein Gas besteht, Berücksichtigung finden. ⑤

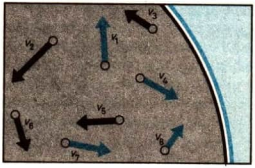
Bei Gasen ist der Abstand benachbarter Moleküle im allgemeinen relativ groß. Daher können Kräfte zwischen ihnen und ihr Volumen unter diesen Bedingungen vernachlässigt werden. Die auftretenden Stöße der Moleküle untereinander sind elastisch, denn ansonsten würden die Moleküle nach gewisser Zeit zur Ruhe kommen. Eine genauere Analyse zeigt, daß man diese Stöße ebenfalls vernachlässigen kann, wenn sich das Gas im Gleichgewicht befindet. Dagegen sind die Stöße der Moleküle gegen die Gefäßwand wesentlich und dürfen nicht vernachlässigt werden.

Man denkt sich somit das Modellgas aus sehr vielen Teilchen bestehend, die kein Volumen haben und keine Wechselwirkung aufeinander ausüben. Sie bewegen sich nach den aus der Mechanik bekannten Gesetzen der geradlinigen Bewegung. Ihre kinetische Energie hängt ab von der Masse m und dem Geschwindigkeitsbetrag v.

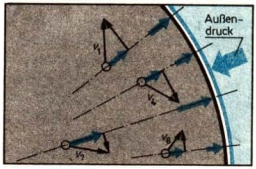
Ein Teilchensystem mit diesen Merkmalen nennt man **ideales Gas**. Es ist ein Denkmodell. ⑥ ⑦



49/1 Gasgefüllter Freiballon als makroskopisches System



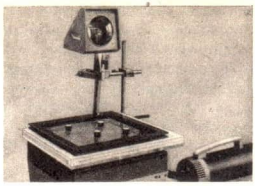
49/2 Ausschnitt aus Bild 49/1 als Modell eines Gases. Unregelmäßige Bewegung von Teilchen des idealen Gases mit unterschiedlichsten Geschwindigkeiten $v_1, v_2, \ldots, v_8$.



49/3 Wirksame Geschwindigkeitskomponente einiger Teilchen aus Bild 49/2 in Richtung Systemgrenze

① Nennen Sie Fundamentalpunkte für Temperaturskalen!
② Nennen Sie weitere Druckeinheiten, die gebräuchlich sind!
③ Nennen Sie die Einheiten der Masse, des Volumens und der Dichte!
④ Worin besteht der Sinn des Arbeitens mit Denkmodellen?
⑤ Charakterisieren Sie den Aufbau der Stoffe!
⑥ Geben Sie weitere Beispiele für Denkmodelle an!
⑦ Vergleichen Sie das Modell des idealen Gases mit den Gasen!

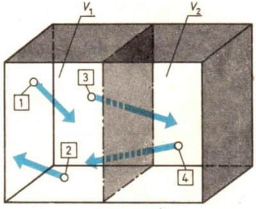
Statistische Betrachtungen. Neben der Verwendung des Modells des idealen Gases erweist es sich als notwendig, statistische Betrachtungen durchzuführen. Über die Bewegung der einzelnen Teilchen können keine sicheren Voraussagen gegeben werden, da man dazu die Lage und den Impuls aller Teilchen zu einer bestimmten Zeit kennen müßte. Ihre meßtechnische Erfassung und die rechnerische Auswertung sind praktisch nicht möglich. Aber eine derartige Information wird auch nicht unbedingt benötigt. Man geht davon aus, daß es zufällig ist, wo sich ein Teilchen zu einer bestimmten Zeit befindet, in welche Richtung es sich bewegt und welche kinetische Energie es zu dieser Zeit hat. Aber es steht auch nicht das zufällige Verhalten der einzelnen Teilchen im Mittelpunkt des Interesses, sondern von der Untersuchung der zufälligen Ereignisse ausgehend, sucht man nach Gesetzmäßigkeiten, die sowohl die Bewegung aller Teilchen in ihrer Gesamtheit charakterisieren als auch Aussagen über einzelne Teilchen enthalten. Diese Gesetze der Molekülbewegung haben den Charakter statistischer Gesetze. Die statistischen Gesetze der Molekülbewegung sind objektiv. Sie sind relativ einfach, und ihr Wesen tritt offensichtlich in Erscheinung. Die folgenden Betrachtungen über die räumliche Verteilung und die Energieverteilung der Moleküle des idealen Gases sind daher auch geeignet, das Verständnis für weitere naturwissenschaftliche Vorgänge, denen statistische Gesetze zugrunde liegen, und für gesellschaftliche Gesetzmäßigkeiten vorzubereiten.



50/1 Zur Darstellung der Bewegung von Teilchen des idealen Gases
Die Bewegung von Gasmolekülen kann in einem Modellexperiment veranschaulicht werden. Infolge einer Luftschicht zwischen der Unterlage und den Magneten bewegen sich diese nahezu reibungslos.

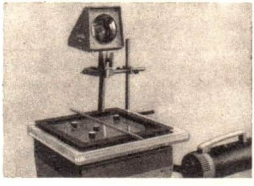
Die räumliche Verteilung der Teilchen 20

Häufigkeit und Wahrscheinlichkeit zufälliger Ereignisse. Zunächst wird ein System von nur 4 Teilchen betrachtet (Bild 50/2). Danach werden die Erkenntnisse auf das ideale Gas mit der sehr großen Teilchenanzahl übertragen.
Die Teilchen befinden sich in einem Kasten mit dem Volumen V, der in Gedanken halbiert ist. Die Teilchen sind gleichartig. Wegen ihrer verschiedenen Orte und Impulse sind sie gleichzeitig stets unterscheidbar.
Ständig treten Teilchen von einem Teilbereich in den anderen über und umgekehrt. Es ist zufällig, welche und wie viele Teilchen sich zu einer Zeit t in den Teilbereichen befinden. Sind gerade N_1 Teilchen im Bereich V_1 und infolgedessen $N_2 = N - N_1$ im Teilbereich V_2, so spricht man davon, daß zu dieser Zeit die Anordnung N_1; N_2 vorliegt. N_1 und N_2 bezeichnet man als **Besetzungszahlen**. Durch die Angabe der Besetzungszahlen ist jede Anordnung hinreichend gekennzeichnet.
Infolge der Bewegung aller Teilchen stellen sich ständig neue Anordnungen N_1;N_2 ein. Man kann im voraus nicht mit Sicherheit angeben, welche Anordnung sich zu einem be-

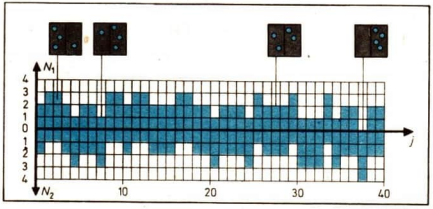


50/2 Momentane Anordnung von 4 Teilchen bei 2 Teilbereichen V_1 und V_2
$N_1 = 3, \quad N_2 = 1$

50/3 Modellexperiment zur Anordnung von 4 Teilchen bei 2 Teilbereichen. Die Teilbereiche sind hierbei zweidimensional. Die Ergebnisse können sinngemäß auf Raumbereiche übertragen werden.

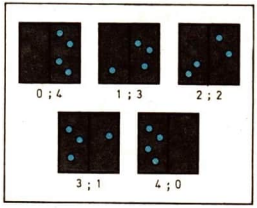


stimmten Zeitpunkt einstellt. Das Eintreten einer bestimmten Anordnung wird als **zufälliges Ereignis** aufgefaßt. Ein Ereignis heißt zufälliges Ereignis, wenn es eintreten kann, aber nicht eintreten muß.



Um das statistische Gesetz der räumlichen Verteilung von 4 Teilchen zu erhalten, wird zunächst ermittelt, welche und wie viele verschiedene Anordnungen möglich sind (Bild 51/2). ①

Bild 51/1 zeigt, daß die möglichen Anordnungen sehr regellos aufeinander folgen können. Auffallend ist die unterschiedliche **Häufigkeit** H $(N_1;N_2)$ der Anordnungen 0;4, 3;1, 2;2, 1;3, 4;0. Wichtiger als die Häufigkeit einer Anordnung ist aber, welcher Anteil von allen registrierten Anordnungen jeweils auf die möglichen Anordnungen entfällt. Um die Häufigkeiten von Anordnungen bei verschiedenen Meßreihen zu vergleichen, werden die **relativen Häufigkeiten** h der einzelnen Anordnungen für eine Menge zufälliger Ereignisse bestimmt. ② ③



51/1 Zufällige, aufeinanderfolgende Anordnungen von 4 Teilchen bei 2 Teilbereichen.
Der Ort der sich bewegenden Teilchen wurde in gleichen zeitlichen Abständen festgestellt. Darunter ist gezeigt ein Diagramm der Besetzungszahlen N_1 und N_2 von j registrierten Anordnungen $N_1;N_2$ bei 4 Teilchen

51/2 Möglichkeiten der Anordnung von 4 Teilchen bei 2 Teilbereichen

► **Die relative Häufigkeit h $(N_1;N_2)$ ist der Anteil der Anordnung H $(N_1;N_2)$ an der Gesamtzahl j der registrierten Anordnungen.**

$$h\,(N_1;N_2) = \frac{H(N_1;N_2)}{j} \qquad (46)$$

In Auswertung des Diagramms Bild 51/1 ergeben sich für $j = 40$ folgende relative Häufigkeiten für die möglichen Anordnungen:

H		8			
$N_1;N_2$	0;4	1;3	2;2	3;1	4;0
h	0,025	0,200	0,500	0,275	0,000

① Man ermittle, welche und wie viele verschiedene Anordnungen für 1, 2, 3, 4, 5 Moleküle auf 2 Teilbereiche möglich sind!
Stellen Sie das Ergebnis in einer Tabelle dar!

② Ermitteln Sie die Häufigkeit H der Anordnungen 0;4, 2;2, 3;1, 4;0 aus dem Diagramm in Bild 51/1 für $j = 20$ und $j = 40$!

③ Errechnen Sie die relative Häufigkeit der Anordnungen 0;4, 1;3, 2;2, 3;1 und 4;0 für $j = 20$ mit Hilfe des Diagramms in Bild 51/1!

Das Ergebnis ist eine **Häufigkeitsverteilung**. Sie gibt an, wie die relativen Häufigkeiten auf die möglichen Anordnungen verteilt sind. Sie wird meist in Form einer Tabelle oder als grafische Darstellung gegeben (Bild 52/1 und Bild 52/2). ①

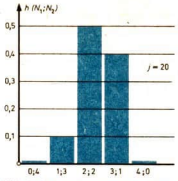
Man erkennt, daß Häufigkeitsverteilungen, denen eine unterschiedliche Anzahl zufälliger Ereignisse zugrunde liegt, sich noch sehr stark voneinander unterscheiden können. Dieses Merkmal tritt um so deutlicher hervor, je weniger zufällige Ereignisse betrachtet werden. Trifft man auf der Grundlage derartiger Häufigkeitsverteilungen bereits eine Voraussage über das Eintreten eines bestimmten Ereignisses, so ist diese Aussage sehr unsicher. Die bisherigen Betrachtungen zeigen, daß man bei Verallgemeinerungen auf der Grundlage nur weniger zufälliger Ereignisse sehr vorsichtig sein muß. ②

Für das Herausarbeiten einer statistischen Gesetzmäßigkeit sind die Gemeinsamkeiten in den Häufigkeitsverteilungen wesentlich: Trotz verschiedener Gesamtanzahl zufälliger Ereignisse erkennt man, daß die Anordnung 2;2 die maximale relative Häufigkeit besitzt, die Anordnungen 0;4 und 4;0 dagegen äußerst selten auftreten und die Anordnungen 1;3 und 3;1 zwar auch eine große relative Häufigkeit haben, aber eine deutlich kleinere als die der 2;2-Anordnung.
Es liegt sehr nahe, nun zu untersuchen, wie die erkannte Regelmäßigkeit beeinflußt wird, wenn man die Anzahl der zufälligen Ereignisse erhöht.

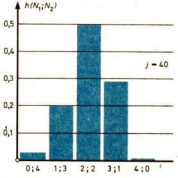
Tabelle 52/3 Relative Häufigkeiten der Anordnungen $N_1:N_2$ in Abhängigkeit von der Anzahl zufälliger Ereignisse

Anordnung $N_1:N_2$	$h(N_1:N_2)$						
	$j=10$	$j=20$	$j=30$	$j=40$	$j=50$	$j=60$	$j=70$
0;4	0,00	0,00	0,00	0,03	0,02	0,02	0,01
1;3	0,20	0,10	0,13	0,20	0,22	0,20	0,20
2;2	0,40	0,50	0,53	0,50	0,50	0,52	0,51
3;1	0,40	0,40	0,30	0,28	0,26	0,25	0,24
4;0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,03

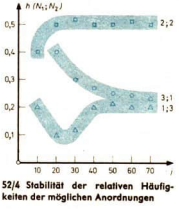
Mit wachsender Anzahl der registrierten zufälligen Ereignisse strebt die relative Häufigkeit einer ganz bestimmten Zahl zu. Für verschiedene Anordnungen ist sie im allgemeinen auch verschieden. Die Annäherung an diese Zahl ist im allgemeinen um so deutlicher, je größer die Anzahl der zufälligen Ereignisse ist. Die relative Häufigkeit wird für eine hinreichend große Anzahl der Anordnungen stabil. Nicht völlig ausgeschlossen ist dabei, daß gelegentlich auch wieder einmal eine größere Abweichung der relativen Häufigkeit von dieser Zahl auftreten kann.



52/1 Häufigkeitsverteilung für 20 zufällige Anordnungen



52/2 Häufigkeitsverteilung für 40 zufällige Anordnungen



52/4 Stabilität der relativen Häufigkeiten der möglichen Anordnungen

Die konstante Zahl, der sich die relative Häufigkeit einer Anordnung $N_1;N_2$ bei hinreichend großer Anzahl von Anordnungen nähert, heißt Wahrscheinlichkeit $P(N_1;N_2)$ dieser Anordnung. ③ ④ ⑤

Wahrscheinlichster Zustand eines Teilchensystems. Nachdem man die Wahrscheinlichkeiten für die möglichen Anordnungen ermittelt hat, ist das gesteckte Ziel erreicht; auch bei weiterer Erhöhung der Anzahl zufälliger Ereignisse ergeben sich die gleichen Wahrscheinlichkeiten. Das Gesetzmäßige der räumlichen Verteilung von 4 Teilchen bei 2 Teilbereichen ist aufgedeckt. Es gilt:

– Die Anordnung 2;2 hat die größte Wahrscheinlichkeit. Die Teilchen sind gleichmäßig auf die Teilbereiche verteilt.

– Die Anordnungen 0;4 und 4;0 haben die geringste Wahrscheinlichkeit. Die Teilchen konzentrieren sich in einem der Teilbereiche.

– Die Anordnungen 1;3 und 3;1 nehmen eine Zwischenstellung ein.

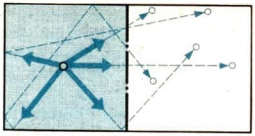
Die bisherige Erkenntnis kann auch so formuliert werden:
Die Teilchenanzahl in den Bereichen schwankt um den Wert 2. Dabei sind die Teilchen meistens gleichmäßig auf die Teilbereiche verteilt. ⑥

Bevor das bisher erworbene Wissen und Können auf das ideale Gas mit einer sehr großen Teilchenanzahl N übertragen wird, soll untersucht werden, warum gerade der Zustand der gleichmäßigen Verteilung der wahrscheinlichste Zustand des Teilchensystems ist. Dazu macht man von der Annahme Gebrauch, daß die Teilchen des Modells des idealen Gases voneinander unterscheidbar sind.
Betrachtet wird nun, welche der Teilchen sich in den Teilbereichen befinden. Jede Anordnung $N_1;N_2$ kann im allgemeinen auf mehrfache Art und Weise realisiert werden. So existieren z. B. für die Anordnung 1;3 genau vier Realisierungsmöglichkeiten. ⑦ ⑧ ⑨

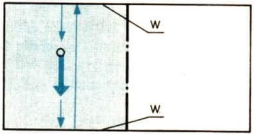
---

① Vergleichen Sie die Häufigkeitsverteilungen von Bild 52/1 und 52/2!
② Erläutern Sie an einem Beispiel, weshalb man bei Verallgemeinerungen beachten muß, welche Anzahl zufälliger Ereignisse den Überlegungen zugrunde liegt!
③ Ermitteln Sie in einem Experiment die Häufigkeitsverteilung für die 6 Augenzahlen eines Spielwürfels für $j = 200$ Würfe! Stellen Sie nach 100 Würfen eine Vermutung darüber auf, welchen Zahlen sich die relativen Häufigkeiten der einzelnen Augenzahlen nähern!
④ Ermitteln Sie näherungsweise die Wahrscheinlichkeiten $P(N_1;N_2)$ aus Bild 52/1 und 52/2!
⑤ Erläutern Sie die Aussage „Die Wahrscheinlichkeit der Anordnung 1;3 beträgt 0,20"!
⑥ Welche charakteristischen Kennzeichen zeigt die räumliche Verteilung von 4 Teilchen bei 2 Teilbereichen?
⑦ Ermitteln Sie, welche Möglichkeiten existieren, um die Anordnungen 2;2, 1;3, 3;1, 0;4, 4;0 zu realisieren!
⑧ Stellen Sie die Anzahl der Realisierungsmöglichkeiten der Anordnungen von Aufgabe 7 fest!
(Anleitung: Versehen Sie die Teilchen z. B. mit Nummern 1, 2, 3, 4)
⑨ Vergleichen Sie die Anzahl der Realisierungsmöglichkeiten und die Wahrscheinlichkeit der Anordnungen von Aufgabe 7!

Vergleicht man die Anzahl der Realisierungsmöglichkeiten mit der Wahrscheinlichkeit einer bestimmten Anordnung, so stellt man fest, daß die Anordnung mit der größten Wahrscheinlichkeit auch die größte Anzahl von Realisierungsmöglichkeiten, die Anordnung mit der geringsten Wahrscheinlichkeit auch die kleinste Anzahl von Realisierungsmöglichkeiten besitzt. Die anderen Anordnungen nehmen wiederum eine Zwischenstellung ein.
Die starke Bevorzugung der gleichmäßigen Verteilung der Teilchen ist also darauf zurückzuführen, daß es sehr viele Möglichkeiten für das Teilchensystem gibt, bei denen sich die Teilchen gleichmäßig im Raum verteilen (Bilder 54/1, 54/2).



54/1 Für das ständige Überwechseln von dem einen in den anderen Teilbereich gibt es unendlich viele Möglichkeiten.



54/2 Der Verbleib in einem Teilbereich ist nur möglich, wenn sich das Teilchen senkrecht zu den Wänden *W* bewegt.

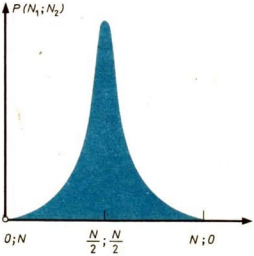
Gesetz der räumlichen Verteilung der Teilchen des idealen Gases. Die bisherigen Ergebnisse gelten nicht nur für vier Teilchen und zwei Teilbereiche, sondern lassen sich auch für eine beliebige Teilchenanzahl *N* und für eine feinere Teilung des begrenzten Raumbereiches ableiten. Zur präzisen Formulierung der Erkenntnisse wird die Anzahl der Teilchen pro Volumen verwendet. Man bezeichnet den Quotienten aus der Anzahl *N* der Teilchen, die sich im Volumen *V* befinden, und dem Volumen *V* als Teilchenanzahldichte $\frac{N}{V}$.

Für das Modell des idealen Gases gilt allgemein:

– **Die Gleichverteilung der Teilchen ist die wahrscheinlichste räumliche Anordnung.** Dieser Zustand ist dadurch gekennzeichnet, daß die Teilchenanzahldichte im betrachteten Raumbereich konstant ist.

– **Anordnungen der Teilchen, bei denen die Teilchenanzahldichte nur geringfügig von der bei der Gleichverteilung abweicht, sind fast so wahrscheinlich wie der Gleichverteilungszustand selbst.**

– **Je stärker sich die Teilchenanzahldichte in den verschiedenen Teilbereichen unterscheidet,** d. h. je stärker die Konzentrationsunterschiede werden, **um so geringere Wahrscheinlichkeit haben diese Zustände des idealen Gases** (Bild 54/3). ① ②



54/3 Kurve der Verteilung der Wahrscheinlichkeiten der Anordnungen N_1; N_2 bei Halbierung eines begrenzten Raumbereiches für das Modell des idealen Gases

Die räumliche Verteilung der Teilchen des idealen Gases unterliegt einem **statistischen Gesetz**. In Gestalt der Wahrscheinlichkeiten der möglichen Anordnungen tritt der zufällige Charakter der Ereignisse in Erscheinung. Die Wahrscheinlichkeiten geben an, welche Aussicht die einzelnen Anordnungen haben, realisiert zu werden. Dies ist eine Seite eines statistischen Gesetzes.
Die Verteilungskurve der Wahrscheinlichkeiten als Ganzes bringt zum Ausdruck, wie sich das ideale Gas mit Notwendigkeit verhalten muß. Im betrachteten Beispiel befindet sich das ideale Gas praktisch im Zustand der Gleichverteilung der Teilchen.
Das ist die zweite Seite eines statistischen Gesetzes.

Ein statistisches Gesetz enthält stets Aussagen über das notwendige Verhalten einer hinreichend großen Menge zufälliger Ereignisse als Ganzes und über die Wahrscheinlichkeiten des Eintretens der zufälligen Ereignisse selbst. ③

Zufällige Ereignisse und statistische Gesetze spielen auch im gesellschaftlichen Leben eine bedeutende Rolle. Das trifft z. B. auf Situationen zu, in denen verantwortungsbewußt wichtige Entscheidungen getroffen werden müssen. Auch in der Planung und Leitung volkswirtschaftlicher Prozesse, vor der Projektierung von neuen Industriebetrieben, Neubaugebieten, Verkehrswegen usw. werden oft umfangreiche und vielseitige statistische Untersuchungen durchgeführt, um danach auf wissenschaftlicher Grundlage eine optimale Entscheidung treffen zu können.

Denk- und Arbeitsschritte bei statistischen Betrachtungen. Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die wesentlichsten Denk- und Arbeitsschritte, mit denen man statistische Gesetze aufdecken kann, die folgenden sind:

1. Feststellen der möglichen Werte einer vom Zufall abhängigen Größe
2. Ermitteln ihrer Häufigkeiten und relativen Häufigkeiten (Häufigkeitsverteilung)
3. Bestimmen der Wahrscheinlichkeiten ihres Eintretens (Verteilung der Wahrscheinlichkeiten)
4. Formulieren der wesentlichsten Aussagen des statistischen Gesetzes ④

Zwischen statistischen Gesetzen und dynamischen Gesetzen muß stets unterschieden werden.
Besonders deutlich lassen sich dynamische Gesetze in der Mechanik anhand der Planetenbewegungen erläutern. Hier handelt es sich um einzelne, deutlich unterscheidbare Objekte, deren Zustände oder Bewegungen weitgehend vollständig mit Hilfe nur weniger Gesetze erfaßt werden. Diese Gesetze ermöglichen u. a. sichere Voraussagen über das Eintreffen bestimmter Einzelereignisse(z. B. Finsternisse).
Wenn jedoch zahlreiche Objekte und vielfältige Einflußgrößen zu berücksichtigen sind, ist es schwierig oder unmöglich, dynamische Gesetze zugrunde zu legen und daraus sichere Voraussagen abzuleiten. Das Beispiel der räumlichen Verteilung

---

① Berechnen Sie die Teilchenanzahldichten für die Zustände $N;O$ und $O;N$ bezogen auf das Teilvolumen V_1 des halbierten Raumbereiches V. Vergleichen Sie beide Werte!
② Welche Teilchenanzahldichte liegt bei der Gleichverteilung der Teilchen vor? (Halbierung des Raumes vorausgesetzt)
③ Vergleichen Sie dynamische und statistische Gesetze!
④ Konkretisieren Sie die Denk- und Arbeitsschritte für die räumliche Verteilung der Teilchen des idealen Gases!

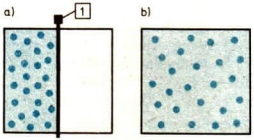
von Teilchen des idealen Gases zeigt deutlich, wie statistische Gesetze formuliert und angewendet werden können. Dazu sind folgende Differenzierungen vorzunehmen:
– Bei ausreichend großer Teilchenanzahl lassen sich für das betrachtete System als Ganzes sichere Voraussagen treffen.
– Die momentanen Einzelzustände der Elemente des Systems sind zufällig. Es lassen sich zwar mögliche Zustände von unmöglichen unterscheiden, aber keine sicheren Voraussagen über die tatsächlich stattfindenden Ereignisse treffen.
– Zur quantitativen Beschreibung dieser Tatsachen dient die Wahrscheinlichkeit. Sie drückt aus, ob bei zahlreichen Ereignissen ein bestimmter Einzelzustand häufig oder selten zu erwarten ist. Solche Informationen können sehr wertvoll sein.

Irreversibilität 21

Irreversible (nicht umkehrbare) Vorgänge. Das Wesen irreversibler Vorgänge wird am Modell des idealen Gases besonders deutlich.
Das System des idealen Gases wird durch einen Einfluß aus der Umgebung aus dem Gleichverteilungszustand in einen Zustand überführt, in welchem die Teilchen sehr ungleichmäßig verteilt sind.

Der äußere Eingriff kann z. B. so erfolgen, daß (Bild 56/1) durch eine Trennwand (1) zunächst alle Teilchen in einem Teilbereich konzentriert werden. Anschließend wird die Trennwand entfernt, und das Teilchensystem wird sich selbst überlassen.

Der im Bild 56/1 betrachtete Vorgang verläuft in Richtung höherer Wahrscheinlichkeit. Diese Vorzugsrichtung ist charakteristisch für alle irreversiblen Vorgänge. Würde man einen Film über einen irreversiblen Vorgang rückwärts ablaufen lassen – im gewählten Beispiel würden sich also alle Teilchen von allein in einem Teilbereich des Raumes konzentrieren –, so wird deutlich, daß im Film ein Vorgang gezeigt wird, den es in der Realität nicht gibt. ① ② ③



56/1 Anfangs- und Endzustand eines irreversiblen Vorgangs
Der Anfangszustand a) wird nicht beibehalten. Das ideale Gas geht im Verlaufe einer gewissen Zeit von einem wenig wahrscheinlichen Anfangszustand zum wahrscheinlichsten Zustand b) über. In diesem Zustand verbleibt das ideale Gas, abgesehen von gelegentlich auftretenden Abweichungen, solange keine Wechselwirkung mit der Umgebung erfolgt.

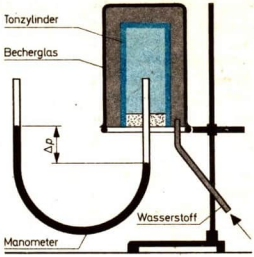
► **Bei irreversiblen Vorgängen ist eine Rückkehr in den Ausgangszustand ohne äußere Einwirkung nicht möglich. Sie führen zu einem Zustand höherer Wahrscheinlichkeit.**

Diffusion als irreversibler Vorgang. Bei der Diffusion von Gasen durch eine poröse Trennwand (Bild (57/1) laufen irreversible Vorgänge ab.
Zunächst befindet sich im Tonzylinder wie in der Umgebung Luft. Man leitet kurzzeitig Wasserstoff in das Glas. Daraufhin

zeigt das Manometer eine Druckerhöhung im Zylinder an. Sie geht wieder zurück. Wird das Becherglas entfernt, entsteht für kurze Zeit ein Unterdruck im Tonzylinder. Nach einiger Zeit herrscht im Zylinder wieder der gleiche Druck wie in der Umgebung. ④ ⑤

Bei festen Körpern ist die Diffusion meist auf eine dünne Grenzschicht begrenzt. Bei Flüssigkeiten und Festkörpern laufen die Vorgänge wegen der dichten Packung der Moleküle sehr langsam ab.
Diffusionsvorgänge haben große Bedeutung in Natur und Technik. Als Beispiele für die technische Nutzung sei auf die Herstellung von elektronischen und mikroelektronischen Bauelementen, von besonderen Stahlsorten, wie z. B. „Zementstahl", und das Einsatzhärten sowie die Isotopentrennung verwiesen. ⑥

Diffusionsvorgänge treten nicht nur bei Molekülen, sondern auch bei elektrisch geladenen Teilchen auf. ⑦



57/1 An einen unglasierten Tonzylinder ist ein Flüssigkeitsmanometer angeschlossen. Über den Tonzylinder ist ein Becherglas gestülpt. Mit dem Manometer wird der Unterschied zwischen Außendruck (Luft) und Innendruck (Wasserstoffgas) gemessen.

Die Energieverteilung für die Teilchen des idealen Gases 22

Geschwindigkeits- und Energieverteilung. Auch die Verteilung der kinetischen Energie des idealen Gases auf seine Teilchen erfolgt auf der Grundlage eines statistischen Gesetzes. Es wird angenommen, daß ein einzelnes Teilchen zufällig eine bestimmte kinetische Energie annimmt. Da sich die Teilchen des idealen Gases nach den aus der Mechanik bekannten Gesetzen bewegen, wäre es zwar denkbar, die kinetische Energie der einzelnen Teilchen zu berechnen, doch die meßtechnische Erfassung notwendiger Informationen über die Bewegung aller Teilchen und die mathematische Auswertung sind wegen der überaus großen Anzahl praktisch nicht zu bewältigen. Sichere Voraussagen über die kinetische Energie der Teilchen zu einer bestimmten Zeit sind nicht möglich. Sie sind auch nicht notwendig, denn mit Hilfe der statistischen Betrachtungsweise und der bereits bekannten Denk- und Arbeitsschritte kann man trotz der Unbestimmtheit zufälliger Einzelereignisse gesetzmäßige Aussagen über das

---

① Konkretisieren Sie die Aussagen für die räumliche Verteilung der Teilchen des idealen Gases!
② Begründen Sie, weshalb der Anfangszustand nicht beibehalten wird!
③ Welches ist der vom Gas angestrebte und wahrscheinlichste Zustand, wenn es sich selbst überlassen ist?
④ Erläutern Sie die Diffusion von Wasserstoff durch eine poröse Trennwand!
⑤ Erklären Sie, warum es im beschriebenen Experiment zu einem Druckausgleich kommt!
⑥ Nennen Sie Vorgänge in der Natur, bei denen die Diffusion eine wichtige Rolle spielt!
⑦ Geben Sie ein Beispiel zur Diffusion elektrisch geladener Teilchen an!

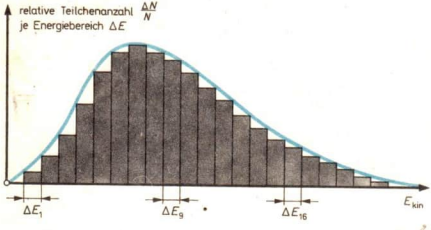
Verhalten von Systemen mit großer Teilchenanzahl erhalten. ①

Daher wird nun nicht die kinetische Energie einzelner Teilchen im Verlaufe der Zeit betrachtet, sondern man untersucht, wie die kinetische Energie des Teilchensystems zu einer bestimmten Zeit auf die Gesamtmenge der Teilchen verteilt ist. Dabei gibt man meist die relative Teilchenanzahl $\frac{\Delta N}{N}$ für die jeweiligen Geschwindigkeits- bzw. Energiebereiche an (Bild 58/3). Ein Experiment (Bild 58/1) soll dazu beschrieben werden, um erste Vorstellungen über wichtige Eigenschaften dieser Energieverteilung zu gewinnen. ② ③ ④

Die wesentlichsten Merkmale der Verteilung der Wahrscheinlichkeiten der kinetischen Energie des idealen Gases sind (kurz als Energieverteilung bezeichnet):

– **Die Teilchen des idealen Gases haben unterschiedliche kinetische Energie.** Es gibt $\frac{N_1}{N}$ Teilchen im Energiebereich ΔE_1 und $\frac{N_2}{N}$ Teilchen im Energiebereich ΔE_2 (usw.).

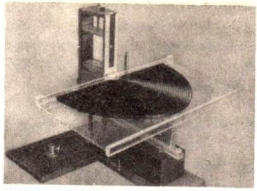
– **Die Energieverteilung ist unsymmetrisch.** Es gibt Energiebereiche, die mit relativ großer Wahrscheinlichkeit durch Teilchen belegt werden. Energiebereiche mit kleineren und größeren Energiewerten werden mit geringerer Wahrscheinlichkeit belegt, wobei die der kleineren Energien jedoch noch größer ist als die der sehr großen Energien (Bild 58/2).

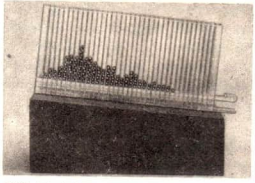


Mittlere kinetische Energie. Bei vielen Überlegungen wird die mittlere kinetische Energie herangezogen. Unter Berücksichtigung der Häufigkeiten N_i der n auftretenden Energiebereiche ΔE_i gilt:

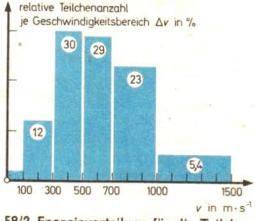
► **Die mittlere kinetische Energie ist gleich dem Quotienten aus der gesamten kinetischen Energie aller Teilchen und der Anzahl der Teilchen.**

$$\overline{E}_{kin} = \frac{\sum_{i=1}^{n} N_i \cdot \Delta E_i}{N} \qquad (47)$$





58/1 Modellexperiment zur Geschwindigkeitsverteilung von Teilchen (Kugeln) eines Modellgases
Aus einer seitlichen Öffnung der Kammer tritt ein Teil der Kugeln aus. Durch die Auffangvorrichtung werden die Kugeln entsprechend ihrer Wurfweite sortiert. Die unterschiedlichen Wurfweiten zeigen, daß die Kugeln unterschiedliche kinetische Energie haben.



58/2 Energieverteilung für die Teilchen des idealen Gases

58/3 Geschwindigkeitsverteilung für die Teilchen eines Gases (Moleküle von Stickstoff)

Innere Energie des idealen Gases. Die innere Energie U des idealen Gases ist gleich der Summe der kinetischen Energie aller Teilchen: ⑤ ⑥

$$U = \sum_{i=1}^{n} N_i \cdot \Delta E_i \qquad (48)$$

Nach (47) gilt auch:

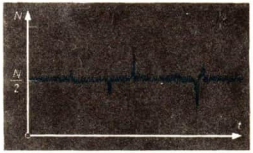
► **Die innere Energie U des idealen Gases ist das Produkt aus der Teilchenanzahl N und der mittleren kinetischen Energie $\overline{E}_{kin}$.**

$$U = N \cdot \overline{E}_{kin} \qquad (49)$$

Statistische Schwankungserscheinungen 23

Die räumliche Verteilung und die Energieverteilung der Teilchen des idealen Gases sind Ausdruck des Wirkens statistischer Gesetze. Das Wirken statistischer Gesetze schließt das Auftreten von statistischen Schwankungserscheinungen ein. In der Natur auftretende statistische Schwankungserscheinungen von Teilchensystemen belegen somit die Richtigkeit der am Modell gewonnenen Erkenntnisse über die Gesetzmäßigkeit der räumlichen Verteilung und der Energieverteilung.

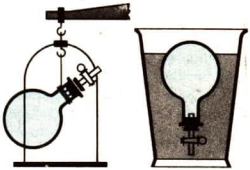
Die Überlegungen zur räumlichen Verteilung des idealen Gases führten zu der Erkenntnis, daß eine konstante Teilchenanzahldichte am wahrscheinlichsten ist. Demnach müßte die Dichte einer abgeschlossenen Gasmenge konstant sein. Diese Folgerung stimmt mit experimentellen Ergebnissen überein.



59/1 Statistische Schwankung der Teilchenanzahl N des idealen Gases bei Halbierung des Raumbereiches

▼ Nach Tarieren bei offenem Hahn (Bild 59/2) wird der Kolben mit einem Vakuumschlauch an eine Luftpumpe angeschlossen und ein Teil der Luft herausgesaugt. Die Masse der herausgesaugten Luft wird durch Wägung festgestellt.

Die Ermittlung des Volumens der herausgesaugten Luft erfolgt durch Wasserfüllung, indem man den Hahn unter Wasser vorsichtig öffnet und Wasser bis zum völligen Druckausgleich einströmen läßt. Danach schließt man den Hahn, nimmt den Rundkolben aus dem Wasser und gießt das eingedrungene Wasser – einschließlich des noch im Rohr befindlichen – in einen Meßzylinder um. Mit den gemessenen Beträgen für Volumen und Masse kann die Dichte berechnet werden.



59/2 Dichtebestimmung eines Gases

① Welches sind die wesentlichsten Denk- und Arbeitsschritte, um ein statistisches Gesetz aufzudecken?
② Welche charakteristischen Eigenschaften hat die Häufigkeitsverteilung nach Bild 58/1?
③ Erläutern Sie, welche weiteren Denkschritte notwendig sind, um zur Verteilung der Wahrscheinlichkeiten zu gelangen!
④ Welche charakteristischen Eigenschaften lassen sich ausgehend von der Geschwindigkeitsverteilung für die Energieverteilung der Teilchen des idealen Gases ableiten?
⑤ Gehen Sie von der Beziehung (47) aus und stellen Sie eine Gleichung zur Berechnung des mittleren Geschwindigkeitsquadrates $\overline{v^2}$ aus den einzelnen Geschwindigkeitsbereichen Δv_i auf!
⑥ Leiten Sie die Beziehung (49) her!

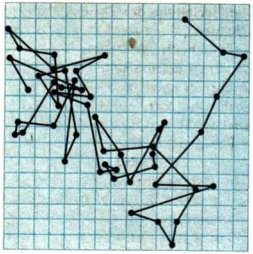
■ Ein besonders einprägsames und bedeutendes Beispiel einer statistischen Schwankungserscheinung stellt die *Brownsche Bewegung* dar (Bild 60/1). ① ②

Die Brownsche Bewegung wird durch die ständigen Stöße der Moleküle gegen ein makroskopisches Teilchen verursacht. Die Anzahl der stoßenden Moleküle sowie die Stärke und Richtung der einzelnen Stöße schwanken statistisch, wodurch sich zufällig in jedem Augenblick die Gesamtkraft auf das makroskopische Teilchen und damit auch seine Bahn ändert (Bild 60/2).
Je größer das makroskopische Teilchen ist, um so geringer sind die Schwankungen ausgeprägt, da sich die zufälligen Stöße der sehr großen Anzahl von Molekülen teilweise ausgleichen. Die Brownsche Bewegung ist daher besser zu beobachten, wenn die makroskopischen Teilchen nicht zu groß sind.

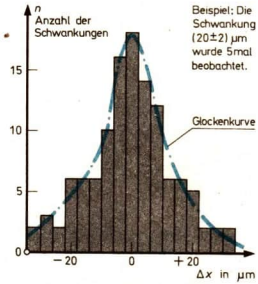
■ Auch das sogenannte „Rauschen" bei Geräten, die elektronische Bauelemente enthalten, ist auf statistische Schwankungserscheinungen zurückzuführen. Die Bewegung der Elektronen in den elektronischen Bauelementen hat trotz der Richtwirkung eines angelegten elektrischen Feldes ebenfalls statistischen Charakter und verursacht eine Vielzahl von Spannungsschwankungen. Diese wirken sich bei empfindlichen Messungen, beim Verstärken oder beim Übertragen von Informationen störend aus bzw. begrenzen die Meßempfindlichkeit und Güte der Geräte (Bild 60/3).

Das Druck-Volumen-Gesetz 24

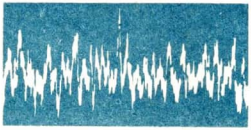
Der Druck des idealen Gases. Es ist bereits bekannt, daß der Druck eines Gases dadurch entsteht, daß die Gasmoleküle in großer Anzahl und sehr oft auf die Gefäßwände auftreffen. Nun soll der Druck des idealen Gases auf der Grundlage des Wissens über die räumliche Verteilung und die Energieverteilung seiner Teilchen berechnet werden. Als Ergebnis erhält man trotz der starken Vereinfachung sehr wichtige Zusammenhänge, die tiefere Einsicht darüber vermitteln, wie die Zustandsgrößen Druck und Temperatur eines thermodynamischen Systems mit den Eigenschaften seiner Elemente in Beziehung stehen. Im folgenden ist ein Weg gegeben, wie man den Druck berechnen kann.
Man geht von folgenden Annahmen aus:
A_1: Ein ideales Gas mit der Teilchenanzahl N sei in einem Würfel eingeschlossen (Bild 61/1).
A_2: Das ideale Gas befindet sich im Gleichverteilungszustand.
A_3: Beim Auftreffen eines Teilchens auf eine Gefäßwand wird nur jene Geschwindigkeitskomponente betrachtet, die senkrecht auf der Gefäßwand steht.
A_4: In allen Richtungen liegt die gleiche Energieverteilung vor. Keine Richtung wird bevorzugt. ③



60/1 Brownsche Bewegung eines makroskopischen Teilchens. Die Lage dieses Teilchens wurde in gleichen Zeitabständen registriert, woraus sich der gezeichnete Streckenzug ergibt.



60/2 Es ist dargestellt, wie oft jede Veränderung Δx der x-Koordinate eines Teilchens bei 120 Messungen auftrat. Den Schwankungen liegt ein statistisches Gesetz zugrunde. A. Einstein erkannte es im Jahre 1905 und verwendete es zur Bestimmung der Teilchenanzahl eines Gases.



60/3 Rauschbild eines elektrischen Bauelements

Die Herleitung der Druckgleichung erfolgt in mehreren Teilschritten.

1. Teilschritt: Wie viele Teilchen N_i treffen während der Dauer Δt auf die Seitenfläche A?

Insgesamt bewegen sich $N/6$ Teilchen in Richtung der Seitenfläche A. Doch nur ein Teil von ihnen trifft während der Stoßzeit Δt auch auf. Es kommen nur jene Teilchen zum Stoß in der Zeit Δt, deren Abstände von der Wand der Bedingung $\Delta s_i = \Delta v_i \cdot \Delta t$ genügen. Dabei sind die auftretenden Geschwindigkeitsbereiche $\Delta v_1, \Delta v_2, \Delta v_3, \ldots, \Delta v_n$ mit Δv_i zusammengefaßt. Die Teilchen befinden sich jeweils in den Teilvolumen

$\Delta V_i = A \cdot \Delta v_i \cdot \Delta t$ (Bilder 61/2 und 61/3). ④ ⑤

Ihre Summe soll mit N_i bezeichnet werden. Die Teilchenanzahl N_i ist für die Berechnung des Druckes maßgeblich. Man erhält sie aus der Proportion $N_i : N_i' = \Delta V_i : V$, wobei N_i' die Summe all der Teilchen darstellt, die sich mit einer der möglichen Geschwindigkeiten aus dem Geschwindigkeitsbereich Δv_i in Richtung der Fläche A bewegen. ⑥

Die Anzahl der Teilchen, die in der Stoßzeit Δt auf die Fläche A auftreffen, ist daher

$$N_i = \frac{N_i}{V} \cdot \Delta V_i \,. \qquad (50)$$

2. Teilschritt: Welche Kräfte üben die N_i Teilchen aus? ⑦

Die Teilchen führen elastische, senkrechte Stöße aus.

Dabei erfährt ein Teilchen aus dem Geschwindigkeitsbereich Δv_i und der Masse m eine Impulsänderung vom Betrage $2m \cdot \Delta v_i$ (↗ S. 43).

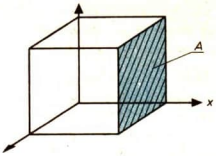
Die Teilchen N_i erfahren jeweils die Impulsänderung $N_i \cdot 2m \cdot \Delta v_i$. Für die von den N_i Teilchen ausgeübten Teilkräfte auf die Wand A gilt somit

$$F_i = \frac{2m \cdot \Delta v_i \cdot N_i}{\Delta t} \,. \qquad (51)$$

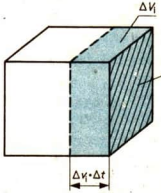
Unter Berücksichtigung von N_i (50) ergibt sich

$$F_i = \frac{2m\,(\Delta v_i)^2\, N_i' \cdot A}{V} \qquad (52)$$

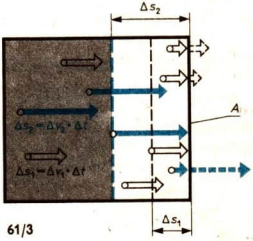
für die auf die Wand A ausgeübten Teilkräfte.



61/1 Der Würfel ist zweckmäßigerweise so in ein rechtwinkliges Kartesisches Koordinatensystem gelegt, daß drei seiner Kanten mit den Achsen zusammenfallen.



61/2



61/3

---

① Erläutern Sie, was man unter Brownscher Bewegung versteht!

② Beobachten Sie die Bewegung von in Wasser aufgeschwemmten Latex-Teilchen unter dem Mikroskop! Verwenden Sie mindestens eine 250fache Vergrößerung (z. B. Schülermikroskop)!

③ Erläutern Sie die Annahmen!

④ Welche der Annahmen geht in die Überlegungen ein?

⑤ Ermitteln Sie N_i, N_i' und geben Sie ΔV_i für die Teilchen aus den Geschwindigkeitsbereichen Δv_1, Δv_2 aus Bild 61/3 an!

⑥ Aufgrund welcher Annahme gilt die verwendete Proportion? Begründen Sie!

⑦ Welche der Annahmen werden verwendet?

3. Teilschritt: Welche resultierende Kraft wirkt auf die Fläche A?

Es gilt $F = \sum_{i=1}^{n} F_i$, $F = \frac{2m \cdot A}{V} \sum_{i=1}^{n} N_i' (\Delta v_i)^2$ (53)

und somit ist die ausgeübte Kraft

$$F = \frac{4A}{V} \sum_{i=1}^{n} N_i' \cdot \Delta E_i \,. \qquad (54)$$

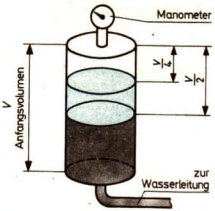
4. Teilschritt: Welcher Druck wird auf die Fläche A ausgeübt? Wegen $p = F \cdot A^{-1}$ gilt nun auch

$$p = \frac{4}{V} \sum_{i=1}^{n} N_i' \cdot \Delta E_i \,. \qquad (55)$$

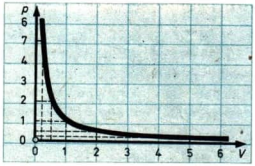
Unter Berücksichtigung dessen, daß die mittlere kinetische Energie der $N/6$ Teilchen

$$\overline{E}_{kin} = \frac{\sum_{i=1}^{n} N_i' \cdot \Delta E_i}{\frac{N}{6}} \qquad (56)$$

beträgt, folgt daraus die Gleichung zur Berechnung des Drucks:



62/1 Versuchsanordnung zur Bestätigung des Druck-Volumen-Gesetzes.



62/2 p-V-Diagramm

► **Der Druck des idealen Gases wird durch die Teilchenanzahldichte und die mittlere kinetische Energie der Teilchen bestimmt.**

$$p = \frac{2}{3} \cdot \frac{N}{V} \cdot \overline{E}_{kin} \qquad (57)$$

Das Druck-Volumen-Gesetz. Aus der Druckgleichung (57) folgt unmittelbar die Gleichung $p \cdot V = \frac{2}{3} N \cdot \overline{E}_{kin}$. Wegen der Annahme A_1 folgt daraus, daß unter diesen Bedingungen das Produkt aus Druck und Volumen des idealen Gases konstant ist. Diese Beziehung ist das

► **Druck-Volumen-Gesetz**

$$p \cdot V = \frac{2}{3} N \cdot \overline{E}_{kin} \qquad (58)$$

Mittlere kinetische Energie und Temperatur. Wird dem idealen Gas dagegen Energie zugeführt bzw. entzogen, so verändert sich die mittlere kinetische Energie der Moleküle. Es gilt $p \cdot V \sim \overline{E}_{kin}$.

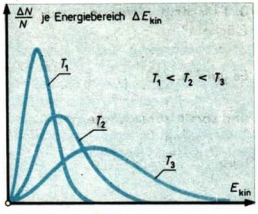
Da das Produkt aus Druck und Volumen auch der Temperatur des idealen Gases proportional ist, folgt aus dem Vergleich, daß die Temperatur T (in Kelvin) der mittleren kinetischen Energie des idealen Gases proportional ist:

$T \sim \overline{E}_{kin}$.

Eine Temperaturänderung ist gleichbedeutend mit einer Änderung der mittleren kinetischen Energie. Bei Temperaturerhöhung vergrößert sich in gleichem Maße die mittlere kinetische Energie. Die Energieverteilungskurve verschiebt sich zu höheren Energiewerten hin und wird flacher. Bei Temperaturerniedrigung verlagert sich die Energieverteilungskurve zu kleineren Energiewerten (Bild 63/1). ② ③

Aus den bisher angestellten Betrachtungen ist die folgende sehr wichtige Schlußfolgerung zu ziehen:

Die Zustandsgrößen Druck und Temperatur des idealen Gases lassen sich auf molekulare Größen zurückführen und sind vor allem durch die mittlere kinetische Energie der Teilchen bestimmt. ④



63/1 Energieverteilung bei verschiedenen Kelvin-Temperaturen

Mittlere Geschwindigkeit von Gasmolekülen. Die Gleichung (58) ermöglicht die näherungsweise Berechnung der mittleren Geschwindigkeit $\overline{v}$ von Gasmolekülen nach der Beziehung

$$\overline{v}^2 \approx \frac{3p}{\varrho}. \qquad (59)$$

ϱ: Dichte des Gases

Durch Messungen, die in der Schule nicht durchführbar sind, wurden die berechneten Werte bestätigt. ⑤ ⑥ ⑦

Die Druckgleichung (57), das Druck-Volumen-Gesetz (58) und die weiteren Folgerungen gelten strenggenommen nur für das Modell des idealen Gases. Sind die Voraussetzungen dieses Modells nicht erfüllt, so können die mit dem Modell des idealen Gases gewonnenen Erkenntnisse nur als grobe Annäherung an das Verhalten von realen Gasen betrachtet werden, oder sie weichen davon sogar so stark ab, daß es nicht erlaubt ist, sie auf derartige Gase zu übertragen.

Dies ist der Fall, wenn die Teilchen so dicht gepackt sind, daß die Wechselwirkungen der Teilchen und ihr Eigenvolumen berücksichtigt werden müssen. Dann sind andere statistische Betrachtungen durchzuführen und anstelle des idealen Gases verfeinerte Modelle zu verwenden.

Tabelle 63/2 Beispiele für mittlere Geschwindigkeiten von Gasmolekülen bei 0 °C

Gas	mittlere Geschwindigkeit
Sauerstoff	460 m · s⁻¹
Stickstoff	490 m · s⁻¹
Wasserstoff	1 840 m · s⁻¹
Luft	485 m · s⁻¹

---

① Begründen Sie diesen Schritt bei der Entwicklung der Gleichung (54)!

② Erklären Sie den Vorgang des Verdunstens aus kinetisch-statistischer Sicht!

③ Erklären Sie den Vorgang des Temperaturausgleichs zwischen zwei Gasen unterschiedlicher Temperatur aus kinetisch-statistischer Sicht! Gehen Sie auf die Irreversibilität ein!

④ Erläutern Sie die Zusammenhänge zwischen molekularen Größen und dem Druck sowie der Kelvin-Temperatur T für das ideale Gas!

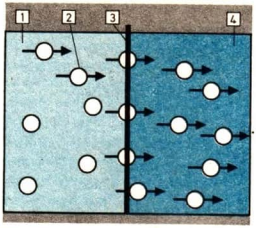
⑤ Leiten Sie die Beziehung (59) her! Hinweis: Beachten Sie, daß $\overline{v}^2 \approx \overline{v^2}$ gesetzt werden kann. Weiterhin gilt $\overline{E}_{kin} = \frac{1}{2} m \cdot \overline{v^2}$.

⑥ Berechnen Sie die mittlere Geschwindigkeit von Wasserstoffmolekülen bei 20 °C und dem normalen Luftdruck von $p = 1{,}01 \cdot 10^5\ \mathrm{N \cdot m^{-2}}$! Wasserstoff wird als ideales Gas betrachtet.

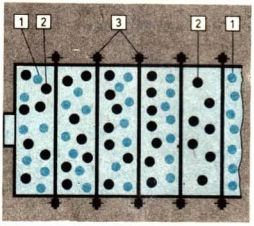
⑦ Erklären Sie, weshalb der Druck beim Experiment zur Diffusion beim Einleiten von Wasserstoff in das Becherglas ansteigt und beim Abheben des Becherglases geringer wird als in der Umgebung!

Anwendungsbeispiele zur Diffusion

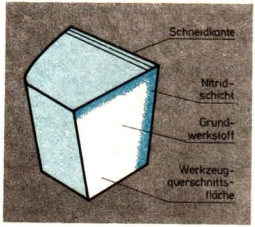
Diffusionsvorgang. Leicht bewegliche Teilchen (2), die sich in einem Körper (1) befinden, sind in der Lage, in einen anderen Körper (4) überzuwechseln. Infolge der thermischen Bewegung der Teilchen und der molekularen Struktur der Körper ist ein Hindurchbewegen durch die Körper möglich. Zwischen beiden Körpern liegt die Grenzschicht (3). Man bezeichnet sie entsprechend ihrer Funktion als Membran, Zellwand, Oberfläche.



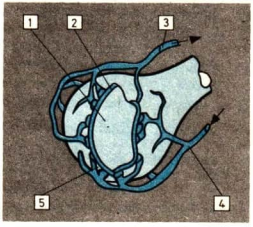
Isotopentrennung. Leichte Moleküle (1) diffundieren schneller aufgrund größerer Geschwindigkeit als schwere (2). Bei isotopen Atomen wie z. B. ^{235}U und ^{238}U ist dieser Unterschied nur gering, aber man kann ihn nutzen, um mit mehreren Diffusionsstufen (3) die beiden Isotope voneinander zu trennen und um den Kernenergieträger ^{235}U (2) anzureichern.



Nitrierhärten. Werkzeuge und Maschinenteile, die an ihrer Oberfläche hohem Verschleiß ausgesetzt sind, werden mit Hilfe eines besonderen Diffusionsverfahrens mit einer glasharten Nitridschicht verschleißfest gemacht. Die Randschicht der zu härtenden Teile wird durch Glühen bei etwa 800 K in einem Stickstoff abgebenden Gas bis in eine Tiefe von etwa $0{,}15 \cdot 10^{-6}$ m nitriert, d. h. im Stahlgefüge werden Schwermetall-Nitride erzeugt, die eine hohe Härte verleihen.



Atmung. Jedes Lungenbläschen (1) ist von einem Netz feinster Blutgefäße (5) umgeben. Beim Einatmen strömt sauerstoffreiche Luft in die Lungenbläschen. Durch die Wand des Bläschens (2) diffundiert Sauerstoff in das durch die Lungenarterie (4) herangeführte Blut. Zugleich gelangt das auszuscheidende Kohlendioxid durch Diffusion in die Lungenbläschen. Das mit Sauerstoff angereicherte Blut fließt über die Lungenvene (3) und das Herz zu den Organen und Geweben des Körpers.



Zusammenfassung

1. Fragestellung

Die sehr unregelmäßige Bewegung der in großer Anzahl vorhandenen Moleküle eines Gases, ihre ständige gegenseitige Beeinflussung veranlassen zu der Frage, welche Gesetze trotz der Zufälligkeit der einzelnen Ereignisse erkennbar wirken.

2. Folgerung

Durch Modellbetrachtungen und durch die Verwendung der statistischen Betrachtungsweise lassen sich statistische Gesetze gewinnen, die zunächst hypothetischen Charakter haben. Es ergeben sich als wichtige gesetzmäßige Aussagen, daß die räumliche Verteilung der Gasmoleküle statistischen Schwankungen unterworfen ist, wobei im Gleichgewichtszustand die Gleichverteilung am wahrscheinlichsten ist, und daß sich eine charakteristische Energieverteilung einstellt.

3. Prüfung

In der Natur auftretende statistische Schwankungserscheinungen von Teilchensystemen belegen die Richtigkeit der am Modell des idealen Gases gewonnenen Erkenntnisse über die Gesetzmäßigkeit der räumlichen Verteilung und der Energieverteilung.

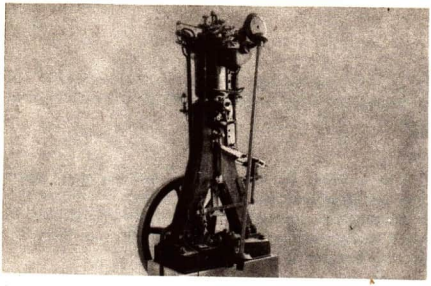
4. Anwendung

Die Erkenntnisse über die Gesetzmäßigkeit der Molekülbewegung werden u. a. genutzt, um Diffusionsvorgänge in gewünschter Weise zu beeinflussen. Hauptsächlich dienen sie dazu, Zusammenhänge zwischen den meßbaren Eigenschaften der Gase und ihren Molekülen abzuleiten. Das Druck-Volumen-Gesetz stellt einen derartigen Zusammenhang dar, wonach z. B. auch für das im Winderhitzer eingeschlossene Gas näherungsweise solche molekularen Größen wie die Anzahl der Moleküle, die mittlere Geschwindigkeit und die Masse der Gasmoleküle, die ihrerseits eng mit der Temperatur und der Dichte des Gases verknüpft sind, aus dem Druck und dem Volumen des Gases berechnet werden können.

$$p \cdot V = \frac{2}{3} N \cdot \overline{E}_{kin}$$

Problemfragen

- Schätzen Sie die Möglichkeit ein, die beschriebenen Diffusionsvorgänge zu steuern, um höchste Effektivität zu erzielen!
- Beschreiben Sie andere Diffusionsvorgänge!
- Verschaffen Sie sich Klarheit über die Wirkungsweise einer Quecksilber-Diffusionsluftpumpe!
- Beschreiben Sie die Rolle der Wissenschaft bei der Entwicklung der Produktion am Beispiel der Diffusion!



Hauptsätze der Thermodynamik

Der Diesel- und der Ottomotor wurden Ende des vorigen Jahrhunderts entwickelt. Sie stellten einen wichtigen Beitrag zur weiteren Entwicklung der Technik dar, indem sie das Antriebsproblem von Maschinen und Fahrzeugen lösten. Mit den ersten Motoren mußte zunächst vor allem ihre Funktionstüchtigkeit nachgewiesen werden.

Der Beginn der industriellen Revolution und die Einführung neuer Antriebsmaschinentypen stehen in enger Wechselbeziehung. Das Arbeitsmittel der vorher benutzten Wasserkraftmaschinen war ein nichtkompressibler Stoff (Wasser). In den neuen, zunächst empirisch erfundenen Antriebsmaschinentypen kam erstmals ein kompressibler Stoff (Gas) als Arbeitsmittel zur Anwendung, und die Maschinen müßten eigentlich analog zu den Wasserkraftmaschinen alle zusammen Gaskraftmaschinen heißen.
Die Energie komprimierter, heißer Gase nutzbar zu machen, erforderte die Entwicklung der Thermodynamik als Fachwissenschaft.
Begonnen hat diese Entwicklung mit der Untersuchung der Prozesse in der Kolbendampfmaschine von Watt. Auch für die Prozesse im Otto- und Dieselmotor mußten die wesentlichen theoretischen Grundlagen für ihren Bau und ihre Vervollkommnung gefunden werden. Heute steht vor allem die rationelle Anwendung der Energie in allen Bereichen der Volkswirtschaft im Vordergrund. Dabei sind z. B. folgende Fragen zu klären: Wie ändern sich Temperatur, Druck und Volumen beim Verdichten, Entspannen, Erwärmen und Abkühlen eines Gases? Wodurch werden diese Vorgänge ausgelöst? Welche Energieumwandlungs- und Energieübertragungsprozesse finden dabei statt?
In den folgenden Ausführungen werden diese Fragen beantwortet, indem der erste und zweite Hauptsatz der Thermodynamik und das thermodynamische Verhalten der Stoffe behandelt und die dabei gewonnenen Erkenntnisse auf technische Probleme angewandt werden.

Phänomenologische Thermodynamik 26

Bei der phänomenologischen Betrachtungsweise werden Erfahrungstatsachen herangezogen, ohne eine Erklärung im mikroskopischen Bereich zu suchen. Bei der dabei angewendeten Systemuntersuchung geht man von unmittelbar meßbaren Eigenschaften wie Druck und Temperatur aus, wobei nicht ihr Zusammenhang mit der Geschwindigkeit der Teilchen interessiert. ①

Innere Energie als Zustandsgröße 27

Auch die innere Energie des Systems als weitere Zustandsgröße des Systems wird in der phänomenologischen Thermodynamik nicht aus der kinetischen Energie der Teilchen errechnet. Sie ist eine Funktion der Temperatur und des Druckes des Systems und kann aus diesen beiden Größen bestimmt werden. Diese Aussage gilt für feste Körper, Flüssigkeiten und Gase. Beim Modell des idealen Gases ist die innere Energie dagegen nur von der Temperatur abhängig.

Prozeßgrößen 28

Der Zustand eines Systems, der durch seine Zustandsgrößen wie Temperatur, Druck und innere Energie gekennzeichnet ist, kann durch Wechselwirkungen des Systems mit der Umgebung verändert werden.
Diese Wechselwirkungen finden während eines Prozesses statt, deshalb werden die aus den Wechselwirkungen resultierenden Größen auch als **Prozeßgrößen** bezeichnet.
Arbeit und Wärme sind z. B. solche Prozeßgrößen (Tabelle).

► **Mit Prozeßgrößen werden die während eines Prozesses stattfindenden Wechselwirkungen des Systems mit der Umgebung charakterisiert.**

W, Q

Tabelle 67/1 Zustandsgrößen und Prozeßgrößen

Zustandsgrößen:	Temperatur	T	Prozeßgrößen:	Wärme	Q
	Druck	p		Arbeit	W
	Dichte	ϱ			
	innere Energie	U			

Im folgenden werden die Besonderheiten bei der Übertragung von Arbeit, Wärme und anderer Prozeßgrößen aufgezeigt.

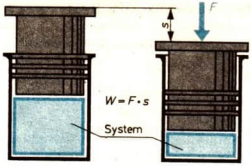
Arbeit *W*. Aus der Mechanik ist bekannt, daß durch das Wirken von Kräften ein Körper beschleunigt werden kann. Dabei wird mechanische Arbeit verrichtet. Neben dieser Beschleunigungsarbeit sind auch Hubarbeit und Reibungsarbeit genannt worden. ②

Eine weitere Form der mechanischen Arbeit kann man an einem Zylinder mit Kolben (Bild 68/1) beobachten. Durch die über den Kolben auf das Gas wirkende Kraft F wird das

① Nennen Sie die charakteristischen Merkmale der kinetisch-statistischen Betrachtungsweise!
② Nennen Sie Beispiele für diese Formen der mechanischen Arbeit! Erklären Sie, welche Energieumwandlungen bei einer Explosionsramme vor sich gehen!

Volumen des Systems (Gas) und damit z. B. seine innere Energie verändert.
Die dabei verrichtete Arbeit mit Veränderung des Systemvolumens wird als **Volumenarbeit W_V** bezeichnet.
Die Volumenarbeit ist wie jede andere Arbeit abhängig vom Verlauf des Prozesses; die auf den Kolben wirkende Kraft kann z. B. konstant oder veränderlich sein. Die Volumenarbeit ist eine Prozeßgröße.
Allgemein kann formuliert werden:

> ► **Wenn bei einem Prozeß eine Änderung des Systemvolumens eintritt, wird am System (Kompression) oder vom System (Expansion) eine Volumenarbeit verrichtet. Die Volumenarbeit ist eine Prozeßgröße.**



68/1 Volumenarbeit
Bei der Verrichtung von Volumenarbeit am System wird das Gas komprimiert; dabei erhöhen sich im allgemeinen der Systemdruck ($p_2 > p_1$) und die innere Energie des Systems ($U_2 > U_1$).

Die Berechnung der Volumenarbeit soll am Beispiel eines Gasbehälters gezeigt werden (Bild 68/2). Eine konstante Menge Gas soll in dem Gasbehälter gespeichert sein. Durch die Abkühlung der Umgebung wird die Temperatur des Gases verringert.

Wie ändert sich dabei das Volumen des Gases?

Die Erfahrung zeigt, daß bei gleichbleibendem Druck ein Gas bei Temperaturverringerung auch sein Volumen verringert. Das Volumen des Systems (Gas) verkleinert sich also, dabei verrichtet die Umgebung am System eine Volumenarbeit.

Aus der Mechanik ist die Arbeit als Produkt der in Wegrichtung wirkenden Kraftkomponenten F_S und dem Weg s bekannt. Die Volumenarbeit wird in der Thermodynamik jedoch durch die Zustandsgrößen Druck und Volumen ausgedrückt. Der Zusammenhang ergibt sich durch folgende Überlegungen:

Der Kolbenweg s kann aus der Volumenänderung ΔV errechnet werden, wenn man den Quotienten aus ΔV und A bildet. Dabei ist zu beachten, daß sich bei der Bewegung des Kolbens in s-Richtung, also mit steigendem s, das Volumen des Systems verringert, also ΔV negativ wird.

Es muß deshalb ein negatives Vorzeichen eingeführt werden:

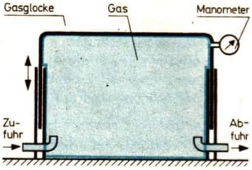
$$s = -\frac{\Delta V}{A}.$$

Setzt man für die Kraft F das Produkt aus Druck und Fläche ein ($F = p \cdot A$), so ergibt sich für die Arbeit
$W = F \cdot s$

$$W = (p \cdot A) \cdot \left(-\frac{\Delta V}{A}\right)$$

oder

$$W = -p \cdot \Delta V$$
$$W = -p\,(V_e - V_a). \qquad (60)$$



68/2 Volumenarbeit an einem Gasbehälter
Durch die konstante Gewichtskraft der Behälterglocke bleibt der Gasdruck während der Temperaturänderung konstant.

Die abgeleitete Gleichung (60) ist **nicht** allgemeingültig, sondern sie gilt nur, wenn ein konstanter Druck während des Prozesses gewährleistet ist.

Dabei bedeuten:

p = der konstante Druck im System
V_e = das Systemvolumen am Ende des Prozesses
V_a = das Systemvolumen am Anfang des Prozesses

Bei dem betrachteten Prozeß wurde Arbeit am System verrichtet. Da das Volumen zu Beginn des Prozesses größer ist als am Ende ($V_a > V_e$), ergibt sich ein positiver Wert für die Arbeit. ①

Allgemein soll vereinbart werden:
Die am System verrichtete Arbeit ist positiv: $W > 0$, die vom System verrichtete Arbeit ist negativ: $W < 0$ (Bild 69/1).
Diese Vorzeichenregelung entspricht nicht der im Physikunterricht der Klasse 8 vereinbarten. Infolge ihrer Übersichtlichkeit hat sie sich jedoch in dieser Form in der wissenschaftlich-technischen Literatur weitgehend durchgesetzt und soll auch hier verwendet werden. ②

Aus der Mechanik ist bekannt, daß sich die Arbeit in einem Kraft-Weg-Diagramm als Fläche darstellen läßt. ③

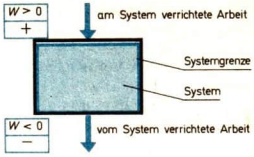
Ebenso kann die Volumenarbeit in einem Druck-Volumen-Diagramm verdeutlicht werden (Bild 69/2).

In einem anderen Beispiel sei ebenfalls ein Gas in einem Zylinder eingeschlossen. Der Kolben ist durch mehrere Wägestücke belastet (Bild 69/3). Der Druck des Gases kann aus Kraft und Fläche bestimmt werden. Nun werden die Wägestücke nacheinander vom Kolben genommen, so daß sich das Gas ausdehnt und eine Volumenarbeit an seiner Umgebung (Kolben) verrichtet.
Bei kleinen Wägestücken sind die Teilschritte so klein, daß bei jedem dieser Schritte eine lineare Druckabnahme stattfindet. Damit läßt sich ein mittlerer Druck $\overline{p_i}$ für jeden Teilschritt i als arithmetisches Mittel des Anfangs- und Endwertes bestimmen. Für jeden Teilschritt i kann damit auch die Volumenarbeit errechnet werden:

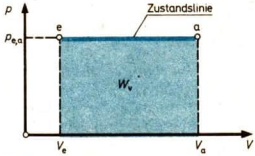
$W_{V,i} = -\overline{p_i} \cdot \Delta V_i$ mit $\Delta V_i = (V_e - V_a)_i$.

Aus der Summe der Teilarbeiten ist dann zu bestimmen die

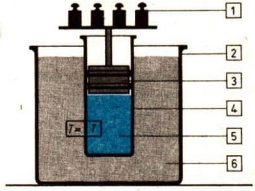
► **Volumenarbeit des Gesamtprozesses**



69/1 Zur Vorzeichenregel der Arbeit



69/2 Volumenarbeit im p-V-Diagramm
Der Prozeß kann durch eine Zustandslinie beschrieben werden, in der der Zusammenhang zwischen Druck und Volumen während des Prozesses veranschaulicht ist. Die Fläche unter der Zustandslinie entspricht dann der Volumenarbeit W_V.



69/3 Bestimmung der Volumenarbeit bei veränderlichem Druck
Bei diesem Prozeß wird die Temperatur des Gases durch das Wasser im äußeren Behälter konstant gehalten.
1 – Wägestücke 4 – Zylinder
2 – Behälter 5 – komprimiertes Gas
3 – Kolben 6 – Wasser

$$W_V = \sum_i W_{V,i}$$

$$W_V = -\sum_i \overline{p_i} \cdot \Delta V_i \qquad (61)$$

① Prüfen Sie, welcher Wert sich bei der Ausdehnung eines Gases ergibt!
② Erläutern Sie, wie diese Vorzeichenregelung von der in Physik Klasse 8 abweicht!
③ Veranschaulichen Sie in einem Kraft-Weg-Diagramm die Arbeit!

Diese vom System verrichtete (abgegebene) Arbeit muß vereinbarungsgemäß negativ sein, das ergibt sich auch aus $V_e > V_a$. Die während eines Teilschrittes abgegebene Arbeit kann durch eine schmale Rechteckfläche im p-V-Diagramm dargestellt werden (Bild 70/1).
Die gesamte Volumenarbeit setzt sich dann aus der Summe der Teilarbeiten zusammen.

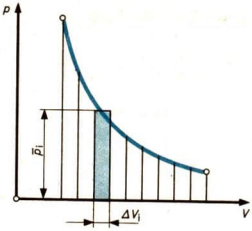
Allgemein gilt:

Die an einem System verrichtete oder die vom System verrichtete Arbeit ist durch eine Fläche unter der Zustandslinie im p-V-Diagramm darstellbar.

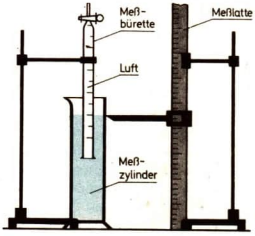
Wurde im Beispiel (Bild 70/2) bei jedem Teilschritt der Druck gemessen und das Volumen des Gases bestimmt, so kann die Zustandsänderung der Luft in einem p-V-Diagramm auf Millimeterpapier veranschaulicht und die dabei verrichtete Arbeit gezeigt werden. ① ②

Wärme Q. Eine weitere Form der Wechselwirkung soll am Beispiel „Kessel einer Warmwasserheizung" veranschaulicht werden. Über die Systemgrenzen (Begrenzungsflächen des Warmwassers) findet eine Übertragung von Wärme statt, d. h. ein Teil der Energie der Verbrennungsgase und der Glut wird bei diesem Prozeß auf das Warmwasser übertragen (Bild 71/1). Der Prozeß der Wärmeübertragung im Kessel läßt sich am besten aus kinetisch-statistischer Sicht erklären:
Die Wärmeübertragung erfolgt durch die Wechselwirkung der sich unregelmäßig bewegenden Teilchen an der Grenzfläche des Systems und der Umgebung. Dabei haben die Teilchen der Umgebung (des Feuerraumes) eine höhere mittlere kinetische Energie als die des Systems, so daß durch deren Zusammenstöße Energie von den Umgebungsteilchen auf die Teilchen des Systems übertragen wird.

Aus phänomenologischer Sicht haben System und Umgebung eine unterschiedliche Temperatur, und durch die Wärmeübertragung erfolgt eine Temperaturerhöhung des Systems und eine Abkühlung der Umgebung. (Diese Abkühlung wird durch die weitergehende Verbrennung sofort wieder ausgeglichen.)
Natürlich kann die Wärmeübertragung auch in umgekehrter Richtung vom System auf die Umgebung erfolgen, wenn das System eine höhere Temperatur als die Umgebung hat.
Ist die Temperatur der Umgebung und des Systems gleich (aus kinetisch-statistischer Sicht ist dann auch die mittlere kinetische Energie ihrer Teilchen gleich), so findet keine Wärmeübertragung statt.
Aus den vorhergehenden Ausführungen wurde auch ersichtlich, daß die Wärmeübertragung während eines Prozesses vor sich geht.



70/1 Darstellung der Volumenarbeit im p-V-Diagramm bei veränderlichem Druck
Der Druck verringert sich vom Anfangsdruck p_a auf den Enddruck p_e. Der Volumenänderung ΔV_i kann ein mittlerer Druck $\bar{p}_i$ annähernd zugeordnet werden.



70/2 Darstellung der Volumenarbeit
In der Meßbürette, deren Volumen genau bestimmt wurde, ist Luft eingeschlossen. Oben ist die Luft in der Meßbürette durch einen Hahn, unten durch das Wasser des Standzylinders begrenzt. Wird die Höhe der Meßbürette verändert, so ändert sich der Wasserspiegel im Standzylinder und in der Bürette, die eingeschlossene Luft wird dann z. B. durch den erhöhten Druck der Wassersäule komprimiert. Bestimmt man für verschiedene Stellungen der Bürette das Luftvolumen und den auf die Luftsäule wirkenden Druck, so kann in einem p-V-Diagramm der Zusammenhang zwischen p und V der Luft in einer Kurve veranschaulicht werden. Die Fläche unter der Kurve entspricht der an der Luft verrichteten Volumenarbeit.

Zusammenfassend läßt sich sagen:

> ► **Die Übertragung von Wärme findet statt, wenn zwischen System und Umgebung eine Temperaturdifferenz vorhanden ist. Die Wärmeübertragung erfolgt in Richtung geringerer Temperatur.**
> **Die Wärme Q ist eine Prozeßgröße.**

Im Beispiel (Bild 71/2) tritt wegen $\Delta V = 0$ keine Arbeit auf, deshalb wird die Wärmeübertragung vollkommen in der Erhöhung der inneren Energie wirksam.

$$U_e - U_a = Q. \qquad (62)$$

Dieser Prozeß führt zu einer Erhöhung der Temperatur des Systems und auch seines Druckes, das wird in einem *p-V*-Diagramm deutlich. ③ ④

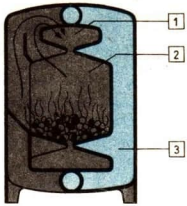
Ebenso wie bei der Arbeit (↗ S. 69) wird folgendes vereinbart:
- Die dem System zugeführte Wärme ist positiv ($Q > 0$).
- Die vom System abgegebene Wärme ist negativ ($Q < 0$).

Der Prozeß der Wärmeübertragung kann in allen Zweigen der Volkswirtschaft beobachtet werden, sowohl in der Energiewirtschaft als auch in der chemischen Industrie, dem Maschinenbau und der Landwirtschaft. ⑤

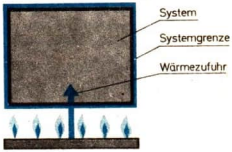
Technische Anlagen, die ausschließlich zur Wärmeübertragung dienen, werden **Wärmeübertrager** genannt.
Zum Begriff der Wärme als Prozeßgröße muß bemerkt werden, daß er in der Umgangssprache nicht immer richtig verwendet wird. Wärme als Prozeßgröße und innere Energie als Zustandsgröße des Systems sind deshalb immer deutlich voneinander abzugrenzen und zu unterscheiden.

Weitere Prozeßgrößen. Die innere Energie eines Systems kann außerdem geändert werden durch die Übertragung von **stoffgebundener Energie** und **Strahlungsenergie**. Die Übertragung von stoffgebundener Energie ist im Gegensatz zu Arbeit und Wärme mit einem Stofftransport über die Systemgrenze verbunden (Bild 71/3). ⑥

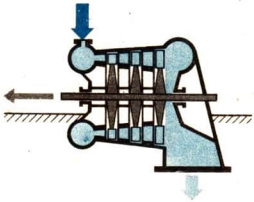
Dem System (Dampfturbine, Bild 71/3) wird mit dem Heißdampfstrom stoffgebundene Energie zugeführt, der als entspannter Dampf das System wieder verläßt. Über die Turbinenwelle wird vom System mechanische Arbeit verrichtet.



71/1 Wärmeübertragung im Heizkessel einer Warmwasserheizung
1 – Rauchgasabzug
2 – Verbrennungsraum
3 – Wasser
Dem System (Wasser) wird über seine Systemgrenzen (Begrenzungsflächen) Wärme übertragen. Dabei findet kein Stofftransport über die Systemgrenzen statt.



71/2 Wärmeübertragung an ein System mit konstantem Volumen



71/3 Dampfturbine

---

① Ziehen Sie vom Anfangszustand a zum Endzustand e durch die übrigen Punkte eine Kurve mit Hilfe eines Kurvenlineals!
② Bestimmen Sie die Arbeit durch Auszählen der Fläche unter der Kurve!
③ Erläutern Sie, warum im Beispiel (Bild 71/2) keine Arbeit verrichtet wird!
④ Zeichnen Sie in ein *p-V*-Diagramm eine Zustandsänderung von $p_a = 0{,}1$ MPa auf $p_e = 0{,}5$ MPa bei $\Delta V = 0$ und erläutern Sie die bei diesem Prozeß verrichtete Arbeit!
⑤ Nennen Sie Beispiele für die Wärmeübertragung in den genannten Zweigen der Volkswirtschaft!
⑥ Unterscheiden Sie diese Prozeßgrößen von der Wärme!

Am Beispiel eines Winderhitzers können ebenfalls die Prozesse der Wärmeübertragung und der Übertragung von stoffgebundener Energie unterschieden werden (Bild 72/1). ① ②
Die Übertragung von Strahlungsenergie erfolgt durch elektromagnetische Wellen. Jeder Heizkörper gibt einen Teil seiner Energie als Strahlungsenergie ab. Weitere Beispiele für die technische Nutzung der Übertragung von Strahlungsenergie sind die Infrarotstrahler und die Gasstrahler. ③

Der Energieerhaltungssatz 29

Ein wichtiger, aus der Erfahrung entwickelter Satz der phänomenologischen Thermodynamik ist der Energieerhaltungssatz. Im Stoffgebiet Mechanik wurde der Energieerhaltungssatz der Mechanik formuliert. ④

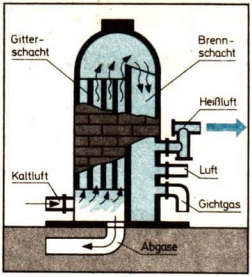
Dieser Satz kann erweitert werden zum allgemeingültigen **Satz von der Erhaltung der Energie.**

► **Energie kann weder erzeugt noch vernichtet werden, sie kann nur transportiert oder von einer Form in eine andere umgewandelt werden.**

Für ein von seiner Umgebung vollständig isoliertes, ein abgeschlossenes System hat dieser Energieerhaltungssatz eine sehr einfache Form:
Die Energie eines abgeschlossenen Systems ist unveränderlich. Es ist bekannt, daß schon immer versucht wurde, Energie aus dem Nichts zu erzeugen. Man konstruierte komplizierte Apparate und Vorrichtungen und führte Berechnungen durch. Doch alle diese Überlegungen erwiesen sich als fehlerhaft, weil sie nicht dem Energieerhaltungssatz genügten.
Ein Beispiel dafür ist der tatsächlich vorgeschlagene Apparat zur Erzeugung von mechanischer Energie (Bild 73/1), der schon dem Energieerhaltungssatz der Mechanik widerspricht. ⑤

Erster Hauptsatz der Thermodynamik (Energiebilanz) 30

Unter der Bezeichnung „Erster Hauptsatz der Thermodynamik" werden alle Erfahrungstatsachen zusammengefaßt, die sich aus der Anwendung des Energieerhaltungssatzes auf die betrachteten Systeme ergeben.
Allgemein läßt sich folgendes sagen:
Wenn keine Energie aus dem Nichts erzeugt werden kann, so muß jede Änderung der Energie des Systems durch eine Energieübertragung über die Systemgrenze erfolgt sein.
Mathematisch läßt sich diese Aussage als Bilanz ausdrücken, in der die Änderung der Energie des Systems der über die



72/1 Winderhitzer
Fall A: Die gesamte Anlage ist das System.
Fall B: Die Luft im Winderhitzer ist das System.

Systeme mit Stofftransport über die Systemgrenzen haben eine große Bedeutung in der Technik. Alle Anlagen, die kontinuierlich beschickt werden und aus denen schließlich die Stoffe mit veränderten Eigenschaften wieder herausströmen, sind diesen Systemen zuzuordnen. Hier sind vor allen Dingen Chemieanlagen und Anlagen der Energiewirtschaft zu nennen, aber auch Aggregate, mit denen wir täglich zu tun haben, z. B. der Haarfön, der Raumheizlüfter, der Heizkörper des Fernheizungssystems, die Pumpe zur kontinuierlichen Wasserförderung und der Ventilator.

Systemgrenze übertragenen Energie gegenübergestellt wird. Diese Energiebilanz wird bezeichnet als allgemeine Formulierung des

ersten Hauptsatzes der Thermodynamik:

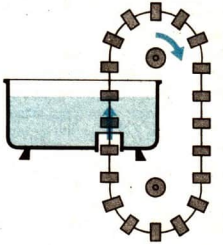
► **Die Änderung der Energie des Systems ist gleich der Summe der über die Systemgrenzen übertragenen Energien.**

$$\Delta E_{System} = \Sigma E_{Übertr} \qquad (63)$$

Alle Energieumwandlungs- und Energieübertragungsprozesse können mit dieser Energiebilanz erfaßt werden. ⑥

Als Energie des Systems kommen die aus der Mechanik bekannte kinetische und potentielle Energie des Systems sowie die innere Energie U in Betracht. ⑦

Als über die Systemgrenzen übertragene Energie können Arbeit W, Wärme Q, stoffgebundene Energie und Strahlungsenergie genannt werden.
Die Energiebilanz kann nun folgendermaßen präzisiert werden: Die Änderung der kinetischen, potentiellen und inneren Energie des Systems ist gleich der Summe der über die Systemgrenzen übertragenen Arbeit, Wärme, stoffgebundenen Energie und Strahlung.
Sollen alle diese Größen präzise erfaßt und beschrieben werden, so wird die Energiebilanz sehr kompliziert. Bei den folgenden Überlegungen wird deshalb vorausgesetzt:
1. Es werden nur Systeme betrachtet, bei denen die Änderung der kinetischen und der potentiellen Energie des Systems Null oder vernachlässigbar klein ist.
2. Es werden nur Systeme betrachtet, bei denen keine Übertragung von stoffgebundener Energie und Strahlungsenergie erfolgt.
Mit den genannten Voraussetzungen kann die Energiebilanz präzisiert werden:



73/1 Apparat zur angeblichen Erzeugung von Energie
Über zwei Rollen läuft ein Band mit Korken. Die Korken werden durch eine Wanne geführt, wobei der Eintritt der Korken von unten konstruktiv durch Klappen gelöst sein soll. Nach dem Eintritt wirkt die Auftriebskraft, so daß das Korkenband immer wieder beschleunigt wird. An die eine Rolle läßt sich ein Generator zur Erzeugung von elektrischer Energie anschließen.

► **Die Änderung der inneren Energie eines Systems ist gleich der Summe der über die Systemgrenzen übertragenen Wärme und Arbeit.**

$$U_e - U_a = Q + W \qquad (64)$$

$$\Delta U = U_e - U_a$$

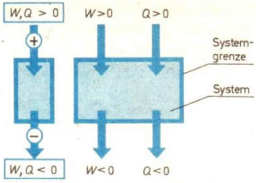
---

① Erläutern Sie für die Fälle A und B die Übertragung von Wärme und stoffgebundener Energie über die Systemgrenzen beim Winderhitzer!
② Erklären Sie am Beispiel des Heizkörpers einer Warmwasserheizung, wo eine Wärmeübertragung und wo eine Übertragung von stoffgebundener Energie erfolgt!
③ Nennen Sie weitere Beispiele der Übertragung von Strahlungsenergie!
④ Formulieren Sie den Energieerhaltungssatz der Mechanik!
⑤ Versuchen Sie zu erklären, warum in der gezeigten Anlage keine Energie gewonnen werden kann und worin die Fehler der Überlegungen liegen!
⑥ Wenden Sie den ersten Hauptsatz der Thermodynamik auf die Energieformen der Mechanik an!
⑦ Welche Energieformen aus anderen Teilgebieten der Physik und Naturwissenschaften könnten hier noch genannt werden?

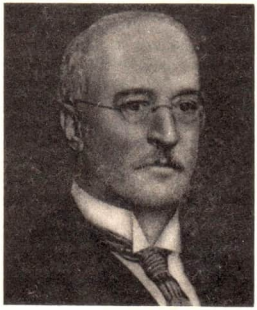
Als Vorzeichenregelung gilt:
Die dem System übertragene Wärme Q und die am System verrichtete Arbeit W sind positiv
($Q > 0$, $W > 0$).
Die vom System abgegebene Wärme Q und die vom System verrichtete Arbeit W sind negativ
($Q < 0$, $W < 0$) (Bild 74/1).
Folgende Prozesse mit dem Ergebnis einer Änderung der inneren Energie können nun unterschieden werden:
1. Es wird dem System nur Wärme zugeführt (Beispiel Aufheizung eines elektrischen Heißwasserboilers).
2. Es wird vom System an die Umgebung nur Wärme abgegeben
(Beispiel Abkühlung von Gußeisen in der Gußform).
3. Es wird am System nur Arbeit verrichtet
(Beispiel Komprimierung des Gases im Verbrennungsmotor).
4. Es wird vom System nur Arbeit verrichtet (Ausdehnung des Dampfes im Zylinder der Dampfmaschine).
5. Es treten Wärme und Arbeit gleichzeitig auf (Beispiel Erwärmung eines Gases in einem Ballon). ① ②

Zu einigen aufgeführten Beispielen muß bemerkt werden, daß sie den vorhergenannten Bedingungen nur annähernd entsprachen, z. B. läßt sich eine Wärmeübertragung in der Praxis nicht vollständig verhindern.
Die Übertragung von Wärme und Arbeit kann auch am Beispiel des Dieselmotors gezeigt werden (Bild 74/3).
Beim Vorgang des Verdichtens wird am Gas eine Volumenarbeit verrichtet, und beim Entspannen verrichtet das Gas eine Volumenarbeit am Kolben (Arbeitstakt eines Dieselmotors). Um den Vorgang der Verbrennung mit in die Überlegungen einzubeziehen, wird dieser als Wärmeübertragung der Umgebung an das System idealisiert. Die Wärmeübertragung erfolgt bei annähernd konstantem Druck bei gleichzeitiger Ausdehnung des Gases. ③ ④

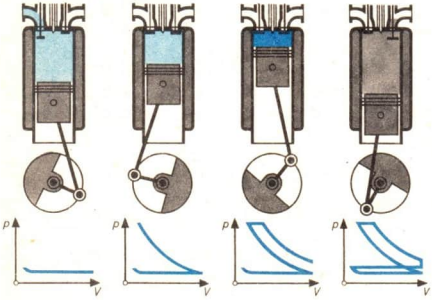
Diese Idealisierung ist wegen der geringen Zeitdauer dieses Prozesses möglich.



74/1 Vorzeichenregelung für Arbeit und Wärme



74/2 Rudolf Diesel (1858 bis 1913)
Wie kompliziert unter den gegebenen Bedingungen diese nebenstehend mit 8 Druckzeilen festgehaltenen Erkenntnisse zu finden und in der Praxis anzuwenden waren, zeigt die Arbeit Rudolf Diesels. Seit 1878 beschäftigte er sich mit der „Theorie und Konstruktion eines rationellen Wärmemotors" (1893 veröffentlicht), und 1897 lief erstmals sein Dieselmotor (↗ Bild 66/1).



74/3 Arbeitstakte eines Dieselmotors

Bei technischen Anlagen ist häufig eine weitere Form der mechanischen Arbeit anzutreffen. Dabei wird die mechanische Arbeit durch Wellen, Wellenräder oder ähnliche technische Vorrichtungen übertragen (Bild 75/1).

■ Zu berechnen ist die Änderung der inneren Energie des Getriebes während des Prozesses!

Gegeben:
zugeführte Leistung:
$P_1 = 10\ \text{kW}$
abgegebene Leistung:
$P_2 = -9{,}8\ \text{kW}$
abgegebene Wärme:
$Q = -500\ \text{kJ}$
betrachtete Zeitdauer:
$t_Z = 1\ \text{h}$
$1\ \text{kWh} = 3600\ \text{kJ}$

Gesucht:
ΔU

Lösung:

$$U_e - U_a = Q + W$$

$$W = (P_1 + P_2) \cdot t_Z$$

$$W = (10 - 9{,}8)\ \text{kW} \cdot 1\ \text{h}$$

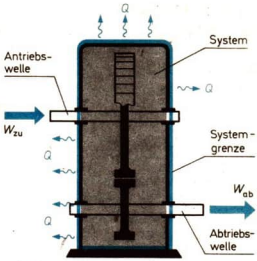
$$W = 0{,}2\ \text{kWh}$$

$$W = 0{,}2\ \text{kWh} \cdot 3600\ \text{kJ} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$$

$$W = 720\ \text{kJ}$$

$$U_e - U_a = 720\ \text{kJ} - 500\ \text{kJ}$$

$$\underline{\underline{U_e - U_a = 220\ \text{kJ}}}$$



75/1 Getriebe
Dem System (Getriebe) wird mechanische Arbeit zugeführt, die zum größten Teil durch die abgehende Welle wieder vom System abgegeben wird. Aus der Leistung an den beiden Wellen kann die Arbeit berechnet werden, die im System durch Reibungsprozesse in innere Energie umgewandelt wird. Ein Teil dieser Energie wird in Form von Wärme wieder an die Umgebung übertragen. Der verbleibende Teil führt zu einer Temperaturerhöhung des Getriebes.

Der erste Hauptsatz der Thermodynamik aus historischer Sicht 31

Bis zur Mitte des vorigen Jahrhunderts war man der Auffassung, daß die Wärme ein unwägbarer, masseloser Stoff sei, dessen Menge bei allen Prozessen gleich bleibt. Dieser Stoff wurde als „Caloricum" bezeichnet. Der Begriff der inneren Energie war noch nicht geprägt, ebenso war die Möglichkeit der Umwandlung von mechanischer Energie in innere Energie und die Äquivalenz von Arbeit und Wärme noch nicht bekannt bzw. nachgewiesen. Aus dieser Zeit stammen auch noch einige Begriffe, wie z. B. die Begriffe „Wärmemenge" und „Wärmeaustausch", die den heutigen Auffassungen nicht mehr entsprechen.
Erst im Jahre 1842 erkannte der Arzt Julius Robert Mayer die Äquivalenz von Arbeit und Wärme. Es gelang ihm, die Wärme zu berechnen, die einem bestimmten Betrag mechanischer Arbeit gleichwertig ist. Mayer ging bei seinen Untersuchungen davon aus, daß bei allen Vorgängen in der Natur die Energie erhalten bleibt. Diese Erkenntnisse waren damals so revolutionierend, daß Mayer auf das Unverständnis und auf den Widerspruch der meisten Zeitgenossen stieß, zumal er kein Physiker war.

---

① Welche Erscheinungen müssen bei den einzelnen Beispielen vernachlässigt werden?
② Erläutern Sie, wie sich die innere Energie in jedem der Fälle ändert, und schreiben Sie die jeweilige Energiebilanz auf!
③ Erläutern Sie anhand der Bilder den Aufbau und die Wirkungsweise des Viertakt-Dieselmotors!
④ Erläutern Sie die einzelnen Zustandsänderungen der Gase im Dieselmotor! Veranschaulichen Sie die Arbeit im 2. und 3. Takt!

Es ist das Verdienst von Hermann von Helmholtz, daß er in seiner 1847 veröffentlichten Schrift „Über die Erhaltung der Kraft" dem Energieerhaltungssatz zu immer breiterer Anerkennung verhalf. Helmholtz verallgemeinerte den in der Mechanik gültigen Satz von der Erhaltung der Energie auf alle zu dieser Zeit bekannten physikalischen Erscheinungen: ①

► **Energie kann nicht erzeugt oder vernichtet werden, sondern nur von einem Körper auf einen anderen übergehen oder sich von einer Energieform in eine andere umwandeln.**

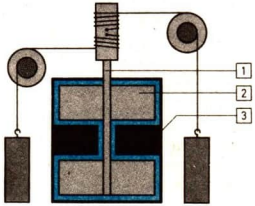
Unabhängig von Mayer hatte Helmholtz das Energieprinzip aus der Erfahrung entwickelt, daß trotz vielfältiger Bemühungen zahlreicher Erfinder keine Maschine konstruiert werden konnte, die aus dem Nichts Energie erzeugt (Perpetuum mobile). Der Energieerhaltungssatz wurde daher früher auch als Satz von der Unmöglichkeit eines Perpetuum mobile ausgesprochen: „Ein Perpetuum mobile gibt es nicht!"

Beim heutigen Erkenntnisstand erscheint es unnötig und unwissenschaftlich, einen Satz über etwas zu formulieren, das es nicht gibt. In der Wissenschaft ist es üblich, daß derjenige, der etwas behauptet (z. B. das Perpetuum mobile), auch den Beweis für die Existenz eines Sachverhalts bzw. für die Richtigkeit seiner Behauptung selbst erbringt.

Einen weiteren wichtigen Beitrag zum Energieerhaltungssatz leistete der Physiker James Prescott Joule im Jahre 1847. Mit seinem Apparat (Bild 76/1) bestimmte er ziemlich genau durch die Zufuhr einer bestimmten mechanischen Arbeit, wieviel Wärme man statt dessen dem Apparat hätte übertragen müssen.

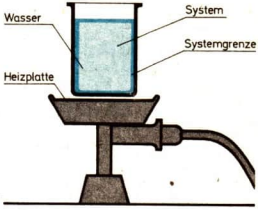
Früher wurden für die Energieformen unterschiedliche Einheiten verwendet, z. B. für die innere Energie die Kilokalorie und für die mechanische Energie das Kilopondmeter. Joule bestimmte mit seiner Versuchsanordnung die Beziehung zwischen diesen Einheiten. Heute ist nach internationalen und nationalen Empfehlungen und Festlegungen für die Energieformen des Systems sowie für Arbeit und Wärme einheitlich das Joule J (gesprochen jul) eingeführt.

Nachdem die wesentlichen thermodynamischen Grundlagen für die Vorgänge in der Dampfmaschine gefunden waren, fand die Thermodynamik mit der Entwicklung der Verbrennungsmotoren durch Diesel und Otto neuen Auftrieb: Durch diese Erfindungen, deren Bedingungen auf Seite 66 angedeutet sind, wurde die Entwicklung der Technik im aufkommenden Kapitalismus wesentlich beschleunigt. Die Verallgemeinerung des Energiebegriffs und die Entdeckung des Energie-



76/1 Versuchsanordnung von Joule
Über die Welle (1) wird dem System mechanische Arbeit zugeführt. Die Flüssigkeitsteilchen zwischen Schaufelrad (2) sowie Behälterwand und radialen feststehenden Zwischenwänden (3) werden infolge der Drehung der Welle beschleunigt. Durch Reibungsprozesse zwischen den Flüssigkeitsteilchen wandelt sich die mechanische Energie der Welle in innere Energie der Flüssigkeit bzw. des Systems um. Die dabei eintretende Temperaturerhöhung wurde gemessen.
Die Übertragung von Volumenarbeit und Wärme ist bei diesem Versuch vernachlässigbar.

prinzips gehören zu den bedeutendsten Leistungen der Physik des 19. Jahrhunderts. Diese epochalen Erkenntnisse waren zugleich ein hervorragender Beitrag zur Entwicklung eines materialistischen Weltbildes.
Jedoch auch nach diesen Entdeckungen war der Begriff der inneren Energie noch nicht geprägt. Der Begriff Wärme wurde sowohl zur Bezeichnung der inneren Energie als auch der energetischen Wechselwirkung angewendet. Auch Mayer und Joule kannten den Begriff der inneren Energie noch nicht. Diese Doppeldeutigkeit ist im heutigen Sprachgebrauch auch noch nicht überwunden. Anfang dieses Jahrhunderts erfolgte dann eine saubere Trennung der Begriffe. Arbeit und Wärme wurden als Energieübertragungsgrößen definiert und die innere Energie dem System zugeordnet. Aufbauend auf diesen Festlegungen und den Erfahrungstatsachen, wie z. B. dem ersten Hauptsatz, wurde die phänomenologische Thermodynamik streng logisch aufgebaut. Sie stellt heute ein geschlossenes Wissenschaftsgebäude dar, das für die technische Anwendung die entsprechenden Grundlagen und Gleichungen bereitstellt.



77/1 Wärmeübertragung an ein System

Energiebilanz in Verbindung mit kalorischen Zustandsgleichungen 32

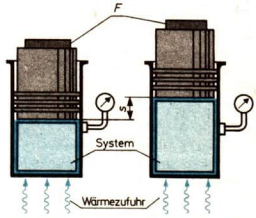
Es ist schon auf den Zusammenhang zwischen der Temperatur eines Systems und seiner inneren Energie hingewiesen worden. Dieser Zusammenhang wird durch kalorische Zustandsgleichungen ausgedrückt. Beim Beispiel der Wärmezufuhr an ein System mit konstantem Volumen (Bild 77/1) gilt die

► **Kalorische Zustandsgleichung**

Aus den kinetisch-statistischen Betrachtungen ist bekannt, daß sich die Temperatur, der Druck und auch die innere Energie eines idealen Gases aus der mittleren kinetischen Energie seiner Teilchen errechnen lassen. Es besteht also u. a. ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen der Temperatur eines Systems und seiner inneren Energie.
Allgemein lassen sich diese Beziehungen durch die Funktionen $U = f(T, V)$ oder $U = f(T, p)$ ausdrücken.

$$U_e - U_a = m \cdot c_V (T_e - T_a) \quad (65)$$

Der Faktor c_V wird als **spezifische Wärmekapazität** bei konstantem Volumen bezeichnet.
Die Gleichung (65) gilt jedoch nicht nur bei Prozessen mit konstantem Volumen, sondern sie kann bei Gasen annähernd für alle Prozesse angewendet werden.
Eine andere Form der kalorischen Zustandsgleichung soll am Prozeß der Wärmeübertragung bei konstantem Druck gezeigt werden (Bild 77/2).
Durch die Wärmezufuhr dehnt sich das Gas aus. Die Wärme kann aus der Energiebilanz $U_e - U_a = Q + W_V$ errechnet werden:
$Q = U_e - U_a - W_V$.



77/2 Wärmeübertragung bei konstantem Druck

ⓘ Vergleichen Sie die Formulierung des Energieerhaltungssatzes von Helmholtz mit den Formulierungen auf Seite 73!

Der Zusammenhang zwischen Wärmezufuhr, Änderung der inneren Energie und Temperaturänderung wird durch die Gleichungen

$$Q = (U_e - U_a) - W_V$$

$$Q = m \cdot c_p \cdot (T_e - T_a) \qquad (66)$$

beschrieben. Die Gleichung (66) ist nur für Vorgänge bei **konstantem Druck** gültig. Sie wurde im Stoffgebiet Wärmelehre der Klasse 8 als „Grundgleichung der Wärmelehre" eingeführt.

Analog zu c_v wird c_p als **spezifische Wärmekapazität** bei konstantem Druck bezeichnet. Beide werden in $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ angegeben.

Gleichung	Bedingungen	
$U_e - U_a = m \cdot c_v (T_e - T_a)$	V = konstant	keine Veränderung des Aggregatzustandes, m = konstant
$Q = (U_e - U_a) - W_V$ $(U_e - U_a) - W_V = m \cdot c_p (T_e - T_a)$	p = konstant	①

Beide spezifische Wärmekapazitäten sind temperatur- und druckabhängig, wobei die Druckabhängigkeit oft vernachlässigt werden kann. Außerdem sind beide Größen stoffspezifisch. Vergleicht man die beiden kalorischen Gleichungen, so ist zu bemerken, daß sich bei Gasen c_p wesentlich von c_v unterscheiden muß, da c_v bei konstantem Volumen ($W_V = 0$) und c_p bei konstantem Druck (wobei $W_V \neq 0$ ist) gemessen wird (Vergleich bei gleichem ΔT).

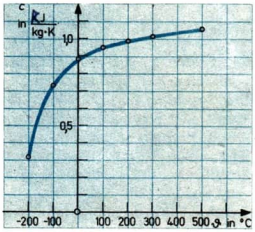
Tabelle 78/1 Spezifische Wärmekapazitäten von Gasen bei 0 °C

Gas	c_v in $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	c_p in $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
Wasserstoff	9 946	14 070
Sauerstoff	653,8	913,6
Stickstoff	740,5	1 037,3
Kohlendioxid	630,6	819,5
Luft	715,1	1 002,2

Aus der Erfahrung ist bekannt, daß sich bei der Erwärmung von festen Stoffen und Flüssigkeiten bei konstantem Druck ihr Volumen nur geringfügig ändert. Deshalb wird auch bei Temperaturänderungen die Volumenarbeit sehr klein sein.

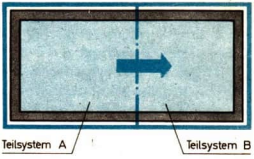
Bei Flüssigkeiten und festen Stoffen kann eine einheitliche spezifische Wärmekapazität c verwendet werden.

Dabei ist jedoch auch ihre Temperaturabhängigkeit zu beachten (Bild 78/2). ②



78/2 Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärmekapazität von Aluminium
Bei Berechnungen kann eine mittlere spezifische Wärmekapazität verwendet werden, die für den vorgegebenen Temperaturbereich gültig ist.

Eine wichtige Anwendung der kalorischen Zustandsgleichungen ergibt sich bei **kalorischen Messungen**. Dabei wird Wärme von einem Teilsystem an ein anderes bei konstantem Druck übertragen (Bild 79/1).
Außerhalb der gemeinsamen Grenzen der Teilsysteme A und B soll keine Wärmeübertragung an die Umgebung möglich sein. Zu Beginn der Wärmeübertragung habe das Teilsystem A eine höhere Temperatur als das Teilsystem B.
Für den Prozeß der Wärmeübertragung kann geschrieben werden für das Teilsystem A:
$Q_A = m_A \cdot c_{p,A} (T_e - T_a)_A$.
Die Temperatur am Ende des Prozesses T_e ist kleiner als die Temperatur zu Beginn T_a, daraus ergibt sich auch $Q_A < 0$ (Wärme wird abgegeben).
Für das Teilsystem B ist analog:
$Q_B = m_B \cdot c_{p,B} (T_e - T_a)_B$.
Jetzt ist die Endtemperatur T_e größer als die Anfangstemperatur T_a, dem Teilsystem B wurde Wärme zugeführt ($Q_B > 0$). Die vom Teilsystem abgegebene Wärme Q_A wird vollständig dem Teilsystem B übertragen: $-Q_A = Q_B$.



79/1 Wärmeübertragung eines Teilsystems A an ein Teilsystem B
Während bisher die Wärmeübertragung zwischen System und Umgebung erfolgte, wird im Beispiel ein spezieller Teil der Umgebung als Nachbarsystem, als Teilsystem B bezeichnet.
Das Gesamtsystem soll gegen die Umgebung wärmeisoliert sein.

► **Die vom System A abgegebene Wärme Q_A ist gleich der vom System B aufgenommenen Wärme Q_B.**	$-Q_A = Q_B$ $-m_A \cdot c_{p,A}(T_e - T_a)_A = m_B \cdot c_{p,B}(T_e - T_a)_B$ (67)

Wurde ein vollkommener Temperaturausgleich erreicht, dann gilt mit $T_{e,A} = T_{e,B} = T_m$
$m_A \cdot c_{p,A} (T_{a,A} - T_m) = m_B \cdot c_{p,B} (T_m - T_{a,B})$.
Aus dieser Gleichung kann die Temperatur T_m errechnet werden:

$$T_m = \frac{m_A \cdot c_{p,A} \cdot T_{a,A} + m_B \cdot c_{p,B} \cdot T_{a,B}}{m_A \cdot c_{p,A} + m_B \cdot c_{p,B}}. \qquad (68)$$

Diese Beziehung (68) wird auch als **Richmannsche Mischungsregel** bezeichnet. Die Gleichung (68) gilt nur unter folgenden Voraussetzungen:
– Der Prozeß findet bei konstantem Druck statt.
– Die Wärmeübertragung erfolgt nur vom System A auf das System B.
– Den Systemen wird keine mechanische Arbeit über Wellen bzw. Wellräder zugeführt.
– In den Systemen finden keine Änderungen des Aggregatzustandes statt. ③

① Erläutern Sie, unter welchen Bedingungen die aufgestellten Gleichungen verwendet werden können!
② Nennen Sie Einflußgrößen, von denen c_p und c_v abhängen!
③ Wie wird diese Gleichung aussehen, wenn ein drittes System C an dem Temperaturausgleich beteiligt ist?

Kalorimetrische Messungen. Trotz dieser Einschränkungen gibt es zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten dieser Gleichungen. Zum Beispiel kann die Wärmeabgabe eines elektrischen Speicherofens an die Raumluft annähernd mit diesen Gleichungen berechnet werden. Eine weitere Anwendung ergibt sich bei kalorimetrischen Messungen.
Bei den meisten kalorimetrischen Untersuchungen wird mit Flüssigkeiten gearbeitet (Bild 80/1).

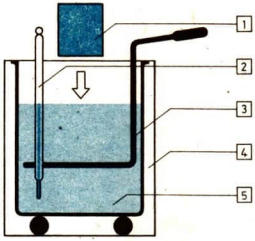
Deshalb können statt der spezifischen Wärmekapazitäten bei konstantem Druck c_p die spezifischen Wärmekapazitäten c verwendet werden.

Um die Berechnungen zu vereinfachen, wird die **Wärmekapazität des Kalorimeters K** eingeführt.

Die Wärmekapazität des Kalorimeters kann aus der Summe der Produkte Masse × spezifische Wärmekapazität der einzelnen Teile des Kalorimeters (Behälter, Thermometer, Rührer, Kalorimeterflüssigkeit) errechnet werden. Die Wärmekapazität ist deshalb vom Füllstand des Kalorimeters abhängig. In der Praxis wird dieser Wert K meist auf experimenteller Basis bestimmt. Im Bild 80/1 ist eine solche Untersuchung gezeigt. Dazu müssen die Masse, die spezifische Wärmekapazität und die Temperatur des Systems A vor dem Eintauchen bekannt sein, ebenso die Temperatur $T_{a,B}$ im Kalorimeter. Nach dem Temperaturausgleich muß die Mischtemperatur T_m gemessen werden.
Zur Auswertung wird in die Gleichung statt des Produktes $m_B \cdot c_B$ die Wärmekapazität des Kalorimeters K eingesetzt:

$$m_A \cdot c_A (T_{a,A} - T_m) = K (T_m - T_{a,B}).$$

In dieser Gleichung ist nunmehr K die einzige unbekannte Größe. ① ②



80/1 Schema einer kalorimetrischen Messung
1 – System A, das in das Kalorimeter (System B) eingebracht wird;
2 – Thermometer;
3 – Rührer;
4 – Kalorimeter;
5 – Kalorimeterflüssigkeit

Ist die Wärmekapazität des Kalorimeters K bekannt, so kann z. B. die spezifische Wärmekapazität eines Metallkörpers in dem vorliegenden Temperaturbereich bestimmt werden.
Kalorimetrische Messungen werden auch zur Messung von Umwandlungsenergien bei Aggregatzustandsänderungen (Schmelzen und Verdampfen) sowie auch z. B. für die Messung der bei der Verbrennung frei werdenden Energie durchgeführt.

Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik 34

Nach dem ersten Hauptsatz sind alle Prozesse möglich, die dem Energieerhaltungssatz genügen, z. B. wäre nach diesem Gesetz eine Wärmeübertragung unabhängig von den Temperaturen der Systeme in beiden Richtungen möglich. Die Erfahrung zeigt aber, daß alle von selbst ablaufenden (natürlichen) Prozesse in eine bestimmte Richtung steuern. Diese Erfahrungstatsachen werden im **zweiten Hauptsatz der Thermodynamik** zusammengefaßt. Aus kinetisch-statisti-

scher Sicht ist die bevorzugte Richtung die Richtung höherer Wahrscheinlichkeit, d. h. die Teilchen streben den Zustand der Gleichverteilung an. Die nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik möglichen Prozesse sind **irreversibel** (nicht umkehrbar). Reversible (umkehrbare Prozesse) lassen sich nur annähernd verwirklichen (Beispiele 1 und 2).

Beispiel 1
Ein Stück Butter fällt zur Erde. Die anfangs vorhandene potentielle Energie wird zuerst in kinetische Energie und nach dem Aufschlag durch die Verformungsarbeit in innere Energie umgewandelt. Die Temperatur der Butter steigt geringfügig. Niemals ist der umgekehrte Vorgang zu beobachten, daß die Butter sich von selbst in entsprechender Weise verformt und schließlich wieder hoch steigt. Der Ausgangszustand des Stücks Butter kann nicht ohne einen zusätzlichen Eingriff von außen wieder hergestellt werden.

Beispiel 2
Eine Stahlkugel fällt auf eine horizontale elastische Unterlage. Die beim Auftreffen vorhandene kinetische Energie wird in potentielle Energie der elastisch verformten Körper umgewandelt. Nach kurzer Zeit nehmen Kugel und Unterlage wieder ihre ursprüngliche Form an. Die Kugel erhält dabei abermals kinetische Energie. Diese wird beim Aufsteigen wieder in potentielle Energie umgewandelt, bis fast wieder die Ausgangslage erreicht ist. Die Erhöhung der inneren Energie ist dabei geringfügig. Bei diesem nahezu reversiblen Prozeß konnte die Kugel fast wieder in den Ausgangszustand zurückpendeln.

Mit dem ersten Beispiel wird das Wesen eines irreversiblen Prozesses beschrieben, das zweite Beispiel erläutert zum Vergleich einen nahezu reversiblen Prozeß.
Allgemein läßt sich sagen:

► **Alle natürlichen Prozesse sind irreversibel, reversible Prozesse sind nicht erreichbare Grenzfälle irreversibler Prozesse.**

Wichtige irreversible Prozesse sind der Temperaturausgleich, die Diffusion sowie Vorgänge mit Reibung und plastischer Verformung. Der Temperaturausgleich findet statt, wenn z. B. in einem mit Gas gefüllten Raum durch äußere Einflüsse in einem Teil eine höhere Temperatur herrscht als in dem anderen.
Bleibt der Raum sich selbst überlassen, so wird sich nach genügend langer Zeit eine gleichmäßige Temperatur einstellen.

---

① Berechnen Sie die Wärmekapazität K des Kalorimeters!
② Welche Vernachlässigungen sind beim Anwenden der Gleichungen bei einem Kalorimeter notwendig?

Aus kinetisch-statistischer Sicht kommt es zum Ausgleich der mittleren kinetischen Energie der Teilchen beider Raumbereiche. ①
Reibung tritt bei allen Vorgängen auf, bei denen Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen den Systemen bzw. Teilsystemen vorhanden sind. ②
Durch Reibungsvorgänge wird das benachbarte System bzw. Teilsystem abgebremst oder beschleunigt, bis schließlich eine gleiche Geschwindigkeit erreicht ist. Dabei wird kinetische Energie in innere Energie umgewandelt (Tabelle).

Tabelle 82/1 Richtung der natürlichen Prozesse

Prozeß	Richtung des Prozesses	
Wärmeübertragung	Ausgleich der Temperatur	der Systeme bzw. Teilsysteme
Diffusion	Ausgleich der Konzentration	der Systeme bzw. Teilsysteme
Reibung	Ausgleich der Geschwindigkeit	der Systeme bzw. Teilsysteme

Quasistatische Zustandsänderungen. Finden Ausgleichsvorgänge in einem System statt, so befindet sich das System zu Beginn des Prozesses in einem **Nichtgleichgewichtszustand**. Zum Beispiel kann die Temperatur im System unterschiedlich sein. Der Ausgleichsvorgang führt dann schließlich zum **thermodynamischen Gleichgewichtszustand**. In diesem sind sowohl der Druck als auch die Temperatur im System überall gleich. Sind energetische Wechselwirkungen des Systems ausgeschaltet, so verbleibt das System in diesem Zustand.
Voraussetzung für den nahezu reversiblen Verlauf eines Prozesses ist eine **quasistatische Zustandsänderung** während des Prozesses. Dabei durchläuft das System eine **Folge von Gleichgewichtszuständen** (Beispiel 3).

Beispiel 3 Kompression eines Gases
Die Kompression eines Gases in einem Zylinder kann als eine Folge von Gleichgewichtszuständen betrachtet werden. Der Wechsel von einem Gleichgewichtszustand zu einem anderen erfolgt durch eine äußere Einwirkung, im Beispiel durch den Druck des Kolbens, der etwas höher ist als der Gasdruck. Dabei stellen sich im Gas Druck- und Temperaturunterschiede ein. Da jedoch die Geschwindigkeit des Druck- und Temperaturausgleiches wesentlich höher ist als die Geschwindigkeit des Kolbens, kann die Abweichung vom Gleichgewichtszustand vernachlässigt werden, das Gas durchläuft annähernd eine Folge von Gleichgewichtszuständen.
Die quasistatische Zustandsänderung als eine Folge von Gleichgewichtszuständen ist ein Modell. Für viele Prozesse, insbesondere solche mit Gasen, kann dieses Modell mit ausreichender Näherung verwendet werden. Eine quasistatische

Zustandsänderung kann in einem *p-V*-Diagramm als Zustandslinie veranschaulicht werden (Bild 83/1).
Ist der Endzustand erreicht, so kann mit einer ebensolchen quasistatischen Zustandsänderung der Ausgangszustand wieder erreicht werden. Beim Beispiel der Kompression eines Gases kann das Gas wieder expandieren, und unter vergleichbaren Verhältnissen wird dabei gerade die mechanische Arbeit verrichtet, die vorher zur Kompression aufgewendet werden mußte.
Man kann deshalb verallgemeinern:

► **Die quasistatische Zustandsänderung ist eine Voraussetzung, daß der Prozeß reversibel verläuft.**

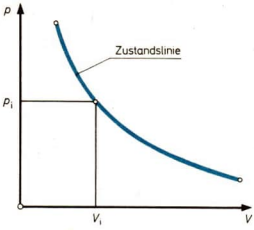
Ein irreversibler Prozeß kann dagegen auf keine Weise wieder vollständig rückgängig gemacht werden. Wenn der Ausgangszustand des Systems wiederhergestellt wurde, muß eine Zustandsänderung in der Umgebung erfolgt sein (Beispiel 4). ③

Beispiel 4 Irreversibler Prozeß
Ein fester Körper wird an einem anderen abgebremst. Dabei erhöht sich die innere Energie der Körper. Um den ursprünglichen Zustand wieder zu erreichen, sind notwendig
– die Beschleunigung des einen Körpers,
– die Abkühlung beider Körper.
Als Ergebnis dieser Maßnahmen bleibt eine Zustandsänderung der Umgebung zurück, der Prozeß kann nicht wieder vollständig rückgängig gemacht werden.

Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik. Die Erkenntnisse über reversible und irreversible Prozesse können bei den verbalen Formulierungen dieses Erfahrungssatzes verwendet werden. Eine erste Formulierung ergibt sich aus der Richtung der Wärmeübertragung:

► **Wärme kann nie von selbst von einem System niederer Temperatur auf ein System höherer Temperatur übergehen.**

Eine weitere Formulierung des 2. Hauptsatzes der Thermodynamik basiert darauf, daß die Energieformen nicht gleichwertig sind. So läßt sich die kinetische Energie in potentielle Energie und wieder zurück verwandeln, wenn von den Reibungsvorgängen abgesehen wird. Auf gleicher Stufe steht die elektrische Energie.



83/1 Zustandslinie im *p-V*-Diagramm
Zu jeder Zeit des Prozesses herrscht ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Druck und Volumen. Jeder Gleichgewichtszustand ist durch einen Punkt, die Folge der Gleichgewichtszustände durch eine Zustandslinie als Ergebnis des Aneinanderreihens der Punkte beschreibbar.

---

① Erläutern Sie das Wesen der Diffusion aus kinetisch-statistischer Sicht!
② Beschreiben Sie Reibungsvorgänge! Unterscheiden Sie, welche davon erwünscht und welche unerwünscht sind!
③ Erklären Sie am Beispiel eines heruntergefallenen Dachziegels, welche zusätzlichen Aufwendungen notwendig sind, um den Anfangszustand wieder zu erhalten!

Dagegen kann man nicht ohne Einschränkung innere Energie eines Systems in mechanische Energie umwandeln. Eine Wärmekraftanlage kann z. B. nur einen Teil der zugeführten Energie als mechanische Arbeit abgeben (Bild 84/1).
Ausgehend von dieser Tatsache formulierte M. Planck im Jahre 1905:

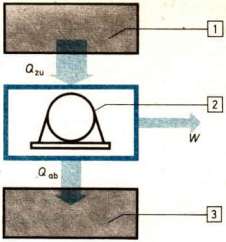
Es ist unmöglich, eine periodisch arbeitende Maschine zu konstruieren, die weiter nichts bewirkt, als eine Last zu heben und einem Behälter dauernd Wärme zu entziehen.

Würde es eine solche Maschine geben, dann könnte die innere Energie des Meerwassers zum Antrieb eines Schiffes genutzt werden, das Schiff brauchte dann keinen Treibstoff mitzunehmen.
Analog zum ersten Hauptsatz der Thermodynamik mit dem Perpetuum mobile erster Art wird eine Anlage, die dauernd innere Energie ohne Einschränkungen in mechanische Energie umwandelt, als **Perpetuum mobile zweiter Art** bezeichnet. Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik ließe sich nun auch in folgender Form formulieren: Ein Perpetuum mobile zweiter Art kann es nicht geben. ①

Thermischer Wirkungsgrad. Ausgehend von den Überlegungen zur Wärmekraftanlage lassen sich noch weitergehende Aussagen über die Wertigkeit einzelner Energieformen treffen. Je höher dabei die Temperaturdifferenz zwischen dem System hoher und dem System niedriger Temperatur ist, um so mehr mechanische Energie kann gewonnen werden. Da bei der großtechnischen Nutzung die Umgebung als System niedriger Temperatur mit seinem nicht zu beeinflussenden Zustand vorgegeben ist, kommt es vor allem auf die Erhöhung der Temperatur des ersten Systems an. So ist dann auch die innere Energie eines Systems mit hoher Temperatur wesentlich „wertvoller" als die eines Systems mit Umgebungstemperatur, da noch mechanische Arbeit aus ihr gewonnen werden kann, während die innere Energie bei Umgebungstemperatur technisch „nutzlos" ist.

Beispiel: Heizkraftwerk

Die Überlegungen über die Wertigkeit der Energieformen führten zur Installierung von Heizkraftwerken. Die Verbrennungsgase haben eine sehr hohe Temperatur, für Warmwasserheizungen wird aber nur eine Einspeisungstemperatur von etwa 90 °C benötigt. Statt der direkten Wärmeübertragung Verbrennungsgase—Warmwasser wird eine Wärmekraftanlage zwischengeschaltet, in der zunächst der durch die Verbrennungsgase erzeugte Heißdampf auf beispielsweise 130 °C in einer Turbine entspannt wird und anschließend mit dem Abdampf die Erwärmung des Heizungswassers erfolgt. Aus der „wertvollen" mechanischen Energie der Turbinen-



84/1 Wärmekraftanlage
Eine Wärmekraftanlage ist eine Anlage zur Umwandlung von innerer Energie in mechanische Energie. Von den heißen Verbrennungsgasen wird der eigentlichen Anlage Wärme übertragen. Die Wärmekraftanlage kann nur einen Teil der zugeführten Energie als mechanische Arbeit abgeben, ein bedeutender Teil muß wieder als Wärme an die Umgebung übertragen werden. Diese Übertragung ist nur möglich, wenn die Wärmekraftanlage in diesem Teil eine höhere Temperatur hat als die Umgebung. Eine Wärmekraftanlage (2) kann folglich nur zwischen einem System hoher Temperatur (1) und einem System niedriger Temperatur (3) arbeiten.

welle kann schließlich elektrische Energie gewonnen werden. Im Gegensatz zum Heizkraftwerk wird in Heizhäusern und Öfen die hochwertige innere Energie der Verbrennungsgase nicht optimal genutzt, da keine Vorrichtung zur Gewinnung von mechanischer Energie angeordnet ist.

Die höhere Wertigkeit von innerer Energie bei hoher Temperatur kommt (mit bestimmten Einschränkungen) auch im thermischen Wirkungsgrad einer Wärmekraftanlage zum Ausdruck. Der Wirkungsgrad einer Anlage kann allgemein als Verhältnis von Nutzen zu Aufwand angegeben werden. Bei einer Wärmekraftanlage ist der Nutzen die verrichtete mechanische Arbeit W_{mech}, der Aufwand die der Anlage zuzuführende Wärme Q_{zu}. Setzt man voraus, daß die innere Energie der Wärmekraftanlage insgesamt konstant bleibt, so kann man diese Größen bzw. ihre Beträge gegenüberstellen:

$$|W_{mech}| = Q_{zu} - |Q_{ab}|.$$

Daraus wird der thermische Wirkungsgrad errechnet

$$\eta_{th} = \frac{|W_{mech}|}{Q_{zu}}, \quad \eta_{th} = \frac{Q_{zu} - |Q_{ab}|}{Q_{zu}}, \quad \eta_{th} = 1 - \frac{|Q_{ab}|}{Q_{zu}}. \quad (69)$$

Statt Q_{zu} und Q_{ab} können auch die entsprechenden Temperaturen T_{zu} und T_{ab} eingesetzt werden; damit ergibt sich:

► **Thermischer Wirkungsgrad**

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_{ab}}{T_{zu}} \quad (70)$$

Aus der Gleichung (70) ist ersichtlich, daß der thermische Wirkungsgrad einer Wärmekraftanlage niemals 1 werden kann und daß es vorteilhaft ist, eine hohe Temperatur T_{zu} anzustreben.

Dieser theoretisch erreichbare Wirkungsgrad wird durch Reibungsvorgänge und durch die technisch mögliche Prozeßführung noch bedeutend gesenkt. Beim Dieselmotor beträgt der Wirkungsgrad z. B. etwa 0,4.

In modernen Wärmekraftwerken konnte ebenfalls der thermische Wirkungsgrad auf 0,4 gesteigert werden, während bei den Dampflokomotiven älterer Bauart $\eta < 0{,}1$ war.

Soll mechanische Energie in andere Energieformen umgewandelt werden, so sind die Umwandlungswirkungsgrade wesentlich höher, da diese als „hochwertige" Energieform den Beschränkungen durch den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik nicht unterliegen.

Gültigkeitsbereich des zweiten Hauptsatzes. Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik hat nur einen begrenzten Gültigkeitsbereich, er ist nicht auf kosmische Bereiche ausdehnbar. Während der Energieerhaltungssatz allgemeingültig ist, kann der zweite Hauptsatz nur auf irdische Bereiche angewendet werden.

---

① Erläutern Sie den Unterschied zwischen einem Perpetuum mobile erster Art und einem Perpetuum mobile zweiter Art!

Erster Hauptsatz der Thermodynamik

1. Fragestellung:

Nachdem an Beispielen aus der Technik das Wesen der Volumenarbeit und der Wärme sowie weiterer Energieübertragungsgrößen verdeutlicht worden war, entstand die Frage, in welcher Beziehung diese Größen zur inneren Energie stehen und wie alle diese Größen bilanziert werden können.

2. Folgerung:

Der Energieerhaltungssatz in seiner allgemeinen Form, der schon vor mehr als 100 Jahren gefunden wurde, diente als Grundlage für die Bilanzierung der Energieübertragungsgrößen und der Änderung der Energie des Systems.
Für spezielle Systeme konnte der erste Hauptsatz der Thermodynamik formuliert werden.
$U_e - U_a = Q + W$

3. Experimentelle Prüfung:

In einem Abriß über die Entwicklung der Thermodynamik im vorigen Jahrhundert wurde gezeigt, daß alle Versuche, den Energieerhaltungssatz zu widerlegen, gescheitert sind und daß es ein Perpetuum mobile nicht gibt.

4. Folgerung:

Ausgehend von der Formulierung des ersten Hauptsatzes sind einige Sonderfälle behandelt worden, wobei die kalorischen Zustandsgleichungen mit verwendet wurden. Mit Hilfe der kalorischen Gleichungen konnten kalorische Messungen ausgewertet und gesuchte Größen berechnet werden.

Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik

Die Erfahrung zeigt, daß alle natürlichen Prozesse in einer bestimmten Richtung ablaufen.
Diese Erfahrungstatsachen werden im zweiten Hauptsatz der Thermodynamik zusammengefaßt.
Im allgemeinen sind alle natürlichen Prozesse irreversibel, reversible Prozesse sind Grenzfälle irreversibler Prozesse.
Das Modell der quasistatischen Zustandsänderung ist eine Voraussetzung für den reversiblen Ablauf eines Prozesses.
Nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik kann innere Energie nicht fortlaufend vollständig in mechanische Energie umgewandelt werden. Der thermische Wirkungsgrad einer Wärmekraftanlage kann niemals Eins werden.

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_{ab}}{T_{zu}}$$

Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik kann nicht auf kosmische Bereiche angewendet werden.

Thermodynamisches Verhalten der Stoffe

Flugzeuge nehmen einen wichtigen Platz im Passagier- und Frachttransport über weite Strecken ein. Mit dem Einsatz von Gasturbinentriebwerken als Antriebsaggregate konnten ihre Geschwindigkeit und ihre Effektivität beträchtlich erhöht werden. Durch Erweiterung des Leistungsbereiches der Triebwerke ist es heute möglich, Großraumflugzeuge für über 300 Fluggäste sowie Überschallpassagierflugzeuge für Fluggeschwindigkeiten von 2500 km · h^{-1} zu bauen.

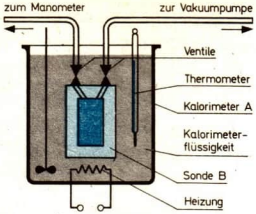
Der Gasturbinenprozeß wird durch eine Folge von Zustandsänderungen der angesaugten Luft verwirklicht. Solche Zustandsänderungen werden z. B. durch Komprimieren, Erwärmen und Expandieren eines Gases erreicht. Sie sind mit starken mechanischen und thermischen Wechselwirkungen zwischen dem Gas und dem Triebwerk verbunden.
Bei der Entwicklung von Triebwerken sind u. a. folgende Fragen zu lösen: Wie sind auf engstem Raum und mit möglichst leichtem Material diese Zustandsänderungen zu verwirklichen? Welche Wärme muß zugeführt werden, um die notwendige Schubkraft zu erzeugen? Welcher Druck ist dabei optimal?
Eine wesentliche Grundlage für die Beantwortung dieser Fragen ist die Kenntnis über das Verhalten der Gase und der Triebwerksteile in den in Frage kommenden Temperatur- und Druckbereichen.
Allgemein geht es darum, das thermodynamische Verhalten verschiedener fester, flüssiger und gasförmiger Stoffe bei thermodynamischen Prozessen zu untersuchen, bei denen Energieumwandlungs- und Energieübertragungsprozesse ablaufen.

Thermodynamisches Verhalten der Stoffe 36

Bei der Bestimmung des thermodynamischen Verhaltens von Stoffen sind z. B. folgende Fragen zu klären:
– Wie groß ist das Volumen einer bestimmten Menge eines Stoffes bei Vorgabe der Größen p und T?
– Wie groß sind dabei c_v und c_p?
– Bei welchen Temperaturen und Drücken siedet oder schmilzt der Stoff?
– Welche Wärme muß zugeführt werden, um diesen Stoff vollständig zu verdampfen?

Ein einfaches Beispiel dafür ist die Bestimmung der Abhängigkeit des Luftvolumens vom Druck und von der Temperatur. Genaue Messungen sind sehr aufwendig, da das Verhalten auch bei sehr hohen und niedrigen Drücken und Temperaturen interessiert und diese bei der eigentlichen Messung keinen Abweichungen unterliegen dürfen (Bild 88/1).
Bisher wurde das Verhalten besonders der Stoffe in großen Druck- und Temperaturbereichen bestimmt, die in der Technik als Arbeitsmittel verwendet werden. ①

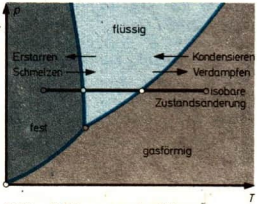
Die Meßergebnisse sind in Tabellen und Diagrammen zusammengefaßt, sie dienen als Grundlage für thermodynamische Betrachtungen und Berechnungen (Bild 88/2).
Es wurden auch Gleichungssysteme zur Beschreibung des thermodynamischen Verhaltens geschaffen, mit denen EDV-Berechnungen von Energieanlagen durchgeführt werden können.
Werden maßstabgerechte Diagramme verwendet, so kann der Zustand im Diagramm genau bestimmt werden. Mit Hilfe geeigneter Diagramme ist es auch möglich, die Prozeßgrößen zu bestimmen.
Leider ist es bisher nur in Ansätzen gelungen, das Verhalten der Stoffe aufgrund molekularkinetischer Betrachtungen zu errechnen, da das Verhalten und die gegenseitige Beeinflussung der Moleküle schwer erfaßbar sind.



88/1 Bestimmung der *p-V-T*-Abhängigkeit eines Stoffes
Im Kalorimeter A ist eine Sonde B angeordnet, in der sich der Stoff befindet. Über eine Pumpenanlage wird der gewünschte Druck in der Sonde hergestellt, die vorgegebene Temperatur stellt sich nach genügend langer Betriebszeit des Kalorimeters ein. Das Innenvolumen der Sonde ist bekannt. Vor bzw. nach der Messung wird die Masse des in der Sonde eingeschlossenen Stoffes durch eine gesonderte Apparatur bestimmt. Große Anforderungen werden bei diesen Messungen an die Reinheit des Stoffes gestellt.

Verhalten von Wasser bei isobarer Wärmezufuhr 37

Ein Teil des thermodynamischen Verhaltens von Wasser kann gezeigt werden, wenn eine isobare (p = konstant) Wärmezufuhr verwirklicht wird (Bild 89/1). Dabei kann sich das Wasser in einer bestimmten **Phase** oder bei einem **Phasenübergang** befinden. Wichtig ist dabei, daß das Wasser nicht verunreinigt ist.
Die isobare Wärmezufuhr an das System mit dem Ergebnis einer Erhöhung seiner inneren Energie wird nun Schritt für Schritt verfolgt: ②



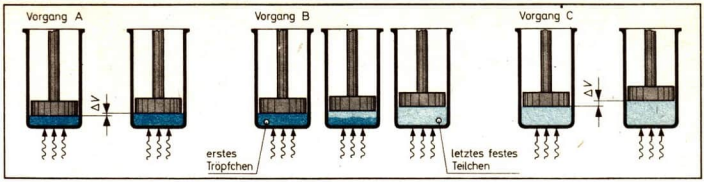
88/2 *p-T*-Diagramm des Wassers
Die Gebiete der Aggregatzustände fest, flüssig und gasförmig sind durch Linien getrennt, bei denen die Aggregatzustandsänderungen stattfinden.

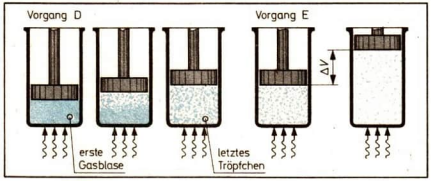
Vorgang A:

Der Stoff liegt in fester Phase vor. Bei der Wärmezufuhr erhöhen sich die Temperatur und das Volumen. Diese Erwärmung kann fortgeführt werden bis zur **Schmelztemperatur**.

Vorgang B:

Bei weiterer Wärmezufuhr schmilzt der Stoff. Während des **Schmelzens** bestehen zwei Phasen nebeneinander, die feste Phase und die flüssige Phase. Der Vorgang des Schmelzens geht bei **konstanter Temperatur**, der Schmelztemperatur, vor sich, bis auch der letzte Kristall geschmolzen ist.





89/1 Isobare Wärmezufuhr an ein System
In einem Zylinder mit Kolben befindet sich der zu untersuchende Stoff (System). Durch die beim ablaufenden Prozeß gleichbleibende Kolbenkraft ist der isobare Ablauf des Prozesses gesichert.

Vorgang C:

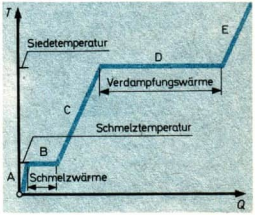
Der flüssige Stoff wird erwärmt, seine Temperatur steigt. Das Volumen des Stoffes wird dabei größer. Die Erwärmung des flüssigen Stoffes kann bis zur **Siedetemperatur** erfolgen. ③

Vorgang D:

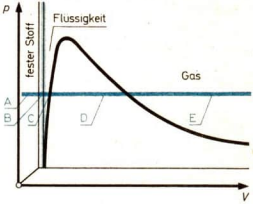
Bei weiterer Wärmezufuhr verdampft der Stoff. Beim Verdampfen bestehen zwei Phasen, die flüssige und die gasförmige Phase, nebeneinander. Nach dem Vorgang des Verdampfens, der bei **konstanter Siedetemperatur** vor sich geht, ist auch das letzte Flüssigkeitströpfchen verdampft.

Vorgang E:

Bei weiterer Wärmezufuhr erhöht sich die Temperatur des Gases. Die Volumenzunahme ist dabei größer als die bei vergleichbarer Erwärmung des flüssigen bzw. des festen Stoffes. Der Vorgang der Wärmezufuhr kann in einem *T-Q*-Diagramm sowie in einem *p-V*-Diagramm veranschaulicht werden (Bild 89/2 und Bild 89/3).
Besonders deutlich wird im Diagramm (Bild 89/2), daß die Vorgänge des Schmelzens und Verdampfens bei konstanter Temperatur, der Schmelztemperatur bzw. der Siedetemperatur, ablaufen. Im *p-V*-Schaubild (Bild 89/3) wird vor allem die unterschiedliche Volumenzunahme ersichtlich. Bei der Verdampfung sowie bei der Erwärmung des Gases ist die Volumenzunahme wesentlich größer als bei den vorhergehenden Prozessen.



89/2 *T-Q*-Diagramm für isobare Wärmezufuhr an das System



89/3 *p-V*-Diagramm für isobare Wärmezufuhr an das System

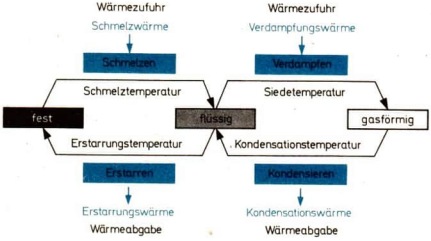
---

① Nennen Sie Stoffe, die in der Technik als Arbeitsmittel in technologischen Prozessen verwendet werden!
② Welche Größe bleibt bei einem isobaren (isochoren, isothermen) Prozeß konstant?
③ Nennen Sie Siedetemperatur und Schmelztemperatur des Wassers unter Normalbedingungen!

Bei der Durchführung eines entsprechenden Versuchs ist zu beobachten, daß z. B. ein Teil des Wassers schon vor Erreichen der Siedetemperatur verdampft. Das ist durch eine überhöhte Temperatur am Behälterrand zu erklären. Bei den vorhergehenden Betrachtungen wurde aber vom Modell einer quasistatischen Zustandsänderung ausgegangen, d. h. zu einem bestimmten Zeitpunkt ist die Temperatur des Wassers im gesamten Behälter gleich.

Der umgekehrte Vorgang läuft bei Wärmeabgabe des Systems ab. Bei Wärmeentzug kondensiert der gasförmige Stoff bei konstanter **Kondensationstemperatur**, die bei demselben Druck der **Siedetemperatur** gleich ist.

Die Flüssigkeit erstarrt bei konstanter **Erstarrungstemperatur**, die bei gleichem Druck gleich der **Schmelztemperatur** ist (Bild 90/1). ①



90/1 Aggregatzustandsänderungen Prozesse der isobaren Phasenumwandlung laufen bei konstanter Temperatur des Systems ab.

► **Beim Schmelzen und Erstarren sowie beim Verdampfen und Kondensieren geht der Stoff von einer Phase in eine andere unter Wärmezufuhr bzw. Wärmeabgabe über. Bei vorgegebenem Druck bleibt dabei die Temperatur konstant.**

Die Temperaturen der Phasenumwandlung des Wassers sind abhängig vom Druck im System.
Bei einem Druck von $p = 0{,}1$ MPa ist z. B. die Siedetemperatur von Wasser 99,64 °C, bei einem Druck von $p = 1$ MPa ist die Siedetemperatur des Wassers 179,88 °C, d. h. erst bei dieser Temperatur beginnt die Verdampfung (Tabelle).

Druck p in MPa	Siedetemperatur in °C
0,01	45,84
0,05	81,35
0,1	99,64
0,2	120,23
0,5	151,84
1,0	179,88
5,0	263,81
10,0	310,96
20,0	365,71

Tabelle 90/2 Abhängigkeit der Siedetemperatur des Wassers vom Druck

■ In einem Schnellkochtopf werden wesentlich kürzere Garzeiten erreicht, weil bei höherem Druck im Kochtopf die Temperatur über 100 °C gesteigert werden kann, bis das Sieden des Wassers beginnt. Andererseits ergeben sich beim Kochen im Hochgebirge, wo der Luftdruck geringer ist als unter normalen Bedingungen, längere Garzeiten, weil das Kochwasser z. B. schon bei 90 °C zu sieden beginnt (Bild 91/1).

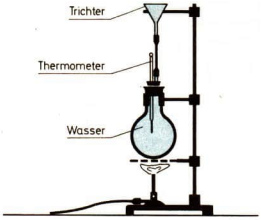
In den bisherigen Ausführungen über das thermodynamische Verhalten der Stoffe wurde im wesentlichen Wasser als Beispiel verwendet. Es erhebt sich die Frage, wie sich andere Stoffe verhalten.

Es ist bekannt, daß auch das Eisen bei hohen Temperaturen verflüssigt werden kann und bei noch höheren Temperaturen gasförmig wird. Die in der Luft enthaltenen Gase, z. B. N_2, H_2, CO_2, lassen sich verflüssigen und erstarren bei sehr niedrigen Temperaturen. Die Stoffe haben also ein durchaus ähnliches Verhalten, nur sind die Aggregatzustände und Phasenumwandlungen in verschiedenen Druck- und Temperaturbereichen zu suchen.

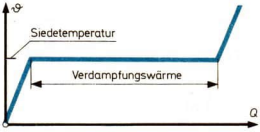
Alle reinen Stoffe haben ein ähnliches thermodynamisches Verhalten. Das vergleichbare Verhalten tritt allerdings in unterschiedlichen Druck- und Temperaturbereichen auf.

Mit der Behandlung **eines** Stoffes läßt sich somit das allgemeine Verhalten **aller** Stoffe verdeutlichen. Dabei ist zu bemerken, daß hier nur reine Stoffe betrachtet werden, da z. B. Gemische und Lösungen ein andersartiges Verhalten zeigen können.

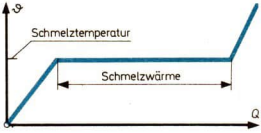
Aus kinetisch-statistischer Sicht läßt sich die Temperaturerhöhung eines Stoffes als Erhöhung der Bewegungsenergie der Teilchen erklären, wobei sich die mittleren Abstände zwischen den Atomen und Molekülen vergrößern. Bei der Phasenumwandlung geht eine Veränderung der Struktur des Stoffes vor sich, bei der die Bewegungsenergie der Teilchen so groß wurde, daß die vorhandenen Bindungskräfte zur Erhaltung der gegebenen Struktur nicht mehr ausreichten.



91/1 Sieden unter erhöhtem Druck
Das Wasser im Kolben wird erwärmt. Erst bei Temperaturen über 100 °C beginnt das Wasser zu sieden, da der Wasserdruck im Kolben höher ist als der Normaldruck.



91/2 Verdampfungswärme eines Stoffes



91/3 Schmelzwärme eines Stoffes

Schmelz- und Verdampfungswärme. Es wurde festgestellt, daß die Phasenumwandlung unter Wärmezufuhr bzw. Wärmeentzug vor sich geht. Zur isobaren Verdampfung einer bestimmten Menge eines Stoffes ist dabei eine bestimmte Energiezufuhr notwendig. Diese Energie wird als **Verdampfungswärme Q_V** bezeichnet.

► **Die spezifische Verdampfungswärme q_V ist gleich dem Quotienten aus der Verdampfungswärme Q_V und der Masse m.**

$$q_V = \frac{Q_V}{m} \qquad (71)$$

Einheit der spezifischen Verdampfungswärme ist 1 $kJ \cdot kg^{-1}$.

Ebenso definiert ist die **spezifische Schmelzwärme q_S** als Quotient der Schmelzwärme Q_S und der Masse m: ②

$$q_S = \frac{Q_S}{m} \qquad (72)$$

① Erklären Sie, was physikalisch beim Verdampfen, Kondensieren, Schmelzen und Erstarren vor sich geht!
② Bestimmen Sie die Wärme, die bei der isobaren Wärmezufuhr im Zylinder dem Wasser insgesamt zu übertragen ist!

Die spezifische Schmelzwärme drückt die Energie aus, die notwendig ist, um 1 kg eines Stoffes isobar zu schmelzen. Die spezifische Verdampfungswärme ist die Energie, die zum Kondensieren, gleicher Druck vorausgesetzt, dem System wieder entzogen werden muß, d. h. die bei Verdampfen des Stoffes zugeführte Wärme wird beim Kondensieren wieder frei. Ebenso verhält es sich bei der spezifischen Schmelzwärme beim Schmelzen und Erstarren.
Die spezifische Verdampfungswärme (Tabelle 92/1) und die spezifische Schmelzwärme sind wie die entsprechenden Temperaturen auch vom Druck abhängig.

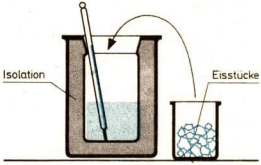
Die spezifische Verdampfungswärme und die spezifische Schmelzwärme eines Stoffes können mit Hilfe kalorimetrischer Messungen bestimmt werden. ①

▼ In die erwärmte Kalorimeterflüssigkeit wird bei Umgebungsdruck Eis der Masse m_E mit der Schmelztemperatur T_S gegeben. Welche Prozesse laufen im Kalorimeter ab?
Das Eis schmilzt mit konstanter Schmelztemperatur bei der Wärmezufuhr aus der Kalorimeterflüssigkeit. Danach erwärmt sich das geschmolzene Eis bis zur Mischtemperatur T_m. Dem Eis muß also Wärme für den Schmelzprozeß ($m_E \cdot q_S$) sowie der entstandenen Flüssigkeit zur weiteren Erwärmung $[m_E \cdot c_p (T_m - T_S)]$ zugeführt werden.
Aus der Energiebilanz für das Kalorimeter kann damit die spezifische Schmelzwärme des Wassers beim Umgebungsdruck berechnet werden.

Mit einem ähnlichen Versuch läßt sich auch die spezifische Verdampfungswärme bestimmen. ② ③

Tabelle 92/1 Abhängigkeit der spezifischen Verdampfungswärme des Wassers vom Druck

Druck p in MPa	spezifische Verdampfungswärme q_v in $kJ \cdot kg^{-1}$
0,01	2 392
0,05	2 304
0,10	2 258
0,20	2 202
0,50	2 109
1,00	2 015
5,00	1 640
10,00	1 317
20,00	583



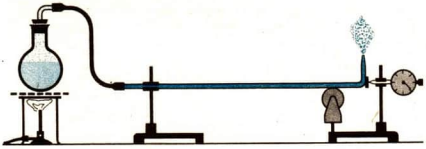
92/2 Bestimmung der spezifischen Schmelzwärme des Wassers
Zur Bestimmung der spezifischen Schmelzwärme des Wassers müssen die Masse des Eises m_E sowie die Masse der Kalorimeterflüssigkeit m_W bestimmt werden. Das Kalorimetergefäß ist nach außen gut zu isolieren.

Verhalten der Stoffe in Gebieten ohne Phasenumwandlung 38

Es wurde schon festgestellt, daß sich bei isobarer Erwärmung eines Stoffes das Volumen vergrößert. Im folgenden soll diese Volumenänderung in Gebieten ohne Phasenumwandlung, also in der festen, flüssigen und gasförmigen Phase, näher untersucht werden. Beim Erwärmen oder Abkühlen eines aus einem festen Stoff bestehenden Systems ändern sich **alle** Abmessungen, so z. B. der Durchmesser einer Kugel, die Länge einer beliebigen Kante eines Quaders sowie die Länge der Raumdiagonale eines Würfels.

Längenänderung. Wird vom betrachteten System nur eine Abmessung herausgegriffen, wie z. B. die Länge eines Stabes, so reduziert sich das Problem auf die Längenänderung des festen Stoffes. Die Bestimmung der Längenänderung und ihre Beachtung ist in der Technik bedeutungsvoll, z. B. bei Schienen und Brücken.
Durch ein Experiment kann festgestellt werden, wie sich die Länge von Stäben aus Metall, Glas oder anderen Stoffen mit der Temperatur verändert.

▼ Rohre verschiedener Metalle werden in eine Vorrichtung eingespannt und erwärmt (Bild 93/1). Die Längenänderung wird über eine Meßuhr angezeigt.



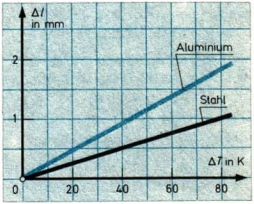
93/1 Bestimmung der Längenänderung von Metallen
Der Stab wird auf einer Seite festgeklemmt, auf der anderen Seite auf einer Rolle gelagert. Der durch das Rohr strömende Wasserdampf erwärmt das Rohr auf etwa 100° C und wird am Ende des Rohres abgeleitet.

Im Versuch ist zu erkennen:
Die Längenänderung eines Stabes ist der Temperaturdifferenz proportional (Bild 93/2): $\Delta l \sim \Delta T$.

Die Längenänderung ist bei gleichen Temperaturdifferenzen der Anfangslänge proportional (Bild 93/3):
$\Delta l \sim l$.

Beide Proportionalitäten werden zusammengefaßt:
$\Delta l \sim l \cdot \Delta T$.

Mit einer Stoffkonstante α erhält man die Gleichung für die Berechnung der



93/2 Diagramm der Längenänderung von Metallstäben
Die Stäbe haben bei der Anfangstemperatur die Länge 1 m.

Längenänderung von Stäben:

$$\Delta l = \alpha \cdot l \cdot \Delta T \qquad (73)$$

Der Faktor α heißt

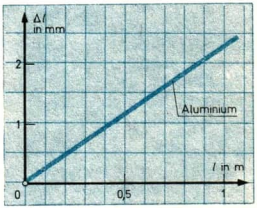
linearer Ausdehnungskoeffizient $\alpha = \dfrac{\Delta l}{l \cdot \Delta T}$. (74)

Aus dem beschriebenen Versuch und aus sehr genau durchgeführten Experimenten ist festzustellen:

1. Der lineare Ausdehnungskoeffizient ist **stoffabhängig**, d. h. für jedes eingesetzte Material verschieden.

2. Die Proportionalität $\Delta l \sim l \cdot \Delta T$ ändert sich mit der Temperatur,
α ist deshalb **temperaturabhängig**.

3. α ist unabhängig von der Länge l des Stabes.



93/3 Diagramm der Längenänderung eines Stabes bei einer Temperaturänderung um 100 K

Allgemein gilt:

► **Längenänderung von Körpern**

$$\Delta l = \alpha \cdot l \cdot \Delta T \qquad (75)$$

① Schreiben Sie sich die notwendigen Berechnungsgleichungen für kalorimetrische Messungen auf!
② Leiten Sie eine Gleichung für die Bestimmung der spezifischen Schmelzwärme bei kalorimetrischen Messungen ab!
③ Überlegen Sie, wie eine solche Messung durchzuführen ist!

■ Berechnung des linearen Ausdehnungskoeffizienten. Aus dem Diagramm (Bild 93/2) ist abzulesen:

Gegeben:

Aluminiumstab 1 m

$\Delta T = 80$ K

$\Delta l = 1{,}84$ mm

Gesucht:

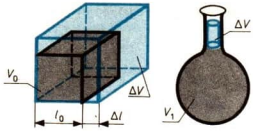
α

Lösung:

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l \cdot \Delta T}$$

$$\alpha = \frac{1{,}84 \cdot 10^{-3}\,\text{m}}{1\,\text{m} \cdot 80\,\text{K}}$$

$$\underline{\underline{\alpha = 2{,}3 \cdot 10^{-3}\,\text{K}^{-1}}}$$ ① ②



94/1 Ausdehnung eines Quaders und Bestimmung des Ausdehnungskoeffizienten von Flüssigkeiten

Volumenänderung. Die Volumenänderung fester Stoffe kann unmittelbar aus der Längenänderung abgeleitet werden. Bei einer Temperaturerhöhung vergrößern sich alle Abmessungen eines Körpers, er bleibt seiner Ausgangsgestalt geometrisch ähnlich (Bild 94/1).

Statt der Längenänderung Δl wird die Volumenänderung ΔV und statt des linearen Ausdehnungskoeffizienten α der Faktor $\gamma \approx 3\alpha$ verwendet.
Dieser Faktor heißt

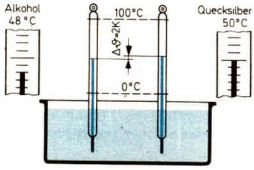
kubischer Ausdehnungskoeffizient γ.

Man erhält damit eine Gleichung zur Berechnung für die Volumenänderung eines Körpers $\Delta V = \gamma \cdot V \cdot \Delta T$. (76)
Ebenso wie α ist γ stoff- und temperaturabhängig.

Allgemein gilt:

► **Volumenänderung von Körpern**

$$\Delta V = \gamma \cdot V \cdot \Delta T \qquad (77)$$

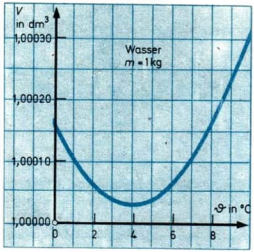


94/2 Quecksilber- und Alkoholthermometer
Übereinstimmender Fundamentalabstand (z. B. 0 °C und 100 °C) und gleichmäßige Skale ergäben bei einer beliebigen Zwischentemperatur verschiedene Anzeigen.

Bei der Bestimmung des Ausdehnungskoeffizienten von Flüssigkeiten (Bild 94/1) ist zu berücksichtigen, daß auch das Volumen des Gefäßes, γ des Gefäßes und γ der Flüssigkeit von der Temperatur abhängig sind. Diese Abhängigkeiten müssen bei der Fertigung von Flüssigkeitsthermometern berücksichtigt werden (Bild 94/2). ③ ④ ⑤

Eine grundsätzliche Abweichung vom normalen thermodynamischen Verhalten zeigt das Wasser in der Nähe der Erstarrungstemperatur (Bild 94/3). Die besondere Temperaturabhängigkeit der Dichte des Wassers beruht darauf, daß sich bei einer Abkühlung schon ab etwa 4 °C Strukturen mit größerem Volumenbedarf bilden, so daß die Dichte bei weiterer Abkühlung wieder ansteigt. Derartige Besonderheiten des Verhaltens treten auch bei anderen Stoffen auf. ⑥

Dieses anomale Verhalten des Wassers ermöglicht das Überwintern von Lebewesen in den Gewässern. Das Wasser ist zwischen 0 °C und etwa 8 °C schwerer als das Eis, so daß die Gewässer von oben nach unten zufrieren und unter normalen Witterungsbedingungen eine genügend starke Flüssigkeitsschicht verbleibt und Lebewesen in den Gewässern überleben können.



94/3 Anomales Verhalten des Wassers
Die Kurve zeigt die Abhängigkeit des Wasservolumens von der Temperatur.

Nachdem das Verhalten der Stoffe in der festen und flüssigen Phase behandelt wurde, soll nun die Gasphase betrachtet werden. In den Ausführungen über die kinetische Betrachtungsweise der Thermodynamik wurde schon verdeutlicht, daß das ideale Gas ein **Modell** ist. Als wesentliches Merkmal dieses Modells wurde genannt, daß die Wechselwirkungen der Teilchen untereinander vernachlässigbar sind.

Es erhebt sich nun die Frage, wann die Stoffe dem Modell des idealen Gases entsprechen bzw. nahe kommen. Normalerweise bestehen zwischen den Molekülen der Stoffe sehr enge Wechselwirkungen, die keinesfalls zu vernachlässigen sind. Ausdruck dessen ist das komplizierte Verhalten dieser Stoffe. Sollen die Wechselwirkungen der Moleküle untereinander vernachlässigbar sein, so müssen die Abstände zwischen ihnen relativ groß sein. Diese Voraussetzung liegt für einen Stoff dann vor, wenn er sich in der gasförmigen Phase unter geringem Druck befindet. Das Gas hat dann ein sehr großes Volumen. Der Modellzustand des idealen Gases wird als Grenzzustand dann erreicht, wenn der Druck gegen Null geht. Sein Volumen wird dann unendlich.

Reale Gase kommen dem Modellzustand des idealen Gases nahe, wenn gilt: $p \rightarrow 0$, $V \rightarrow \infty$.

Mit guter Näherung gilt auch:
Die realen Gase kommen dem Zustand des idealen Gases nahe, wenn sie möglichst weit vom Gebiet der Verflüssigung entfernt sind.

Viele Gase, z. B. die Bestandteile der Luft Stickstoff, Wasserstoff und Kohlendioxid sowie Edelgase kommen in einem großen Temperatur- und Druckbereich dem Zustand des idealen Gases genügend nahe, so daß sie in vielen Berechnungen mit guter Näherung als ideales Gas behandelt werden können. Gleiches gilt für die in Verbrennungskraftmaschinen eingesetzten Kraftstoff-Luft-Gemische. ⑦

Für die nachfolgenden Betrachtungen soll ebenfalls von dieser Vereinfachung Gebrauch gemacht werden.

---

① Zeigen Sie, daß aus der Gleichung (75) die Gleichung $l_2 = l_1\,[1 + \alpha\,(\vartheta_2 - \vartheta_1)]$ folgt, wenn für die Anfangslänge l_1 und für die Anfangstemperatur ϑ_1 gesetzt wird.
② Erklären Sie, wie bei einem Bimetall die unterschiedliche Längenänderung von Metallen ausgenutzt wird!
③ Wie verändert sich das Volumen eines Hohlraumes in einem festen Körper mit der Temperatur?
④ Vergleichen Sie anhand des Tafelwerkes die Ausdehnungskoeffizienten von festen und flüssigen Stoffen!
⑤ Weshalb braucht die Volumenänderung des Gefäßes nur bei sehr genauen Messungen berücksichtigt zu werden?
⑥ Warum wird Wasser nicht als Thermometerflüssigkeit verwendet?
⑦ Überlegen Sie, ob sich durch Verringerung der Temperatur dieser Gase ihr Verhalten dem des idealen Gases annähert!

Die thermische Zustandsgleichung des idealen Gases. Das ideale Gas zeigt ein sehr einfaches thermodynamisches Verhalten. Schon im 17. Jahrhundert ermittelten die Physiker Boyle und Mariotte, daß für eine bestimmte Gasmenge bei konstanter Temperatur das Produkt aus Druck und Volumen konstant bleibt:

$p \cdot V =$ konstant.

Aus den kinetisch-statistischen Betrachtungen ist bekannt, daß die Temperatur und das Produkt $p \cdot V$ von der mittleren kinetischen Energie der Teilchen abhängen und T und $p \cdot V$ proportional sind:

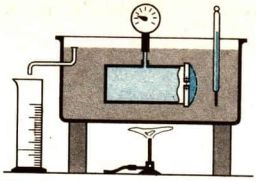
$p \cdot V \sim T$.

Außerdem ist bei gleichem p und T das Volumen direkt proportional der Masse: $V \sim m$ (vgl. Lehrbuch Chemie). ①

Zusammengefaßt ist damit

$p \cdot V \sim m \cdot T$.

Es hat sich gezeigt, daß diese direkte Proportionalität in allen Druck- und Temperaturbereichen des idealen Gases besteht. Mit der spezifischen Gaskonstante R ergibt sich (Bild 96/1) die



96/1 Experiment zur Bestätigung der Zustandsgleichung des idealen Gases
Das im Wasserbehälter befindliche Gefäß ist mit einer Gummimembran abgeschlossen. Durch die Wärmezufuhr werden sich Druck, Temperatur und Volumen der Luft im Gefäß erhöhen.
Die Volumenänderung der Luft und des Wassers wird durch ein Überlaufgefäß gemessen.

► **Thermische Zustandsgleichung des idealen Gases**

$$p \cdot V = m \cdot R \cdot T \qquad (78)$$

Mit dieser Zustandsgleichung können viele Aufgaben über Zustandsänderungen von Gasen berechnet werden.

Die spezifische Gaskonstante R ist für jedes Gas, das dem Modell des idealen Gases nahezu entspricht, eine charakteristische Konstante. Sie ist unabhängig vom Druck und von der Temperatur (Tabelle 96/2).

Tabelle 96/2 Spezifische Gaskonstante

Gas	spezifische Gaskonstante R in $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
Wasserstoff	4 124,4
Helium	2 077,1
Sauerstoff	259,83
Stickstoff	296,78
Kohlendioxid	188,92

■ Von der Luft ist bekannt, daß sie bei Normalbedingungen eine Dichte $\varrho = 1{,}292\ kg \cdot m^{-3}$ hat. Zu bestimmen ist die spezifische Gaskonstante der Luft.

Gegeben:

$p_0 = 0{,}101325\ MPa$

$T_0 = 273{,}15\ K$

$\varrho_0 = 1{,}292\ kg \cdot m^{-3}$

Gesucht:

R

Lösung:

$$\varrho = \frac{m}{V}$$

$$R = \frac{p_0}{\varrho_0 \cdot T_0}$$

$$R = \frac{0{,}101325 \cdot 10^6\ N \cdot m^{-2} \cdot 1\ J \cdot N^{-1} m^{-1}}{1{,}292\ kg \cdot m^{-3} \cdot 273{,}15\ K}$$

$$\underline{\underline{R = 287{,}1\ J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}}}$$

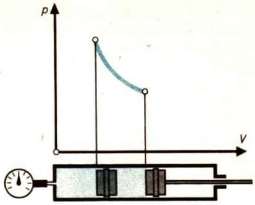
Zustandsänderung des idealen Gases. Wird der Zustand einer abgegrenzten Menge (System) eines idealen Gases verändert, so bleibt dabei die Masse des Gases sowie seine spezifische Gaskonstante konstant. Die thermische Zustandsgleichung des idealen Gases läßt sich also in der Form

$$p \cdot \frac{V}{T} = m \cdot R = \text{konstant}$$

schreiben, d. h. für jeden beliebigen Zustand ist der Ausdruck $p \cdot \frac{V}{T}$ konstant. Diese Gleichung ist allgemein eine Funktion mit drei Variablen. Werden bei konstanten Bedingungen zwei Variable vorgegeben, so ist die dritte auch festgelegt. Für einen Anfangszustand a und einen Endzustand e kann geschrieben werden:

$$\frac{p_a \cdot V_a}{T_a} = \frac{p_e \cdot V_e}{T_e}. \qquad (79)$$

Diese Gleichung (79) ist ebenfalls eine Form der thermischen Zustandsgleichung des idealen Gases.
Im allgemeinen ändern sich bei Zustandsänderungen Druck, Temperatur und Volumen. Die Gleichung kann dann unmittelbar verwendet werden (Bild 97/1).
Viele Zustandsänderungen laufen aber bei spezifischen Bedingungen ab, so kann z. B. der Druck, das Volumen oder die Temperatur konstant oder annähernd konstant bleiben. Für diese Fälle ist es möglich, die thermische Zustandsgleichung zu vereinfachen.



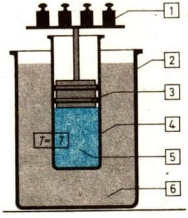
97/1 Aufnahme eines *p-V*-Diagrammes bei einer Zustandsänderung (schematisch)
Das Volumen des Gases ist durch die Kolbenstellung bestimmt. Das angeschlossene Manometer zeigt den Druck des Gases an. Jedem Zustand des Gases ist ein bestimmter Punkt der *p-V*-Ebene zugeordnet. Während einer Zustandsänderung durchläuft dieser Punkt eine Kurve.

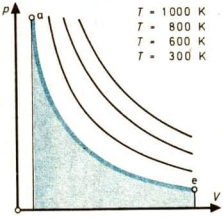
Isotherme Zustandsänderung (T = konstant) 40

Aus der Gleichung (79) ergibt sich mit $T_a = T_e$

$$p_a \cdot V_a = p_e \cdot V_e. \qquad (80)$$

Bei der im Bild 97/2 dargestellten Zustandsänderung findet eine isotherme Expansion statt, es wird Arbeit vom System (Gas) verrichtet. Dabei verringert sich der Druck, und das Volumen vergrößert sich.
Diese Zustandsänderung kann in einem *p-V*-Diagramm veranschaulicht werden (Bild 97/3).





97/2 Isotherme Expansion eines Gases
Das Gas befindet sich in einem Zylinder mit einer Ummantelung konstanter Temperatur. In Abhängigkeit von der auf den Kolben wirkenden Kraft verändern sich der Druck im System und das Volumen.
1 — Wägestücke
2 — Behälter
3 — Kolben
4 — Zylinder
5 — komprimiertes Gas
6 — Wasser

97/3 Isotherme Expansion im *p-V*-Diagramm
Im Bild sind verschiedene Isothermen (Linien T = konstant) gezeigt. Die bei der isothermen Expansion verrichtete Arbeit ist unter der Zustandslinie als Fläche darstellbar.

Es erhebt sich nun die Frage, ob bei der isothermen Zustandsänderung dem System Wärme übertragen werden muß.
Nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik gilt
$U_e - U_a = W_V + Q$.
Außerdem kann die kalorische Zustandsgleichung (65) ver-

① Begründen Sie, warum bei dieser Proportionalität konstanter Druck und Temperatur vorausgesetzt werden!

wendet werden. Beim idealen Gas hängt c_v nur von der Temperatur ab (im allgemeinen auch vom Druck), damit ist auch die innere Energie des idealen Gases nur temperaturabhängig.

Aus $T_a = T_e$ folgt $U_a = U_e$ und aus $W_V + Q = 0$ ergibt sich $-W_V = Q$.

Da $W_V < 0$ (Arbeit wird vom System verrichtet), ist $Q > 0$, d. h., es muß Wärme dem System zugeführt werden.

Bei isothermer Expansion eines idealen Gases bleibt die innere Energie konstant. Die verrichtete Arbeit muß durch Zuführung von Wärme von gleichem Betrag kompensiert werden.

Bei einer isothermen Kompression dagegen muß eine entsprechende Wärme vom System abgegeben werden.

In der Technik haben isotherme Zustandsänderungen wenig Bedeutung, da es sehr schwierig ist, während der schnell ablaufenden Prozesse eine entsprechende Wärme zu- oder abzuführen. ① ②

Isochore Zustandsänderung (V = konstant) 41

Aus der Gleichung (79) ergibt sich mit $V_a = V_e$

$$\frac{p_a}{T_a} = \frac{p_e}{T_e} \tag{81}$$

Im p-V-Diagramm ist die isochore Zustandsänderung als Parallele zur p-Achse darstellbar (Bild 98/1).

Eine isochore Erwärmung eines idealen Gases wird im Bild 98/2 gezeigt.

Mit dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik

$U_e - U_a = W_V + Q$

gilt wegen $W_V = 0 \quad (V_e = V_a)$ (82)

$U_e - U_a = Q$.

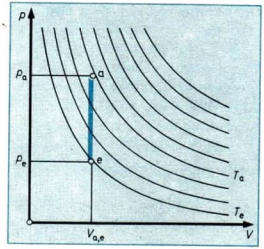
Bei der isochoren Zustandsänderung wird keine Arbeit verrichtet. Die zu- oder abgeführte Wärme führt zu einer entsprechenden Änderung der inneren Energie des Systems.

Wichtige Anwendungen der Gleichungen für die isochore Zustandsänderung sind

– die Berechnung der in geschlossenen Behältern herrschenden Druck- und Temperaturverhältnisse von Gasen und

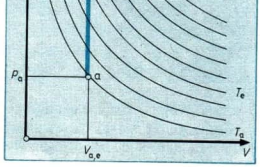
– die Berechnung von Drücken und Temperaturen bei der Zustandsänderung nach der Zündung des Kraftstoff-Luft-Gemisches im Viertakt-Ottomotor, die idealisiert als isochore Zustandsänderung betrachtet werden kann.

Eine große Bedeutung hat die isochore Zustandsänderung bei der Festlegung der Temperaturskale. Nach der thermischen



98/1 Isochore Zustandsänderung eines Gases

Anhand der dünn eingezeichneten Isothermen kann verfolgt werden, wie sich die Temperatur ändert. Es ist zu ersehen, daß diese Zustandsänderung zur tieferen Temperatur geht, es handelt sich also um eine isochore Abkühlung, bei der der Druck absinkt.



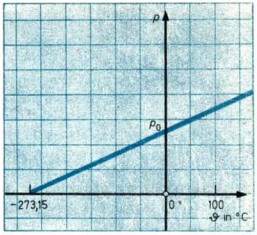
98/2 Isochore Erwärmung eines Gases

Da das Volumen des Systems konstant bleibt, wird keine Volumenarbeit am bzw. vom System verrichtet.

Zustandsgleichung für die isochore Zustandsänderung (81) ist die Temperaturänderung direkt proportional der Druckänderung. Wenn also der Druck des Gases sehr klein ist, muß auch seine Temperatur sehr klein werden. Auf diese Weise wurde auch der absolute Temperaturnullpunkt bestimmt. Das ist die Temperatur, bei der der Druck eines idealen Gases bei konstantem Volumen den Wert Null annehmen würde (Bild 99/1). Aus experimentellen und theoretischen Untersuchungen geht hervor, daß der absolute Nullpunkt unerreichbar ist. Jedoch kann die Temperatur eines Systems dem Wert Null, dem **absoluten Temperaturnullpunkt**, beliebig angenähert werden.

Diese Temperatur ist $T = 0$ K oder $\vartheta = -273{,}15$ °C.

Der absolute Nullpunkt ist unerreichbar, mit Hilfe aufwendiger Versuche kann man sich aber dem Temperaturnullpunkt asymptotisch nähern. ③



99/1 Druckabhängigkeit der Temperatur beim idealen Gas
Mit Hilfe von realen Gasen, die dem Verhalten des idealen Gases sehr nahe kommen, werden genaue Temperaturskalen hergestellt. Für solche Messungen werden Wasserstoff und Helium verwendet.

Zur Bestimmung des absoluten Temperaturnullpunkts wurde die im Bild 99/1 gezeigte Druckabhängigkeit der Temperatur eines nahezu idealen Gases gedanklich bis auf $p = 0$ weitergeführt.

Isobare Zustandsänderung (p = konstant) 42

Aus der thermischen Zustandsgleichung (79) ergibt sich mit

$p_a = p_e$

$$\frac{V_a}{T_a} = \frac{V_e}{T_e} \qquad (83)$$

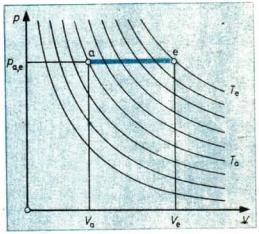
Die Darstellung im p-V-Diagramm ergibt eine Parallele zur V-Achse (Bild 99/2). ④

Der Zusammenhang zwischen isobarer Wärmezufuhr und Temperaturänderung wird durch die Gleichung
$Q = m \cdot c_p\,(T_e - T_a)$ (/ kalorische Zustandsgleichung) beschrieben.

Die Arbeit bei isobarer Zustandsänderung wurde bei der Einführung der Volumenarbeit bestimmt:

$$W_V = -p\,(V_e - V_a). \qquad (84)$$

Die isobare Zustandsänderung hat eine große Bedeutung in der Technik, z. B. laufen viele Prozesse bei Umgebungsdruck ab. Als Beispiel sind die isobare Erwärmung von Wohnräumen, die isobare Erwärmung großer, wetterbestimmender



99/2 Isobare Zustandsänderung eines Gases
Die von a nach e geschnittenen Isothermen zeigen ein Ansteigen der Temperatur, es wird also eine isobare Erwärmung gezeigt.

① Erläutern Sie die Energiebilanz für eine isotherme Kompression!
② Vergleichen Sie die Energieumwandlung bei der isothermen Kompression mit dem Spannen einer Schraubenfeder!
③ Überlegen Sie anhand der thermischen Zustandsgleichung, welches Volumen das ideale Gas bei beliebigem Druck bei einer Temperatur von 0 K einnehmen würde!
④ Zeichnen Sie die Kurve für eine isobare Abkühlung in das Diagramm in ihrem Nachschriftheft ein!

Luftmassen sowie der Luft bei der Verbrennung, die isobare Trocknung von feuchten Gegenständen und die isobare Abkühlung der Luft in Kühlanlagen zu nennen. Die isobare Erwärmung nach der Verbrennung des Kraftstoff-Luft-Gemisches im Dieselmotor kann auch annähernd als isobare Zustandsänderung eines idealen Gases angesehen werden.

Zusammenfassend zu den betrachteten Zustandsänderungen ist festzustellen, daß man spezielle Gleichungen aus der thermischen Zustandsgleichung herleiten konnte. So wurde gezeigt, daß spezielle Gesetze in einem allgemeinen Gesetz zusammengefaßt werden können und daß diese darin als Sonderfälle enthalten sind. ①

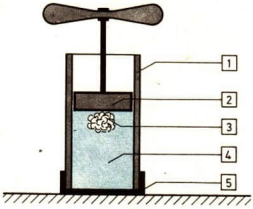
Adiabatische Zustandsänderung ($Q = 0$) 43

Eine Zustandsänderung, bei der sich im Gegensatz zu den vorher behandelten alle drei Zustandsgrößen Druck, Temperatur und Volumen ändern, ist die **adiabatische Zustandsänderung**.

Eine adiabatische Zustandsänderung findet statt, wenn während des Prozesses keine Wärme über die Systemgrenze übertragen wird.

Da es keine vollkommene Wärmeisolation gibt, können adiabatische Zustandsänderungen nur angenähert verwirklicht werden. Einige sehr schnell ablaufende Zustandsänderungen können als adiabatische Zustandsänderungen bezeichnet werden, da in den sehr kurzen Zeitabschnitten nur eine geringe Wärmeübertragung an die Umgebung möglich ist.

▼ In einem pneumatischen Feuerzeug (Bild 100/1) wird der Kolben sehr schnell zur Verschlußkappe hin bewegt. Die Luft erwärmt sich bei dieser Kompression.
Infolge der Temperaturerhöhung wird sich der mit Schwefelkohlenstoff getränkte Wattebausch entzünden. Es findet eine annähernd adiabatische Kompression statt, weil dabei wegen der Schnelligkeit des Vorganges fast keine Wärme an die Umgebung übertragen wird.



100/1 Pneumatisches Feuerzeug
1 – Zylinder
2 – Kolben
3 – Watte
4 – Luft
5 – Verschlußkappe

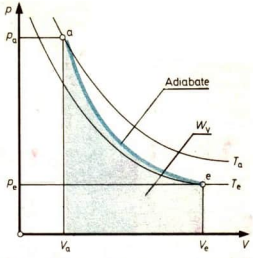
Dieser Versuch veranschaulicht den Zündvorgang beim Dieselmotor, in dem keine besondere Zündvorrichtung notwendig ist. Die Temperatur des Kraftstoff-Luft-Gemisches wird durch eine adiabatische Kompression bis auf die Zündtemperatur erhöht. Die bei diesem Prozeß an die Zylinderwände übertragene Wärme ist wegen der Schnelligkeit des Prozesses vernachlässigbar ($Q = 0$).

Aus dem ersten Hauptsatz $U_e - U_a = Q + W_V$ kann mit $Q = 0$ Auskunft über die Energieumwandlung während einer adiabatischen Zustandsänderung gegeben werden.

Es ergibt sich:
$U_e - U_a = W_V$.

Die bei der adiabatischen Kompression am System verrichtete Arbeit erhöht die innere Energie des Systems und damit seine Temperatur (Bild 101/1). Bei der adiabatischen Expansion entspricht die vom System verrichtete Arbeit der Verminderung der inneren Energie. ②

Die adiabatische Zustandsänderung hat ebenso wie die isobare Zustandsänderung eine weite Anwendung in der Technik. Da viele Prozesse sehr schnell ablaufen, kann der Wärmeübergang zwischen System und Umgebung meist vernachlässigt werden, so daß $Q \approx 0$ gilt.
Adiabatische Kompressionen dieser Art laufen z. B. in Lüftern, Ventilatoren, Kompressoren und, wie schon gezeigt, in Verbrennungsmotoren ab; adiabatische Expansionen werden ebenfalls in Verbrennungsmotoren sowie in Turbinen annähernd verwirklicht.



101/1 Adiabatische Kompression im *p-V*-Diagramm
Die Zustandslinie ist steiler als bei der isothermen Zustandsänderung, so daß auch die Temperaturzunahme sichtbar wird.

Energieumwandlungsprozesse als Folge spezieller Zustandsänderungen 44

Bei einer einmaligen Zustandsänderung kann eine bestimmte Arbeit vom System verrichtet werden. Technisch bedeutungsvoll ist jedoch, wenn kontinuierlich Arbeit verrichtet wird, z. B. für den Antrieb von Maschinen oder zur Elektroenergieerzeugung in Generatoren. Es muß deshalb fortwährend vom System Arbeit verrichtet werden durch ständige Wiederholung der betreffenden Zustandsänderung. Würde man die Zustandsänderung einfach umkehren, z. B. adiabatische Expansion – adiabatische Kompression bei gleichen Drükken, so würde der gewonnene Betrag an Arbeit wieder aufgebraucht werden. Deshalb müssen sich die entsprechenden Zustandsänderungen voneinander unterscheiden, d. h., das Gas durchläuft eine Aufeinanderfolge von Zustandsänderungen mit dem Ziel, daß das System Arbeit verrichtet. Prozesse dieser Art werden **Kreisprozesse** genannt. In den Verbrennungsmotoren durchlaufen die Gase z. B. einen solchen Kreisprozeß.

Der Gasturbinenprozeß. Ein Beispiel für einen Kreisprozeß ist der Gasturbinenprozeß. In einem kontinuierlichen Prozeß mit dem Ziel der Verrichtung von Arbeit müssen folgende einzelne Prozesse ablaufen: Kompression – Wärmezufuhr – Expansion – Wärmeentzug.
Infolge der Schnelligkeit der ablaufenden Prozesse kann die Kompression und die Expansion des Gases nahezu adiabatisch verwirklicht werden, während die Wärmeübertragung isobar erfolgen kann.

---

① Erläutern Sie an einem weiteren allgemeinen Gesetz aus der Physik diese Feststellung!
② Erläutern Sie die Energiebilanz für eine adiabatische Expansion!

Der geschlossene Gasturbinenprozeß (Bild 102/1) besteht damit aus folgenden Zustandsänderungen:

1–2 adiabatische Kompression (Verdichter)
2–3 isobare Wärmezufuhr (Erhitzer)
3–4 adiabatische Expansion (Turbine)
4–1 isobarer Wärmeentzug (Kühler)

Im Verdichter wird das Gas adiabatisch bis auf den maximalen Druck p_2 komprimiert. Die Temperatur steigt dabei von T_1 auf T_2. Anschließend wird das Gas im Erhitzer auf die Temperatur T_3 erwärmt. Der Erhitzer ist ein Wärmeübertrager, in dem dem Gas Energie übertragen wird. Danach wird das Gas in der Gasturbine auf den Druck p_4 adiabatisch entspannt, seine Temperatur verringert sich auf T_4. Ein Teil der verrichteten Arbeit muß dem Kompressor zugeführt werden, der andere verläßt als eigentliche „Nutzarbeit" W das Gesamtsystem. Um den Anfangszustand zu erreichen, muß das Gas wieder von T_4 auf T_1 im Kühler isobar gekühlt werden. Dieser Prozeß kann in einem p-V-Diagramm veranschaulicht werden (Bild 102/2).

Die Energiebilanz dieser Anlage ergibt, daß die innere Energie des Gases am Anfangszustand und am Endzustand gleich ist, die innere Energie des Gesamtsystems wird sich also nicht ändern, wenn immer wieder der gleiche Prozeß verwirklicht wird. Dem System wird die Wärme Q_{zu} im Erhitzer zugeführt, und im Kühler wird die Wärme Q_{ab} vom System abgegeben. Die Arbeit W wird als „Nutzarbeit" vom System verrichtet. Die Energiebilanz ist damit

$$U_e - U_a = 0 \text{ und } Q_{zu} + Q_{ab} + W = 0. \qquad (85)$$

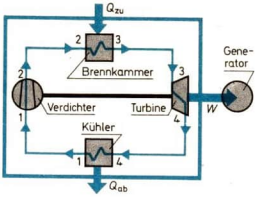
Von der zugeführten Wärme kann ein Teil als Arbeit vom System verrichtet werden, der andere Teil wird als Wärme wieder an die Umgebung abgegeben (Bild 103/1). Diese Aussage ist auch schon bei der Behandlung des zweiten Hauptsatzes verdeutlicht worden. ⓘ

Ebenso wurde der Wirkungsgrad von Wärmekraftanlagen schon bestimmt (↗ S. 85).
Für den betrachteten Prozeß ergibt sich mit
$Q_{ab} = Q_{41} = m \cdot c_p\,(T_4 - T_1)$ (isobare Wärmeübertragung)
und $Q_{zu} = Q_{23} = m \cdot c_p\,(T_3 - T_2)$

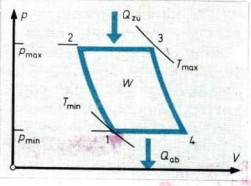
$$\eta = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}. \qquad (86)$$

Da die Wärmeübertragung nicht bei einer Temperatur T_{ab} und T_{zu} erfolgt, können dafür mittlere Temperaturen der Wärmezufuhr $T_{m,zu}$ und Wärmeabgabe $T_{m,ab}$ eingeführt werden:

$$\eta = 1 - \frac{T_{m,ab}}{T_{m,zu}} \qquad (87)$$



102/1 Schema eines Gasturbinenprozesses
Der Verdichter arbeitet ähnlich wie der Ventilator, nur sind mehrere Schaufelkränze (beim Ventilator Flügelräder) hintereinander angeordnet.
Das Heizmedium für den Erhitzer kann ein Verbrennungsgas aus einer Öl- oder Gasbrennkammer sein. Möglich ist auch ein Medium, das von den Brennelementen eines Kernreaktors Wärme aufnimmt und diese im Erhitzer an das Gas überträgt. Das Wirkungsprinzip der Gasturbine ist das gleiche wie bei einer Dampfturbine. Zur Kühlung wird Luft oder Wasser aus der Umgebung verwendet.



102/2 Gasturbinenprozeß im p-V-Diagramm
Das Gas durchläuft kontinuierlich eine Aufeinanderfolge von Zustandsänderungen. Die von den Zustandslinien eingeschlossene Fläche entspricht der vom Gesamtsystem verrichteten Arbeit. Zu den Zustandsänderungen muß bemerkt werden, daß sich in den real bestehenden Anlagen keine Zustandsänderung in dieser reinen Form verwirklichen läßt. Angenähert lassen sich aber die ablaufenden Prozesse mit Hilfe dieser Modelle beschreiben.

Diese Gleichung ermöglicht eine Diskussion über die Wirkungsgraderhöhung einer solchen Anlage. Der Wirkungsgrad vergrößert sich, wenn die mittlere Temperatur der Wärmezufuhr erhöht oder die mittlere Temperatur des Wärmeentzuges gesenkt wird: ②

1. Erhöhung der mittleren Temperatur der Wärmezufuhr

Dies könnte erreicht werden durch die Erhöhung der maximalen Prozeßtemperatur T_3. Dabei ergeben sich aber Einschränkungen, da die im Erhitzer und in der Turbine eingesetzten Werkstoffe ab einer bestimmten Temperatur die erforderlichen Festigkeitswerte nicht mehr besitzen. Eine andere Möglichkeit, um die mittlere Temperatur der Wärmezufuhr zu erhöhen, ist die Regeneration (Bild 103/2). ③

2. Verringerung der mittleren Temperatur des Wärmeentzugs

Außer der Regeneration gibt es nur begrenzte Möglichkeiten, die minimale Prozeßtemperatur zu senken, da das Kühlmittel aus der Umgebung entnommen werden muß.

Die Erhöhung des Wirkungsgrades ist deshalb aus werkstofftechnischen, ökonomischen und verfahrenstechnischen Gründen nur in Grenzen möglich.

Gasturbinen haben eine immer größere Bedeutung bei der Elektroenergieerzeugung während der Verbraucher-Spitzenzeiten und z. B. auch für den Antrieb von Pumpen beim Erdöltransport bzw. von Verdichtern beim Erdgastransport. Auch im Transportwesen finden sie immer breitere Verwendung, z. B. für den Schiffsantrieb. Der Flugzeugantrieb durch Gasturbinen ist besonders vorteilhaft, da solche Spezialturbinen sehr leicht gebaut werden können (stoßfreie Belastung) und eine große Leistung bei äußerst geringen Abmessungen besitzen.

■ Berechnen Sie die in einer Sekunde einer Gasturbine (ohne Regeneration) zuzuführende Wärme. Die Anlage soll eine Leistung von 200 MW abgeben und hat einen thermischen Wirkungsgrad von $\eta = 0{,}35$.

Gegeben:

$P = 200\ \text{MW}$
$\eta = 0{,}35$
$t_z = 1\ \text{s}$

Gesucht:

Q_{zu}

Lösung:

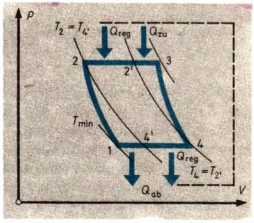
$$Q_{zu} = \frac{|P| \cdot t_z}{\eta}$$

$$Q_{zu} = \frac{200\ \text{MW} \cdot 1\ \text{s}}{0{,}35}$$

$$\underline{\underline{Q_{zu} = 570\ \text{MJ}}}$$

Bei einem schon sehr hohen Wirkungsgrad von $\eta = 0{,}35$ ist fast dreimal soviel Wärme der Anlage zuzuführen, als in Form von Arbeit abgegeben wird.

103/1 Energiediagramm einer Gasturbinenanlage



103/2 Gasturbinenprozeß mit Regeneration

Ein Teil der abzuführenden Wärme wird wieder zum Erwärmen des Gases genutzt. Die eigentliche Wärmezufuhr an die Gesamtanlage beginnt damit bei einer höheren Temperatur, so daß die mittlere Temperatur der Wärmezufuhr höher ist. Gleichzeitig wird die mittlere Temperatur des Wärmeentzuges der Gesamtanlage geringer, da die eigentliche Wärmeabgabe an die Umgebung bei geringerer Temperatur beginnt.

Die Regeneration wird in technischen Anlagen oft angewendet.

---

① Wiederholen Sie die wesentlichen Aussagen des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik!
② Interpretieren Sie diese Gleichung für den Gasturbinenprozeß!
③ Zeichnen Sie ein einfaches Energiediagramm eines Gasturbinenprozesses mit Regeneration!

Der Kraftwerksprozeß. Die allgemeinen Aussagen über den Gasturbinenprozeß sind auch für den Prozeß in Wärmekraftwerken anwendbar. Der wesentliche Unterschied besteht darin, daß statt eines Gases Wasser als Arbeitsmittel verwendet wird.

Im einzelnen laufen folgende Zustandsänderungen ab:

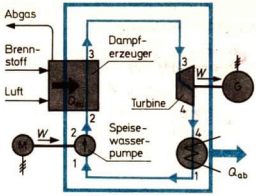
- adiabatische Druckerhöhung des Wassers in der Pumpe,
- isobare Wärmezufuhr im Dampferzeuger,
- adiabatische Entspannung in der Turbine,
- isobare Wärmeabfuhr im Kondensator. (1)

Im *p-V*-Diagramm (Bild 104/2) stellt die eingeschlossene Fläche die nutzbare Arbeit dar, die dem Generator zur Stromerzeugung zugeführt wird.
Zur Erhöhung des Wirkungsgrades (87) wird auch beim Kraftwerksprozeß die Regeneration angewendet. Moderne Anlagen erreichen einen thermischen Wirkungsgrad von etwa 40%.
Das Energiediagramm einer einfachen Kraftwerksanlage zeigt Bild 104/3. (2) (3) (4)

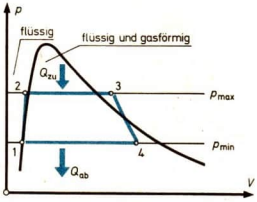
Großkraftwerke mit Leistungen über 100 MW, die Bezirke und Großstädte mit Heiz- und Elektroenergie versorgen, belasten infolge der großen Mengenumsätze, vor allem durch die Rauchgase sowie die Abwärme, ihre Umwelt.
Die abzuführenden Rauchgase werden deshalb in Filtern von Ascheteilchen gereinigt und in möglichst hohen Schornsteinen abgeführt, um eine breite Verteilung der Abgase und restlichen Ascheteilchen zu erreichen. Das aus den Kühltürmen hochsteigende Luft-Wasserdampf-Gemisch kann für die angrenzenden Gebiete ebenfalls eine Belastung darstellen.
In Kraftwerken an größeren Flüssen (z. B. im Kraftwerk „Elbe" in Vockerode) wird statt des umlaufenden Kühlwassers Flußwasser in die Kondensatoren geführt, so daß die Kühltürme eingespart werden können. Das Flußwasser erwärmt sich dabei um einige Kelvin. (5)

Damit die Wassertemperatur der Flüsse nicht zu hoch wird, da sonst das biologische Gleichgewicht gestört ist, kann nur eine begrenzte Anzahl von Kraftwerken mit Flußwasserkühlung betrieben werden.
In der DDR werden alle notwendigen Maßnahmen ergriffen, um die Belastung der Umwelt in Grenzen zu halten, so daß Mensch und Natur nur unwesentlich beeinträchtigt werden.

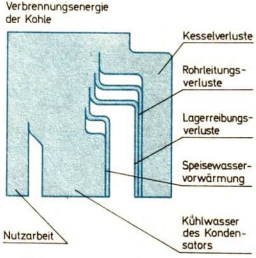
Eine zumindest ebenso große Belastung der Umwelt entsteht durch die Abgasprodukte von Verbrennungsmotoren der Straßenkraftfahrzeuge und Schienenfahrzeuge, verstärkt durch mitunter unsachgemäßen Betrieb dieser Motoren.
Durch technische Veränderungen werden deshalb zielgerichtet die schädlichen Bestandteile der Abgase vermindert.



104/1 Schema einer Kraftwerksanlage
Nach der Druckerhöhung in der Speisewasserpumpe wird bei der isobaren Wärmezufuhr im Dampferzeuger zunächst das Wasser bis auf die Siedetemperatur erwärmt, danach erfolgt die Verdampfung des Wassers, und anschließend wird der Dampf noch überhitzt, d. h. weiter erwärmt. In der Turbine wird der Dampf entspannt, er gibt einen Großteil seiner Energie ab, die als Arbeit an der Turbinenwelle abgenommen werden kann.



104/2 Kraftwerksprozeß im *p-V*-Diagramm



104/3 Energiediagramm einer einfachen Kraftwerksanlage

Zusammenfassung

1. Fragestellung

Aus der Erfahrung ist bekannt, daß die Stoffe unter bestimmten Bedingungen ein bestimmtes thermodynamisches Verhalten zeigen, z. B. in bestimmten Aggregatzuständen vorliegen. Daraus ergeben sich folgende Fragen:
Wie ist die Abhängigkeit des Volumens der Stoffe von Druck und Temperatur bestimmbar und beschreibbar?
Welche Energie muß zur Phasenumwandlung zugeführt werden? Ist das thermodynamische Verhalten der Stoffe einander ähnlich?
Kommen die realen Gase in ihrem Verhalten dem des idealen Gases nahe?

2. Folgerung und experimentelle Prüfung

Anhand von Experimenten und Überlegungen wurde gezeigt, daß das thermodynamische Verhalten eines Stoffes sehr kompliziert und nicht in seiner Gesamtheit einfach zu beschreiben ist. Die Versuchsergebnisse liegen in Diagrammen, Tabellen und Gleichungssystemen vor. Dabei zeigte sich, daß alle reinen Stoffe ein ähnliches thermodynamisches Verhalten zeigen. Viele Gase kommen in ihrem Verhalten dem idealen Gas nahe, die thermische Zustandsgleichung des idealen Gases kann deshalb mit guter Näherung verwendet werden. Unter bestimmten Bedingungen (T = konstant, V = konstant, p = konstant, $Q = 0$) konnten Zustandsänderungen des idealen Gases näher untersucht werden.

3. Anwendung

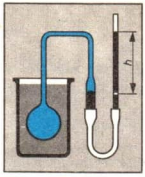
Die Erkenntnisse über das thermodynamische Verhalten des Wassers und des idealen Gases konnten an vielen technischen Beispielen angewendet werden, z. B. bei der Betrachtung des Gasturbinen- und des Kraftwerksprozesses.

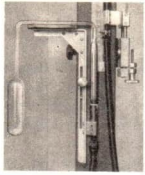
---

① Vergleichen Sie die Zustandsänderungen und das Schema des Kraftwerksprozesses mit denen des Gasturbinenprozesses!
② Erläutern Sie das Energiediagramm, und deuten Sie Möglichkeiten zur Verbesserung der Energieausnutzung an!
③ Nennen Sie Wärmekraftwerke der DDR und deren Leistung!
④ Erläutern Sie, auf welcher Basis und in welchem Maße die Elektroenergieerzeugung der DDR weiter entwickelt wird!
⑤ Überlegen Sie, welche Prozesse in der Dampflokomotive ablaufen!

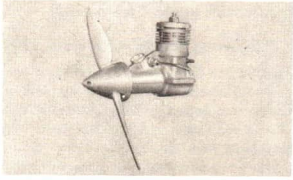
Anwendungsbeispiele zum thermodynamischen Verhalten der Stoffe

Gasthermometer· Der gasgefüllte Rundkolben mit einer Ausgangstemperatur von $T_0 = 273{,}15$ K wird in das System eingeführt, dessen Temperatur gemessen werden soll. Durch Anheben oder Senken des rechten Manometerrohres wird erreicht, daß auch nach der Temperaturänderung das Gasvolumen den gleichen Betrag hat.
Die Drücke p_0 und p des Gases bei den Temperaturen T_0 und T erhält man als Summe von Luftdruck und Schweredruck der Quecksilbersäule.

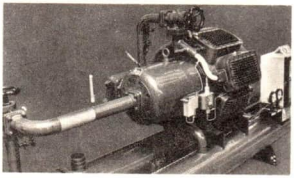




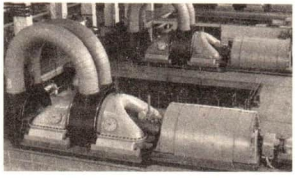
Verbrennungskraftmaschinen· Die Selbstzünder- bzw. Glühzündermotoren zum Antrieb von Flugmodellen sind Zweitaktmotoren. Sie haben einen Hubraum von 0,5 cm³ bis 2,5 cm³ und eine Leistung von 0,09 bis 0,4 kW bei Drehzahlen zwischen 15000 bis 23000 min^{-1}. Die Zündung erfolgt durch eine annähernde adiabatische Kompression des Treibstoff-Luft-Gemisches.



Kältemaschine· In einer Kältemaschine wird auch ein Kreisprozeß eines Arbeitsmittels verwirklicht. Im Gegensatz zur Wärmekraftanlage muß aber dabei einem Behälter mit geringer Temperatur (z. B. dem Kühlschrankinnenraum) Wärme entzogen werden. Zur Verwirklichung des Prozesses wird dem Aggregat elektrische Energie zugeführt. An einem Wärmeübertrager wird Wärme an die Umgebung übertragen.

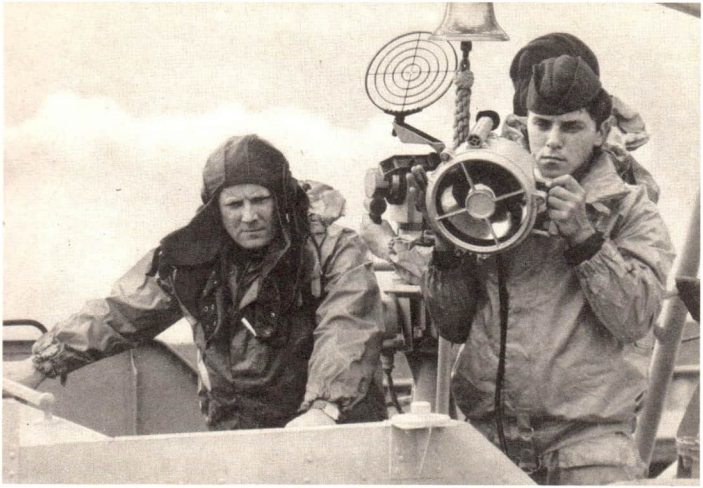


Dampfturbine. Die innere Energie des Wasserdampfes wird in der Turbine z. T. in mechanische Energie umgewandelt und zum Antrieb von Elektrogeneratoren genutzt. Die Entspannung des Dampfes erfolgt annähernd adiabatisch.
Die abgebildeten Turboaggregate bestehen aus einer Dampfturbine und einem Generator. Die Wirtschaftlichkeit beim Bau und im Betrieb von Kraftwerken vergrößert sich mit der Leistung dieser Aggregate. Heute werden bereits Turbinenleistungen von 1000 Megawatt erreicht.



Problemfragen

- Bestimmen Sie die Temperatur T, wenn am Gasthermometer ein Luftdruck von 0,092 MPa und die Höhe h der Quecksilbersäule 100 mm abgelesen wird!
- Welche Zustandsänderungen laufen in einem Viertakt-Ottomotor, in einem Viertakt-Dieselmotor und in einem Zweitakt-Selbstzündermotor ab? Welche Takte sind die Arbeitstakte?
- Stellen Sie eine Energiebilanz für einen Kühlschrank mit geschlossener Tür auf! Berücksichtigen Sie dabei die durch die Kühlschrankwände übertragene Wärme Q_{zu}, die zugeführte mechanische Arbeit W_{mech} und die am Wärmeübertrager übertragene Wärme Q_{ab}!
- Welche der aufgeführten Wärmen ist dem Betrag nach größer?
- Erklären Sie den Unterschied im Arbeitsprinzip einer Dampfmaschine (Lokomotive) und einer Dampfturbine!

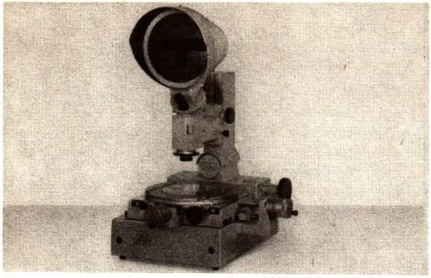


OPTIK

Strahlungsquellen wie Flammen, Glühlampen, Leuchtstofflampen, Laser senden eine elektromagnetische Strahlung aus, von der ein Teil mit dem Auge wahrgenommen werden kann. Diesen Teil der Strahlung bezeichnet man als Licht. Im erweiterten Sinne versteht man unter Licht – über den sogenannten sichtbaren Bereich hinaus – auch Strahlungsvorgänge im Ultrarot-, im Ultraviolett- und im Röntgenbereich.

Die Strahlenoptik ist ein Teilgebiet der klassischen Optik. Klassische Optik und Quantenoptik bilden das System der physikalischen Optik.

Aus dem Verhalten der Strahlungsquellen und Strahlungsempfänger, aus mannigfaltigen physikalisch-optischen Erscheinungen und Vorgängen, aus vielen Beobachtungen und Experimenten wird mit Hilfe verschiedener Denkansätze versucht, auf das Wesen des Lichtes, auf seine Entstehung und seine Ausbreitung zu schließen und das Wechselverhältnis des Lichtes mit anderen Formen der Materie zu erklären.



Strahlenoptik

Optische Geräte, in denen die Gesetzmäßigkeiten der Lichtausbreitung zur Vergrößerung und Abbildung von Gegenständen angewendet werden, sind für Industrie und Landwirtschaft wie auch für die verschiedenen Zweige der Wissenschaft unentbehrlich. In diesen Geräten wird der Gang der Lichtstrahlen so gelenkt, daß z. B. Längen und Winkel gemessen und Formgenauigkeit und Oberflächengüte geprüft werden können.

In der Strahlenoptik werden Aussagen über die Ausbreitung des Lichtes unter der einschränkenden Voraussetzung des Denkmodells Lichtstrahl gemacht; von der wellenartigen Ausbreitung des Lichtes sieht man zunächst ab. In einer idealisierenden Abstraktion wird angenommen,
- daß sich das Licht immer geradlinig ausbreitet,
- daß sich kreuzende Lichtstrahlen gegenseitig nicht beeinflussen,
- daß die Lichtwege umkehrbar sind,
- daß das Reflexionsgesetz und das Brechungsgesetz uneingeschränkt gelten.

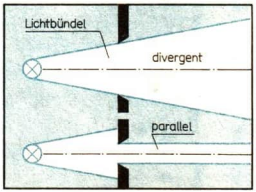
In der Strahlenoptik werden mit Hilfe dieser Vorstellungen die Bildentstehungen – wie beispielsweise in dem abgebildeten Meßmikroskop – erklärt, und es wird die Abbildungsgleichung aufgestellt. Die Gesetze der Strahlenoptik werden vielfältig und mannigfaltig angewendet, um in vereinfachender Weise Aussagen zu machen über die lichtoptische Abbildung durch einfache optische Elemente (z. B. Spiegel, Linsen), durch optische Systeme (z. B. Linsenkombinationen) und durch optische Instrumente (z. B. Fernrohre, Mikroskope), wie sie in der Forschung, in der Technik und im Militärwesen vorkommen.
Mit Hilfe der Strahlenoptik lassen sich aber nicht alle optischen Probleme lösen; es müssen dazu weitere Denkmodelle entwickelt und auf die jeweils gegebenen Fälle angewendet werden.

Lichtausbreitung

46

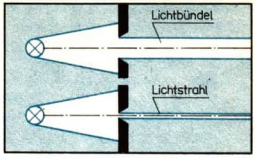
Licht breitet sich in einem isotropen Medium geradlinig und allseitig aus. Fällt Licht einer Glühlampe auf einen lichtundurchlässigen Schirm, so entsteht hinter diesem Schirm bekanntlich ein Schattenraum. Trifft das Licht der Glühlampe auf eine Öffnung in einem lichtundurchlässigen Schirm, so wird ein Teil des Raumes hinter dem Schirm vom Licht durchstrahlt. Der Schirm mit Öffnung stellt eine Blende dar, es entsteht ein divergentes Lichtbündel (Bild 108/2). Wird die Öffnung in dem Schirm immer kleiner gemacht, so wird bei

108/2 Divergentes Lichtbündel und paralleles Lichtbündel



hinreichendem Abstand der Lichtquelle vom Schirm das divergente Lichtbündel hinter dem Schirm mehr und mehr zu einem parallelen Lichtbündel. Sieht man bei einem schmalen parallelen Lichtbündel von seiner Breite ab und betrachtet man nur die geradlinige Achse des schmalen Lichtbündels (Bild 109/1), so spricht man von einem **Lichtstrahl**.

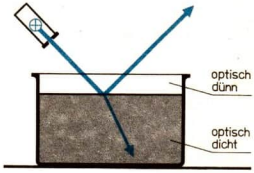
Der Lichtstrahl ist eine Abstraktion und wird als Modell in der Strahlenoptik verwendet. Physikalisch gibt der Lichtstrahl die Richtung der Lichtausbreitung an. Der Lichtstrahl ist ein gedankliches und zeichnerisches Hilfsmittel, um optische Erscheinungen und Vorgänge geometrisch verhältnismäßig einfach beschreiben zu können.



109/1 paralleles Lichtbündel und Lichtstrahl

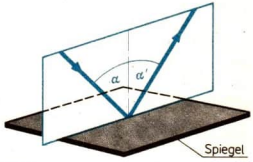
Reflexion und Brechung des Lichtes 47

Trifft Licht auf die Grenzfläche zwischen zwei lichtdurchlässigen Stoffen, so wird ein Teil des Lichtes reflektiert und ein Teil des Lichtes wird gebrochen. Fällt das reflektierte oder gebrochene Licht abermals auf eine ebene Grenzfläche, so wird auch dieses zum Teil reflektiert und zum Teil gebrochen. Wieviel des einfallenden Lichtes jeweils reflektiert oder gebrochen wird, hängt vom Einfallswinkel des Lichtes und von den verwendeten Stoffen ab. ① ②



109/2 Zerlegung eines einfallenden Lichtstrahls in einen reflektierten und in einen gebrochenen Lichtstrahl

Reflexionsgesetz. Bei der experimentellen Untersuchung der Lichtreflexion führen alle Variationen der Experimente grundsätzlich zu immer den gleichen Ergebnissen, nämlich Einfallswinkel und Reflexionswinkel sind gleich groß. Die Ergebnisse lassen sich in einem Gesetz zusammenfassen (Bild 109/3). ③



109/3

Reflexionsgesetz

► **Einfallender Lichtstrahl, Einfallslot und reflektierter Lichtstrahl liegen in einer Ebene.**
Der Einfallswinkel ist gleich dem Reflexionswinkel.

$$\alpha = \alpha' \qquad (88)$$

Brechungsgesetz. Verändert man in einer Experimentieranordnung gemäß Bild 109/2 den Einfallswinkel α, so ändert

① Entwickeln Sie eine Versuchsanordnung, um die gleichzeitige Reflexion und Brechung des Lichtes beim Auftreffen auf eine Grenzfläche zu demonstrieren! Benutzen Sie dazu eine mit Wasser gefüllte Glaswanne oder einen Flachglaskörper!

② Befindet sich ein ausreichend heller Gegenstand vor einem Planspiegel, so erscheinen bei genauem Betrachten nicht nur ein, sondern mehrere Spiegelbilder nebeneinander. Der Effekt ist besonders deutlich, wenn man eine brennende Kerze dicht vor den Spiegel hält und das Spiegelbild möglichst schräg betrachtet. Erklären Sie die Erscheinung!

③ Ist der Reflexionswinkel von der Farbe des einfallenden Lichtes abhängig?

sich neben dem Reflexionswinkel auch der Brechungswinkel β. Als Ergebnis entsprechender Versuchsreihen erhält man das

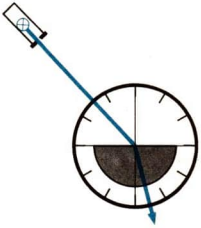
Brechungsgesetz: ①

► **Einfallender Lichtstrahl, Einfallslot und gebrochener Lichtstrahl liegen in einer Ebene.**
Einfallswinkel und Brechungswinkel sind verschieden groß.

$$\alpha \neq \beta \qquad (89)$$

In den vorliegenden Formulierungen ist das Brechungsgesetz zwar qualitativ, nicht aber quantitativ gegeben. Offen bleibt also die Frage, welche mathematische Beziehung zwischen der Größe Einfallswinkel α und der Größe Brechungswinkel β besteht. Auf diese Frage muß das Experiment eine Antwort geben.

▼ An einer halbkreisförmigen Glasscheibe oder an einer Halbkreisküvette (Bild 110/1) werden für verschiedene Einfallswinkel die dazugehörigen Brechungswinkel ermittelt.

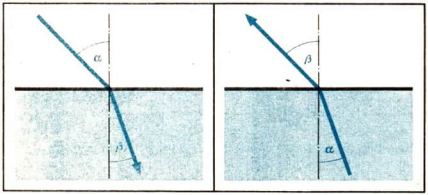


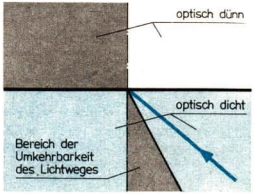
110/1 Prinzip einer Versuchsanordnung zur Ermittlung des Brechungswinkels in Abhängigkeit vom Einfallswinkel

Die Auswertung der gewonnenen Meßreihen ergibt zunächst nur, daß beim Übergang von Luft in Wasser oder von Luft in Glas mit größer werdendem Einfallswinkel auch der Brechungswinkel zunimmt und daß der Brechungswinkel dabei jeweils immer kleiner bleibt als der Einfallswinkel. Auf beliebige Stoffkombinationen bezogen sagt man: Ist der Brechungswinkel des Lichtes kleiner als der Einfallswinkel, so breitet sich das Licht vom optisch dünneren in das optisch dichtere Medium aus. ②

Eine wichtige Erkenntnis optischer Untersuchungen ist, daß die Lichtwege umkehrbar sind. Auf die Brechung des Lichtes an einer ebenen Grenzschicht angewendet heißt das: Der Strahlenverlauf beim Übergang des Lichtes vom optisch dünneren zum optisch dichteren Medium ist – abgesehen von der Strahlenrichtung – derselbe wie beim Übergang vom optisch dichteren zum optisch dünneren Medium. ③

110/2 Anwendung des Satzes von der Umkehrbarkeit der Lichtwege auf die Brechung





110/3

Durch folgende Hilfsbetrachtung kommt man zu einer mathematischen Lösung des Problems der Brechung des Lichts. Die Verläufe des einfallenden Lichtstrahls und des gebrochenen

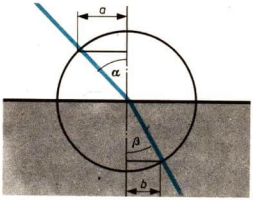
Lichtstrahls werden auf einer optischen Scheibe direkt untersucht, oder die Strahlenverläufe werden entsprechend der Darstellung in Bild 111/1 in einen Einheitskreis gezeichnet. Es ergibt sich daraus, daß das Verhältnis $a:b$ der Kathetenlängen für jedes beliebige Winkelpaar α und β stets denselben Wert hat.

Es gilt also:

$$\frac{a}{b} = \text{konstant},$$

und mit Hilfe von Winkelfunktionen ausgedrückt:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \text{konstant}.$$



111/1 Einfallender Lichtstrahl und gebrochener Lichtstrahl im Einheitskreis

Werden die beiden lichtdurchlässigen Stoffe Luft und Wasser bzw. Glas gegen andere lichtdurchlässige Stoffe ausgetauscht, so nimmt die Konstante einen anderen Wert an. Diese dimensionslose Größe heißt

► **Brechzahl n**

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = n \qquad (90)$$

Die Brechzahl n hängt also von den beiden Stoffen ab, zwischen denen die Brechung des Lichtes auftritt. ④

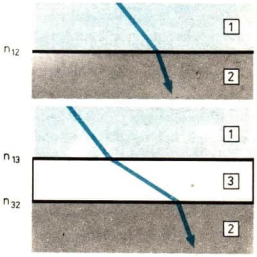
Es hat sich als zweckmäßig erwiesen, die Brechzahl für eine Kombination aus zwei Stoffen auf einen dritten, stets gleichen Stoff zu beziehen (Bild 111/2). Als drittes Medium (Stoff 3) wählt man das Vakuum. Das Vakuum kann in erster Näherung auch durch das Medium Luft ersetzt werden. Allgemein gilt dann:

$$n_{\text{Stoff 1/Stoff 2}} = \frac{n_{\text{Stoff 1/Vakuum}}}{n_{\text{Stoff 2/Vakuum}}}.$$

Speziell auf die Brechung Wasser-Glas bezogen gilt:

$$n_{\text{Wasser/Glas}} = \frac{n_{\text{Wasser/Vakuum}}}{n_{\text{Glas/Vakuum}}}.$$

$n_{\text{Wasser/Vakuum}}$ und $n_{\text{Glas/Vakuum}}$ sind damit Materialkonstanten.



111/2 Strahlenverlauf und Brechzahlen in einer Zwei-Stoff-Kombination (z. B. Wasser/Glas) und einer entsprechenden Drei-Stoff-Kombination (z. B. Wasser/Vakuum/Glas)
1 – Wasser, 2 – Glas, 3 – Vakuum

① Ist der Brechungswinkel von der Farbe des einfallenden Lichtes abhängig?
② Interpretieren Sie die grafische Darstellung des Bildes 110/3!
③ Denken Sie sich an einer ebenen Grenzfläche (Bild 110/3) den Einfallswinkel des Lichtes beim Übergang vom optisch dünneren zum optisch dichteren Medium und beim Übergang vom optisch dichteren zum optisch dünneren Medium variiert! Wie ändern sich die Brechungswinkel?
④ Ein Lichtbündel fällt aus Luft kommend mit dem Einfallswinkel α schräg auf einen Glaskörper. Ändert sich der Brechungswinkel β, wenn Wasser über den Glaskörper geschichtet wird und der Einfallswinkel α dabei derselbe bleibt?
⑤ Vergleichen Sie den Verlauf des Graphen für die Brechung mit dem Graphen für die Reflexion in Bild 168/1!

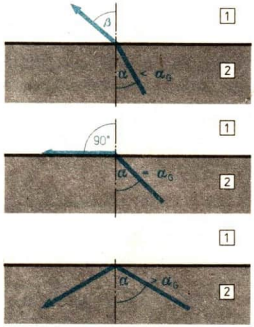
Zusammenfassend folgt also für das Brechungsgesetz:

► **Brechungsgesetz** $\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{n_{\text{Stoff 2/Vakuum}}}{n_{\text{Stoff 1/Vakuum}}}$

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{n_b}{n_a} \qquad (91)$$

Mit Hilfe der Gleichung (91) ist das Brechungsgesetz auch quantitativ faßbar. Schreibt man die Gleichung für das Brechungsgesetz in der Produktenform, so erkennt man: Bei der Brechung bleibt bei einem vorgegebenen Einfallswinkel in einem bestimmten Medium auch für jedes andere Medium das Produkt aus der Brechzahl und dem Sinus des Winkels konstant. Man bezeichnet das Produkt als die Invariante der Brechung. ①

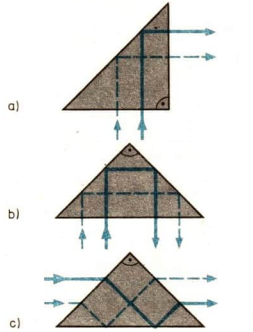
Totalreflexion. Wenn die Aufgabe ① vollständig gelöst worden ist, dann wurde erkennbar, daß beim Übergang des Lichtes von einem optisch dichteren in ein optisch dünneres Medium bei einem bestimmten Einfallswinkel α der Brechungswinkel $\beta = 90°$ wird. Wählt man den Einfallswinkel größer als α_G, so versagt die formelmäßige Anwendung des Brechungsgesetzes. Experimentelle Untersuchungen (Bild 112/1) zeigen, daß das gesamte Licht dann an der Grenzfläche in das dichtere Medium zurückgeworfen wird. Auf Grund dieser völligen Reflexion des Lichtes spricht man von einer **Totalreflexion.** Sie tritt also immer dann auf, wenn der sogenannte Grenzwinkel α_G überschritten wird. ② ③



112/1 Strahlenverläufe beim Übergang des Lichtes vom optisch dichteren zum optisch dünneren Medium bei verschiedenen Einfallswinkeln

Die Nutzung der Totalreflexion hat gegenüber der Reflexion am Spiegel verschiedene Vorteile.
Nachteile bei der Spiegelreflexion:
– störende Bildunschärfe bei schrägem Lichteinfall durch Mehrfachreflexion,
– hohe Lichtverluste bei Mehrfachreflexion,
– die Reflexionsschicht ist gegenüber chemischen und mechanischen Einflüssen nicht sehr widerstandsfähig. ④ ⑤

Die Totalreflexion wird u. a. in optischen Instrumenten bei der inneren Reflexion an optischen Prismen ausgenutzt, wobei die Prismen an die Stelle mehrerer Planspiegel treten. Fällt das Licht senkrecht auf eine Kathetenfläche des optischen Prismas, so dringt das Licht ungebrochen in das Glas ein, wird von innen an der Hypothenusenfläche total reflektiert und durchdringt wiederum ungebrochen die zweite Kathetenfläche (Bild 112/2a). In der Praxis sind daneben weitere Prismenlagen gebräuchlich, um Strahlenverläufe mit Hilfe der Totalreflexion in gewünschter Weise zu verändern.



112/2 Totalreflexion an Prismen

Lichtleitstab. Eine wichtige Anwendungsmöglichkeit der Totalreflexion ist die Lichtfortleitung in einem sogenannten Lichtleitstab (Bild 113/1). Der Lichtleitstab ist ein beliebig gekrümmter Glasstab, in dem das Licht in der Längsrichtung

des Stabes fortgeleitet wird. Infolge der Totalreflexion innerhalb des Glasstabes kann das Licht nicht aus dem Stab austreten. ⑥ ⑦

Eine prinzipiell gleiche Erscheinung wie beim Lichtleitstab erhält man, wenn man Licht in einem gekrümmten Wasserstrahl fortleitet (Bild 113/2).

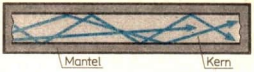
Die Totalreflexion wird in der sogenannten Faseroptik, zuweilen auch als Fiberoptik bezeichnet, technisch genutzt (Bild 113/3).

In der Faseroptik werden viele dünne, lichtdurchlässige Fasern bündelartig zu Lichtleitstäben zusammengefaßt, wobei jede Faser die Fortleitung des Lichtes, das von einem einzigen Punkt des Gegenstandes ausgeht, übernimmt. Ein Bündel kann aus über 10^5 einzelnen Fasern bestehen, wobei das Gesamtbündel nur einige Millimeter dick ist. Der große Vorzug der Faseroptik gegenüber herkömmlichen Lichtleiteinrichtungen besteht darin, daß die Fasern sehr flexibel sind, und daß das Licht demzufolge verhältnismäßig leicht auf gekrümmten Wegen fortgeleitet werden kann. Der hohe Justieraufwand der Spiegel, Linsen und Prismen in herkömmlichen Lichtleiteinrichtungen entfällt bei der Anwendung der Faseroptik.

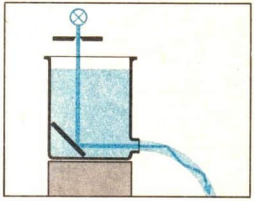
In der Medizin werden Endoskope aus Glasfasern benutzt, um Körperhöhlen auszuleuchten und zu betrachten. Das gleiche Verfahren wird in der technischen Praxis angewendet, wenn man Hohlräume in Maschinen, zum Beispiel die Zylinder von Motoren mit Hilfe von Lichtleiteinrichtungen ausleuchtet und auf ihren technischen Zustand untersucht.

Die Faseroptik gewinnt auch in der (Glasfaser-) Nachrichtenübertragung mehr und mehr an Bedeutung. Hierbei wird von einem Lasersender über die Faseroptik moduliertes Licht zu einer Halbleiterfotodiode als Empfänger geleitet.

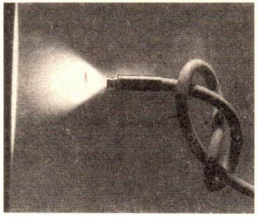
Neben der Medizin und der Nachrichtenübertragung wird die Faseroptik in vielen anderen Zweigen der wissenschaftlichen und technischen Praxis angewendet, wobei sich immer neue Einsatzmöglichkeiten abzeichnen. ⑧



113/1 Lichtleitstab-Lichtleitfaser mit hoher optischer Dichte im Kern und mit geringerer optischer Dichte im Mantel
Die Totalreflexion erfolgt bei solchen Fasern im Inneren zwischen Kern und Mantel an der Grenzschicht.



113/2 Totalreflexion in einem gekrümmten Wasserstrahl



113/3 Glasfaser-Lichtleitkabel

---

① Entwerfen Sie eine Versuchsanordnung, um den Übergang des Lichtes von einem optisch dichteren Medium in ein optisch dünneres Medium zu demonstrieren! Führen Sie den Versuch durch, und variieren Sie dabei den Einfallswinkel! Fertigen Sie eine graphische Darstellung an! Interpretieren Sie insbesondere den Kurvenverlauf für den gebrochenen Strahl beim Übergang des Lichtes vom optisch dichteren in ein optisch dünneres Medium, und deuten Sie das Ergebnis physikalisch!

② Wie kann man den Grenzwinkel mit Hilfe des Brechungsgesetzes errechnen?

③ Bestimmen Sie rechnerisch den Grenzwinkel für den Lichtübergang von Glas zu Luft bei $n_{Luft/Glas} = 1{,}5$! Vergleichen Sie diesen Wert mit dem für den Lichtübergang von Wasser zu Luft bei $n_{Luft/Wasser} = 1{,}3$!

④ Stellen Sie einen Spiegel als Schnittzeichnung dar!

⑤ Welche Vorteile hat ein Spiegel gegenüber einem optischen Prisma?

⑥ Warum werden die Prismen nach Bild 112/2 auch Umkehrprismen genannt?

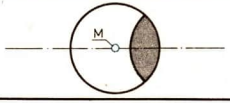
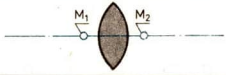
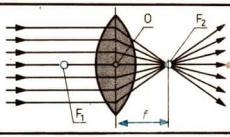
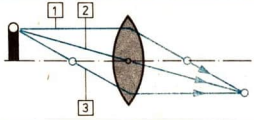
⑦ Was geschieht, wenn ein optisches Prisma an der Reflexionsfläche verstaubt oder durch Feuchtigkeit sich beschlägt?

⑧ Informieren Sie sich anhand zugänglicher Literatur, wo in der Praxis Lichtleitstäbe nach Art der Faseroptik verwendet werden!

Bildpunktentstehung

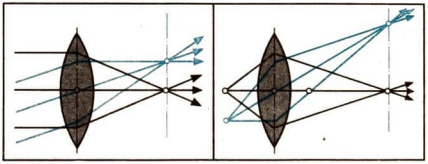
48

Selbstleuchtende Körper senden selbständig Lichtstrahlen aus. Beleuchtete Körper reflektieren von allen Körperpunkten ihrer beleuchteten Oberfläche Lichtstrahlen. Diese Lichtstrahlen breiten sich allseits aus.
Wenn man von einem Körper optisch ein deutliches Bild erzeugen will, dann muß man
– so viele der ausgesendeten Lichtstrahlen wie nur möglich wieder auffangen, um ein möglichst lichtstarkes, helles Bild zu erhalten.
– diese von jedem Körperpunkt ausgesendeten Lichtstrahlen jeweils wieder in genau einem Punkt zusammenführen, um ein scharfes, deutliches Bild zu erhalten.
Diese Aufgaben können mit Hilfe der Lichtbrechung (annähernd) gelöst werden.
Eine solche optische Vorrichtung, die alle eintreffenden Lichtstrahlen in eine gewünschte, andere Richtung lenkt, ist die **optische Linse**. Solche optischen Linsen, mit denen alle eintreffenden Lichtstrahlen gesammelt werden, bezeichnet man als Sammellinse. Die folgenden Betrachtungen beschränken sich auf Sammellinsen.

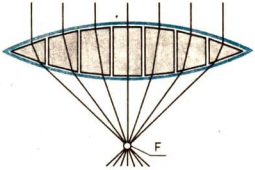
Bezeichnung	Zeichen	Merkmal	Darstellung
Krümmungsmittelpunkt	**M**	Mittelpunkt einer Kugel, aus der die Linse herausgeschnitten ist	
Optische Achse		Gerade durch die Krümmungsmittelpunkte M_1 und M_2	
Optischer Mittelpunkt	**O**	Schnittpunkt der optischen Achse mit der Linsenebene	
Brennpunkt	**F**	Konvergenzpunkt des durch die Linse gehenden parallelen Lichts	
Brennweite	***f***	Abstand zwischen O und F	
1 – Parallelstrahl 2 – Mittelpunktstrahl 3 – Brennpunktstrahl (Als Beispiel wurde eine sphärische Bikonkavlinse gewählt)			

Strahlengang und Bildentstehung

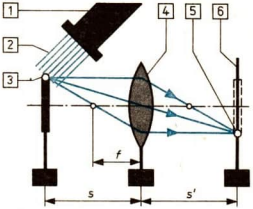
Eine optische Linse kann man sich aus optischen Prismen zusammengesetzt denken (Bild 115/1). Von einem Punkt ausgehende, auf die Linse treffende Strahlen kreuzen sich hinter der Linse im Bildpunkt.
Parallel auf die Linse treffende Strahlen kreuzen sich hinter der Linse im Brennpunkt (Bild 115/2, schwarze Strahlen).
Fällt paralleles Licht nicht parallel zur optischen Achse auf die Linse, so entsteht ein Bildpunkt, der ebenfalls im Abstand der Brennweite hinter der Linse außerhalb der optischen Achse liegt (Bild 115/2, blaue Strahlen).
Fallen von einem Gegenstandspunkt, der außerhalb der optischen Achse liegt, Lichtstrahlen auf eine Linse, so entsteht der Bildpunkt außerhalb der optischen Achse (Bild 115/3).



115/2 115/3



115/1 Strahlengang am Linsenmodell



115/4

1 – Lichtquelle
2 – Licht
3 – Abbildungsgegenstand
4 – Linse
5 – Bild
6 – Schirm
f: Brennweite
s: Gegenstandsweite
s': Bildweite

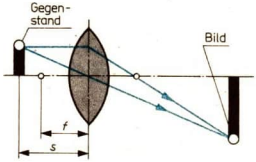
▼ Ein Körper steht als Abbildungsgegenstand vor einer Linse (Bild 115/4). Auf einem Schirm wird das Bild des Körpers aufgefangen. Durch Verstellen des Schirmabstandes s' wird das Bild scharf eingestellt. Durch Verändern der Gegenstandsweite s lassen sich verschiedene Möglichkeiten des Bildortes, der Bildart, der Bildlage und der Bildgröße untersuchen.

Ort des Gegenstandes	Ort des Bildes	Art des Bildes	Lage des Bildes	Größe des Bildes
außerhalb der doppelten Brennweite $s > 2f$	auf der anderen Seite der Linse zwischen einfacher und doppelter Brennweite $f < s' < 2f$	reell	umgekehrt	verkleinert $y' < y$
in der doppelten Brennweite $s = 2f$	auf der anderen Seite der Linse ebenfalls in der doppelten Brennweite $s' = 2f$	reell	umgekehrt	ebenso groß wie der Gegenstand $y' = y$
zwischen der doppelten und einfachen Brennweite $2f > s > f$	auf der anderen Seite der Linse außerhalb der doppelten Brennweite $s' > 2f$	reell	umgekehrt	vergrößert $y' > y$
innerhalb der einfachen Brennweite $s < f$	auf derselben Seite der Linse $s' > s$	virtuell	aufrecht	vergrößert $y' > y$

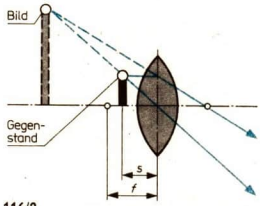
An der Entstehung eines Bildpunktes sind immer sehr viele Lichtstrahlen beteiligt. Zur Bestimmung des Strahlenschnittpunktes durch geometrische Konstruktion genügen jedoch zwei Strahlen. Es ist zweckmäßig, den Mittelpunktstrahl und einen Brennpunktstrahl bzw. Parallelstrahl auszuwählen, obwohl in vielen Fällen diese Strahlen gar nicht an der Bildentstehung beteiligt sind. ① ②

Reelle und virtuelle Bilder 50

Sammellinsen erzeugen bei einer Gegenstandsweite von $s > f$ ein Bild, bei dem sich die Strahlen nach Brechung in der Linse in einem Punkte wirklich (reell) kreuzen (Bild 116/1). Solch ein Bild ist auf einem Schirm auffangbar, es ist ein **reelles Bild**.
Ist die Gegenstandsweite bei einer Sammellinse $s < f$, dann kreuzen sich die Strahlen nach Brechung in der Linse nicht (Bild 116/2). Die Strahlen scheinen von einem gemeinsamen Punkt herzukommen, der nicht der Gegenstandspunkt ist. Ein solches Bild ist nicht auf einem Schirm auffangbar, es kann nur von unseren Sinnesorganen wahrgenommen werden, obwohl es reell nicht existiert, es ist ein **virtuelles Bild**. ③



116/1



116/2

Abbildungsgleichung für dünne Linsen 51

▼ Verändert man bei der Abbildung eines Gegenstandes durch eine Linse die Gegenstandsweite, so ändert sich auch die Bildweite.

▼ Wird bei gleichbleibender Gegenstandsweite durch Auswechseln der Abbildungslinse die Brennweite geändert, so ändert sich wiederum die Bildweite.

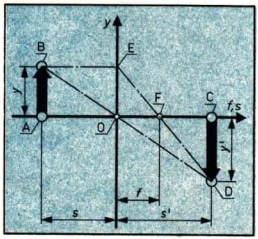
Mit diesen Variationen ist neben der Änderung der Bildweite stets auch eine Änderung der Bildgröße verbunden. Zwischen der Gegenstandsweite s, der Brennweite f der Abbildungslinse und der Bildweite s' sowie zwischen der Gegenstandsgröße y, der Brennweite der Abbildungslinse und der Bildgröße y' (Bild 116/3) bestehen offensichtlich physikalische Zusammenhänge, die mathematisch beschreibbar sind.

Ansatz: Wegen der Ähnlichkeit der Dreiecke BAO und DCO (Bild 116/3) ist

$$y' : y = s' : s \qquad (92)$$

und wegen der Ähnlichkeit der Dreiecke FEO und FDC mit $EO = BA = y$ ist

$$y' : y = (s' - f) : f. \qquad (93)$$



116/3 Zur Abbildungsgleichung für Linsen

Lösung: Aus den Gleichungen (92) und (93) folgt

$$s' : s = (s' - f) : f \qquad (94)$$

$$s' \cdot f = (s' - f) \cdot s$$

$$s' \cdot f = s' \cdot s - f \cdot s \qquad ④$$

$$s' \cdot s = s' \cdot f + s \cdot f \mid : s' \cdot s \cdot f$$ ergibt die

► **Abbildungsgleichung für dünne Linsen**

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'} \qquad (95)$$

Bei der rechnerischen Lösung von Aufgaben ist zu beachten, daß in (95) bei einem reellen Bild der Betrag von s' mit positivem Vorzeichen, bei einem virtuellen Bild hingegen mit negativem Vorzeichen zu versehen ist. Das ist dadurch bedingt, daß nach TGL der Ursprung des Koordinatensystems in den jeweiligen Gegenstandspunkt und nicht in den optischen Mittelpunkt der Linse zu legen ist. ⑤

Die Gleichung (95) gilt nur unter der Bedingung,
- daß die Gegenstandsebene und die Bildebene senkrecht auf der optischen Achse stehen,
- daß die Linse verhältnismäßig dünn ist und
- daß die Lichtstrahlen achsennah verlaufen.

Durch richtiges Anordnen der Bildebene (Auffangschirm, Film), durch eine geeignete Auswahl der Linsen und durch hinreichend starkes Ausblenden der Lichtstrahlen, d. h. durch Verwendung achsennaher Strahlen, lassen sich diese Bedingungen etwa realisieren. Werden die genannten Bedingungen nicht beachtet, treten Abbildungsfehler auf.

Die Abbildungsgleichung liefert immer nur Aussagen über die Entfernung von Gegenstand und Bild in bezug auf die Linse, sie sagt aber nichts über den **Abbildungsmaßstab**, d. h. über das Größenverhältnis von Gegenstand und Bild aus. Aus der Strahlenkonstruktion nach Bild 116/3 folgt der

► **Abbildungsmaßstab**

$$\frac{y}{y'} = \frac{s}{s'} \qquad (96)$$

---

① Wodurch wird der geometrische Ort eines Punktes in einer Ebene eindeutig bestimmt?

② Vergleichen Sie die lichtoptische Abbildung eines Gegenstandes durch eine fotografische Kamera bzw. Sammellinse und durch eine Lochkamera!

③ Welche Bedingung ist durch das Auge oder den Fotoapparat gegeben, so daß virtuelle Bilder mit dem Auge sichtbar oder fotografierbar sind?

④ Bestätigen Sie die Richtigkeit der Gleichung für den Abbildungsmaßstab an dünnen Linsen unter Berücksichtigung der Strahlenkonstruktion nach Bild 116/3!

⑤ Legen Sie den Ursprung eines Koordinatensystems in den optischen Mittelpunkt einer Linse und entwickeln Sie die Linsengleichung nach mathematischen Richtlinien! Sie erhalten:
$\frac{1}{f} = \frac{1}{s'} - \frac{1}{s}$. Begründen Sie diese Gleichung!

Sobald die Gegenstandsweite, die Gegenstandsgröße und die Brennweite der Abbildungslinse bekannt sind, lassen sich die Bildweite und die Bildgröße mit Hilfe der Abbildungsgleichung und des Abbildungsmaßstabes errechnen. ①

■ Wie groß sind bei einer Linse mit den nachfolgend gegebenen Größenbeträgen die Brennweite und die Bildgröße eines reellen und eines virtuellen Bildes?

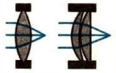
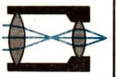
Gegeben:	*Lösung:*	*Lösung:*
	(reelles Bild)	*(virtuelles Bild)*
$s = 20\text{ mm}$	$f = \frac{s' \cdot s}{s' + s}$	
$s' = 60\text{ mm}$ (-60 mm)		
$y = 10\text{ mm}$	$f = \frac{60\text{ mm} \cdot 20\text{ mm}}{60\text{ mm} + 20\text{ mm}}$	$f = \frac{(-60\text{ mm}) \cdot 20\text{ mm}}{-60\text{ mm} + 20\text{ mm}}$
	$\underline{f = 15\text{ mm}}$	$\underline{f = 30\text{ mm}}$
Gesucht:		
f	$y' = \frac{y \cdot s'}{s}$	
y'	$y' = \frac{10\text{ mm} \cdot 60\text{ mm}}{20\text{ mm}}$	$y' = \frac{10\text{ mm} \cdot (-60\text{ mm})}{20\text{ mm}}$
	$\underline{y' = 30\text{ mm}}$	$\underline{y' = -30\text{ mm}}$

Prüfen Sie die Ergebnisse zeichnerisch für ein reelles Bild und für ein virtuelles Bild und diskutieren Sie den mathematisch gewonnenen Betrag —30 mm in bezug auf seinen physikalischen Sinn!

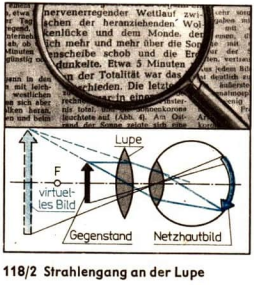
Optische Geräte 52

Um Fernes besser erkennen und Kleines genauer untersuchen zu können, um Augenfehler zu korrigieren, um gespeicherte Informationen bildhaft wiedergeben zu können, werden schon seit langer Zeit in Wissenschaft und Technik optische Hilfsmittel eingesetzt. Wissenschaftliche Erkenntnisse und praktische Erfordernisse haben sich dabei gegenseitig beeinflußt. Damit die Qualität optischer Abbildungen erhöht werden kann, ist es vielfach notwendig, mehrere optische Elemente (Spiegel, Prismen, Linsen) zu einem optischen System (Doppelkondensor, Okular) und optische Systeme zu einem optischen Gerät zusammenzufassen. Wichtige optische Geräte sind die Lupe, die Kamera und der Bildwerfer, das Fernrohr und das Mikroskop.

Lupe. Sie dient dazu, von einem Gegenstand ein vergrößertes Bild zu erzeugen. Schon eine einfache Sammellinse kann als Lupe benutzt werden (Leseglas). Der zu betrachtende Gegenstand wird in die Brennebene der Linse gebracht und durch die Lupe betrachtet. Rückt man den Gegenstand aus der Brennebene dichter an die Linse heran, so erscheint das virtuelle Bild im Endlichen (Bild 118/2).

Optische Geräte	
Einfache optische Geräte	Zusammengesetzte optische Geräte
	
Brille Lupe Kamera	Mikroskop Bildwerfer Fernrohr

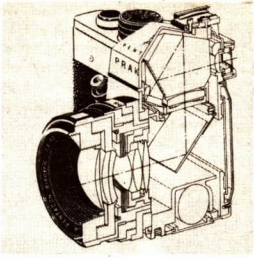
118/1 Systematisierung der optischen Geräte



118/2 Strahlengang an der Lupe

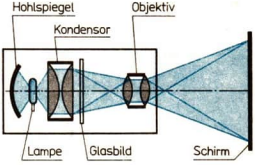
In der Praxis werden anstelle einer einfachen 1-Glas-Lupe vielfach zusammengesetzte Lupen verwendet und je nach Verwendungszweck als Meßlupe, Fadenzähllupe, Koinzidenzlupe ... bezeichnet.

Kamera. Sie dient der Erzeugung und Speicherung von Bildern. In der fotografischen Kamera wird mit einer Linse als Objektiv von einem großen Gegenstand ein verkleinertes reelles Bild erzeugt und auf einer lichtempfindlichen Schicht (Film) festgehalten. Um die Bildschärfe der Aufnahmen zu verbessern, werden anstelle einfacher Objektive mit nur einer einzigen Abbildungslinse Objektive mit Linsenkombinationen verwendet. Biotar, Tessar, Sonnar, Flektogon usw. sind weltbekannte Handelsbezeichnungen für Objektive, die in optischen Werken der DDR hergestellt werden und in vielen Kameras zu finden sind. ② ③



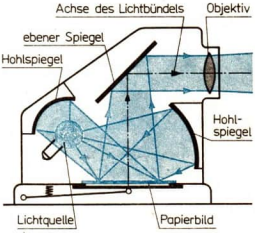
119/1 Schnitt durch eine fotografische Kamera

Bildwerfer. Es wird umgekehrt zur fotografischen Kamera ein kleines Lichtbild (als abzubildender Gegenstand) vergrößert auf einen Schirm projiziert. Je nach Bau- und Beleuchtungsart können lichtdurchlässige Bilder oder lichtundurchlässige Vorlagen abgebildet werden; die entsprechenden Bildwerfertypen bezeichnet man als **Diaskop** und als **Episkop**. Diaskop und Episkop stimmen in ihrer prinzipiellen Wirkungsweise weitgehend überein. Zum Aufbau und zur Wirkungsweise der Geräte vgl. 119/2 und 119/3.
Der Bildwerfer kann bezüglich des Strahlengangs als ein Umkehrungsgerät der fotografischen Kamera angesehen werden. ④ ⑤



119/2 Strahlengang in einem Diaskop

Fernrohr. Es dient normalerweise dazu, weit entfernte Gegenstände dem Auge so darzubieten, daß mehr Einzelheiten wahrgenommen werden können. Es besteht grundsätzlich aus einem Objektiv und einem Okular, z. T. sind Zusatzelemente wie Umkehrlinsen, Umlenkprismen usw. vorhanden. Beim astronomischen Linsenfernrohr erzeugt das Objektiv vom (unendlich) weit entfernten Gegenstand (von dem die Lichtstrahlen nahezu parallel einfallen) ein reelles, verkleinertes, seitenverkehrtes Bild in seiner Brennebene, die seinerseits in der Brennebene des Okulars liegt oder sich innerhalb der einfachen Brennweite des Okulars befindet.



119/3 Strahlengang in einem Episkop

---

① Geben Sie eine physikalische Deutung für die Beziehungen $\frac{y}{y'} > 1$ und $\frac{y}{y'} < 1$!

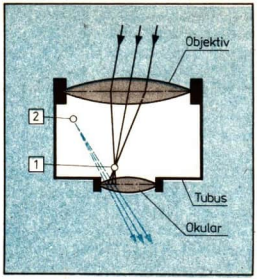
② Beschreiben Sie den Aufbau und die Wirkungsweise einer fotografischen Kamera, die Ihnen zur Verfügung steht!

③ Welche Vor- und Nachteile entstehen beim Fotografieren durch Abblenden des Fotoapparates?

④ Nehmen Sie von einem Tageslichtprojektor Polylux die Schreibunterlage ab! Beschreiben Sie den Aufbau und die Wirkungsweise des Tageslichtprojektors!

⑤ Wie kann bei der Bildprojektion mit einem Diaskop die Bildgröße unterschiedlichen Raumverhältnissen angepaßt werden?

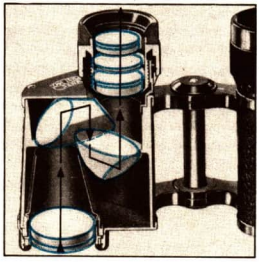
Das Okular wirkt als Lupe und liefert demzufolge ein virtuelles Bild vom reellen Objektivbild bzw. vom Gegenstand.
Um die verhältnismäßig langen Fernrohre, deren Gesamtlänge $l = f_{obj} + f_{oku}$ ist, handhabbarer zu machen, wurden sogenannte **Prismenfernrohre** entwickelt. Beim Prismenfernrohr wird durch ein spiegelndes Prismensystem eine Fernrohrverkürzung und gleichzeitig eine Bildumkehrung erreicht. Der prinzipielle Strahlenverlauf ist in Bild 120/2 skizziert.



120/1 Strahlenverlauf in einem astronomischen Fernrohr (Prinzip eines Fernrohrs) bei parallelem Lichteinfall (z. B. Fixsternbetrachtung)
1 – reelles Zwischenbild
2 – virtuelles Hauptbild

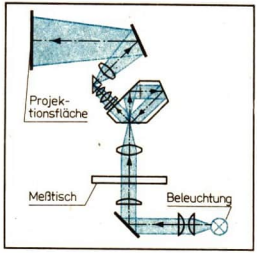
Optische Zielgeräte für militärische Zwecke (Entfernungsmesser, Richtgerät am Geschütz, Visiereinrichtungen in Flugzeugen) enthalten Linsensysteme zur Bildvergrößerung, Prismen zur Verringerung der Abmessungen und zur Einblendung von Fadenkreuzen und Abstandsmarken. Mitunter sind sie äußerst einfach im Aufbau. ① ②

Werkzeugmikroskop. Es ist geeignet zum Messen von Gewinde, Längen und Winkeln sowie zur Prüfung von Formen. Durch ein Mikroskop kann man eine Meßmarke auf einen bestimmten Punkt am Werkstück durch Verstellen des Meßtisches einstellen. Durch Längs- bzw. Querverstellen oder Verdrehen des Meßtisches bringt man die Meßmarke im Mikroskopblickfeld auf einen beliebigen anderen Punkt des Werkstückes und kann die hierzu erforderliche Verstellung an den Meßtrommeln ablesen. Zum Prüfen der Formgenauigkeit werden entsprechende Strichplatten eingesetzt und zur Deckung mit der Werkstückform gebracht.
Eine Projektionseinrichtung (Bilder 108/1, 120/3) gestattet das Prüfen an dem stark vergrößerten Mattscheibenbild in ermüdungsfreier Kopfhaltung. Alle Bilder sind durch Umkehrprismen seiten- und höhenrichtig.


120/2 Schnitt durch ein Prismenfernrohr

Mikroskop. Es dient dazu, kleine Gegenstände dem Auge vergrößert darzubieten.

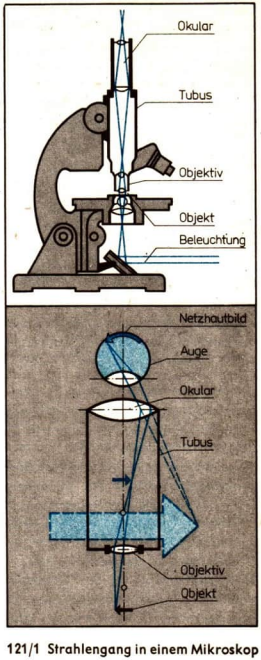
Aufbau. Ein Mikroskop besteht aus Objektiv und Okular, wobei mit dem Objektiv wie auch mit dem Okular in üblicher Weise Abbildungen vorgenommen werden.
Das Objektiv besteht aus einer Sammellinse oder einem sammelnden Linsensystem mit einer sehr kurzen Brennweite. Der Gegenstand wird zwischen einfacher und doppelter Brennweite dicht an die Brennebene herangebracht, wodurch ein stark vergrößertes reelles Bild erzeugt wird.
Das reelle (Zwischen-) Bild wird durch eine Lupe, die als Okular dient, betrachtet, so daß man nochmals eine Vergrößerung erhält (zweistufige Abbildung).
Die Gesamtvergrößerung des Mikroskops ist umgekehrt proportional der Brennweite vom Objektiv und umgekehrt proportional der Brennweite vom Okular. Objektiv und Okular sind bei den meisten technischen Mikroskopen aus-



120/3 Strahlengang im Werkzeugmikroskop

wechselbar, wodurch unterschiedliche Vergrößerungen erreicht werden. ③ ④

Wichtig für die Brauchbarkeit optischer Geräte ist es, dicht nebeneinander liegende Punkte optisch zu trennen. Diese Eigenschaft wird als das **Auflösungsvermögen** des Geräts bezeichnet.
Das Auflösungsvermögen optischer Instrumente, d. h. sehr dicht nebeneinander liegende Objektpunkte noch getrennt sichtbar zu machen, ist durch die wellenartige Ausbreitung des Lichtes begrenzt. Das Auflösungsvermögen des Mikroskops hängt u. a. von der Wellenlänge des verwendeten Lichtes ab, es kann gesteigert werden, wenn man vom sogenannten „sichtbaren" Licht zu kürzeren Wellenlängen (/ S. 132) übergeht, also anstelle von Lichtmikroskopen Ultraviolettmikroskope verwendet.



121/1 Strahlengang in einem Mikroskop

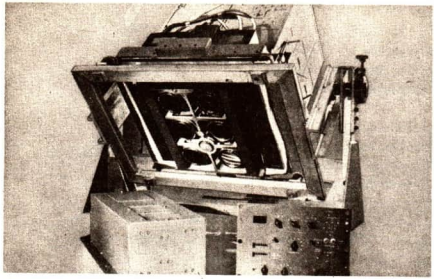
Zusammenfassung 53

Licht wird an der Grenzfläche zweier Körper unterschiedlicher optischer Dichte zu einem Teil reflektiert und zum anderen Teil gebrochen. Es gelten das Reflexionsgesetz $\alpha = \alpha'$ und das Brechungsgesetz $\alpha \neq \beta$.
Die Totalreflexion und die Brechung werden in optischen Geräten eingesetzt. Den Strahlengang in optischen Prismen und Linsen kann man mit dem Modell Lichtstrahl beschreiben. Im Ergebnis der optischen Zuordnung von Gegenstand und Bild mit Hilfe des Modells Lichtstrahl erhält man die Abbildungsgleichung

$f^{-1} = s^{-1} + s'^{-1}$.

① Beschreiben Sie Aufbau und Funktionsweise des Schulfernrohrs „Telementor"!
② Wie erreicht man bei Fernrohren eine Aufrichtung des umgekehrten Bildes? Beachten Sie hierzu die Aufgabe 19 in der Aufgabensammlung!
③ An welcher Stelle des Mikroskops muß eine Meßskale angebracht werden, um die Größe des Objekts direkt messen zu können?
④ Beschreiben Sie Aufbau und Wirkungsweise eines Schülermikroskops! Führen Sie eine Mikroskopeinstellübung an einem selbst gewählten Gegenstand durch!

Wellenoptik



Von einem Spezialflugzeug An-30 wie auch von dem Weltraumfahrzeug Sojus 22 wurden gleichzeitig mit je einer Multispektralkamera Aufnahmen von den Territorien der DDR und der UdSSR im infraroten Lichtwellenbereich zur Bodenerkundung gemacht. In dieser Kamera werden bestimmte Welleneigenschaften des Lichtes ausgenutzt.

Licht tritt in verschiedenen Farben auf. Das deutet auf Welleneigenschaften des Lichtes hin.
Schwingungs- und Wellenerscheinungen gibt es in der Natur und in der Technik ebenfalls in mannigfaltigster Form; sie spielen in der Seismologie, Ozeanographie und Astronomie, in der Musik, Biologie und Medizin, in der Funktechnik, im Maschinenbau und im Verkehrswesen und in vielen anderen Zweigen der industriellen Technik eine wichtige Rolle. So unterschiedlich die einzelnen Erscheinungsformen der Schwingungen und Wellen auch immer sind, man suchte schon frühzeitig nach der Möglichkeit einer einheitlichen Beschreibung und Interpretation all dieser verschiedenen Erscheinungen und Vorgänge. Diese Bemühungen fanden ihren Niederschlag in einer einheitlichen Schwingungs- und Wellenlehre, wobei die Wellenoptik als ein Bestandteil in die Schwingungs- und Wellenlehre eingegliedert wird.
Die Wellenoptik als ein Teilgebiet der Optik behandelt u. a. Interferenzen und Beugungen und wendet die gewonnenen Kenntnisse über diese Erscheinungen auf die Abbildung durch optische Instrumente an, indem sie die Bildentstehung mit Hilfe des Denkmodells Lichtwelle beschreibt und erklärt.

Grundbegriffe der Wellenlehre 54

Im Physikunterricht der Klasse 10 wurden die wichtigsten Begriffe und Aussagen der Schwingungs- und Wellenlehre bereits behandelt, wobei Lichtwellen und Wasserwellen in mancher Hinsicht miteinander verglichen wurden.
Schwingung. Eine **mechanische** Schwingung ist ein Vorgang, der durch die zeitlich periodische Änderung einer **mechanischen** Größe beschrieben wird.
Eine **elektromagnetische** Schwingung ist ein **elektromagnetischer** Vorgang, der durch die zeitlich periodische Änderung einer **elektrischen** und/oder **magnetischen** Größe beschrieben wird. Ähnliche Definitionen wie für mechanische

und elektromagnetische Schwingungen gelten auch für andere Schwingungsarten, etwa für Temperaturschwingungen, Helligkeitsschwingungen usw.
Allgemein gilt:

► **Eine Schwingung spiegelt einen physikalischen Vorgang wider und wird durch die zeitlich periodische Änderung einer physikalischen Größe beschrieben.**

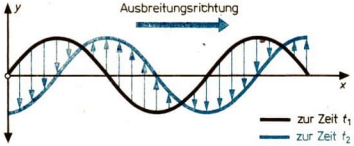
$$y = f(t)$$
$$y = f(t + T) \qquad (97)$$

Welle. Die Welle ist ein von Zeit **und** Ort abhängiger Ausbreitungsvorgang, der durch die zeitlich **und** räumlich periodische Änderung einer physikalischen Größe beschrieben wird.

Eine Welle ist in einem Koordinatensystem in einfacher Weise nicht darstellbar, wohl aber kann man Augenblickswerte einer sich ausbreitenden Welle zeichnerisch angeben (Bild 123/2). Entsprechend lassen sich von konkreten Wellenvorgängen immer nur Momentanzustände bildhaft festhalten.

Die Pfeile im Bild 123/2 geben die jeweilige Richtung der schwingenden Größe an den Orten x an.
Die Welle kann mathematisch als eine Funktion zweier Variabler angesehen werden: $y = f(x; t)$.
Die Schwingung an einem Punkt ist dabei der Sonderfall $y = f(t)$ mit $x =$ konstant.
Ein Augenblickswert der Welle ist der Sonderfall $y = f(x)$ mit $t =$ konstant.

Die Geschwindigkeit, mit der die Phase einer fortschreitenden Welle wandert, nennt man die Phasengeschwindigkeit oder auch kurz die Geschwindigkeit der Welle.

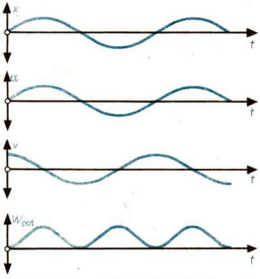


123/2 Augenblickswert einer Welle

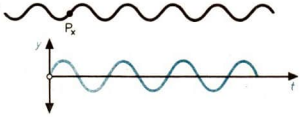
Für die Phasengeschwindigkeit der Welle gilt die **Grundgleichung** $c = \lambda \cdot f$, wobei c die Phasengeschwindigkeit der Welle, λ die Wellenlänge und f die Frequenz ist.
Für alle Wellen gilt die

► **Phasengeschwindigkeit einer Welle**

$$c = \lambda \cdot f \qquad (98)$$



123/1 Unterschiedliche Beschreibungen von Schwingungsvorgängen an einem Pendelschwinger
Die Hin- und Herbewegung eines Pendelkörpers als realer Vorgang wird durch die zeitlich periodische Änderung verschiedener physikalischer Größen beschrieben.



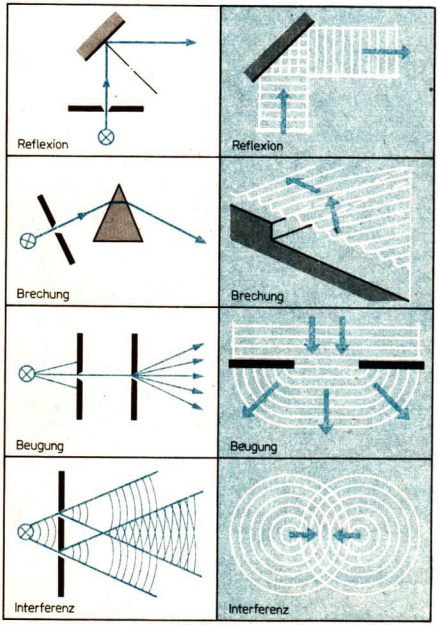
123/3 Beziehungen zwischen der Welle, dem Augenblickswert der Welle und der Schwingung an einem ausgewählten Ort
Die Welle breitet sich von links nach rechts aus und passiert die Stelle P_x. Die Welle ist durch einen Augenblickswert grafisch wiedergegeben. Die Schwingung am Ort P_x ist grafisch gesondert aufgetragen.

Eigenschaften der Welle. Mit der Ausbreitung der Welle ist eine Energiefortleitung ohne Transport von Teilchen verbunden. Die übertragene Energie hängt dabei von der Größe der Amplitude ab, sie ist dem Quadrat der Wellenamplitude proportional. ①

► **Eine Welle spiegelt einen Vorgang wider, bei dem Energie übertragen, jedoch kein Stoff transportiert wird, und der durch zeitlich und örtlich periodische Änderungen einer physikalischen Größe beschrieben wird.**

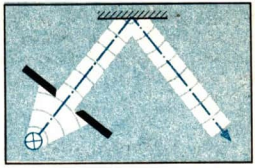
$$y = f(s, t) \qquad (99)$$

Wasserwellen, Schallwellen, Hertzsche Wellen und Lichtwellen zeigen in vielerlei Hinsicht ein gleiches Verhalten beim Auftreffen auf Hindernisse. Allen ist gemeinsam, daß sie an den Hindernissen reflektiert und gebrochen werden, daß Beugungen vorkommen und daß Interferenzen auftreten (Bild 124/1). ②



124/1

Analogiebetrachtungen zwischen verschiedenen Wellenarten dienen dazu, anhand schon bekannter Muster das Verhalten anderer Wellenarten besser beschreiben zu können und damit auch ihr Wesen besser verstehen zu lernen. Ein Vergleich der Bilder in 124/1 zeigt, daß beispielsweise in der Spalte „Wasserwellen" ausschließlich Wellenflächen und in der Spalte „Lichtwellen" fast ausschließlich Lichtbündel bzw. Lichtstrahlen gezeichnet worden sind.
Ausgangspunkt der Darstellungen ist in beiden Fällen zunächst einmal das im Experiment Sichtbare, nämlich die Ausbreitungen von Wellenflächen bei der Ausbreitung von Wasserwellen in einer Wellenwanne und der geradlinige Verlauf der Lichtbündel in der optischen Versuchsanordnung. Auf Grund der Wellenvorstellung vom Licht werden nun den Lichtbündeln ähnlich wie bei den Wasserwellen auch Wellenflächen zugeordnet. In Bild 125/1 sind unter Vernachlässigung der Beugung die Wellenflächen in das Lichtbündel zusätzlich eingezeichnet worden.
Das Bild zeigt nun, daß der Lichtstrahl die Richtung der Wellenausbreitung angibt und auf den Wellenflächen – zumindest aber auf kleinen Ausschnitten aus der Wellenfläche – senkrecht steht. Der Lichtstrahl ist damit Wellen(flächen)normale. ③



125/1 Lichtbündel, Richtung der Lichtwellen

Interferenz des Lichtes

55

In den Jahren 1801/02 gelang es Thomas Young, optische Beugungserscheinungen und die Interferenzfarben dünner Blättchen durch die Interferenz des Lichtes zu erklären und die Wellenlängen des Lichtes zu messen. 1807 führte er den grundlegenden Versuch „Beugung des Lichtes am Doppelspalt" durch.

Augustin Jean Fresnel war seit 1815 mit der Ausarbeitung einer Theorie der Beugungs- und Interferenzerscheinungen beschäftigt und untersuchte 1816 die Interferenz durch Reflexion an dem nach ihm benannten Doppelspiegel.
Seit 1822 führte Fraunhofer Lichtwellenlängenbestimmungen mit Hilfe feiner Draht- und Ritzgitter durch.

Interferenzversuche sind für das theoretische Verständnis der Lichtausbreitung und für die praktische Anwendung gleichermaßen von großer Bedeutung. Vor allem aber kann man das Wesen des Lichtes tiefer erfassen, als es mit Hilfe der Strahlenoptik gelingt.

125/2 Augustin Jean Fresnel
geb. 1788, verst. 1827

① Erklären Sie diese Aussage am Beispiel eines Holzstückchens, das auf einer wellig bewegten Wasseroberfläche schwimmt!
② Beschreiben Sie die skizzierten Versuchsanordnungen, und vergleichen Sie analoge Fälle miteinander!
③ Welche Form haben die Wellenflächen im freien Raum um eine punktförmige Lichtquelle? Welche Form haben sie hinter einer schmalen Spaltblende bei senkrechtem Lichteinfall ebener Wellenflächen?

An die erfolgreiche Durchführung der genannten Experimente sind stets bestimmte Bedingungen geknüpft. Werden diese Bedingungen – die noch näher beschrieben werden – nicht eingehalten, dann zeigen die Experimente nicht den gewünschten Erfolg, und es treten keine Interferenzen auf. Um diese Behauptung zu untermauern, soll noch einmal der Mechanismus der Überlagerung von Wasserwellen betrachtet werden.

Bei der Ausbreitung von Wasserwellen kann man zeigen, daß sich die Wellen ungestört überlagern und bei gleicher Erregerfrequenz ruhende Interferenzfiguren (auch Interferenzmuster genannt) erzeugen. Im Interferenzbereich gibt es Stellen, an denen sich die Wasseroberfläche recht heftig auf und ab bewegt (Wellenbauch), während sie an anderen Stellen dauernd relativ ruhig bleibt (Wellenknoten). Zur Herleitung der Interferenzgleichung unter Nutzung der angegebenen mathematischen Beziehungen vgl. Bild 126/1 bis 4!

Von zwei Erregerzentren A_1 und A_2 mit dem Abstand b breiten sich kreisförmig Wellen aus (Bild 126/1). Die hellen Streifen stellen die Wellenberge, die dunklen Streifen stellen die Wellentäler dar. Im Punkt P (Bild 126/2) beträgt die Weglängendifferenz $\Delta e = 1\ \lambda$. Dort entsteht ein Wellenbauch.

Zeichnet man durch P eine Gerade parallel zu $\overline{A_1A_2}$, so kann man entlang dieser Geraden eine Folge von Wellenbäuchen und Wellenknoten beobachten. Die Abstände zwischen zwei Wellenbäuchen lassen sich messen.

Für einen sehr großen Abstand $\overline{PA_1}$ bzw. $\overline{PA_2}$ folgt in erster Näherung (Bild 126/3 und Bild 126/4):

$\overline{PA_1} = \overline{PA_2} = e_1$.

Es gilt: $\sin\alpha = \dfrac{\Delta e}{b}$ und $\sin\alpha = \dfrac{s_1}{e_1}$.

Für die Weglängendifferenz von $\Delta e = 1\ \lambda$ ergibt sich:

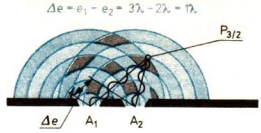
$$\frac{1\ \lambda}{b} = \frac{s_1}{e_1}.$$

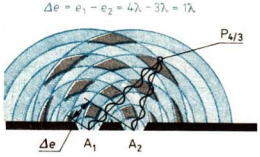
Für eine Weglängendifferenz $\Delta e = n \cdot \lambda$ (Bild 130/1) folgt

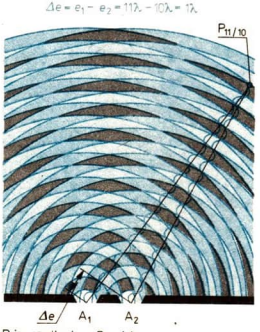
$$\frac{n \cdot \lambda}{b} = \frac{s_n}{e_n}.$$

Das Prinzip der ungestörten Überlagerung kann man auch bei Schallwellen und Hertzschen Wellen beobachten, wobei sich in den sogenannten Wellenbäuchen der Betrag der entsprechenden physikalischen Größe fortwährend ändert, während er in den Wellenknoten unverändert Null bleibt.

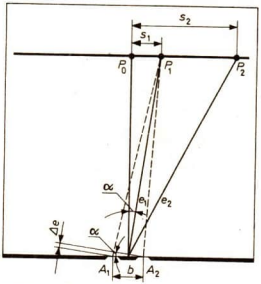
Kohärentes Licht. Beim Licht sind Überlagerungserscheinungen nicht unmittelbar festzustellen. Zwei getrennte Lichtquellen erzeugen keine beobachtbaren Interferenzfiguren; es tritt im Überlagerungsbereich des Lichtes lediglich eine Helligkeitsverstärkung auf. Dabei ist es gleichgültig, welcher Art die verwendeten Lichtquellen sind. In Klasse 10 wurde aber bereits das Wellenmodell des Lichtes entwickelt und







P im spaltnahen Bereich



126/1–4 Herleitung der Interferenzgleichung am Beispiel eines Doppelspalts für Wasserwellen

demzufolge die Ausbreitung des Lichtes als ein wellenartiger Vorgang gedeutet. Wie kommt es, daß beim Licht die Überlagerung nur schwer nachzuweisen ist? Die Ursachen für die schwer nachweisbare Überlagerung von Lichtwellen liegen im Mechanismus der Lichtausstrahlung begründet. Bei Verwendung von Licht unterschiedlicher Wellenlängen ändern sich die auftretenden Interferenzfiguren zeitlich und räumlich derart schnell, daß eine Beobachtung unmöglich ist. Um das zeitliche Ändern der Interferenzfiguren in Abhängigkeit von den verwendeten Wellenlängen des Lichtes zu vermeiden, sind gleiche Wellenlängen notwendig, d. h. es muß monochromatisches Licht verwendet werden. Um einen bestimmten räumlichen Bereich für das Auftreten der Interferenzfiguren zu erhalten, muß die Richtung der interferierenden Lichtbündel etwa übereinstimmen. Das erreicht man experimentell (vgl. auch Bild 128/4) mit dem Pohl'schen Interferenzversuch (Bild 127/1).

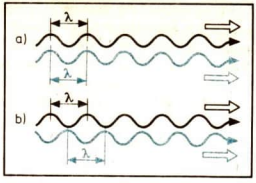
127/1 Pohl'scher Interferenzversuch

Bei der Deutung des Ausstrahlungsmechanismus des Lichtes geht man von der Vorstellung aus, daß einzelne Atome als elementare Lichtstrahler der Lichtquelle wirken und unabhängig voneinander und damit nicht jeweils gleichzeitig kurze „Lichtblitze" aussenden. Die Dauer der Ausstrahlung liegt in der Größenordnung von 10^{-8} s. Daraus ergibt sich, daß die elementaren Lichtstrahler keine endlos langen Wellenzüge liefern, sondern Wellenzüge begrenzter Länge. Je nach Umstand können diese Wellenzüge des Lichtes einige Zentimeter bis zu einigen Metern lang sein. Ferner ergibt sich aus der gegenseitigen Unabhängigkeit der elementaren Lichtstrahler in der Lichtquelle, daß die einzelnen Wellenzüge in ihrer Phase völlig regellos zueinander sind. Die unterschiedliche Phasenlage der Wellenzüge zueinander und die Längenbegrenzung der Wellenzüge bewirken, daß ohne weitere Hilfsmaßnahmen oder Hilfsmittel keine **stationären** Interferenzfiguren auftreten.

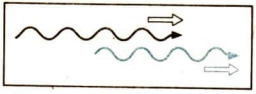
127/2 Kohärente Wellenzüge
Sendet ein beliebiger elementarer, d. h. atomarer Lichtstrahler innerhalb der Lichtquelle einen Wellenzug aus, so wird dieser in der Versuchsanordnung in zwei Wellenzüge aufgespalten und beide überlagern sich am Untersuchungsort mit einer bestimmten Weglängendifferenz oder einer bestimmten Phasendifferenz. Wird nach einer gewissen Zeit abermals ein Lichtblitz ausgestrahlt, so spaltet sich der dazugehörige Wellenzug wiederum in zwei Wellenzüge auf, die am Beobachtungsort zur Überlagerung kommen. Die geometrische Weglängendifferenz bzw. die Phasendifferenz haben wie im ersten Falle denselben Betrag. Das wiederholt sich für alle weiteren Lichtblitze, wobei die Zeitdifferenz zwischen zwei Lichtblitzen völlig bedeutungslos ist. Im Ergebnis all dieser Vorgänge treten Überlagerungen auf, die als helle oder dunkle Figuren erscheinen.

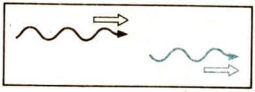
Interferenzversuche mit Licht können nur dann gelingen, wenn man erreicht, daß sich die Wellenzüge am selben Ort unter stets gleicher Phasenbeziehung treffen. Dazu ist notwendig, daß man künstlich zwei Lichtquellen schafft, deren „homologe elementare Lichtstrahler" stets in genau gleichem Rhythmus das Licht aussenden. Dazu spaltet man durch Reflexion oder Brechung der Lichtbündel eine wirklich vorhandene Lichtquelle in zwei scheinbare Lichtquellen auf und läßt das scheinbar von diesen virtuellen Lichtquellen ausgehende Licht interferieren (Bild 127/2). Licht, das so interferenzfähig gemacht worden ist, wird als **kohärentes** Licht bezeichnet. Unter **Kohärenz** versteht man also eine feste Phasenbeziehung zwischen zwei oder mehr Teilwellen gleicher Wellenlänge, die von demselben elementaren Lichtstrahler ausgehen.

Lichtwellen, die von verschiedenen Punkten der Lichtquelle, d. h. von verschiedenen elementaren Lichtstrahlern derselben Lichtquelle ausgehen, sind inkohärent. ① ②
Kommen kohärente Wellenzüge vollständig zur Überlagerung, so erhält man je nach Verstärkung oder Auslöschung extrem helle oder dunkle Interferenzstreifen, Interferenzringe usw. Die Wellenzüge sind in Bild 128/1 skizziert; der Einfachheit halber werden im Bild die interferierenden Lichtstrahlen parallel zueinander gezeichnet. Kommen die einzelnen Wellenzüge nur zum Teil zur Überlagerung, d. h. einzelne Enden der Wellenzüge bleiben ohne Interferenzpartner, so ergibt das eine nur mäßig helle Interferenzfigur in Form von hellen Streifen, hellen Ringen usw. (Bild 128/2). Die Dauer der Überlagerung ist im ersten Falle größer als im zweiten Falle.



128/1 Momentanbild einer vollständigen Überlagerung zweier Wellenzüge
a) Verstärkung, b) Auslöschung


128/2 Momentanbild einer unvollständigen Überlagerung zweier Wellenzüge


128/3 Momentanbild zweier Wellenzüge, die sich nicht überlagern

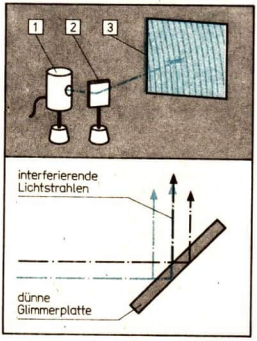
Interferenz durch Reflexion und Brechung 56

Interferenzfiguren lassen sich in mannigfaltiger Weise demonstrieren.

▼ Fällt Licht einer möglichst starken monochromatischen Lichtquelle auf eine hinreichend dünne, planparallele Platte, so können im reflektierten Licht Interferenzringe mit einem Durchmesser von mehreren Metern entstehen. Die interferierenden Lichtstrahlen erhält man hierbei durch die Reflexion an zwei parallelen Spiegeln, hier im Experiment durch die Reflexion und Brechung des Lichtes an den Grenzflächen der planparallelen Platte (Bild 128/4). ③

▼ Bestrahlt man eine Lamelle aus einer wäßrigen Seifenlösung, so entstehen sowohl in Durchsicht wie in Aufsicht Interferenzstreifen. Da sich das Wasser in der dünnen Seifenlamelle infolge seiner Schwere nach unten bewegt, erzeugt es somit eine schwach keilförmige Wasserschicht. Es treten parallele etwa horizontal liegende Interferenzstreifen gleicher Dicke auf (vgl. auch Bild 129/1). ④

Ein Sonderfall zur Interferenz am Keil ist die Interferenz an einer schalenförmig gekrümmten Glasplatte, die mit der gewölbten Fläche auf einer planparallelen Glasplatte liegt (Bild 129/2). Infolge der Kreisform der gewölbten Scheibe entstehen entsprechende kreisförmige Interferenzlinien, die man nach seinem Entdecker Newtonsche Ringe nennt. ⑤ ⑥



128/4 Interferenz an einer planparallelen Platte (nach Pohl)
1 – Lichtquelle
2 – Glimmerplatte
3 – Interferenzbild

Interferenz durch Beugung am Doppelspalt 57

Fällt Licht senkrecht auf einen Doppelspalt, so entstehen hinter dem Doppelspalt auf einem Auffangschirm helle und dunkle Interferenzstreifen. Handelt es sich dabei um Glüh-

licht, so sind die hellen Interferenzstreifen farbig. Wird mit monochromatischem Licht eingestrahlt, dann erscheinen die hellen Streifen in der Farbe des verwendeten Lichts.

Zur Erklärung des Phänomens sucht man (Bild 129/3) zu einem willkürlich festgelegten Punkt P in der Ebene der einen Spaltöffnung im Abstand Spaltbreite *a* plus Stegbreite *st* den dazugehörigen Punkt P′ in der Ebene der anderen Spaltöffnung. Die einander entsprechenden, gleichliegenden Punkte und die einander zugehörigen Strahlen bezeichnet man als homolog. Bei senkrechtem Lichteinfall werden beide Punkte P und P′ in der Spaltebene zu jeder Zeit von Wellenflächen gleicher Phase erreicht. Demzufolge schwingt das Licht in beiden Punkten synchron, die Lichtwellen werden somit in gleicher Erregungsphase zueinander weiter ausgestrahlt. Kommen diese Lichtwellen auf einem Auffangschirm zur Überlagerung, dann treten bei bestimmten mathematischen Beziehungen zwischen der Wellenlänge des Lichtes, der Spaltbreite *a*, der Stegbreite *st* und dem Ablenkwinkel α des Lichtes Maxima und Minima auf. Für diese Extremwerte der Energieverteilung auf dem Auffangschirm sind die Ablenkwinkel hinter dem Doppelspalt dadurch ausgezeichnet, daß die Weglängendifferenz zwischen zwei homologen Strahlen genau ein Vielfaches von λ oder ein ungradzahliges Vielfaches von $\frac{\lambda}{2}$ beträgt. ⑦

Maxima. Ist der Ablenkwinkel des Lichtes hinter dem Doppelspalt gerade so groß, daß die Weglängendifferenz zwischen Spalt und Auffangschirm $1 \cdot \lambda$ beträgt, dann tritt eine Verstärkung des Lichtes auf, d. h. es entsteht ein Maximum in Gestalt eines hellen Streifens. Es gilt:

$b \cdot \sin \alpha_1 = 1 \cdot \lambda$ (Maximum 1. Ordnung).

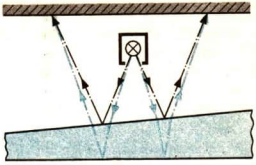
Bei einer Weglängendifferenz von $2 \cdot \lambda$ ergibt sich:

$b \cdot \sin \alpha_2 = 2 \cdot \lambda$ (Maximum 2. Ordnung).

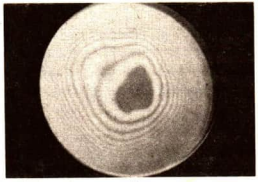
Allgemein gilt für eine Weglängendifferenz von $n \cdot \lambda$:

► **Maximum *n*. Ordnung**

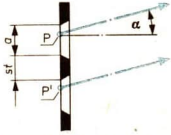
$$b \cdot \sin \alpha_n = n \cdot \lambda \qquad (100)$$



129/1 Interferenz an einer keilförmigen Schicht



129/2 Aufbau eines Newtonschen Glases und Interferenzbild



129/3 Doppelspalt mit zwei homologen Punkten und einem homologen Strahlenpaar

① Sind inkohärente Wellenzüge interferenzfähig?

② Erläutern Sie den Begriff „stationäre Interferenzfigur"!

③ Geben Sie die Weglängendifferenz der beiden interferierenden Lichtstrahlen an! Erklären Sie das Zustandekommen der Interferenzfiguren!

④ Erklären Sie das Zustandekommen der Interferenzfiguren am schwachen Keil der Seifenlamelle! Deuten Sie den Terminus „Interferenzstreifen gleicher Dicke"!

⑤ Erklären Sie das Zustandekommen der Newtonschen Ringe! Warum sind die Interferenzfiguren in Aufsicht besser zu erkennen als in Durchsicht? Wann ist die Mitte der konzentrischen Ringe hell und wann ist die Mitte dunkel?

⑥ Beschreiben Sie ein Verfahren, mit dem man die Ebenheit bzw. die gleichmäßige Krümmung von Glaskörpern, Glaslinsen usw. prüfen und auch messen kann!

⑦ Interpretieren Sie den Begriff „homolog"! Was versteht man in der Biologie und in der Chemie unter „homolog"?

Die Folge der natürlichen Zahlen n geht nur soweit, wie der Sinus des Ablenkwinkels seinem Betrage nach stets kleiner als Eins bleibt.
Die Überlegungen, die bisher für ein ausgewähltes Punktepaar P und P′ angestellt worden sind, gelten gleichermaßen für alle beliebigen homologen Punkte des Doppelspalts. ① ②

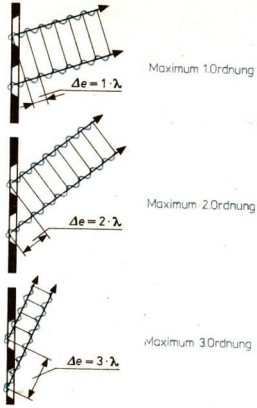
Interferenzgleichung. Unter Einbeziehung des Abstandes zwischen Doppelspalt und Auffangschirm kann man ähnlich wie bei der Ausbreitung von Wasserwellen eine Interferenzgleichung für den Doppelspalt ableiten (/ S. 126). Dabei gelten folgende Beziehungen:

$$\sin \alpha_n = \frac{\Delta e}{b} \text{ und } \sin \alpha_n = \frac{s_n}{e_n},$$

wobei s_n der Abstand zwischen dem Maximum 0. Ordnung und dem ausgewählten hellen Interferenzstreifen und e_n der Abstand zwischen dem Interferenzstreifen und der Mitte des Doppelspalts ist. Durch Gleichsetzen erhält man

$$\frac{\Delta e}{b} = \frac{s_n}{e_n}.$$

Für die Maxima der Wellenüberlagerung, d. h. für die hellen Interferenzstreifen folgt die Interferenzgleichung in der speziellen Form



130/1 Strahlenverlauf zur Entstehung der Maxima hinter einem Doppelspalt für Weglängendifferenzen
$\Delta e = 1 \cdot \lambda$, $\Delta e = 2 \cdot \lambda$, $\Delta e = 3 \cdot \lambda$

► **Interferenzgleichung für Maxima**

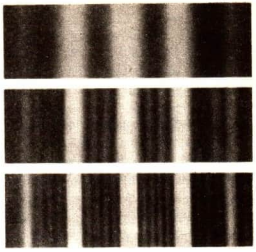
$$\frac{n \cdot \lambda}{b} = \frac{s_n}{e_n}$$
mit $n = 1, 2, 3, \ldots$ (101)

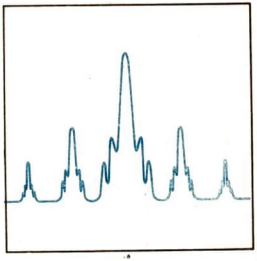
Die Interferenzgleichung für den Doppelspalt bildet gleichzeitig auch die Grundlage zur rechnerischen Bestimmung der Interferenzen am Mehrfachspalt. ③

Interferenz durch Beugung am Gitter 58

Die experimentelle Erfahrung lehrt, daß mit zunehmender Spaltanzahl die beim Doppelspalt auftretenden Maxima schmaler und heller werden und daß weitere Nebenmaxima und Nebenminima auftreten (Bild 131/1). Bei einem optischen Gitter mit sehr vielen Spalten sind die sogenannten Hauptmaxima besonders ausgeprägt. Bei einem guten Gitter kommen etwa 17000 Spaltöffnungen auf 1 cm Gitterlänge.
Sind in einer Blende anstelle von nur 2 oder 4 Spalten zahlreiche Spalte gleicher Spaltbreite bei immer derselben Stegbreite angebracht, so spricht man von einem optischen **Beugungsgitter**, oder kurz von einem **Gitter**. Der Abstand homologer Punkte zweier benachbarter Spalten heißt **Gitterkonstante**. Die Gitterkonstante b ist gleich der Summe aus Spaltbreite a und Stegbreite st.

Fällt Licht auf ein Gitter, dann wird das Licht hinter der Blende von jeder einzelnen Spaltöffnung in alle Richtungen gebeugt. Demzufolge ist die Kombinationsmöglichkeit interferierbarer Lichtstrahlen wesentlich größer als beim Doppelspalt oder beim Viererspalt. Die Analyse der Interferenzerscheinungen zeigt aber, daß im Vergleich zu den Beugungen am Doppelspalt und am Viererspalt keine wesentlich neuen Erscheinungen auftreten. Mit Erhöhung der Spaltanzahl werden die Hauptmaxima, wie sie schon beim Doppelspalt auftreten, nur noch schmaler und noch heller; dazwischen treten weitere Nebenmaxima und Nebenminima auf, wobei die Intensität der Nebenmaxima mit zunehmender Spaltanzahl kleiner wird. Im Spektrum herrscht schließlich bei hinreichend großer Spaltanzahl zwischen den Hauptmaxima Dunkelheit. Dadurch kann eine deutliche Trennung der Hauptmaxima erreicht werden. ④





131/1 Beugungserscheinung hinter einem Zweierspalt, Viererspalt, Gitter und Energieverteilung im Gitterspektrum

Zusammenfassend kann man feststellen:

Bei der Beugung des Lichtes an einem Gitter treten Hauptmaxima unter der Beziehung $\sin \alpha_n = \frac{n \cdot \lambda}{b}$ mit $n = 1, 2, 3, \ldots$ auf, wobei λ die Wellenlänge des verwendeten Lichtes und b die Gitterkonstante ist. Die Hauptmaxima sind um so intensiver und um so schmaler, je größer die Anzahl der beugenden Öffnungen im Gitter ist. ⑤ ⑥

Eine Analyse der Formel zeigt:

► **Die Ablenkung des Lichtes am Gitter ist proportional der Wellenlänge des Lichtes und umgekehrt proportional der Gitterkonstante.**

Hieraus ergibt sich sofort, daß die Ablenkwinkel für die einzelnen Farben des Lichtes unterschiedlich sind und daß bei Verwendung von Glühlicht Beugungsspektren auftreten. ⑦ ⑧ ⑨

---

① Leiten Sie sinnentsprechend eine mathematische Beziehung für die Minima her!

② Was wird man vermutlich unter einem Maximum 0. Ordnung verstehen? Geben Sie den entsprechenden Strahlenverlauf an!

③ Leiten Sie sinnentsprechend auch eine Interferenzgleichung für dunkle Streifen, d. h. für Minima ab!

④ Weisen Sie nach, daß beispielsweise beim Übergang vom Zweierspalt zum Viererspalt im Zwischenraum zwischen zwei Maxima des Doppelspalts zusätzlich mehrere Minima neu auftreten! Diskutieren Sie entsprechend den Übergang vom Viererspalt zum Achterspalt!

⑤ Erläutern Sie die Aussage durch selbstgewählte Beispiele!

⑥ Vergleichen Sie das Beugungsspektrum mit dem entsprechenden Dispersionsspektrum!

⑦ Wie wird das Beugungsspektrum bei Verwendung einer monochromatischen Lichtquelle aussehen?

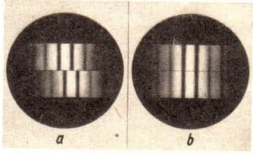
⑧ Entwerfen Sie eine Versuchsanordnung zur Demonstration eines Beugungsspektrums! Greifen Sie dabei auf Versuchsanordnungen zur Erzeugung eines Dispersionsspektrums zurück!

⑨ Bestimmen Sie in einem Schülerexperiment mit Hilfe eines Gitters die Wellenlänge des roten und des blauen Lichtes! Stellen Sie die benötigte Interferenzgleichung selbst auf!

Beugungsgitter werden in den Gitterspektralapparaten zur Zerlegung des Lichtes verwendet, wobei nicht nur sogenanntes sichtbares Licht, sondern auch ultrarotes und ultraviolettes Licht zerlegt werden kann. Mit Hilfe mechanischer Gitter und mit Kristallen läßt sich auch Röntgenlicht spektral zerlegen.

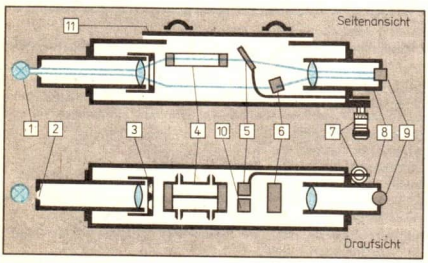
Gitterspektralapparate. In den Gitterspektralapparaten wird das Licht mit Hilfe eines Beugungsgitters in seine Bestandteile zerlegt, wobei im Gitterspektrographen das Spektrum mit einer fotografischen Platte aufgenommen und gespeichert und im Gitterspektrometer die Lichtenergie hinter dem Austrittsspalt mit einem thermischen oder lichtelektrischen Strahlungsmeßgerät bestimmt wird. Der erste Typ wird überwiegend für Untersuchungen im ultravioletten und im sichtbaren Bereich des Spektrums benutzt. Der zweite Typ findet auch für Untersuchungen im infraroten Bereich des Spektrums Anwendung. Gitterspektroskope dienen der individuellen Betrachtung der Spektren.

Interferometer. Zur genauen Messung von Längen, Winkeln, Brechungszahlen ... dienen oft sogenannte Interferometer. Interferometer sind optische Geräte, bei denen die Interferenz des Lichtes die Grundlage der jeweiligen Messung und die Lichtwellenlänge die Meßeinheit ist.
Interferometer (Bild 132/2) sind im Prinzip so aufgebaut, daß ein Strahlenbündel durch Brechung oder Reflexion in zwei kohärente Bündel aufgespalten wird. Die beiden Teilbündel durchlaufen unterschiedliche Wege und werden dann wieder vereinigt, wobei sie miteinander interferieren. Aus dem Interferenzbild kann man auf die Wegunterschiede schließen.
Im Interferometer werden durch den Doppelspalt (3) aus dem vom Leuchtspalt (2) herkommenden Licht zwei kohärente Bündel ausgeblendet. Diese werden dann in zwei übereinander liegende Lichtbündelpaare geteilt.
Das untere Lichtbündelpaar verläuft in Luft, wird dann im Fernrohr (8) vereinigt und liefert die untere Hälfte der in Bild 132/1 dargestellten Interferenzbilder.

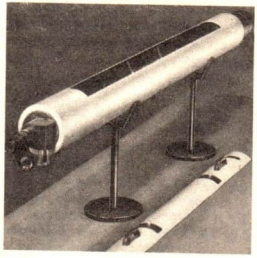


132/1 Interferenzbilder im Okular des Laboratorium-Interferometers
a) Durch unterschiedliche optische Weglängen seitlich verschobenes oberes Interferenzbild
b) Durch Nachstellen erreicht man Übereinstimmung zwischen den beiden Interferenzbildern

132/2



132/3 Laboratorium-Interferometer des VEB Carl Zeiss JENA



Die Ablenkplatte (6) lenkt die untere Hälfte etwas nach oben ab, damit sie gut im Gesichtsfeld liegt.

Das obere Lichtbündelpaar durchläuft die Kammern (4) und die Kompensatorplatten (5) und (10).

Sind die beiden Kammern mit dem gleichen Stoff gefüllt und nehmen die Kompensatorplatten die gleiche Lage ein, so stimmt das entstehende Interferenzbild mit dem des unteren Bündelpaares überein. Enthalten dagegen die Kammern verschiedene Flüssigkeiten oder Gase, so verschiebt sich auf Grund der unterschiedlichen optischen Weglängen das obere Interferenzbild.

Durch Neigen der beweglichen Kompensatorplatte (5) mit Hilfe der Meßschraube (7) wird die Verschiebung rückgängig gemacht.

Die vorbeiwandernden Streifen werden gezählt, und daraus wird die Differenz aus den Brechzahlen der beiden Stoffe errechnet.

Zusammenfassung

59

1. Vorüberlegung

Licht breitet sich geradlinig aus, es wird reflektiert und gebrochen; diese Sachverhalte kann man mit dem Modell Lichtstrahl beschreiben.

2. Problemstellung

Licht breitet sich in besonderen Fällen, wie zum Beispiel hinter Kanten und Spalten, nicht geradlinig aus, es wird gebeugt; diesen Sachverhalt kann man nicht mit dem Modell Lichtstrahl beschreiben, sondern es muß ein anderes Modell gefunden werden.

3. Hypothese

Wenn bei der Lichtausbreitung Beugungserscheinungen auftreten, dann muß man zur Erklärung des Sachverhalts erfahrungsgemäß das Modell Lichtwelle heranziehen.
Diese Erklärung trifft zunächst nur wahrscheinlich zu, es ist eine hypothetische Erklärung.

4. Folgerung

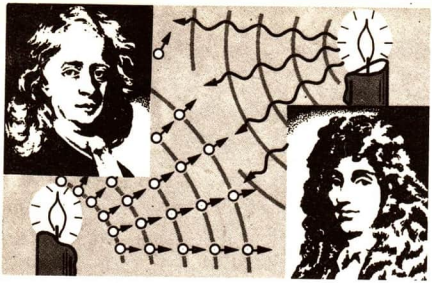
Aus der Hypothese „Licht als Welle" ergibt sich die Prognose: Versuche am Doppelspalt bzw. am Gitter lassen erwarten, daß gebeugtes Licht interferiert. Die Interferenzversuche bestätigten die Richtigkeit der Hypothese.

5. Erkenntnis

Das Modell Lichtstrahl kann präzisiert werden durch Deutung als Normale der Lichtwelle.

6. Anwendung

Die Interferenz wird beispielsweise zur Präzisionslängenmesssung genutzt. Michelson bediente sich der Interferenz zur Vermessung des Urmeters.



Quantenhafte Absorption von Licht

Mehr als zwei Jahrhunderte dauerten die Auseinandersetzungen der Naturwissenschaftler um das Wesen des Lichtes. In der von I. Newton aufgestellten Korpuskulartheorie wurde angenommen, daß das Licht aus kleinen Teilchen, sogenannten Korpuskeln, besteht. C. Huygens betrachtete in seiner Wellentheorie das Licht als Welle.

Die Untersuchung der Beugung und Interferenz des Lichtes führte zu einer Reihe wichtiger Ergebnisse. Diese Erscheinungen ließen sich zunächst vollständig mit der Annahme erklären, daß Licht eine Wellenerscheinung ist. Deshalb bekannten sich immer mehr Physiker zu dieser Auffassung. Es schien so, als seien die Auseinandersetzungen um das Wesen des Lichts zugunsten der Wellentheorie des Physikers Huygens entschieden. Doch bald darauf wurden Beobachtungen gemacht, die dieser Auffassung widersprachen. Sie betrafen den äußeren lichtelektrischen Effekt. Die experimentellen Ergebnisse belegten, daß Licht nicht vollständig mit dem Wellenmodell beschreibbar ist. Sie deuteten darauf hin, daß Licht aus Teilchen besteht. Um auf die Frage: Was ist Licht? eine Antwort geben zu können, waren sorgfältige experimentelle Untersuchungen und die Deutung ihrer Ergebnisse erforderlich. ①

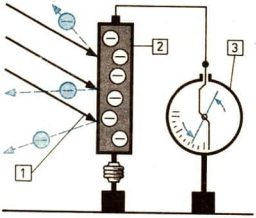
Der äußere lichtelektrische Effekt

60

Bestrahlt man eine negativ aufgeladene Zinkplatte mit kurzwelligem Licht, so verringert sich ihre Ladung. Beim Bestrahlen einer positiv geladenen Platte verändert sich der Aufladungszustand nicht (Bild 134/2).
Dieser Effekt tritt bei allen Metallen auf, er ist jedoch an die Erfüllung bestimmter Voraussetzungen (s. u.) gebunden. ② ③ ④

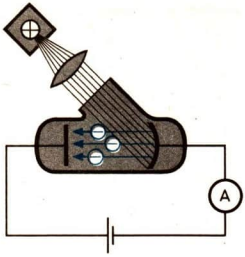
Kurzwelliges Licht kann aus Metallen Elektronen herauslösen. Man nennt diese Erscheinung den äußeren lichtelektrischen Effekt.

Um das Wesen des Lichtes zu ergründen, sollen die Zusammenhänge beim äußeren lichtelektrischen Effekt näher untersucht werden. Dazu ist es notwendig, die durch Licht aus dem Metall herausgelösten Elektronen aufzufangen.



134/2 Versuch zum äußeren lichtelektrischen Effekt
1 – UV-Strahlung
2 – Zinkplatte
3 – Elektrometer

▽ **Experimentelle Untersuchung des äußeren lichtelektrischen Effektes.** Anstelle der bisher verwendeten Metallplatte findet die Katode einer Vakuumfotozelle Verwendung (Bild 135/1). Die Beleuchtung erfolgt mit einer Glühlampe. Katode und Anode der Fotozelle sind mit einer Spannungsquelle verbunden. Der Strommesser dient zur Messung des Stromes, der durch den äußeren lichtelektrischen Effekt verursacht wird. ⑤



135/1 Versuchsaufbau zur qualitativen Untersuchung des äußeren lichtelektrischen Effektes

▽ Die Glühlampe wird eingeschaltet. Der Zeiger des Strommessers schlägt aus. Die Glühlampe wird der Fotozelle allmählich genähert. Die Stromstärke nimmt dabei ständig zu.

Die Stromstärke ist ein Maß für die Anzahl der Elektronen, die bei Beleuchtung je Zeiteinheit aus der Katode herausgelöst werden. Infolge der Annäherung der Glühlampe an die Fotozelle wächst die Beleuchtungsstärke. Dadurch werden je Zeiteinheit mehr Elektronen aus der Katode herausgelöst.

▽ Bei geringer Beleuchtungsstärke (großer Abstand zwischen Glühlampe und Fotozelle) werden nacheinander verschiedenfarbige Filter in den Strahlengang gebracht. Sie lassen nur einfarbiges Licht bestimmter Wellenlänge hindurch. Bei violettem, blauem, grünem und gelbem Licht tritt ein Ausschlag des Strommessers auf, bei orangefarbenem und rotem Licht zeigt er keinen Fotostrom an.

▽ Die Intensität des orangefarbenen und des roten Lichtes wird durch Annähern der Glühlampe an die Fotozelle erhöht. Der Zeiger des Meßinstrumentes schlägt nicht aus. Auch bei intensiver Beleuchtung mit Licht dieser Farben tritt kein Fotostrom auf.

Die Experimente zeigen, daß nur kurzwelliges Licht in der Lage ist, Elektronen aus Metallen herauszulösen. Bei langwelligem Licht kann der Effekt selbst durch noch so große Intensität nicht hervorgerufen werden.
Die Untersuchung des äußeren lichtelektrischen Effektes führte zu folgenden wichtigen Ergebnissen:

- **Der Fotostrom nimmt mit der Beleuchtungsstärke des eingestrahlten Lichtes zu.**
- **Nur bei Bestrahlung mit kurzwelligem Licht tritt ein Fotostrom auf. Langwelliges Licht bewirkt selbst bei noch so großer Beleuchtungsstärke keinen Strom.**

Wie zu Beginn des Abschnittes angegeben, bieten sich zur Erklärung der experimentellen Ergebnisse zwei Modelle an, das

---

① Erklären Sie die Erscheinungen Beugung und Interferenz des Lichtes auf der Grundlage der Wellentheorie!
② Beschreiben Sie ein einfaches Experiment zum Nachweis des äußeren lichtelektrischen Effektes!
③ In welchen Bauelementen findet der Fotoeffekt Anwendung?
④ Nennen Sie Beispiele für die praktische Anwendung fotoelektrischer Bauelemente!
⑤ Erläutern Sie die Schaltung im Bild 135/1!

Teilchenmodell und das Wellenmodell. Dem Teilchenmodell liegen folgende wichtige Aussagen zugrunde:

– Teilchen befinden sich zu jedem Zeitpunkt an einem bestimmten Ort und besitzen eine bestimmte Geschwindigkeit.

– Sie sind diskontinuierlich im Raum verteilt.

– Jedes Teilchen bewegt sich auf einer bestimmten Bahn.

Demgegenüber gründet sich das Wellenmodell auf folgende wesentliche Aussagen:

– Wellen sind räumlich ausgedehnt.

– Sie sind durch die räumlich und zeitlich periodische Änderung einer physikalischen Größe gekennzeichnet.

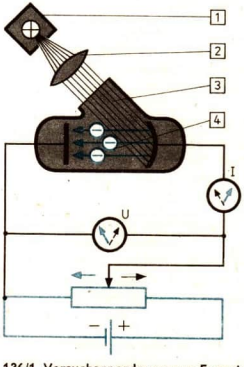
– Bei der Überlagerung von Wellen treten Interferenzmuster auf.

Das erste experimentelle Ergebnis entspricht den Erwartungen. Die Tatsache, daß mit zunehmender Beleuchtungsstärke die Anzahl der je Zeiteinheit aus dem Metall herausgelösten Elektronen wächst, läßt sich sowohl auf der Grundlage der Wellen- wie auch der Korpuskulartheorie des Lichtes erklären. ①

Das zweite Ergebnis ist allein auf der Grundlage des Wellenmodells des Lichtes nicht erklärbar.
Nach dem Wellenmodell stellt die Zunahme der Beleuchtungsstärke eine Vergrößerung der Wellenamplitude dar. Je größer aber die Amplitude der Welle ist, um so mehr Energie überträgt sie je Zeiteinheit. Eine Zunahme der Beleuchtungsstärke müßte also in jedem Falle einen Fotostrom bedingen. Das Experiment zeigt jedoch, daß das nicht erfolgt.

Energie der Fotoelektronen. Die bisher gewonnenen Informationen reichen für eine Klärung des Problems noch nicht aus. Es ist deshalb notwendig, weitere Untersuchungen durchzuführen. Ihr Ziel besteht darin, Aussagen über die kinetische Energie der Fotoelektronen zu gewinnen. Aus den diskutierten Messungen ist nur bekannt, unter welchen Bedingungen Elektronen aus der Katode herausgelöst werden und wie man die Anzahl der herausgelösten Elektronen beeinflussen kann.
Die Bestimmung der kinetischen Energie der Elektronen ist dadurch möglich, daß man sie nicht durch ein elektrisches Feld beschleunigt, wie das in den vorangegangenen Experimenten geschah (vgl. Bild 135/1), sondern sie durch ein meßbares elektrisches Gegenfeld abbremst. ② ③

▽ **Experimentelle Bestimmung der Energie der Fotoelektronen.** Die Fotozelle (Bild 136/1) wird mit einfarbigem, mit violettem Licht bestrahlt. Dazu wird zunächst eine Glühlampe mit kleiner Leistungsaufnahme verwendet, wodurch die Beleuchtungsstärke gering ist. Es fließt ein Fotostrom. Nun erhöht man die Gegenspannung so weit, daß der Ausschlag am Strommesser auf 0 zurückgeht. Die dazu



136/1 Versuchsanordnung zur Energiemessung beim äußeren lichtelektrischen Effekt
1 – Lichtquelle
2 – Kondensor
3 – Licht
4 – Fotostrom
Die Feldstärke kann mittels eines Spannungsteilers zum Einstellen der Gegenspannungen variiert werden.
Hat man die Gegenspannung von 0 beginnend gerade so weit vergrößert, daß der Ausschlag am Strommesser auf 0 zurückgegangen ist, so werden alle Fotoelektronen so stark abgebremst, daß sie die Anode nicht mehr erreichen.

erforderliche Spannung wird gemessen. Das Experiment wird mit großer Beleuchtungsstärke wiederholt. Wiederum wird die Gegenspannung bestimmt, die notwendig ist, um den Fotostrom zu verhindern. Beide gemessenen Spannungen stimmen überein.

In dem beschriebenen Experiment ist in beiden Fällen ein gleich großes elektrisches Gegenfeld erforderlich, um zu erwirken, daß die schnellsten Fotoelektronen die Anode nicht mehr erreichen. Das bedeutet, daß die kinetische Energie der Fotoelektronen unabhängig von der Beleuchtungsstärke des eingestrahlten Lichtes ist. Die Beleuchtungsstärke hat nur auf die Anzahl der je Zeiteinheit herausgelösten Elektronen Einfluß.

▽ Das Violettfilter wird nachfolgend durch ein Blaufilter, ein Grünfilter und schließlich ein Gelbfilter ersetzt. In allen Fällen wird die Gegenspannung nach dem oben beschriebenen Verfahren ermittelt (Tabelle 137/1).

Tabelle 137/1 Verwendete Beleuchtungsfrequenzen und gemessene Gegenspannungen

Lichtfarbe	Frequenz des Lichtes f in $10^{14}\ s^{-1}$	Gegenspannung U in V
violett	7,4	1,00
blau	6,5	0,85
grünblau	6,1	0,56
grün	5,5	0,26
gelb	4,9	0,10

Beim Betrachten der Meßergebnisse fällt sofort auf: Je geringer die Frequenz des eingestrahlten Lichtes ist, um so kleiner ist die kinetische Energie der aus der Katode herausgelösten Elektronen. Aus der gemessenen Spannung U kann die kinetische Energie der schnellsten Elektronen nach der Gleichung berechnet werden

$$\frac{1}{2} m_e \cdot v^2 = e \cdot U. \qquad (102)$$

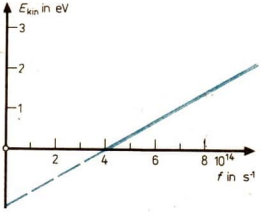
Als Einheit der Energie wird im atomaren Bereich häufig das Elektronenvolt (eV) benutzt.
Wird ein Elektron mittels einer Spannung von 1 V beschleunigt oder abgebremst, so nimmt seine kinetische Energie um ein Elektronenvolt zu oder ab. Zwischen dem Elektronenvolt und der in der Makrophysik gebräuchlichen Energieeinheit Wattsekunde besteht die Beziehung
$1\ Ws = 1\ V \cdot 1\ As = 1\ V \cdot 6{,}24 \cdot 10^{18} \cdot e = 6{,}24 \cdot 10^{18}\ eV.$

---

① Versuchen Sie, das Ergebnis des ersten Experimentes zum lichtelektrischen Effekt
a) auf der Grundlage des Wellenmodells,
b) auf der Grundlage des Teilchenmodells zu deuten!
② Erläutern Sie die Schaltung in Bild 136/1!
③ Beschreiben und erklären Sie die experimentelle Bestimmung der kinetischen Energie der Fotoelektronen!

Die kinetische Energie der Elektronen ergibt sich aus den Versuchsergebnissen unmittelbar in dieser Einheit. Bei violettem Licht wurde z. B. eine Gegenspannung von 1,0 V gemessen (vgl. Tabelle 137/1). Die schnellsten Elektronen besitzen somit eine kinetische Energie von 1,0 eV. Stellt man die kinetische Energie der Elektronen als Funktion der Frequenz grafisch dar, so erhält man eine Gerade (Bild 138/1).
Daraus folgt, daß eine lineare Beziehung zwischen der kinetischen Energie der Elektronen und der Frequenz des eingestrahlten Lichtes besteht.
Die Experimente präzisieren die Untersuchungsergebnisse von S. 135 wie folgt:

- **Mit zunehmender Beleuchtungsstärke nimmt die Anzahl der je Zeiteinheit ausgelösten Fotoelektronen zu.**
- **Die kinetische Energie der einzelnen Fotoelektronen ist von der Beleuchtungsstärke unabhängig.**
- **Die Energie der Fotoelektronen wächst linear mit der Frequenz des eingestrahlten Lichtes.** ①



138/1 Abhängigkeit der kinetischen Energie der Elektronen von der Frequenz

Grenzfrequenz. Die Gerade in Bild 138/1 schneidet die Abszissenachse bei etwa $4 \cdot 10^{14}$ Hz. Wird die Fotozelle mit Licht dieser Frequenz bestrahlt, so besitzen die Elektronen die kinetische Energie 0. Die Energie des auftreffenden Lichtes reicht zwar noch aus, um die Elektronen aus der Katode herauszulösen, jedoch nicht mehr, um ihnen darüber hinaus eine bestimmte kinetische Energie zu verleihen, so daß sie sich von der Katode wegbewegen. Diese Frequenz nennt man **Grenzfrequenz.** Sie besitzt für verschiedene Metalle verschiedene Werte. Damit wird das Ergebnis des 2. und 3. Versuches, daß langwelliges Licht selbst bei noch so großer Intensität keinen Fotostrom bewirkt, nicht nur bestätigt; es läßt sich auch mit den neuen Untersuchungsergebnissen erläutern. Hierauf wird im nächsten Abschnitt eingegangen. Jedoch ist es nicht möglich, die beobachteten Zusammenhänge auf der Grundlage der Wellentheorie des Lichtes zu erklären.

Lichtquanten 61

Die experimentelle Untersuchung des äußeren lichtelektrischen Effektes im vorangegangenen Abschnitt führte zu einigen sehr bedeutsamen Ergebnissen. Es wurde bereits darauf hingewiesen, daß einige der ermittelten Zusammenhänge im Widerspruch zum Wellenmodell des Lichtes stehen. ②

Nachdem sich dieses Modell als ungeeignet erwiesen hat, um alle Eigenschaften des Lichtes zu erklären, liegt die Frage nahe, ob die experimentellen Ergebnisse bei der Unter-

suchung des lichtelektrischen Effektes mit dem Teilchenmodell gedeutet werden können.
Betrachtet man das eingestrahlte Licht als Strom kleiner kompakter Lichtteilchen, so bedeutet eine Zunahme der Beleuchtungsstärke eine Vergrößerung der Anzahl dieser Teilchen, die in der Zeiteinheit auftrifft. Somit ist es verständlich, daß mit zunehmender Beleuchtungsstärke die Anzahl der je Zeiteinheit ausgelösten Fotoelektronen zunimmt. Es läßt sich jedoch auf der Grundlage dieses Modells nicht erklären, daß die Energie der Fotoelektronen von der Frequenz des Lichtes abhängt. Weiterhin bleibt die Existenz einer Grenzfrequenz unverständlich.

Weder das Wellenmodell noch das Teilchenmodell allein sind geeignet, um die vielfältigen Erscheinungen des Lichtes vollständig zu beschreiben.

Diese Tatsache ist nicht verwunderlich. Die Modelle „Welle" und „Teilchen" stammen aus der Makrophysik. Bei ihrer Anwendung auf Bereiche der Mikrophysik mit ihren spezifischen Gesetzmäßigkeiten muß man Abweichungen geradezu erwarten. ③

Die Physiker unternahmen viele Versuche, um das Verhalten des Lichts, das beim Zugrundelegen der Modelle „Welle" und „Teilchen" so widersprüchlich erscheint, zu erklären. Einen entscheidenden Fortschritt erzielte 1905 Albert Einstein. Unter Berücksichtigung der Strahlungsgesetze gelangte er zu folgender Auffassung:
Das Licht besteht aus einzelnen, nicht weiter zerlegbaren „Energieportionen", den **„Lichtquanten"** oder **„Photonen"**. Jedes Photon besitzt die Energie

$$E = h \cdot f. \qquad (103)$$

Dabei ist f die Frequenz des Lichtes und h eine von M. Planck gefundene, fundamentale Naturkonstante, das **Plancksche Wirkungsquantum.** ④

► **Plancksches Wirkungsquantum**

$$h = 6{,}6256 \cdot 10^{-34}\ \mathrm{W \cdot s^2} \qquad (104)$$

Zur Erklärung der Vorgänge beim äußeren lichtelektrischen Effekt machte A. Einstein folgende Annahme:
Jeweils **ein** Photon (Lichtquant), tritt nur mit **einem** (wanderungsfähigen) Elektron des Katodenmaterials in Wechselwirkung. Dabei überträgt es seine gesamte Energie auf das Elektron und hört somit auf zu existieren.

---

① Versuchen Sie eine Deutung des Ergebnisses auf der Grundlage des Teilchenmodells!
② Welche bei der Untersuchung des äußeren lichtelektrischen Effektes gewonnenen Ergebnisse lassen sich nicht mit dem Wellenmodell deuten?
③ Nennen Sie weitere Beispiele dafür, daß im mikrophysikalischen Bereich spezifische Gesetze gelten!
④ Geben Sie weitere Naturkonstanten an, und kennzeichnen Sie die Bereiche, in denen sie von Bedeutung sind!

Auf dieser Grundlage lassen sich die experimentell gefundenen und auf Seite 138 dargestellten Ergebnisse wie folgt deuten:

Zum Herauslösen des Elektrons aus dem Metall ist eine bestimmte Arbeit W_A erforderlich, die man **Austrittsarbeit** nennt. Ist die Energie des Lichtquants kleiner als die Austrittsarbeit

$$h \cdot f < W_A,$$

dann kann das Elektron nicht aus dem Metallgefüge herausgelöst werden. Das wird auch nicht dadurch möglich, daß man die Beleuchtungsstärke vergrößert; denn dadurch wächst lediglich die Anzahl der je Zeiteinheit auftreffenden Lichtquanten, nicht aber ihre Energie.

Eine Ablösung eines Elektrons vom Metall ist erst dann möglich, wenn die Energie des Photons einen bestimmten Mindestwert erreicht hat, so daß gilt

$$h \cdot f_G = W_A. \qquad (105)$$

Dieser Mindestwert liegt vor, wenn die Frequenz des eingestrahlten Lichtes gleich der Grenzfrequenz f_G ist. ①

In diesem Falle wird die gesamte Energie des Lichtquants benötigt, um das Elektron aus dem Metall herauszulösen.

Ist die Energie des auftreffenden Photons größer als die Austrittsarbeit

$$h \cdot f > W_A, \qquad (106)$$

so verbleibt die überschüssige Energie in Form von kinetischer Energie beim Elektron. Das Elektron verläßt dann die Metalloberfläche mit der Energie

$$\frac{1}{2} m_e \cdot v^2 = h \cdot (f - f_G). \qquad (107)$$

Unter Verwendung von Gleichung (102) kann das in der von A. Einstein gefundenen Form geschrieben werden als

► **Einsteinsche Gleichung**

$$h \cdot f = \frac{1}{2} m_e \cdot v^2 + W_A \qquad (108)$$

Die Annahme von Lichtquanten und die Gültigkeit der Einsteinschen Gleichung ermöglichen die Deutung der übrigen experimentell gewonnenen Ergebnisse (vgl. S. 138):

- Da sich mit der Beleuchtungsstärke lediglich die Anzahl der je Zeiteinheit auftreffenden Lichtquanten ändert, nicht aber ihre Energie [vgl. (108)], ist die kinetische Energie der Fotoelektronen von der Beleuchtungsstärke (Intensität der Bestrahlung) unabhängig. Mit der Intensität ändert sich jedoch die Anzahl der je Zeiteinheit ausgelösten Elektronen.
- Entsprechend Gleichung (108) wächst die Energie der Fotoelektronen mit der Frequenz des eingestrahlten Lichts. ②

Das Plancksche Wirkungsquantum

62

Das Plancksche Wirkungsquantum ist eine für die Mikrophysik bedeutsame Konstante, deren Entdeckung die Entwicklung der gesamten Physik nachhaltig beeinflußte. Seine experimentelle Bestimmung ist mittels des äußeren lichtelektrischen Effekts möglich. Hierzu ist die in Bild 141/1 dargestellte Versuchsanordnung geeignet.

Die Fotozelle wird nacheinander mit Licht zweier verschiedener Frequenzen f_1; $f_2 > f_G$ bestrahlt. Die Fotoelektronen besitzen in beiden Fällen unterschiedliche kinetische Energien $\frac{1}{2} m_e \cdot v_1^2$ und $\frac{1}{2} m_e \cdot v_2^2$. Das elektrische Gegenfeld ermöglicht die Abbremsung aller Elektronen bis auf die Geschwindigkeit 0.

Aus den gemessenen Spannungen U_1 und U_2 kann die kinetische Energie der schnellsten Elektronen mittels Gleichung (102) berechnet werden

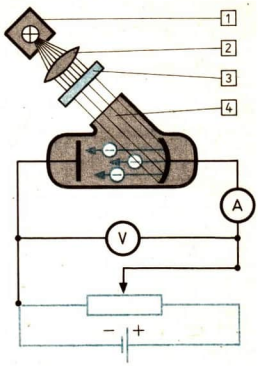
$$e \cdot U_1 = \frac{1}{2} m_e \cdot v_1^2$$

(bei Einstrahlen von Licht der Frequenz f_1)

und

$$e \cdot U_2 = \frac{1}{2} m_e \cdot v_2^2$$

(bei Einstrahlen von Licht der Frequenz f_2). ③



141/1
1 – Lichtquelle
2 – Kondensor
3 – Farbfilter
4 – Licht mit Frequenz f_1 bzw. f_2

Weiterhin gilt entsprechend der Gleichung (108)

$$h \cdot f_1 = e \cdot U_1 + W_A, \qquad (109)$$

$$h \cdot f_2 = e \cdot U_2 + W_A. \qquad (110)$$

Da in beiden Fällen das gleiche Metall (Katodenmaterial der Fotozelle) verwendet wird, ist die Austrittsarbeit gleich. Subtrahiert man die Gleichungen (109) und (110) voneinander, so ergibt sich

$$h = e \cdot \frac{U_1 - U_2}{f_1 - f_2}. \qquad (111)$$

▼ **Versuch zur Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums.** Im ersten Teilversuch wird das Licht der violetten Quecksilberlinie ($\lambda_1 = 405$ nm) benutzt. Es ist eine Gegenspannung von $U_1 = 1{,}07$ V erforderlich, um die Fotoelektronen völlig abzubremsen. Im zweiten Teilversuch wird die Katode mit dem Licht der grünen Quecksilberlinie ($\lambda_2 = 546$ nm) bestrahlt. Zur Abbremsung der Fotoelektronen auf die Geschwindigkeit 0 wird eine Gegenspannung von 0,28 V benötigt.

---

① Was versteht man unter der Grenzfrequenz?
② Erläutern Sie die Energiebilanz beim äußeren lichtelektrischen Effekt!
③ Warum besitzen – trotz der Verwendung monochromatischen Lichtes – nicht alle Fotoelektronen die gleiche Geschwindigkeit?

Aus der Beziehung $c = \lambda \cdot f$ (98) erhält man die Frequenzen des verwendeten Lichts
$f_1 = 7{,}41 \cdot 10^{14}\ s^{-1}$ und
$f_2 = 5{,}49 \cdot 10^{14}\ s^{-1}$.

Für das Plancksche Wirkungsquantum errechnet man hieraus den folgenden Wert:

Gegeben:
$f_1 = 7{,}41 \cdot 10^{14}\ s^{-1}$
$f_2 = 5{,}49 \cdot 10^{14}\ s^{-1}$
$U_1 = 1{,}07\ V$
$U_2 = 0{,}28\ V$

Gesucht:
h

Lösung:

$$h = e \cdot \frac{U_1 - U_2}{f_1 - f_2}$$

$$h = 1{,}602 \cdot 10^{-19}\ As \cdot \frac{0{,}79\ V}{1{,}92 \cdot 10^{14}\ s^{-1}}$$

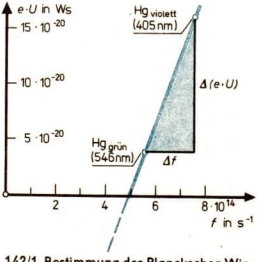
$$\underline{\underline{h = 6{,}6 \cdot 10^{-34}\ W \cdot s^2}}$$

Das Ergebnis des Experimentes belegt, daß die Annahme von Lichtquanten und damit verbunden die Einsteinsche Gleichung die Zusammenhänge beim äußeren lichtelektrischen Effekt quantitativ richtig wiedergeben.

Das Plancksche Wirkungsquantum kann auch unmittelbar aus der grafischen Darstellung der Abhängigkeit der kinetischen Energie der Fotoelektronen von der Frequenz ermittelt werden (Bild 142/1). Die Gerade ist Ausdruck der linearen Beziehung zwischen kinetischer Energie und Frequenz in der Einsteinschen Gleichung. Sie wird deshalb auch **Einsteinsche Gerade** genannt. Ihr Anstieg beträgt $\frac{\Delta(e \cdot U)}{\Delta f}$. Ein Vergleich mit der Gleichung (111) zeigt, daß dieser Quotient gleich dem Planckschen Wirkungsquantum ist

$$h = \frac{\Delta(e \cdot U)}{\Delta f}.$$

Der Anstieg der Geraden in Bild 142/1 beträgt
$h = 6{,}6 \cdot 10^{-34}\ W \cdot s^2$. ①



142/1 Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums h und der Grenzfrequenz f_G aus der Einsteinschen Geraden.

Das komplizierte Verhalten von Licht 63

Das Wellenmodell gestattet die Erklärung einiger optischer Erscheinungen. Licht besitzt nicht alle, sondern nur **einige** der Eigenschaften, die auch Wellen besitzen. ②

Der äußere lichtelektrische Effekt zeigt die Mängel des Wellenmodells besonders deutlich. Die Existenz der Grenzfrequenz ist ein Beleg für die Tatsache, daß das Licht nicht kontinuierlich, wie nach dem Wellenmodell zu erwarten wäre, sondern in Form von „Portionen" absorbiert wird.

Genauso wie das Wellenmodell, so ermöglicht auch das Teilchenmodell die Erklärung nur einiger Eigenschaften des Lichts. So lassen sich die Vorgänge beim äußeren lichtelektrischen Effekt anschaulich wie folgt beschreiben: Lichtteilchen und Elektron stoßen zusammen. Das Lichtteilchen gibt seine gesamte Energie an das Elektron ab und verschwindet dabei.

Der Teilchencharakter des Lichtes tritt auch deutlich in Erscheinung, wenn man es wie Alpha- oder Betateilchen mit einem Zählrohr akustisch nachweist.

Trotz der Möglichkeit, diese experimentellen Ergebnisse mit dem Teilchenmodell beschreiben zu können, lassen sie jedoch nicht den Schluß zu, daß Licht aus Teilchen im Sinne der Mechanik besteht. Er würde zunächst im Widerspruch zu den im Stoffabschnitt Wellenoptik erkannten Welleneigenschaften des Lichtes stehen.
Aber auch bei der Deutung der im Zusammenhang mit dem äußeren lichtelektrischen Effekt gewonnenen Ergebnisse ist unverkennbar, daß das Licht nur gewisse Züge eines Teilchens trägt. Bei der Erklärung ist es sowohl erforderlich, auf gewisse Teilchen- wie auch auf gewisse Welleneigenschaften zurückzugreifen. So wird zur Ermittlung des Verlaufs der Geraden für jeden durch die Messung bestimmten Punkt in Bild 138/1 monochromatisches Licht einer bestimmten Frequenz benötigt.

Die Frequenz ist aber Ausdruck gewisser Welleneigenschaften, und sie wird experimentell (z. B. mittels einer Interferenzanordnung) auf der Grundlage des Wellenmodells bestimmt. Schließlich geht die Frequenz des Lichtes in die Beziehung $E = h \cdot f$ (103) ein. Diese Beziehung ist aber weder aus Wellen- noch aus Teilchenvorstellungen herleitbar.

A. Einstein hat mit der Einführung des Begriffes „Lichtquant" eine Synthese geschaffen, die es gestattet, die experimentellen Ergebnisse zu deuten. Das Lichtquant besitzt nur ganz bestimmte Wellen- und ganz bestimmte Teilcheneigenschaften.

Zusammenfassung

64

Ausgangspunkt der Betrachtungen war die Frage nach dem Wesen des Lichtes. Die Experimente zur Interferenz hatten gezeigt, daß das Licht Welleneigenschaften besitzt. In Zusammenhang mit dem äußeren lichtelektrischen Effekt treten jedoch Erscheinungen auf, die mit dem Wellenmodell unvereinbar sind. Hieraus ergab sich die Notwendigkeit, die

---

① Welche Informationen lassen sich aus der Einsteinschen Geraden gewinnen?
② Welche gemeinsamen Eigenschaften besitzen Licht und Wellen?

gesetzmäßigen Zusammenhänge beim lichtelektrischen Effekt quantitativ zu untersuchen.

Sorgfältige Schlußfolgerungen unter Berücksichtigung der begrenzten Anwendbarkeit makrophysikalischer Modelle im mikrophysikalischen Bereich führten zu grundlegenden Aussagen über das Licht. Es zeigt sich, daß das Verhalten des Lichts weder auf der Grundlage des Wellen- noch des Teilchenmodells vollständig beschrieben werden kann. Licht besitzt nur einige Eigenschaften, die auch Wellen besitzen, und einige Eigenschaften, die auch Teilchen aufweisen. Licht zeigt nicht von Experiment zu Experiment ein unterschiedliches Verhalten. Die Analyse zeigt, daß es stets sowohl Wellen- als auch Teilcheneigenschaften aufweist. Je nach Wahl der experimentellen Anordnung treten allerdings im einzelnen Experiment die einen oder die anderen Eigenschaften in den Vordergrund. Die Synthese dieser Eigenschaften liegt dem von A. Einstein geschaffenen Begriff **Lichtquant** bzw. **Photon** zugrunde.

Beim äußeren lichtelektrischen Effekt handelt es sich um eine bestimmte Form der Wechselwirkung zwischen Licht und Stoff. Die Untersuchungen führten zu fundamentalen Aussagen vor allem bezüglich des Wesens des Lichtes:

- Das Licht besteht aus einzelnen, nicht weiter zerlegbaren Lichtquanten.

- Die Energie eines Lichtquants beträgt $E = h \cdot f$.

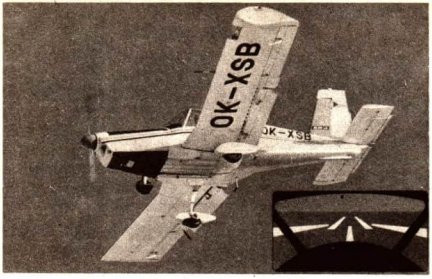
- Beim äußeren lichtelektrischen Effekt tritt ein Lichtquant nur mit einem Elektron in Wechselwirkung und gibt an dieses seine gesamte Energie ab.

- Ein Teil der vom Lichtquant an das Elektron abgegebenen Energie wird zum Herauslösen des Elektrons aus dem Metall benötigt. Der Rest dient zur Beschleunigung des Elektrons. Es gilt die Einsteinsche Gleichung

$$h \cdot f = \frac{1}{2} m_e \cdot v^2 + W_A .$$

- Der äußere lichtelektrische Effekt gestattet die Bestimmung der Austrittsarbeit der Elektronen. Sie ist von Stoff zu Stoff verschieden.

- Der äußere lichtelektrische Effekt ermöglicht die Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums, eine für die gesamte Mikrophysik bedeutsame Konstante. Sie ist gleich dem Anstieg der Einsteinschen Geraden im Energie-Frequenz-Diagramm.



Quantenhafte Emission des Lichtes

Nach einem Laserstrahl-Leitverfahren können auch Flugzeuge ohne besondere technische Ausrüstung bei jeder Witterung, also auch bei Nebel, sicher gelandet werden. Das Verfahren, bei dem fünf rote Laserstrahlen die Anflugbahn auf bis zu dreißig Kilometer Länge markieren, wurde von Wissenschaftlern des Physikalischen Instituts der Akademie der Wissenschaften der UdSSR entwickelt. Im Bild rechts unten ist gezeigt, wie der Pilot die Landeanflugmarkierung sieht.

Um das Wirkprinzip des Lasers verstehen zu können, sind Kenntnisse über die Emission von Lichtstrahlung erforderlich. Sie sind das Ergebnis der Untersuchungen mehrerer Generationen von Physikern. Der Chemiker R. W. Bunsen hatte sich bereits 1859 bemüht, die bekannte Lichterscheinung der Flammenfärbung als qualitatives Verfahren für die chemische Analyse zu nutzen. Da das Auge jedoch nicht genau zwischen Farbtönen unterscheiden kann, schlug der Physiker G. R. Kirchhoff 1860 vor, die spektrale Zerlegung des Lichtes mit den dabei auftretenden meßbaren Spektrallinien als quantitatives Verfahren zu nutzen. Dieses Verfahren heißt Spektralanalyse. Infolge der Tatsache, daß jeder Stoff ein für ihn charakteristisches Spektrum aussendet und daß bereits unwägbar kleine Mengen der Stoffe für die Spektralanalyse ausreichen, beschäftigten sich immer mehr Wissenschaftler mit den Spektren. Die Fülle der Einzeluntersuchungen wurde immer weniger überschaubar. Deshalb mußte ein System gefunden werden, in das man die Untersuchungsergebnisse einordnen kann. Sollte sich die Lichtemission nicht gesetzmäßig vollziehen, so daß diese Gesetzmäßigkeiten auch in den Spektren ihren Niederschlag finden?
Aus der Verschiedenartigkeit der Spektren könnten dann wichtige Rückschlüsse auf den Bau der Stoffe erfolgen!

Linienspektren 65

Von den Atomen können verschiedene Arten von Strahlung ausgesandt werden. Die Art der Strahlung hängt vom Aufbau des Atoms ab und von den Bedingungen, unter denen sie sich befinden. Aus dem Physikunterricht der Klasse 10 ist bekannt, daß der Kern bestimmter Atome Ausgangspunkt von Kernstrahlung ist.

Der Entstehungsbereich von Röntgenstrahlung, ultraviolettem, sichtbarem und infrarotem Licht ist die Elektronenhülle der Atome bzw. Moleküle. Während die Röntgenstrahlen durch die fester gebundenen Elektronen verursacht werden, bedin-

gen die weniger fest gebundenen „Außen"elektronen die Entstehung von Licht im Sichtbaren und in den angrenzenden Bereichen. ① ②

Ein Beleg hierfür ist das Entstehen von Licht als Begleiterscheinung von chemischen Prozessen, z. B. der Oxydation (Feuer). Diese Prozesse sind durch Veränderungen im Bereich der äußeren Elektronenhülle gekennzeichnet. Auch die Leuchterscheinungen, die bei den elektrischen Leitungsvorgängen in Gasen auftreten, lassen erkennen, daß die Elektronenhülle der Entstehungsbereich der Lichtquanten ist; denn die mit der Elektrizitätsleitung verbundenen Stoß- und Ionisierungsprozesse betreffen lediglich den äußeren Teil der Elektronenhülle. Allgemein läßt sich also feststellen:

Atome bzw. Moleküle vermögen unter bestimmten Bedingungen Licht auszusenden.

Das von Atomen verschiedener Stoffe ausgestrahlte Licht unterscheidet sich voneinander. Bringt man z. B. mittels eines Metallöffels ein kleines Stück Natrium in eine heiße Bunsenflamme, so leuchtet die Flamme intensiv gelb (Bild 146/1). Das gelbe Licht geht vom Natrium aus, welches infolge der hohen Temperatur im gasförmigen Aggregatzustand vorliegt. Die spektrale Zerlegung zeigt, daß die Natriumatome im sichtbaren Bereich nur gelbes Licht zweier eng beieinanderliegender Frequenzen aussenden. Bringt man andere Stoffe in die Bunsenflamme, so treten andere Flammenfärbungen auf.

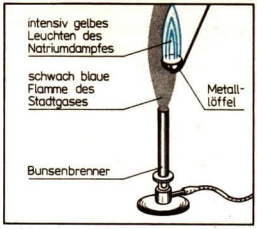
Atome senden charakteristisches Licht aus.

Die nähere Untersuchung des ausgesandten Lichtes soll am Beispiel des Wasserstoffs erfolgen.

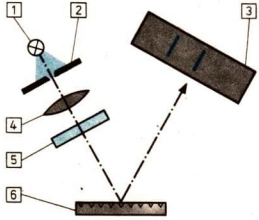
▼ **Experimentelle Gewinnung des Wasserstoffspektrums.** In einem Vorversuch dient zunächst eine Glühlampe als Lichtquelle (Bild 146/2). Nacheinander werden mehrere Farbfilter in den Strahlengang gebracht, die jeweils nur Licht einer bekannten Frequenz hindurchlassen. Die jeweilige Auftreffstelle des Lichtes auf den Schirm wird markiert und beschriftet. Auf diese Weise wird die Versuchsanordnung geeicht. ③ ④

Danach wird die Glühlampe durch eine Spektralröhre, die mit Wasserstoff gefüllt ist, ersetzt (Bild 146/3). Durch Anschließen an eine Hochspannungsquelle wird das Gas zum Leuchten angeregt. Im sichtbaren Bereich treten im Spektrum mehrere Linien verschiedener Farbe auf. Aus ihrer Lage auf dem Schirm wird ihre Frequenz bestimmt (Tabelle 147/1). ⑤

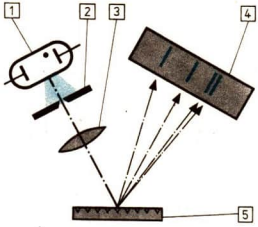
Bild 147/2 zeigt das auf diese Weise erhaltene Wasserstoffspektrum. Es fällt auf, daß die Linien zum violetten Ende des Spektrums hin immer dichter beieinanderliegen.



146/1 Flammenfärbung durch Natrium



146/2 Eichen der Versuchsanordnung zur Untersuchung des Wasserstoffspektrums mit einfarbigem Licht bekannter Frequenz
1 – Glühlampe
2 – Spalt
3 – Schirm mit Spektrallinie
4 – Linse
5 – Farbfilter
6 – Reflexionsgitter



146/3 Versuchsaufbau zur Erzeugung des Wasserstoffspektrums
1 – Spektralröhre
2 – Spalt
3 – Linse
4 – Schirm mit Linienspektrum
5 – Reflexionsgitter

J. Balmer hat 1885 aus der Fülle des Beobachtungsmaterials empirisch herausgefunden, daß der Anordnung dieser Spektrallinien eine Gesetzmäßigkeit zugrunde liegt. Diese Linien, die nicht die einzigen Wasserstofflinien sind, werden deshalb Balmerserie genannt. ⑥

Die Spektrallinien des Wasserstoffs sind gesetzmäßig angeordnet.

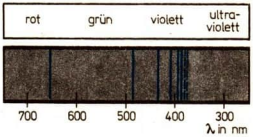
Wie ist es zu erklären, daß die Atome nur Licht bestimmter Frequenzen aussenden? Wodurch wird die gesetzmäßige Anordnung der Spektrallinien bedingt?
Die Beantwortung dieser Fragen ist eng mit Betrachtungen zur Struktur der Atome verbunden.
Wasserstoffatome, die keinen starken äußeren Einflüssen wie z. B. hohen Temperaturen unterliegen, befinden sich in einem energetisch sehr stabilen Zustand, dem **Grundzustand**. In diesem Zustand können sie beliebig lange verharren. Stoßen die Atome mit schnellen anderen Teilchen zusammen, so ist es möglich, daß sie ohne wesentliche Änderung ihrer eigenen kinetischen Energie vom Stoßpartner Energie aufnehmen. Sie befinden sich danach in einem Zustand höherer Energie, einem **„angeregten" Zustand**

Ein Atom bzw. Molekül kann bei einem solchen Stoß nicht beliebige Energiebeträge ΔE aufnehmen. Das wird dadurch bedingt, daß die Elektronenhülle nur ganz bestimmter Energiezustände E_0, E_1, E_2 usw. fähig ist. Bei Aufnahme der Energie ΔE geht die Elektronenhülle und damit das Atom vom Grundzustand E_0 in einen anderen bestimmten („diskreten") Energiezustand (E_1, E_2, ...) über. Durch Abgabe der Energie ΔE kann es wieder in den Grundzustand zurückkehren. Da der Grundzustand der energetisch stabilere ist, vollzieht sich dieser Übergang in der Regel kurzzeitig danach von selbst („spontan"). Die Energie wird dabei in Form von Licht ausgestrahlt.

Mittels der Gleichung (103) läßt sich die Energie der Lichtquanten berechnen, die die Spektrallinien bewirken. Da

Tabelle 147/1 Frequenzen der Wasserstofflinien im sichtbaren und nahen ultravioletten Bereich

Farbe	Frequenz f in $10^{14}\ s^{-1}$
rot	4,57
blau	6,17
violett	6,91
violett	7,32
UV	7,56
UV	7,72



147/2 Linienspektrum des Wasserstoffs

---

① In welchen Zusammenhängen finden heute noch Flammenfärbungen Anwendung?
② Ordnen Sie die angegebenen Spektralbereiche in das elektromagnetische Spektrum ein, und geben Sie einen groben Überblick über die jeweiligen Wellenlängenbereiche!
③ Erläutern Sie das Wirkungsprinzip eines Reflexionsgitters!
④ Beschreiben Sie das experimentelle Vorgehen und das Anliegen des Eichens!
⑤ Ist es möglich, die Lage der Auftreffstellen des verschiedenfarbigen Lichts auf den Schirm zu berechnen?
⑥ Bestätigen Sie durch Rechnung die gesetzmäßige Anordnung der Spektrallinien im Wasserstoffspektrum!
Nach Balmer gilt für die Frequenzen der Linien der Balmerserie die Gleichung

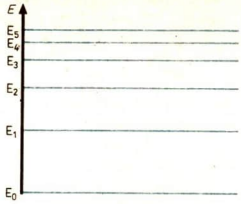
$$f = \frac{R}{2^2} - \frac{R}{n^2} \quad (n = 3, 4, 5, \ldots).$$

Die Konstante R hat dabei den Wert
$R = 3{,}288 \cdot 10^{15}\ s^{-1}$.
Berechnen Sie die Frequenzen, und vergleichen Sie sie mit den experimentell ermittelten Werten!

diese Energie der Differenz zweier Energiezustände entspricht, wobei das Atom von dem einen in den anderen übergeht, lautet die Gleichung hierfür

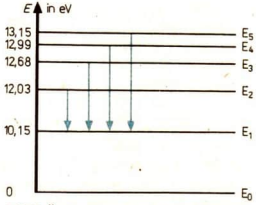
$$\Delta E = h \cdot f. \qquad (112)$$

Die Energiezustände lassen sich in Form des sogenannten **Energieniveauschemas** grafisch darstellen (Bild 148/1).



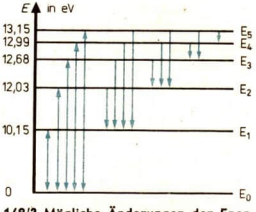
148/1 Energieniveauschema des Wasserstoffatoms

Auf der Ordinatenachse sind die einzelnen diskreten Energiezustände der Elektronenhülle E_0, E_1, E_2 usw. aufgetragen und durch waagerechte Linien markiert. Die Abstände zwischen den Linien entsprechen der Energie, die zugeführt oder abgegeben wird, wenn das Atom von einem Energiezustand in einen anderen übergeht.
Die Übergänge von einem höheren zum ersten angeregten Zustand E_1 entsprechen den Linien der Balmerserie. Die Übergänge werden im Energieniveauschema durch Pfeile symbolisiert (Bild 148/2).
Bei Übergängen zu anderen Energieniveaus des Wasserstoffatoms treten andere Spektrallinien auf. Sie liegen jedoch nicht im sichtbaren Bereich. Alle diese Spektralserien konnten nachgewiesen werden (Bild 148/3). ①

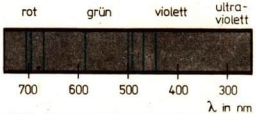


148/2 Änderungen des Energiezustandes des Wasserstoffatoms, die zur Emission der Balmerlinien führen.

Als Beispiel dafür, daß andere Stoffe andere Spektren besitzen, sei das Helium angeführt (Bild 148/4).
Ein Vergleich mit dem Wasserstoffspektrum (Bild 147/2) zeigt, daß das Heliumspektrum wesentlich komplizierter aufgebaut ist. Das ist nicht verwunderlich; denn in der Elektronenhülle des Heliumatoms befinden sich zwei Elektronen gegenüber dem einen beim Wasserstoff. Diese kompliziertere Struktur spiegelt sich in dem Spektrum wider.
Auch die Linien des Heliums sind gesetzmäßig angeordnet. Es treten ebenfalls bestimmte Spektralserien auf, die es ermöglichen, die Energieniveaus zu bestimmen und in Form eines Energieniveauschemas darzustellen. Die Atome können jedoch nicht von jedem beliebigen Energiezustand in jeden beliebigen anderen unter Emission von Licht übergehen.
Die Existenz bestimmter Energiezustände in der Elektronenhülle läßt sich nicht nur dadurch nachweisen, daß angeregte Atome von Gasen Linienspektren aussenden, d. h. nur ganz bestimmte Energiebeträge abgeben. Mittels der Spektren läßt sich auch der Nachweis erbringen, daß die Atome nur ganz bestimmte Energiebeträge aufnehmen können. Diese Absorption ist die Ursache der Fraunhoferschen Linien im Spektrum der Sonne. ②



148/3 Mögliche Änderungen der Energiezustände des Wasserstoffatoms

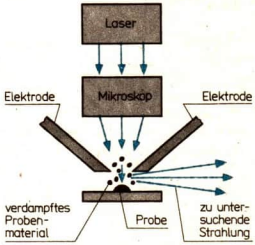


148/4 Linienspektrum des Heliums
Das Heliumspektrum besitzt Linien in den Spektralbereichen rot, gelb, grün und blau.

Um die Möglichkeit zu veranschaulichen, daß die Atome bestimmte Energiebeträge aufnehmen und nachfolgend wieder abgeben können, sind die Pfeilspitzen in Bild 148/3 sowohl nach oben als auch nach unten gerichtet. ③

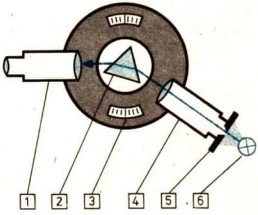
Die Linienspektren bei Emission und Absorption sind ein wichtiger Beleg für die Existenz diskreter Energiezustände in der Elektronenhülle. Sie lassen erkennen, daß die Energie vom Atom nur in Form bestimmter Energiebeträge $\Delta E = h \cdot f$ aufgenommen bzw. abgegeben wird.

Ein weiterer, direkter Beleg für die Aufnahme nur ganz bestimmter Energiebeträge durch die Atome ist auf Seite 151 beschrieben.
Die Linienspektren gestatten die Bestimmung der Energieniveaus der Atome verschiedener Stoffe. Vor allem über diese Energieniveaus liefern die Spektren wichtige Informationen über den Bau der Stoffe.
Nach dem Erkennen dieser wichtigen Zusammenhänge wurden die Spektren neben einem wichtigen Hilfsmittel zur chemischen Analyse ein bedeutender Schlüssel zur Aufklärung der Struktur der Stoffe.



149/1 Prinzip eines Laser-Mikrospektralanalysators

Die Spektralanalyse. Die Spektralanalyse ist vor allem infolge ihrer Anwendbarkeit bei kleinsten Stoffmengen und ihrer Zuverlässigkeit ein aus der Forschung und Produktion nicht mehr wegzudenkendes Verfahren. Zur Spektralanalyse ist es zunächst erforderlich, das Spektrum des zu untersuchenden Stoffes zu gewinnen. Dazu wird der Stoff in vielen Fällen im gasförmigen Aggregatzustand zur Lichtemission veranlaßt. Das kann im einfachsten Falle thermisch durch Einbringen in eine Flamme erfolgen. Im Mikroanalysator vom VEB Carl Zeiss JENA wird die Probe durch einen Laserstrahl verdampft und nachfolgend elektrisch zum Leuchten angeregt (Bild 149/1). Das ausgesandte Licht wird in einem Spektrometer spektral zerlegt.
In dem **Spektrometer** (Bild 149/2) gelangt das Licht durch den Spalt in den Kollimator.



149/2 Prinzipieller Aufbau eines Spektrometers
1 – Fernrohr
2 – Prisma
3 – Teilkreisableseeinrichtung
4 – Kollimator
5 – Spalt
6 – Lichtquelle

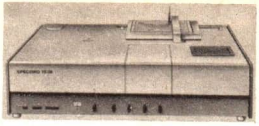
Aus dem Kollimator tritt es als nahezu paralleles Lichtbündel aus und trifft auf das Prisma. Im Prisma werden die verschiedenfarbigen Anteile des Lichtes unterschiedlich stark abgelenkt und gelangen in das Fernrohr, in dem dann das Spektrum sichtbar wird. Die Lage der einzelnen Linien des Spektrums läßt sich durch eine Teilkreisablesevorrichtung ermitteln. In der Regel wird das Spektrum fotografisch aufgezeichnet. Bei der Auswertung erfolgt ein Vergleich mit Spektraltafeln, in denen die Spektren zusammengestellt und genau beschrieben sind.

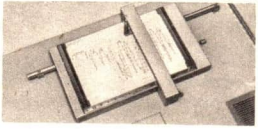
---

① In welchem Bereich des elektromagnetischen Spektrums müssen die Wasserstofflinien liegen, die beim Übergang von den angeregten Zuständen zum Grundzustand auftreten?
② Beschreiben Sie das Entstehen der Fraunhoferschen Linien im Spektrum der Sonne!
③ Warum zeigen im Bild 146/3 nur bei der ersten Spektralserie die Pfeile nach oben und unten, bei den übrigen nur nach unten? Unter welchen experimentellen Bedingungen kommt auch den fehlenden Pfeilen Bedeutung zu?

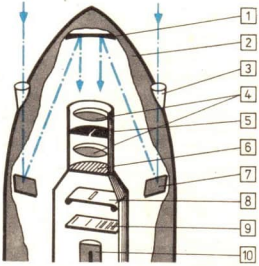
Stimmt die Lage mehrerer Linien in der Fotografie mit der in einer Spektraltafel genau überein, so kann daraus auf das Vorhandensein des betreffenden Stoffes in der Probe geschlossen werden. ①

Die Spektren lassen jedoch nicht nur Aussagen über die Art des Stoffes in der Probe zu. Die Intensität der Linien der einzelnen Stoffe gibt auch über ihren prozentualen Anteil am Gemisch Auskunft.
Mit Hilfe der elektronischen Datenverarbeitung ist es möglich, automatische Analysegeräte einzusetzen, in denen eine selbständige Auswertung der Spektren erfolgt.
Spektralanalytische Verfahren haben eine sehr große Verbreitung gefunden. So sind z. B. für elektronische Bauelemente, Reagenzien und Arzneimittel Stoffe mit hoher chemischer Reinheit erforderlich. Ihre Qualität wird mittels der Spektralanalyse geprüft.
In der Landwirtschaft sind Bodenuntersuchungen wesentliche Voraussetzung für die Ertragssteigerung. Dabei muß u. a. dem Vorhandensein von Spurenelementen die notwendige Aufmerksamkeit geschenkt werden. Ihr Nachweis ist mit der Spektralanalyse möglich. Die Spektralanalyse wird weiterhin in zunehmendem Maße zur Überwachung von großtechnischen Prozessen genutzt. Es erfolgt hierbei eine laufende Untersuchung der Reaktionsprodukte. Abweichungen von der gewünschten Zusammensetzung werden automatisch korrigiert.
Von besonderer Bedeutung ist die Spektralanalyse für die kosmische Physik (Bild 150/2). Sie ermöglicht z. B. Aussagen über die chemische Zusammensetzung der Sonnenkorona, anderer Fixsternatmosphären und der interstellaren Plasmen. Hierbei zeigt sich nicht nur, daß im Weltall die gleichen Stoffe wie auf der Erde auftreten, auch ihre Häufigkeit stimmt weitgehend mit der auf der Erde überein. Darüber hinaus lassen die Spektren noch Rückschlüsse auf die physikalischen Bedingungen an den verschiedenen Stellen des Weltalls zu. Unterliegen nämlich die Atome z. B. hohen Temperaturen und großen Drücken, so bedingt ihre starke gegenseitige Beeinflussung eine Verbreiterung der Spektrallinien (Bild 150/3).
Diese Linienverbreiterung ist letztlich auch die Ursache für die besondere Art der Spektren flüssiger und fester Körper. In Flüssigkeiten und Festkörpern beeinflussen sich die Atome oder Moleküle bzw. Gitterbausteine so stark, daß ein weitgehend kontinuierliches Spektrum entsteht. ②

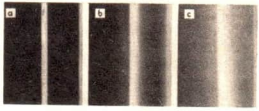




150/1 Spektralphotometer zur Analyse von Stoffen und Stoffgemischen (oben) und Schreiber (unten).



150/2 Schema einer Meßapparatur zum Messen und Auswerten von Spektralbildern für Höhenraketen
1 – Hohlspiegel
2 – Raketenspitze
3 – Eintrittsoptik
4 – optisches System der Kamera
5 – Spaltblende
6 – Gitter
7 – Spiegel
8 – Abtastblende
9 – abgebildetes Spektrum
10 – Ionisationskammer zum numerischen Erfassen des Spektrums



150/3 Verbreiterung der grünen Quecksilberlinie bei steigendem Druck

Das Elektronenstoßexperiment von Franck und Hertz 66

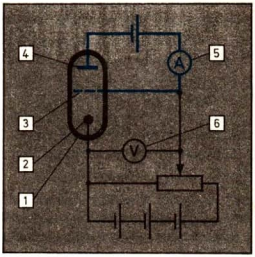
Die Aufnahme bestimmter Energiebeträge ΔE durch die Atome von Gasen kann auf verschiedene Weise bewirkt werden. Genannt seien folgende Möglichkeiten:

Die thermische Anregung. Sie tritt z. B. in Flammen auf. Infolge der hohen Temperatur besitzen einige Gasatome bzw. -moleküle eine so große Geschwindigkeit, daß sie bei Stößen von ihrer kinetischen Energie einen bestimmten Betrag ΔE an andere Atome abgeben, wodurch diese in einen angeregten Zustand versetzt werden.

Die Anregung durch Licht. Sie tritt bei Bestrahlung mit Licht solcher Frequenzen auf, die die Atome beim Übergang zum Grundzustand selbst emittieren (vgl. S. 148 oben). Bestrahlt man die Atome mit weißem Licht, so führt die Absorption von Lichtquanten bestimmter Energie ΔE zum Fehlen eng begrenzter Farbbereiche im Spektrum. Es entstehen Absorptionsspektren (vgl. S. 148 unten). ③

Die Anregung durch die kinetische Energie von Elektronen. Diese Form der Anregung tritt z. B. beim elektrischen Leitungsvorgang in Gasen auf. Die im elektrischen Feld beschleunigten Elektronen stoßen mit großer Geschwindigkeit auf die Gasteilchen. Dabei können sie einen bestimmten Betrag ihrer kinetischen Energie ΔE an die Atome übertragen, wodurch diese in einen angeregten Zustand gelangen.
Die zuletzt genannte Form der Anregung gestattet den direkten Nachweis für die Aufnahme nur ganz bestimmter Energiebeträge durch die Atome.

Dazu findet folgende experimentelle Anordnung Verwendung: In einem evakuierten Glasgefäß befinden sich 3 Elektroden, eine heizbare Katode, ein Gitter und eine Auffangelektrode (Bild 151/1) sowie etwas Quecksilber. Das Gefäß wird auf eine Temperatur von etwa 500 K erwärmt. Dadurch verdampft das Quecksilber teilweise, der Druck in der Röhre beträgt etwa 10^{-2} Pa. Die aus der geheizten Katode (2) austretenden Elektronen werden durch eine einstellbare Spannung beschleunigt und gelangen durch das Gitter (3) hindurch auf die Auffangelektrode (4). Dabei müssen sie ein elektrisches Gegenfeld zwischen Gitter und Auffangelektrode überwinden, das durch eine Spannung von etwa 0,5 V verursacht wird.



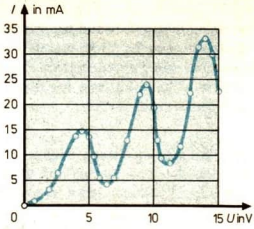
151/1 Schaltplan für das Elektronenstoßexperiment
1 – Elektronenröhre
2 – Katode
3 – Gitter
4 – Anode
5 – Strommesser
6 – Spannungsmesser

Wie wird sich der Auffängerstrom bei wachsender Beschleunigungsspannung ändern? Infolge des Gegenfeldes ist zu erwarten, daß bei geringen Beschleunigungsspannungen noch keine Elektronen die Auffangelektrode erreichen. Wird die Spannung allmählich vergrößert, so besitzen zunächst einige der Elektronen eine ausreichend große kinetische Energie, um

① Beschreiben Sie Aufbau und Wirkungsweise eines Spektrometers!
② Geben Sie einen Überblick über die Einsatzmöglichkeiten der Spektralanalyse!
③ Beschreiben Sie das prinzipielle Vorgehen bei der Absorptionsspektroskopie!

das Gegenfeld zu überwinden und zur Auffangelektrode zu gelangen. Es ist zu erwarten, daß bei weiterer Vergrößerung der Beschleunigungsspannung immer mehr Elektronen zur Auffangelektrode gelangen. Die Stromstärke-Spannungskurve müßte der einer Triode gleichen.

Dieses Ergebnis tritt jedoch nicht ein. Bei einer Erhöhung der Beschleunigungsspannung über 4,9 V sinkt die Stromstärke schnell ab. Es erreichen nur noch wenige Elektronen die Auffangelektrode. Erst beim weiteren Anwachsen der Beschleunigungsspannung (über etwa 6 V) steigt die Stromstärke wieder an, erreicht schließlich bei etwa 9,8 V ein weiteres Maximum, um dann abermals abzusinken (Bild 152/1).



152/1 Stromstärke-Spannungsverlauf beim Franck-Hertz-Versuch

Dieser Effekt kann wie folgt erklärt werden:

Auf dem Wege zum Gitter stoßen die Elektronen mit Quecksilberatomen zusammen. Infolge der wesentlich größeren Masse dieser Atome und ihrer viel geringeren Geschwindigkeit ändert sich dabei die kinetische Energie der Elektronen nur unwesentlich. Haben die Elektronen jedoch durch die Beschleunigung im elektrischen Feld eine kinetische Energie von etwa 4,9 eV oder etwas mehr gewonnen, so können sie einen Energiebetrag von $\Delta E = 4{,}9$ eV an jeweils ein Quecksilberatom abgeben. Dieses gelangt dadurch vom Grundzustand in den ersten angeregten Zustand. Die ggf. vorhandene restliche Energie verbleibt in Form von kinetischer Energie beim Elektron. Sie reicht für dieses Elektron jedoch nicht mehr aus, um sich im elektrischen Gegenfeld zur Auffangelektrode zu bewegen. Deshalb sinkt die Stromstärke ab, wenn die Beschleunigungsspannung 4,9 V erreicht und geringfügig überschreitet. Bei größeren Beschleunigungsspannungen können auch die Elektronen wieder die Auffangelektrode erreichen, die bei einem Stoß 4,9 eV an ein Quecksilberatom abgegeben haben. Die Stromstärke steigt wieder an.

Das Absinken des Stromes bei 9,8 V wird dadurch bedingt, daß einige der Elektronen auf dem Wege zum Gitter nun zweimal in einem Stoß einen Energiebetrag von 4,9 eV an Quecksilberatome abgeben. (1)

Dieses Experiment wurde erstmals von J. Franck und G. Hertz durchgeführt. Ihre Untersuchungen führten noch zu einem zweiten wichtigen Ergebnis. Bei Beschleunigungsspannungen kleiner als 4,9 V sendet der Quecksilberdampf keinerlei Licht aus. Bei einer Beschleunigungsspannung von 4,9 V und mehr tritt ultraviolette Strahlung auf. Die spektroskopische Untersuchung zeigt, daß dieses Licht die Wellenlänge 254 nm besitzt. Diese Erscheinung wird dadurch verursacht, daß die Quecksilberatome durch Aufnahme der Energie $\Delta E = 4{,}9$ eV vom Grundzustand in den ersten angeregten Zustand gelan-

gen. Da dieser Zustand nicht stabil ist, gehen sie nach einer Zeit von etwa 10^{-8} s wieder in den Grundzustand über. Die Energie von 4,9 eV wird dabei in Form von Licht abgegeben.
Die folgende Rechnung bestätigt die Richtigkeit dieser Aussage.

Gegeben:

$\Delta E = 4{,}9\ \text{eV}$

$h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \text{W} \cdot \text{s}^2$

$1\ \text{W} \cdot \text{s} = 6{,}24 \cdot 10^{18}\ \text{eV}$

Gesucht:

f

λ

Lösung:

$$f = \frac{\Delta E}{h}$$

$$f = \frac{4{,}9\ \text{eV}}{6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \text{W} \cdot \text{s}^2}$$

$$f = \frac{4{,}9\ \text{eV}}{6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \text{W} \cdot \text{s}^2 \cdot 6{,}24 \cdot 10^{18}\ \text{eV}} \cdot \text{W} \cdot \text{s}$$

$$\underline{\underline{f = 1{,}18 \cdot 10^{15}\ \text{s}^{-1}}}$$

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^{17}\ \text{nm} \cdot \text{s}^{-1}}{1{,}18 \cdot 10^{15}\ \text{s}^{-1}}$$

$$\underline{\underline{\lambda = 254\ \text{nm}}}$$

Durch geringfügige Veränderung der experimentellen Anordnung konnten J. Franck und G. Hertz zeigen, daß Quecksilberatome außer einer Mindestenergie von 4,9 eV auch noch andere diskrete Energiebeträge aufnehmen können. In Tabelle 153/1 sind die Energien zusammengestellt, bei denen ein Absinken der Auffängerstromstärke beobachtet wurde. Die angegebenen Energiebeträge werden z. T. in einem Stoß, zum Teil in mehreren aufeinanderfolgenden übertragen. ② ③

Neben den Linienspektren ist das Elektronenstoßexperiment von Franck und Hertz somit ein weiterer wichtiger Beleg für die Existenz diskreter Energiezustände in der Elektronenhülle. Dabei erweist sich die Gleichung $E = h \cdot f$ als richtig. Da ΔE und f gemessen werden können, wird die Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums h möglich.
Bemerkenswert ist, daß beim Franck-Hertz-Versuch der Energieaustausch durch Elektronenstöße erfolgt, während bei den Spektren die diskreten Energiebeträge von Lichtquanten übertragen wurden.

Tabelle 153/1 Gesamtheit der experimentell ermittelten Energiewerte beim Franck-Hertz-Versuch
n: Nummer des Maximums
ΔE: kinetische Energie der Elektronen

n	ΔE in eV
1	4,9
2	6,7
3	9,8
4	11,2
5	13,5
6	14,7
7	16,0
8	17,6
9	19,3
10	21,2

① In welchem Bereich zwischen Katode und Anode wird bei einer Beschleunigungsspannung von 10 V die erste Energieübertragung der Elektronen an die Quecksilberatome erfolgen und in welchem Bereich die zweite?
② Erläutern Sie das experimentelle Vorgehen beim Franck-Hertz-Versuch!
③ Deuten Sie das *I-U*-Diagramm beim Franck-Hertz-Versuch!

Im Zusammenhang mit dem Elektronenstoßexperiment von Franck und Hertz wurden folgende wichtige Ergebnisse herausgearbeitet:

- **Die Anregung von Atomen ist durch thermische innere Energie, Strahlungsenergie und kinetische Energie von Elektronen möglich.**
- **Elektronen vermögen nur diskrete Energiebeträge an die Atome zu übertragen.**
- **Die Energie wird von den Atomen nachfolgend in diskreten Beträgen in Form von Licht wieder abgegeben.**
- **Die Meßergebnisse ermöglichen die Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums *h*.**

James Franck und Gustav Hertz. James Franck und Gustav Hertz arbeiteten gemeinsam am Physikalischen Institut der Berliner Universität und veröffentlichten 1913 das Ergebnis ihrer Elektronenstoßversuche.

Der Franck-Hertz-Versuch zählt zu den bedeutendsten Experimenten in der neueren Geschichte der Physik. Die beiden Forscher erhielten dafür 1925 gemeinsam den Nobelpreis. J. Franck und G. Hertz haben auch in der Folgezeit als Forscher und Lehrer Hervorragendes geleistet und so zur Ausgestaltung der Physik des Atomzeitalters beigetragen. J. Franck wirkte 1921 bis 1933 als Professor der Experimentalphysik in Göttingen. Die wissenschaftsfeindliche Politik des Hitlerfaschismus und die Judenverfolgung veranlaßten ihn, 1933 aus Solidarität mit den gemaßregelten Fachkollegen sein Lehramt niederzulegen. Er wirkte später viele Jahre in den USA.

Wenige Wochen vor der Explosion der ersten Atombombe 1945 wandten sich sieben bedeutende Kernforscher in einer Eingabe an das amerikanische Kriegsministerium. Der Bericht, der von J. Franck angeregt und von ihm an erster Stelle unterzeichnet wurde, ist unter dem Namen „Franck-Report" in die Geschichte der Wissenschaft und Menschlichkeit eingegangen. Das bedeutende Dokument warnte vor jedem Mißbrauch der Atomenergie für die Massenvernichtung.

G. Hertz hat 1935 seinen Lehrstuhl an der Technischen Hochschule in Berlin-Charlottenburg im Ergebnis der faschistischen Hochschulpolitik aufgeben müssen. Nach 1945 arbeitete er 10 Jahre als Vertragsforscher in der UdSSR und erhielt dort 1951 den Staatspreis. Danach wirkte er als Direktor des Physikalischen Instituts an der Karl-Marx-Universität in Leipzig und erhielt auch in der DDR höchste Auszeichnungen.

J. Franck und G. Hertz gehören zu den Unterzeichnern der Mainauer Erklärung der Nobelpreisträger von 1955, die mit den denkwürdigen Sätzen schließt: „Alle Nationen müssen zu

154/2 Gustav Hertz (1887 bis 1975)

der Entscheidung kommen, freiwillig auf die Gewalt als letztes Mittel der Politik zu verzichten. Sind sie nicht dazu bereit, so werden sie aufhören zu existieren."

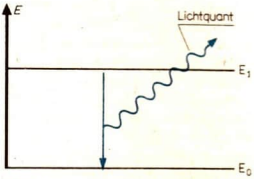
Die historische Entwicklung der Vorstellungen vom Licht. Aufgrund der starken Einwirkung auf die Sinnesorgane wurden die Menschen frühzeitig auf die besonderen Eigenschaften des Lichts aufmerksam. Die Erklärung der beobachteten Effekte und Eigenschaften wie das (weitgehend) ungehinderte Durchdringen bestimmter (lichtdurchlässiger) fester und flüssiger Stoffe, die Reflexion und Brechung, die (zunächst) nicht meßbare Ausbreitungsgeschwindigkeit, die Substanzlosigkeit und Nichtspeicherbarkeit bereitete jedoch Schwierigkeiten. Eine ausreichende experimentelle Untersuchung des Lichtes fehlte, und ihr wurde zu wenig Wert beigemessen. Als O. Römer 1675 die Verzögerung bei der Verfinsterung der Jupitermonde auf die endliche Lichtgeschwindigkeit zurückführte, stieß er bei der Pariser Akademie auf die Ablehnung seiner Gedanken. Auch die Ansichten von I. Newton und C. Huygens stellten lediglich Versuche zur Interpretation der bekannten Effekte und Eigenschaften dar. Sie stützten sich zwar auf die fortgeschrittene Entwicklung der klassischen Mechanik, waren aber experimentell wenig fundiert. Obwohl Newton 1676 genaue Messungen an den Newtonschen Ringen anstellte und die periodische Beziehung fand, blieb er bei seiner korpuskularen Auffassung. In Anbetracht der größeren Autorität Newtons fand seine Teilchenvorstellung viele Anhänger. Erst die Entdeckung des Interferenzprinzips durch Th. Young 1801 rückte die Wellentheorie wieder in den Vordergrund, gestützt durch die Untersuchungen von A. J. Fresnel. Die Entdeckung der Polarisation durch E. L. Malus 1808 wurde von diesem erst 9 Jahre später als Beleg für die Transversalität der Lichtwellen gewertet. Als H. Hertz 1886 die von J. C. Maxwell postulierten elektromagnetischen Wellen experimentell realisiert hatte und sich ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit als mit der des Lichts identisch erwies, schien die Wellentheorie des Lichts abgesichert. Um die Jahrhundertwende stellten jedoch die experimentellen Ergebnisse im Zusammenhang mit dem äußeren lichtelektrischen Effekt die Wellenvorstellung von Licht erneut in Frage. Die Lösung des Problems gelang auf der Grundlage der von A. Einstein geschaffenen Photonenvorstellung. Ausgehend von den Ergebnissen von M. Planck über die Emission und Absorption von Strahlungsenergie nahm A. Einstein an, daß Licht neben gewissen Wellen- auch bestimmte Teilcheneigenschaften besitzt. Die vorangehend beschriebenen Experimente und ihre Auswertung bestätigen die Richtigkeit dieser Auffassung.
Diese komplizierte Struktur des Lichtes wurde von vielen idealistischen Philosophen dahingehend falsch ausgelegt, daß es unmöglich sei herauszufinden, was Licht „wirklich" ist. Sie leugneten damit die Erkennbarkeit der Welt. Auf der Grund-

lage der von A. Einstein geschaffenen Photonenvorstellung betrachteten die marxistischen Philosophen das Auftreten gewisser Wellen- und Teilcheneigenschaften als dialektische Einheit.

Die geschilderte Entwicklung ist ein eindrucksvolles Beispiel für das allgemeine Gesetz der Dialektik von der Negation der Negation bei der Erkenntnisfindung der Menschen im Bereich der Physik. Die Annahme von Lichtquanten stellt eine Höherentwicklung dar und erfaßt alle wichtigen Erkenntnisse in Übereinstimmung mit den Experimenten.

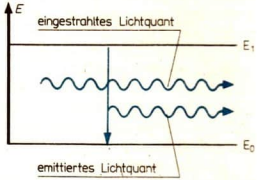
Der Laser

Die letzten Abschnitte machten deutlich, daß sich ein Atom in einem Gas in verschiedenen diskreten Energiezuständen befinden kann. Da der Grundzustand der stabilste Energiezustand ist, kehren angeregte Atome bereits nach etwa 10^{-8} s wieder in den Grundzustand zurück. Dabei senden sie Licht aus. Dieser Vorgang vollzieht sich ohne äußeren Einfluß. Man nennt ihn **spontane Emission** (Bild 156/1). ①



156/1 Spontane Emission eines Lichtquants

Unter dem Einfluß äußerer elektromagnetischer Strahlung kann sich jedoch noch ein anderer Vorgang vollziehen. Das angeregte Atom wird durch diese Strahlung zum Emittieren von Licht veranlaßt, noch bevor es von selbst in den Grundzustand übergeht. Man nennt diesen Vorgang **induzierte** oder **stimulierte Emission**. Voraussetzung hierfür ist, daß die Frequenz der elektromagnetischen Strahlung mit der Frequenz des emittierten Lichtes übereinstimmt. Nur unter dieser Bedingung kann das auftreffende Licht das Atom zur Lichtemission stimulieren (Bild 156/2). ②



156/2 Induzierte Emission eines Lichtquants

Da jedoch das angeregte Atom in der Regel bereits sehr kurze Zeit nach der Energieaufnahme spontan in den Grundzustand übergeht, spielt die induzierte Emission bei herkömmlichen Lichtquellen wie z. B. Leuchtstofflampen eine völlig untergeordnete Rolle.

Im Abschnitt „Linienspektren" wurde bereits darauf hingewiesen, daß nicht in jedem Falle ein Übergang von einem bestimmten Energiezustand in einen anderen möglich ist. Aus diesem Grunde gibt es Energiezustände, in denen das angeregte Atom die relativ lange Zeit von etwa 10^{-2} s verbleibt. Durch spontane Emission kann kein Übergang in einen stabileren Energiezustand erfolgen, sondern lediglich durch bestimmte Stoßprozesse. Dadurch ist es möglich, daß sich viele Atome in einem derartigen angeregten Zustand befinden. In einem solchen Falle kann ein einfallendes Lichtquant geeigneter Energie die Atome zur induzierten Emission veranlassen.

Dieses Prinzip ist die Grundlage des Lasers, einer Lichtquelle mit besonderen Eigenschaften und vielfältigen Einsatzmöglichkeiten.
Es gibt verschiedene Arten von Lasern. Als Beispiel sollen hier Aufbau und Wirkungsweise des Rubinlasers beschrieben werden. Kernstück eines solchen Lasers ist ein stabförmig geschliffener Rubinkristall (Al_2O_3), in dem die Aluminiumatome zum Teil durch dreiwertige Chrom-Ionen (Cr^{+++}) ersetzt wurden. Bei der Lichtabsorption gehen die Chrom-Ionen vom Energiezustand E_0 in den angeregten Zustand E_2 über. Von hier aus vollziehen sich Übergänge in den Zustand E_1. Sie erfolgen ohne Emission von Strahlung und sehr schnell. Die Energie wird dabei an das Kristallgitter abgegeben. Demgegenüber verbleiben die Ionen im Zustand E_1 relativ lange.
Das führt dazu, daß sich sehr viele Ionen im angeregten Zustand E_1 befinden.
Ein Lichtquant, das die Energie ($E_1 - E_0$) besitzt, kann diese Ionen zum Aussenden von Licht mit gleicher Frequenz anregen (induzierte Emission). Sie tritt in Form eines intensiven Leuchtens in Erscheinung (Bild 157/1).

Um den Ablauf dieser Vorgänge zu garantieren, muß die Laserstrahlungsquelle im wesentlichen aus drei Teilen bestehen:

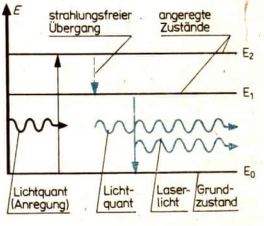
1. dem **Energiespeicher**, einem Material mit geeignetem Energieniveauschema (z. B. Al_2O_3),

2. der **Energiequelle**, die die Atome oder Ionen in einen angeregten Zustand versetzt (z. B. Xenonblitzlampe),

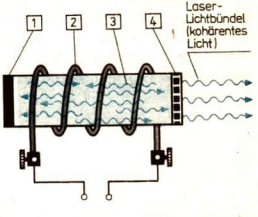
3. dem **Resonator und Energieausgeber**, zwei einander gegenüberstehende Spiegel, von denen der eine halbdurchlässig verspiegelt ist, zwischen denen sich der Energiespeicher befindet (z. B. verspiegelte Stirnflächen des Rubinstabes).

Das kräftige Aufblitzen der Xenonlampe bewirkt ein Anregen der Ionen im Rubinkristall. Die strahlungslosen Übergänge bedingen, daß sich sehr viele Ionen im Energiezustand E_1 befinden. Ein geeignetes Photon ruft die induzierte Emission hervor. Bedingt durch die verspiegelten Enden bildet sich zwischen den Stirnflächen des Rubinstabes eine stehende Lichtwelle aus. Da jedoch eine der beiden Stirnflächen nicht vollständig verspiegelt ist, verläßt ständig ein Teil der Energie der stehenden Lichtwelle den Rubinstab als Laserstrahlung durch den Spiegel mit Durchlässigkeit (Bild 157/2).
Die Laserstrahlung besitzt im Unterschied zum Licht herkömmlicher Lichtquellen eine Reihe bemerkenswerter Eigenschaften:

- Laserstrahlung ist nahezu parallel. Nach einer Strecke von 10 km hat sie sich erst um etwa 1,5 m verbreitert. Als Ver-



157/1 Entstehung des Laserlichtes



157/2 Aufbau eines Rubinlasers
1, 4 – Resonator
2 – Energiequelle
3 – Energiespeicher
4 – Energieausgeber

① Was verstehen Sie unter spontaner Emission?
② Was verstehen Sie unter induzierter Emission?

gleich sei angeführt, daß selbst bei einem guten Scheinwerfer das Lichtbündel bereits nach 1 km einen Durchmesser von 15 m besitzt. Infolge des nahezu parallelen Lichtbündels ist es z. B. möglich, kleinere Objekte auf dem Mond von der Erde aus erkennbar mit Laserstrahlen zu beleuchten.

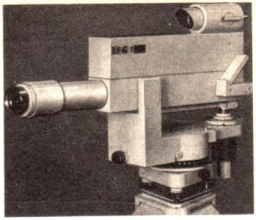
- Laserstrahlung zeichnet sich durch eine hohe Leucht- (und damit Energie-) Dichte aus. Sie läßt sich durch Fokussieren mittels Linsen auf sehr große Werte steigern.
- Laserstrahlung ist monochromatisch. Mit keinem anderen Verfahren läßt sich Licht einer bestimmten Frequenz mit so hoher Qualität erzeugen.
- Laserstrahlung läßt den Wellencharakter des Lichtes besonders deutlich erkennen. Demgegenüber tritt der Teilchenaspekt in den Hintergrund.
- Laserstrahlung ist völlig kohärent. Bei Gaslasern (das sind Laser, bei denen als Energiespeicher geeignete Gase Verwendung finden und die Energiezufuhr auf elektrischem Wege erfolgt) lassen sich Kohärenzlängen von 10^5 km erzielen. Bei herkömmlichen Lichtquellen liegt die Kohärenzlänge unter 1 m.

Die besonderen Eigenschaften des Laserlichts haben zu einer Reihe wichtiger Einsatzmöglichkeiten geführt. Genannt seien die Anwendung in der Nachrichtentechnik, zur Ortung und Entfernungsmessung, zur Materialbearbeitung, in der Medizin und Biologie, in der naturwissenschaftlichen Forschung, in der Meßtechnik und der Fotografie. Auch heute werden immer noch neue Einsatzmöglichkeiten des Lasers erschlossen. So bemüht man sich u. a. um einen breiten Einsatz bei der Datenverarbeitung und zur Schaffung der Bedingungen für die friedliche Nutzung der gesteuerten Kernfusion.

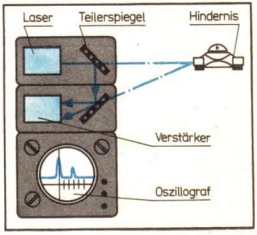
Anwendungsbeispiele zum Laser

Laser in der Spektroskopie. Der Einsatz des Lasers ermöglicht die Durchführung spektrometrischer Untersuchungen in sehr kurzer Zeit, wobei nur geringe Stoffmengen erforderlich sind. Auf diese Weise ist es möglich, die Art der Stoffe und ihr Massenverhältnis im Stoffgemisch zu ermitteln.
Eines der ersten industriell gefertigten Geräte, in das ein Laser eingebaut wurde, war der Laser-Mikrospektralanalysator vom VEB Carl Zeiss JENA (vgl. S. 149). Kleinste Mengen (10^{-9} g bis 10^{-6} g) eines Stoffgemisches, einer Legierung o. a. genügen zum Nachweis von bis zu 60 chemischen Elementen.

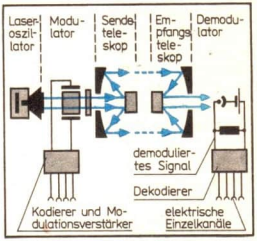
Laser bei der Längenmessung. Der Längenmessung kommt in allen Bereichen der Naturwissenschaft und Technik eine große Bedeutung zu, wobei die Anforderungen an die Genauigkeit ständig wachsen. Bei der Lösung dieser Aufgabe hat sich der Laser als sehr zweckmäßig erwiesen. Meßvorrichtungen mit Laser und Interferometer gestatten, selbst große Längen und Längendifferenzen auf Bruchteile einer Lichtwellenlänge genau zu messen.



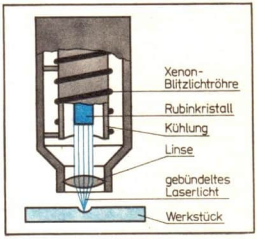
Laser bei der Entfernungsmessung. Laser werden u. a. für militärische Zwecke (also unter erschwerten Einsatzbedingungen) zur Entfernungsmessung eingesetzt. Bei einer Meßstrecke von 10 km beträgt unter solchen Bedingungen die Abweichung des Ergebnisses nur wenige Meter. 1976 wurde z. B. die Strecke Erde–Mond vermessen. Zur besseren Reflexion des Laserlichtes führte das sowjetische Mondfahrzeug „Lunochod 1" einen Laserreflektor mit sich.



Laser zur Nachrichtenübermittlung. Die zu übertragende Nachricht wird dem Laserstrahl mit einem Modulator aufgeprägt. Im Empfänger wird das Signal wieder demoduliert. Die sehr große Frequenz des Laserlichtes ermöglicht es, mittels eines Laserlichtbündels gleichzeitig Hunderttausende verschiedener Informationen zu übertragen. Während in Erdnähe witterungsbedingte Störungen auftreten, eignet sich der Laser hervorragend für Nachrichtenverbindungen im Weltall.



Laser bei der Materialbearbeitung. Die Erwärmung im Brennpunkt eines Laserlichtbündels reicht aus, um alle absorbierenden Materialien zu schmelzen. Es lassen sich z. B. Bleche aus schwerschmelzenden Metallen und Diamanten bohren, Drähte verschweißen und Hochtemperaturoxide schmelzen.



Zur Untersuchung des Wesens des Lichtes sind neben den in den vorangegangenen Abschnitten angegebenen Experimenten noch viele andere durchgeführt worden. Ihre wesentlichen Ergebnisse sollen am Beispiel eines Experiments mit einem Doppelspalt dargestellt werden.

Gemäß Bild 160/1 trifft ein Lichtbündel geringer Intensität auf einen Doppelspalt. Dahinter befindet sich in einiger Entfernung eine Fotoplatte. Dort bewirken die Photonen eine Schwärzung der jeweiligen Stelle, an der sie auftreffen. Nach dem Experiment gibt die Schwärzung der Fotoplatte Auskunft über die Häufigkeitsverteilung der aufgetroffenen Photonen. Aus der Sicht einer mechanisch-anschaulichen Vorstellung bestehen für jedes Lichtquant 3 Möglichkeiten, um zur Fotoplatte zu gelangen:

1. Es durchdringt den 1. Spalt,
2. Es durchdringt den 2. Spalt,
3. Es durchdringt gleichzeitig beide Spalte.

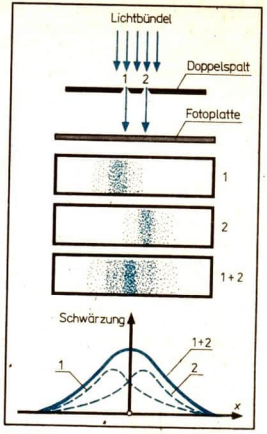
Das Teilchenmodell läßt nur die beiden ersten Möglichkeiten zu, das Wellenmodell nur die 3. Möglichkeit.
Wie kommt nun das für den Doppelspalt typische Interferenzbild zustande? Zur Beantwortung dieser Frage sollen die beiden Spalte in der Versuchsanordnung nacheinander einzeln geöffnet werden.

▼ **Doppelspaltexperiment mit nacheinander geöffneten Spalten.** In der im Bild 160/1 dargestellten Versuchsanordnung ist zunächst nur Spalt 1 geöffnet. Auf der Fotoplatte 1 sind die Auftreffstellen der Photonen markiert. Dabei wurden die bei der Beugung am einfachen Spalt auftretenden Nebenmaxima zur Vereinfachung der Darstellung vernachlässigt.

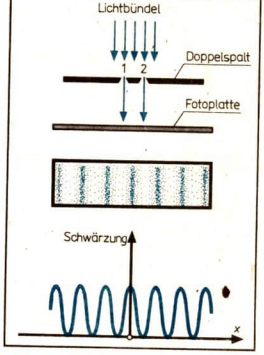
▼ Im 2. Teilversuch ist nur Spalt 2 geöffnet. Fotoplatte 2 zeigt die Verteilung der Photonen.
Beim Übereinanderlegen beider Fotoplatten müßte sich nun auf der Grundlage des Teilchenmodells die gleiche Häufigkeitsverteilung ergeben, wie wenn beide Spalte geöffnet sind (vgl. oben durchgeführte Betrachtung). Sie ist in Bild 160/1 als 1 + 2 angegeben, entspricht aber nicht dem vom Doppelspaltexperiment bekannten Interferenzbild. Unten im Bild sind die Häufigkeitsverteilungen für alle 3 Fälle grafisch dargestellt.

▼ **Doppelspaltexperiment mit gleichzeitig geöffneten Spalten.** In der beschriebenen Versuchsanordnung werden beide Spalte gleichzeitig geöffnet. Es ergibt sich die in Bild 160/2 dargestellte Häufigkeitsverteilung. Sie zeigt deutliche Maxima und Minima und ist nicht gleich der Summe der bei einzeln geöffneten Spalten erhaltenen Verteilungen (Bild 160/1).

Der Vergleich der in den Bildern 160/1 und 160/2 dargestellten Versuchsergebnisse macht deutlich, daß die Photonen den

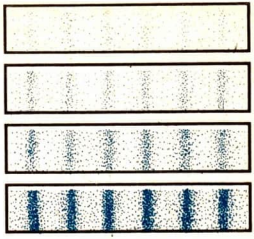


160/1 Häufigkeitsverteilungen der Photonen am Doppelspalt, wenn beide Spalte einzeln geöffnet werden.
1 – es ist nur Spalt 1 geöffnet
2 – es ist nur Spalt 2 geöffnet
1 + 2 – durch Übereinanderlegen von 1 und 2 erhaltene Häufigkeitsverteilung



160/2 Häufigkeitsverteilung der Photonen am Doppelspalt, wenn beide Spalte gleichzeitig geöffnet sind.

Doppelspalt nicht wie Teilchen im mechanischen Sinne durchdringen. Da noch die Denkmöglichkeit besteht, daß das Interferenzmuster nur dann auftritt, wenn die Photonen gewissermaßen paarweise beide Spalte durchdringen, soll das Experiment abgewandelt werden.

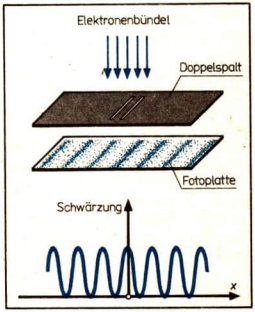


161/1 Allmähliches Ausbilden des Interferenzmusters beim Doppelspaltexperiment mit extrem geringer Lichtintensität. Die Bilder a bis d zeigen die Fotoplatte nach jeweils gleichen Zeitabständen.

▼ **Doppelspaltexperiment bei extrem geringer Lichtintensität.** Bei gleicher Versuchsanordnung wird die Lichtintensität so weit verringert, daß nur noch so viele Lichtquanten je Zeiteinheit ankommen, daß sie einzeln und nacheinander den Doppelspalt durchsetzen. Bild 161/1 zeigt die Gesamtheit der Auftreffstellen der Photonen auf der Fotoplatte nach jeweils gleichen Zeiten.
Auch bei extrem geringer Lichtintensität bildet sich nach genügend langer Zeit das vom Doppelspaltexperiment zur Wellenoptik auf S. 131 bekannte Interferenzmuster heraus.

Die Versuchsabläufe zeigen, daß die zu Beginn des Abschnittes angestellten mechanisch-anschaulichen Betrachtungen nicht dazu geeignet sind, die Ergebnisse richtig zu beschreiben. Das ist erst aus der Sicht der entwickelten Physik möglich.
Es liegt die Frage nahe, ob dieses komplizierte Welle-Teilchen-Verhalten nur auf das Licht beschränkt ist oder ob sich auch andere Mikroobjekte ähnlich verhalten.
Ein bekanntes mikrophysikalisches Objekt ist das Elektron. Das Verhalten des Elektrons ließ sich im Physikunterricht gut mit dem Teilchenmodell beschreiben, so z. B. bei der Ladungstrennung durch Reibung, bei elektrischen Leitungsvorgängen vor allem in metallischen Leitern und im Vakuum, beim glühelektrischen und beim lichtelektrischen Effekt, bei den Katoden- und Betastrahlen sowie deren Anwendung.

▼ **Doppelspaltexperiment mit Elektronen.** Um festzustellen, ob Elektronen auch Welleneigenschaften besitzen, findet die experimentelle Anordnung gemäß Bild 161/2 Verwendung. Die Elektronen durchdringen einen Doppelspalt und treffen nachfolgend auf eine Fotoplatte. Auf der Platte treten helle und dunkle Streifen auf. Rechts im Bild ist die Häufigkeitsverteilung der Elektronen aufgetragen. Ein Vergleich mit dem entsprechenden Experiment bei Photonen (Bild 160/2) zeigt prinzipielle Übereinstimmung.



161/2 Prinzip der Versuchsanordnung und Ergebnis beim Doppelspaltexperiment mit Elektronen

Das Experiment führt zu dem Ergebnis:

Beim Durchgang von Elektronen durch einen Doppelspalt treten Interferenzerscheinungen auf.

Durchdringt ein paralleles Elektronenbündel einen Kristall oder eine Metallfolie, so belegen die dabei auftretenden Erscheinungen ebenfalls die Welleneigenschaften der Elektronen. Befindet sich hinter dem Kristall bzw. der Metallfolie eine Fotoplatte, so erhält man ein Interferenzmuster. Die Elektronen werden an den Ionen gebeugt. Infolge der räumlichen Anordnung der Ionen weist das Interferenzmuster keine

parallelen Streifen wie beim Doppelspalt oder beim optischen Gitter auf, sondern Punkte oder konzentrische Kreise. Ein analoges Bild erhält man, wenn Photonen großer Energie (Röntgenstrahlen) den Kristall oder die Folie durchdringen.

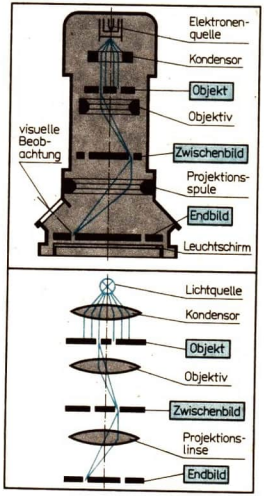
Experimente mit anderen Mikroobjekten ergeben, daß nicht nur Elektronen, deren Verhalten sich in vielen Fällen gut mit dem Teilchenmodell beschreiben läßt, gewisse Welleneigenschaften besitzen. Auch bei anderen Mikroobjekten wie Protonen und Neutronen treten Interferenzerscheinungen auf.

Alle Mikroobjekte besitzen sowohl gewisse Teilchen- als auch Welleneigenschaften. Weder das Wellen- noch das Teilchenmodell sind allein geeignet, die Mikroobjekte ausreichend zu beschreiben.

Das allmähliche Heranreifen dieser Erkenntnis unter den Wissenschaftlern war das Ergebnis sowohl experimenteller als auch theoretischer Arbeiten. Diese Entwicklung war für die Naturwissenschaften von großer Bedeutung. Das beim Licht zunächst unverständlich erscheinende Verhalten führte schließlich zur Aufklärung einer für die Mikrophysik typischen Struktur, die allen Mikroobjekten eigen ist. Diese Verallgemeinerung hatte darüber hinaus einen großen Einfluß auf die Entwicklung der Philosophie. Für die marxistische Philosophie stellte sie eine wesentliche Bereicherung dar. Sie ist ein weiterer Beleg sowohl für die Unerschöpflichkeit der Natur als auch für unser Fortschreiten zu immer besseren und umfassenderen Kenntnissen und Erkenntnissen. Viele nichtmarxistische Philosophen gerieten jedoch durch diese Erkenntnisse verständlicherweise in Schwierigkeiten bzw. deuteten sie falsch als Beleg für eine Nichterkennbarkeit der Welt.

Das Elektronenmikroskop. Die Wellen- und Teilcheneigenschaften der Mikroobjekte, insbesondere der Elektronen, führten zur Entwicklung neuer, hochwertiger Geräte, unter denen das Elektronenmikroskop zu den bedeutendsten gehört. Im Bild 162/1 ist der prinzipielle Aufbau eines Elektronenmikroskops dem eines Lichtmikroskops gegenübergestellt. Um störende Einflüsse der Luftmoleküle auszuschalten, muß sich das Objekt im Vakuum befinden. Beim Durchgang durch das hauchdünne Objekt wird das Elektronenbündel an den verschiedenen Stellen je nach dem Absorptionsvermögen der Objektsubstanz in unterschiedlichem Maße geschwächt. Danach wird es auf Grund der elektrischen Ladung der Elektronen in magnetischen oder elektrischen Feldern wie Licht in einer Glaslinse abgelenkt und erzeugt schließlich auf dem Fluoreszenzschirm ein Bild. Dabei lassen sich wesentlich stärkere Vergrößerungen als beim Lichtmikroskop erzeugen.

Der Vorteil des Elektronenmikroskops gegenüber dem Lichtmikroskop besteht in erster Linie in dem besseren **Auflösungsvermögen**. Das Auflösungsvermögen ist ein Maß für



162/1 Prinzipieller Aufbau eines Elektronenmikroskops mit magnetischen Linsen und eines Lichtmikroskops

den geringsten Abstand zweier benachbarter Beobachtungsobjekte, die mit Sicherheit noch als getrennt registriert werden können. Es kann beim Elektronenmikroskop mehr als 10^3 mal besser als beim Lichtmikroskop sein.

Zusammenfassung

69

Zielgerichtete empirische Untersuchung der Spektren

Ausgangspunkt der Betrachtungen war die Frage, ob den verschiedenartigen und mannigfaltigen Spektren der Stoffe ein System zugrunde liegt. Zu ihrer Beantwortung wurden Untersuchungen der Lichtemission und der Anregung der Atome bzw. Moleküle durchgeführt. Es zeigte sich, daß die Elektronenhülle der Entstehungsbereich der Lichtquanten ist. Die Spektren ermöglichten Aussagen über die Energiezustände der Elektronenhülle. Damit erwiesen sie sich als wichtiger Schlüssel zur Aufklärung der Struktur der Stoffe.

Bestätigung und Erweiterung der Untersuchungsergebnisse durch das Elektronenstoßexperiment

Die ausgehend von den Spektren gewonnenen Erkenntnisse bez. der quantenhaften Emission und Absorption der Energie wurden durch den Franck-Hertz-Versuch überprüft und bestätigt. Dabei zeigte sich, daß die Anregung nicht nur durch Strahlungsenergie und thermische innere Energie, sondern auch durch die kinetische Energie von Elektronen möglich ist. Bei einem solchen Stoß gibt das Elektron einen bestimmten Energiebetrag an das Atom ab. Diese Energie wird nachfolgend in Form eines Lichtquantes wieder ausgestrahlt.

Anwendung wichtiger Erkenntnisse beim Laser

Die Tatsache, daß neben der spontanen Emission auch induzierte auftreten kann, führte zum Laser, einer Lichtquelle mit bemerkenswerten Eigenschaften und vielseitigen Anwendungen. Bei der Entwicklung des Lasers wurden die gewonnenen Erkenntnisse über den Bau der Stoffe und das Wesen des Lichts planmäßig genutzt.
Während beim äußeren lichtelektrischen Effekt die Teilcheneigenschaften stark in den Vordergrund treten, sind es beim Laser die Welleneigenschaften des Lichts.

Verallgemeinerung der gewonnenen Ergebnisse

Ausgehend von dem Welle-Teilchen-Verhalten des Lichtes wurde die Frage gestellt, ob nicht andere Mikroobjekte, die bisher nur als Teilchen betrachtet wurden, auch Welleneigenschaften besitzen. Das Welle-Teilchen-Verhalten erwies sich als typisch für alle Mikroobjekte.

Bedeutung der Erkenntnisse

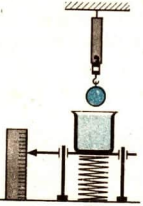
Alle diese Erkenntnisse beeinflußten die Entwicklung der Naturwissenschaften und Technik sowie der Philosophie nachhaltig. Die Auswirkungen reichen von der Stahlproduktion, bei der spektroskopische Verfahren eine wichtige Voraussetzung für eine hohe Qualität sind, über die Konstruktion hochwertiger Elektronenmikroskope bis hin zur Lösung der Probleme der jüngsten Bereiche der Naturwissenschaften.

AUFGABEN

Mechanik

Arbeit, Energie

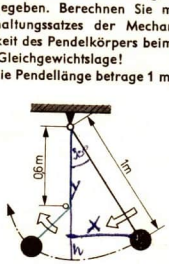
1. Woran ist zu erkennen, daß der Mond eine Kraft auf die Erde ausübt?
2. Diskutieren Sie, warum sich die von dem Kraftmesser angezeigten Kräfte verändern, sobald die Kugel in der Flüssigkeit untertaucht (Bild 164/1)! Formulieren Sie die statische Gleichgewichtsbedingung für die Kugel vor und nach dem Eintauchen!



164/1

3. Erläutern Sie, daß das Wechselwirkungsgesetz auch bei der Gleitreibung gültig ist!
4. Eine Rakete hat die Masse 20 t. Welche Schubkraft muß das Triebwerk beim senkrechten Abheben von der Startrampe mindestens entwickeln?
5. Weshalb werden elastische Verformungen von Körpern zur Kraftmessung genutzt?
6. Ein Kran hebt eine Last von 1,2 t senkrecht nach oben. Dabei tritt anfangs die Beschleunigung $0{,}15\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$ auf. Mit welcher Kraft wird das Seil hierbei beansprucht?
7. Wie können mit Hilfe der elektromagnetischen Induktion Geschwindigkeiten gemessen werden?
8. Ein Fahrgast läuft mit der Geschwindigkeit $1\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$
   - 8.1. in Fahrtrichtung
   - 8.2. entgegen der Fahrtrichtung
   - 8.3. senkrecht zur Fahrtrichtung

   eines Zuges, der sich mit der Geschwindigkeit $36\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$ bewegt. Bestimmen Sie grafisch die resultierenden Geschwindigkeiten!
9. Ein Körper gleitet reibungsfrei eine geneigte Ebene hinab. Zeichnen Sie die Kräfte ein, die auf den Körper einwirken, und bestimmen Sie deren Summe!
10. Ein Kraftfahrzeug der Masse 1 t wird mit der Verzögerung $a = 2\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$ gebremst. Berechnen Sie die Arbeit, die auf einem Bremsweg von 80 m verrichtet wird!
11. Ein Sputnik hatte die Masse 1 t und bewegte sich mit der Geschwindigkeit $7\ \mathrm{km \cdot s^{-1}}$. Ein Frachtschiff hatte die Masse 10^4 t und bewegte sich mit der Geschwindigkeit $36\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$.
    Vergleichen Sie die kinetischen Energien beider Körper!
12. Ein Kraftfahrzeug steigert seine Geschwindigkeit mit der konstanten Beschleunigung a von v_1 auf v_2. Entwickeln Sie mit Hilfe der Beziehung zwischen Arbeit und kinetischer Energie eine Gleichung für den Weg, der bei diesem Vorgang zurückgelegt wird!
13. Beschreiben Sie die Energieumwandlungen, die bei einem mechanischen Federschwinger stattfinden!
14. Ein Güterwagen der Masse 15 t stößt mit der Geschwindigkeit $2\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$ gegen einen Prellbock. Um welche Strecke werden dabei die beiden Pufferfedern zusammengedrückt?
    Die Federkonstante einer Pufferfeder beträgt $2 \cdot 10^6\ \mathrm{N \cdot m^{-1}}$.
15. N Mauersteine der Masse m und der Dicke d werden zu einer Säule aufeinandergeschichtet. Berechnen Sie die potentielle Energie dieser Säule im Schwerefeld der Erde!
16. Die in Bild 20/3 dargestellte Beschleunigungsarbeit wird an einem Geschoß der Masse 7,9 Gramm verrichtet. Welche Geschwindigkeit erhält das Geschoß hierbei?
17. Berechnen Sie die potentielle Energie eines Raumfahrzeuges der Masse 1 t, das sich in 300 km Höhe befindet! Die Abnahme der Schwerkraft mit zunehmender Höhe soll durch den durchschnittlichen Wert $g = 9{,}4\ \mathrm{m \cdot s^{-2}}$ für die Fallbeschleunigung berücksichtigt werden.
18. Ein Fadenpendel wird aus seiner vertikalen Gleichgewichtslage um den Winkel α ausgelenkt und danach freigegeben. Berechnen Sie mit Hilfe des Energieerhaltungssatzes der Mechanik die Geschwindigkeit des Pendelkörpers beim Durchgang durch die Gleichgewichtslage!
    Beispiel: Die Pendellänge betrage 1 m, der Winkel $\alpha = 30°$.



164/2

19. Ein Fadenpendel wird um einen Winkel $\alpha = 45°$ nach rechts ausgelenkt und danach freigegeben. Beim Erreichen der Vertikallage wird es durch einen Stift S von $l_1 = 1$ m auf $l_2 = 0{,}4$ m verkürzt. Begründen Sie, warum der Pendelkörper beim Anschlag nach links nahezu die gleiche Höhe erreicht wie beim Start! Prüfen Sie dies durch ein Experiment nach (Bild 164/2)!

Kraftstoß, Impuls

1. Das Raketentriebwerk einer meteorologischen Forschungssonde liefert einen Gasstrahl mit dem Massestrom 2,6 kg · s^{-1}, der mit der Geschwindigkeit 1,9 km · s^{-1} austritt. Welche Schubkraft entwickelt das Triebwerk?

2. Ein Körper hat den Impuls p und die Masse m. Geben Sie die kinetische Energie des Körpers an!

3. Die Trägerrakete des Raumschiffs „Sojus" liefert einen Startschub von etwa 5 MN.
Welchen Massestrom muß das Triebwerk liefern, wenn die Gase mit der Geschwindigkeit 3,2 km · s^{-1} ausströmen?

4. Erläutern Sie, wie auf der Grundlage des Impulserhaltungssatzes ein Massenvergleich möglich ist!

5. Beim Zerfall des Radiumkerns wird ein Alpha-Teilchen mit der Geschwindigkeit $1{,}5 \cdot 10^7$ m · s^{-1} emittiert. Welchen Impuls und welche Geschwindigkeit erhält der Tochterkern bei diesem Vorgang?

6. Ein Kosmonaut verfügt über eine Druckgaspistole, die eine Schubkraft von 5 N liefert. Seine Eigenmasse mit Ausrüstung beträgt 200 kg.
Welche Geschwindigkeitsänderung erfährt der Kosmonaut, wenn die Schubkraft 10 Sekunden lang wirkt?

7. Eine Versuchsperson steht auf einem leichtbeweglichen Wagen. Sie springt ab und landet auf einem zweiten Wagen gleicher Art. Welche Aussage liefert der Impulserhaltungssatz
7.1. für das System Person – Wagen 1
7.2. für das System Person – Wagen 2?

8. Der in Bild 30/1 dargestellte Kraftstoß wirkt auf ein Geschoß der Masse 7,9 Gramm. 1/1 KS 249
Welche Geschwindigkeit erhält das Geschoß hierdurch?

9. Auf einen Körper wirkt zuerst die Kraft $F_1 = 24$ N während der Zeit $t_1 = 0{,}03$ s ein, danach die Kraft $F_2 = 37$ N während der Zeit $t_2 = 0{,}02$ s.
Vergleichen Sie die Beträge der Kraftstöße!

10. Zwei Körper mit den Massen $m_1 = 3$ kg und $m_2 = 5$ kg haben den gleichen Impuls $p = 45$ kg · m · s^{-1}.
Berechnen Sie die Geschwindigkeiten beider Körper!

Stoßprozesse

1. Ein Güterwagen der Masse 3 t rollt mit der Geschwindigkeit 5 m · s^{-1} unter eine Ladevorrichtung. Dort werden während der Durchfahrt 10 t Kohle eingekippt. Mit welcher Geschwindigkeit rollt der beladene Wagen weiter?

2. Unter welchen Voraussetzungen können nach einem unelastischen Stoß beide Stoßpartner ruhen?

3. In Tabelle 165/1 sind erdachte Ergebnisse von Stoßversuchen dargestellt. Untersuchen Sie, ob bei diesen Vorgängen die Erhaltungssätze für Energie und Impuls erfüllt sind! Welche Vorgänge sind nicht realisierbar?
Überprüfen Sie das Ergebnis durch Stoßversuche mit Münzen oder Stahlkugeln!

Tabelle 165/1 $m_1 = m_2 = m_3$

Nr.	v_1 in m · s^{-1}	v_2 in m · s^{-1}	u_1 in m · s^{-1}	u_2 in m · s^{-1}
1	5	0	3	4
2	5	0	2,5	2,5
3	5	0	0	5
4	5	0	2	3
5	5	0	4	4

4. Eine Kugel der Masse 2 kg stößt mit der Geschwindigkeit 10 m · s^{-1} auf eine ruhende Kugel der Masse 3 kg.
Berechnen Sie die Geschwindigkeiten beider Kugeln nach dem Stoß
a) für den Fall des elastischen Stoßes,
b) für den Fall des unelastischen Stoßes!

5. Eine Person nimmt einen kurzen Anlauf und springt auf einen zunächst ruhenden Wagen auf. Diskutieren Sie diesen physikalischen Vorgang als Stoß!

6. Eine Kugel der Masse 990 Gramm stößt gerade elastisch mit der Geschwindigkeit 5 m · s^{-1} gegen eine ruhende Kugel der Masse 10 Gramm. Berechnen Sie die Geschwindigkeiten beider Kugeln nach dem Stoß! Vergleichen Sie das Ergebnis mit dem im Spezialfall $m_1 \gg m_2$ gültigen Ergebnis!

7. Über eine Messung mit dem Stoßpendel liegen die folgenden Angaben vor:
Masse des Geschosses $m_1 = 6$ g
Masse des Pendelkörpers $m_2 = 3{,}6$ kg
Maximalhöhe des Pendelkörpers über der Gleichgewichtslage 15 mm.
Berechnen Sie die Geschwindigkeit des Geschosses!

8. Bei einem Auffahrunfall stieß ein PKW der Masse $m_1 = 1{,}20$ t gegen ein zunächst ruhendes Fahrzeug der Masse $m_2 = 0{,}80$ t. Die Analyse ergab, daß beide Fahrzeuge unmittelbar nach dem Stoß die gemeinsame Geschwindigkeit $u = 8$ m · s^{-1} hatten. Wie groß war die Geschwindigkeit des PKW vor dem Aufprall?

Thermodynamik

1. Ein Eisenbahnzug hat die Masse $m = 2500$ t. Er wird von der Geschwindigkeit $v = 72\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$ bis zum Stillstand abgebremst.
Wie wird sich dabei die innere Energie der Bremsteile erhöhen, wenn angenommen wird, daß beim Vorgang des Bremsens keine Wärme an die Umgebung übertragen wird?

2. Bei der Verbrennung eines Streichholzes werden 1,2 J frei. Wie hoch muß man einen Körper der Masse $m = 50$ kg heben, um eine gleichwertige Arbeit zu verrichten?

3. Ein Werkstück aus Stahl wird auf einer Drehmaschine bearbeitet. Die Schnittgeschwindigkeit beträgt $v = 24\ \mathrm{m \cdot min^{-1}}$. Der Drehmeißel erfährt tangential zur Oberfläche des Werkstückes eine Kraft von $F = 2{,}5$ kN.
   a) Welche Leistung muß für das Zerspanen aufgebracht werden?
   b) Wie groß ist die in einer Minute verrichtete Arbeit?
   c) Die Hälfte der verrichteten Arbeit soll sich als Erhöhung der inneren Energie des Drehspans auswirken. Welche Temperaturerhöhung erfährt der Span (Spanquerschnitt 1 mm)?

4. Eine abgeschlossene Luftmasse dehnt sich isotherm vom Volumen 2 $\mathrm{dm^3}$ auf das Volumen 12 $\mathrm{dm^3}$ aus. Der Anfangsdruck beträgt 1 MPa.
   a) Bestimmen Sie die bei der Expansion verrichtete Arbeit mit Hilfe eines p-V-Diagramms.
   b) Welche Wärme muß der Luft bei diesem Vorgang zugeführt werden?

5. Diskutieren Sie, ob einem Gas Wärme zugeführt werden kann, ohne daß eine Temperaturerhöhung stattfindet!

6. Von einer in einem Zylinder eingeschlossenen Luftmenge ist bekannt, daß sich bei einem Prozeß ihr Volumen von $V_a = 10\ \mathrm{dm^3}$ auf $V_e = 2\ \mathrm{dm^3}$ verringert, während der Druck einen linearen Anstieg von $p_a = 0{,}1$ MPa auf $p_e = 0{,}5$ MPa erfährt. Wie groß ist die Volumenarbeit?

7. Mit einem Tauchsieder wird 1 l Wasser bei konstantem Druck erwärmt. Dabei werden aber nur 80% der dem Netz entnommenen Energie zur Energiezufuhr an das Wasser genutzt.
   a) Welche elektrische Leistung muß der Tauchsieder haben, wenn innerhalb von 15 Minuten das Wasser von 10 °C auf die Siedetemperatur 99,63 °C gebracht werden soll?
   b) In welcher Zeit läuft der Vorgang ab, wenn ein Tauchsieder mit einer Leistung von 1000 W verwendet wird?

8. In einem vollkommen wärmeisolierten Behälter mit starren Wänden befindet sich ein ideales Gas mit einer Masse von 2 kg und einer Anfangstemperatur von 30 °C, dessen spezifische Wärmekapazität in diesem Temperaturbereich $c_V = 0{,}8\ \mathrm{kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}}$ beträgt. Über ein Rührwerk wird dem Gas eine mechanische Arbeit von 10 kJ zugeführt. Berechnen Sie die Endtemperatur!

9. In einem Gefäß befindet sich 1 $\mathrm{dm^3}$ Wasser der Temperatur 10 °C. Es wird bei ständigem Umrühren Wasser der Temperatur 80 °C zugegossen. Wie hängt die Mischungstemperatur von der Masse des nachgefüllten Wassers ab?
Stellen Sie diesen Zusammenhang in einem Diagramm für den Bereich 0 bis 2 $\mathrm{dm^3}$ dar!

10. Erläutern Sie, auf welche Weise die spezifische Wärmekapazität einer Flüssigkeit gemessen werden kann!

11. In eine Destillationsanlage tritt Kühlwasser der Temperatur 8 °C ein. Beim Verlassen des Kühlers hat sich das Wasser auf 30 °C erwärmt. Welche Wärme wird dem Kühlwasser in 2 h übertragen, wenn die Durchflußmenge des Wassers 6 Liter je Minute beträgt?

12. Eine Stahlkugel ($m = 25{,}0$ g, $c = 0{,}46\ \mathrm{kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}}$) wird einige Zeit in der Flamme eines Bunsenbrenners erwärmt und danach sofort in ein Kalorimeter mit der Wärmekapazität $K = 4{,}4\ \mathrm{kJ \cdot K^{-1}}$ gebracht. Die Temperatur des Kalorimeters steigt hierbei von 24,2 °C auf 41,3 °C. Welche Temperatur hat die Kugel in der Flamme angenommen?

13. Entwerfen Sie ein Diagramm, aus dem hervorgeht, wie die Temperaturänderung von Körpern der Masse $m = 1$ kg aus Aluminium, Kupfer, Blei oder Stahl von der zugeführten Wärme abhängt!

14. In einem Gefäß befinden sich 0,5 kg Wasser der Temperatur 90 °C. Es wird eine gleich große Wassermenge der Temperatur 10 °C nachgefüllt. Bestimmen Sie die Mischtemperatur ϑ_m! Die Änderung der inneren Energie des Gefäßes soll vernachlässigt werden!

15. 6,2 kg Aluminium der Temperatur 85 °C werden in einen Eisenbehälter der Masse $m_{Fe} = 1$ kg gebracht, der mit 8 l Wasser gefüllt ist. Wasser und Behälter haben vor dem Eintauchen eine Temperatur von 15 °C.
Die mittleren spezifischen Wärmekapazitäten sind
   - für Aluminium $c_{Al} = 0{,}908\ \mathrm{kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}}$
   - für Wasser $c_{H_2O} = 4{,}18\ \mathrm{kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}}$
   - für Eisen $c_{Fe} = 0{,}465\ \mathrm{kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}}$.

Welche Mischtemperatur stellt sich ein, wenn keine Wärme an die Umgebung abgeführt wird und der Vorgang bei konstantem Druck abläuft?

16. Siedendes Wasser der Masse 50 kg, das unter einem konstanten Druck von 1 MPa steht, soll verdampft werden. Bei welcher Temperatur läuft dieser Vorgang ab?
Welche Wärmezufuhr ist notwendig, wenn das Wasser ansonsten von seiner Umgebung isoliert ist?

17. In einem Kochkessel sollen bei konstantem Druck von 0,1 MPa 2 kg Wasser von 15 °C erwärmt und verdampft werden.
Welche Wärmezufuhr ist mindestens notwendig? Veranschaulichen Sie diesen Vorgang in einem *T*-*Q*-Diagramm!

18. In einem Dampferzeuger werden stündlich 20 t Wasserdampf bei konstantem Druck $p = 10$ MPa erzeugt.
a) Bestimmen Sie die dem Wasser von $\vartheta_a = 15$ °C zuzuführende Wärme, wenn der Dampf mit Siedetemperatur die Anlage verläßt!
b) Wieviel Tonnen Lausitzer Briketts werden stündlich benötigt, wenn bei deren Verbrennung 20000 kJ · kg^{-1} Energie frei wird und der Wirkungsgrad der Anlage $\eta = 0{,}9$ beträgt?

19. Ein Stahlträger hat bei 0 °C die Länge $l = 20$ m. Entwerfen Sie ein Diagramm, aus dem die Länge des Trägers für Temperaturen zwischen —20 °C und +40 °C entnommen werden kann!

20. Ein Stahlmeßband ist für eine Meßtemperatur von 18 °C geeicht. Bei der Temperatur —20 °C mißt man die Länge eines Bauplatzes von $l = 62{,}35$ m. Welcher Fehler ist durch die Längenänderung des Meßbandes entstanden, wenn der lineare Ausdehnungskoeffizient
$\alpha = 11{,}5 \cdot 10^{-6}$ K^{-1} beträgt?

21. In einen Winderhitzer eines Hochofens tritt Luft mit der Temperatur 10 °C ein und wird während des Durchströmens bei gleichbleibendem Druck auf 800 °C erhitzt.
a) Auf welches Vielfache wächst dabei das Volumen der Luft an?
b) Die Ausströmöffnung hat den dreifachen Querschnitt der Einströmöffnung. In welchem Verhältnis stehen die Geschwindigkeiten beim Aus- und Einströmen?

22. Die Luft in einem Zimmer wird bei gleichbleibendem Druck von 12 °C auf 22 °C erwärmt. Sie hat eine mittlere Dichte von $\varrho = 1{,}29$ kg · m^{-3} und eine spezifische Wärmekapazität
$c_p = 1{,}005$ kJ · kg^{-1} · K^{-1}.
a) Wieviel Luft muß nach außen entweichen, wenn das Zimmer folgende Abmessungen hat: $l = 5$ m, $b = 4$ m, $h = 3$ m!
b) Welche Wärme muß zugeführt werden?

23. Im Schlauch eines Autoreifens herrscht bei 18 °C ein Druck von 0,3 MPa. Wie groß wird der Druck, wenn durch Sonneneinstrahlung die Temperatur auf 40 °C steigt?

24. Eine kugelförmige Gasblase steigt vom Grund eines Gewässers auf. Nahe der Oberfläche beträgt ihr Durchmesser 1 cm. Wie groß war der Durchmesser in 30 m Tiefe, wenn Temperaturunterschiede vernachlässigt werden?

25. Bei welcher Temperatur nimmt ein ideales Gas unter konstantem Druck das doppelte Volumen ein, wenn das Gas eine Anfangstemperatur von 15 °C aufweist?

26. Eine Stahlflasche für Sauerstoff mit einem Volumen von 40 Litern wird bei 5 °C bis zu einem Druck von 15 MPa gefüllt. Wieviel Liter Gas können unter einem Druck von 0,15 MPa bei 20,5 °C entnommen werden?

27. Eine Achtliterflasche mit Kohlendioxid, wie sie in Gaststätten zum Ausschenken von Bier und Brause benutzt wird, hat bei 20 °C einen Druck von 1,2 MPa. Wie groß ist das Volumen der eingeschlossenen Gasmasse im Normzustand?

28. In einem Luftvolumen $V_0 = 1$ m^3 herrscht bei $T_0 = 273{,}15$ K der Druck 0,1 MPa. Die Luft wird als ideales Gas betrachtet und hat eine Dichte von $\varrho = 1{,}29$ kg · m^{-3}.
a) Berechnen Sie die Masse der Luft!
b) Welche Wärme ist erforderlich, die Luft isochor um 1 K zu erwärmen ($c_V = 0{,}718$ kJ · kg^{-1} · K^{-1})?
c) Welche Wärme muß zugeführt werden, um die Luft vom gleichen Ausgangszustand isobar um 1 K zu erwärmen ($c_p = 1{,}005$ kJ · kg^{-1} · K^{-1})?
d) Wie groß ist der Volumenzuwachs bei der isobaren Erwärmung?
e) Welche Arbeit verrichtet die Luft bei isobarer Erwärmung?
f) Stellen Sie die Energiebilanz für die isobare Erwärmung auf!

29. Ein Luftvolumen 0,5 m^3 hat die Temperatur 20 °C und einen Druck 0,1 MPa. Welche Arbeit wird verrichtet, wenn bei gleichbleibendem Druck die Temperatur auf 150 °C erhöht wird?
Zeigen Sie diesen Vorgang in einem *p*-*V*-Diagramm!

30. In einem geschlossenen Behälter befindet sich Luft von 15 °C und 0,11 MPa. Durch Wärmezufuhr steigt der Druck auf 0,4 MPa. Gegeben ist die spezifische Wärmekapazität der Luft bei konstantem Volumen $c_V = 0{,}718$ kJ · kg^{-1} · K^{-1}.
a) Skizzieren Sie den Prozeß im *p*-*V*-Diagramm!
b) Auf welche Temperatur wird die Luft im Kessel erwärmt?
c) Welche Wärme wird je kg Luft zugeführt?

31. In einer Kälteanlage wird Luft mit einem Druck von 0,1 MPa und einer Temperatur von 300 K in einem Kühler isobar auf 250 K abgekühlt, wobei je Sekunde 650 kJ Wärme abgegeben wird. Anschließend wird der Luftdruck in einer Entspannungsmaschine auf 0,025 MPa abgesenkt, die Temperatur der Luft sinkt dabei auf 168 K ab. Danach führt man die Luft in Rohrschlangen durch den zu kühlenden Raum, wobei sie bei gleichbleibendem Druck die Wärme $Q = 200$ kJ aufnimmt. Die Luft ist als ideales Gas mit $c_p = 1{,}005$ kJ · kg^{-1} · K^{-1} zu betrachten!

a) Veranschaulichen Sie den Prozeß im *p-V*-Diagramm!
b) Bestimmen Sie die Lufttemperatur nach der Wärmeaufnahme!

32. In einer Gasturbinenanlage werden folgende Prozesse verwirklicht:
1–2 adiabatische Verdichtung
2–3 isobare Wärmezufuhr
3–4 adiabatische Entspannung
4–1 isobare Kühlung
Gegeben sind die Temperaturen T_1, T_2, T_3 und T_4, die Masse des in der Sekunde umlaufenden Stoffes sowie die spezifische Wärmekapazität c_p.
a) Berechnen Sie die Leistung der Anlage!
b) Berechnen Sie den Wirkungsgrad!

33. Erläutern Sie die Prozesse in einem Wärmekraftwerk und die Berechnung des Wirkungsgrades!

34. Erläutern Sie die Besonderheiten von Kernkraftwerken und deren Vorteile!

35. Berichten Sie über die Zusammenarbeit der sozialistischen Länder bei der Errichtung von Kraftwerksanlagen!

36. Erarbeiten Sie eine Übersicht zum Einsatz von Wärmekraftmaschinen in der Energiewirtschaft, in der Industrie, in der Landwirtschaft und im Verkehrswesen!

Optik

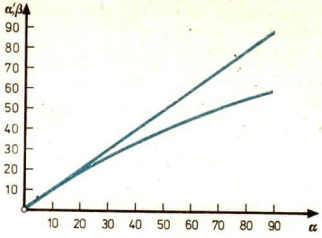
Strahlenoptik

1. Der Einfallswinkel eines Lichtstrahls auf eine ebene Grenzfläche beträgt 55°. Wie groß ist der Winkel zwischen dem reflektierten und dem gebrochenen Strahl, wenn die Brechzahl $n = 1{,}5$ ist?

2. Die Einfallswinkel eines Lichtstrahls betragen an einer Grenzfläche Luft–Wasser 30°, 45°, 60° und 75°. Wie groß sind die Brechungswinkel, wenn $n = 4/3$ ist?

3. Unter welchen Bedingungen stimmen die Richtungen des einfallenden und des „gebrochenen" Lichtstrahls beim Übergang des Lichtes von einem Medium in ein anderes Medium überein?

4. In dem Diagramm nach Bild 168/1 sind der Graph für die Reflexions- und die Brechungswinkel in Abhängigkeit vom Einfallswinkel gegeben. Deuten Sie dieses Diagramm für den Übergang des Lichtes an einer Grenzfläche zwischen zwei optisch verschiedenen Medien! Berücksichtigen Sie auch verschiedene Farben des einfallenden Lichtes!



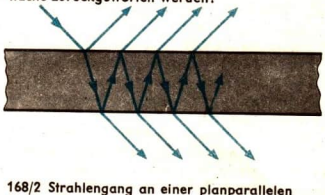
168/1

5. Entwickeln Sie aus dem Diagramm nach Bild 168/1 auch die Graphen $\alpha' = f(\alpha)$ und $\beta = f(\alpha)$ für den Übergang des Lichtes von einem optisch dichteren in ein optisch dünneres Medium! Deuten Sie das Ergebnis!

6. Vergleichen Sie anhand eines Tabellenwerkes für verschiedene Stoffe die mechanische Dichte (Masse/Volumen) mit der optischen Dichte! Läßt sich eine Beziehung zwischen der mechanischen Dichte und der optischen Dichte herleiten?

7. Fällt Licht auf eine Grenzfläche zwischen zwei optischen Medien, so wird ein Teil des Lichtes reflektiert und ein Teil des Lichtes gebrochen. Fällt das reflektierte oder gebrochene Licht abermals auf eine Grenzfläche, so wird auch dieses Licht wiederum zum Teil reflektiert und zum Teil gebrochen. In Bild 168/2 ist der Strahlenverlauf an einer planparallelen Platte skizziert.
Welchen Einfluß hat die Dicke der Platte auf den Strahlengang?

8. Geben Sie, ähnlich wie in Aufgabe 7, den Strahlenverlauf für einen rückseitig „versilberten" Glasspiegel an! Sagen Sie etwas über die relative Intensität der Lichtstrahlen aus, indem Sie annehmen, daß bei dem betreffenden Einfallswinkel des Lichtes immer 10% des einfallenden Lichtes an der unverspiegelten Grenzfläche reflektiert und 100% des einfallenden Lichtes an der verspiegelten Grenzfläche zurückgeworfen werden!


168/2 Strahlengang an einer planparallelen Platte

9. Durchdringt ein Lichtstrahl eine planparallele Glasplatte, so tritt eine Parallelverschiebung des Lichtstrahls auf. Wie groß ist die Parallelverschiebung, wenn der Lichtstrahl unter 45° auf eine 5 cm dicke planparallele Glasplatte mit der Brechzahl $n = 1{,}5$ auftrifft?

10. Beschreiben Sie das entstehende Bild, wenn zur Abbildung eines Gegenstandes anstelle einer vollständigen Linse nur ein Bruchstück einer Linse (Bild 169/1) verwendet wird!

169/1 Unvollständige Abbildungslinse

11. Entwerfen Sie eine Versuchsanordnung und führen Sie den entsprechenden Versuch durch, um die untenstehende Tabelle anhand der Versuchsergebnisse vervollständigen zu können!
Was für ein optisches Abbildungselement wählen Sie?

Gegenstand			Bild	
Ort	Ort	Art	Lage	Größe
$s > 2f$	$f < s' < 2f$	reell	höhenverkehrt seitenverkehrt	$y' < y$
$s = 2f$				
$2f > s > f$				
$f > s$				

Verwenden Sie zur Bezeichnung der Bildlage die Ausdrücke „aufrecht", „seitenverkehrt", „höhenverkehrt" und „kopfstehend" bzw. „umgekehrt" (= seitenverkehrt + höhenverkehrt)!

12. Anstelle der Abbildungsgleichung $1/f = 1/s + 1/s'$ wird vielfach die Newtonsche Abbildungsgleichung in der Form $f^2 = z \cdot z'$ verwendet.
Hierbei sind $z = s - f$ und $z' = s' - f$. Interpretieren Sie die Größen z und z'! Leiten Sie die Gleichung $f^2 = z \cdot z'$ aus der Abbildungsgleichung durch Einsetzen der entsprechenden Größen ab. Tragen Sie z' in Abhängigkeit von z graphisch auf! Diskutieren Sie die Kurve!

13. Für den Fall, daß die Gegenstandsweite kleiner ist als die Brennweite einer Sammellinse (oder eines Hohlspiegels), ergibt sich rechnerisch für die Brennweite ein negativer Wert. Diskutieren Sie diesen Fall! Führen Sie einen entsprechenden Versuch durch, und geben Sie eine physikalische Deutung des rechnerischen Ergebnisses!

14. Errechnen Sie nach der gegebenen Tabelle die Bildweiten für die vorgegebenen Gegenstandsweiten und die vorgegebenen Brennweiten! Interpretieren Sie insbesondere die herausfallenden Ergebnisse!

Gegenstandsweite in cm	Brennweite in cm				
	10	20	30	40	50
10					
20					
50					
100					
1000					

15. Ein Gegenstand, der 10 cm groß ist und sich 2 m vor einer Linse mit der Brennweite von 50 mm befindet, soll mit Hilfe der Linse scharf abgebildet werden.
In welcher Entfernung von der Linse entsteht das Bild? Wie groß ist das Bild?

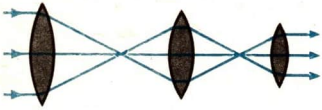
16. Untersuchen Sie Ort, Art, Lage und Größe der Bilder, die bei der Abbildung durch Spiegel und Linsen entstehen. Tragen Sie Ihre Untersuchungsergebnisse in solch eine Tabelle ein!

abbildendes Element	Gegenstandsweite				
	$s > 2f$	$s = 2f$	$2f > s > f$	$s = f$	$s < f$
Hohlspiegel					
Planspiegel					
Wölbspiegel					
Sammellinse					
planparallele Platte					
Zerstreuungslinse					

17. Wenn die Brechzahlen des Lichtes für die verschiedenen Farben des Lichtes unterschiedlich sind, muß sich das zwangsläufig auch auf die Abbildung durch Linsen auswirken. Was vermuten Sie? Geben Sie die Folgerungen an, die Ihrer Meinung nach auftreten müßten!

18. Vergleichen Sie die Strahlenverläufe an Kamera und Bildwerfer!

19. In Bild 170/1 ist der Strahlengang eines terrestrischen Fernrohrs mit einer Umkehrlinse skizziert. Erklären Sie die Wirkungsweise des Fernrohrs, indem Sie den Strahlengang und die entstehenden Bilder beschreiben! Geben Sie die Gesamtlänge des Fernrohrs an, ausgedrückt durch die Brennweiten der verwendeten Linsen! Vergleichen Sie dieses Fernrohr mit einem astronomischen Fernrohr und mit einem Prismenfernrohr!

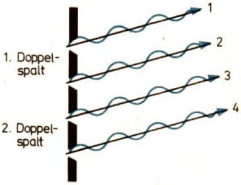


170/1

20. Um bei astronomischen Beobachtungen die Helligkeit schwach zu erkennender Fixsterne zu steigern, haben die Fernrohrobjektive einen großen Durchmesser. Linsen mit einem großen Durchmesser sammeln mehr Licht als solche mit einem kleinen Durchmesser. Vgl. auch die Pupillengröße von Tagtieren und Nachttieren! Ein punktförmig abgebildeter Stern bleibt aber auch bei jeder Vergrößerung des Objektivdurchmessers als punktförmiger Stern erhalten. Erklären Sie dieses Phänomen mit der Größe und dem Abstand der Sehstäbchen auf der Netzhaut des Auges!

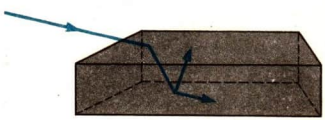
Wellenoptik

1. Ein optisches Gitter hat die Gitterkonstante $b = 0{,}015$ mm. Bei einem Beugungsversuch sind auf dem 2,5 m entfernten Auffangschirm die beiden hellen Beugungsstreifen 1. Ordnung 20 cm voneinander entfernt. Wie groß ist die Wellenlänge des verwendeten Lichts?
2. Bei einem Beugungsversuch mit einem optischen Gitter wurde Natriumlicht mit der Wellenlänge $\lambda = 590$ nm verwendet. Der Auffangschirm war 2 m vom Gitter entfernt. Der Abstand der beiden hellen Beugungsstreifen 1. Ordnung voneinander betrug 18 cm. Wie groß war die Gitterkonstante?
3. Eine Natrium-Metalldampflampe strahlt Licht mit der Wellenlänge $\lambda = 5{,}89 \cdot 10^{-5}$ cm auf einen Doppelspalt, bei dem Spaltbreite plus Stegbreite 0,1 mm beträgt. Wie groß ist der Abstand zwischen dem Maximum 0. Ordnung und dem Maximum 1. Ordnung auf dem Auffangschirm, wenn sich dieser 1 m hinter dem Doppelspalt befindet?
4. Die Spaltbreite in einer Blende beträgt 0,1 mm. Wieviel Wellenlängen des roten Lichts mit $\lambda = 500$ nm entsprechen dieser Spaltbreite?
5. Wie können die Farberscheinungen an einer Seifenblase erklärt werden?
6. Erzeugen Sie mit Hilfe des Reflexionsgitters, dessen Gitterkonstante $b = 1/650$ cm beträgt, Beugungsspektren. Wieviel Spektren erscheinen? Erklären Sie, warum beim Spektrum ... Ordnung nicht mehr alle Farben erscheinen!
7. Diskutieren Sie anhand einer Skizze die Möglichkeit, daß bei konstant bleibender Spaltbreite in einem Gitter die Stegbreite vergrößert oder verkleinert wird! Wie wirkt sich eine solche Veränderung auf den Abstand der Beugungsstreifen auf dem Auffangschirm aus?
8. Ein Viererspalt kann aus zwei Doppelspalten bestehend aufgefaßt werden. Die Überlagerung der homologen Strahlen 1 und 2 sowie 3 und 4 ergibt, daß am Doppelspalt und am Viererspalt beim Ablenkwinkel α mit $\sin\alpha_1 = \frac{\lambda}{2b}$ ein Minimum 1. Ordnung auftritt (Bild 170/2). Am Viererspalt tritt bei der Überlagerung der Strahlen 1 und 3 sowie 2 und 4 für den gleichen Ablenkwinkel mit $\sin\alpha = \frac{\lambda}{2b}$ ein Maximum 1. Ordnung auf. Wie ist dieser Widerspruch zu beseitigen?



170/2

9. Vervollständigen Sie den Strahlengang in Bild 170/3! Was für ein Effekt tritt an der Glasplatte bei dem angedeuteten Strahlengang vermutlich auf?



170/3

Quantenhafte Absorption und Emission von Licht

1. Bei der Einstrahlung der Frequenzen $f_1 = 6{,}88 \cdot 10^{14}\,s^{-1}$ und $f_2 = 5{,}19 \cdot 10^{14}\,s^{-1}$ waren Gegenspannungen von $U_1 = 0{,}83$ V und $U_2 = 0{,}13$ V erforderlich, um alle Fotoelektronen auf die Geschwindigkeit 0 abzubremsen.
   Berechnen Sie das Plancksche Wirkungsquantum! Bestimmen Sie die Austrittsarbeit für das Katodenmaterial der verwendeten Fotozelle!
2. Bei der Einstrahlung der Wellenlängen 546 nm und 366 nm des Quecksilberlichtes waren Gegenspannungen von 0,28 V und 1,30 V erforderlich, um alle Elektronen auf die Geschwindigkeit 0 abzubremsen. Zeichnen Sie die Einsteinsche Gerade, und gewinnen Sie daraus alle interessierenden Ergebnisse!
3. Berechnen Sie ausgehend von Bild 148/2 die Frequenzen der Wasserstofflinien im sichtbaren Bereich, und vergleichen Sie sie mit den Angaben in Tabelle 147/1!
4. Berechnen Sie die Frequenz, die beim Übergang des Wasserstoffatoms vom angeregten Zustand E_3 zum Grundzustand E_0 auftritt (vgl. Bild 148/3)! In welchem Bereich des elektromagnetischen Spektrums liegt diese Frequenz?
5. Berechnen Sie die Frequenz, die beim Übergang des Wasserstoffatoms vom angeregten Zustand E_3 zum angeregten Zustand E_2 auftritt! In welchem Bereich des elektromagnetischen Spektrums tritt die dadurch bedingte Spektrallinie auf (Bild 148/3)?
6. Welche Wellenlänge und Frequenz besitzt die kurzwelligste Wasserstofflinie gemäß Energieniveauschema in Bild 148/3?
7. Auf welche diskreten Energiebeträge, die in einem Stoß übertragen werden, läßt die Tabelle 153/1 schließen?
8. Berechnen Sie die Wellenlängen der Strahlung, die aufgrund der Energiebeträge in Tabelle 153/1 erwartet werden!
9. Bei der abgewandelten Durchführung des Franck-Hertz-Versuchs fand anstelle von Quecksilberdampf Argon Verwendung. Das erste Absinken der Stromstärke-Spannungs-Kurve wurde bei 11,6 V festgestellt. Welche Frequenz besitzt das dadurch verursachte Licht? In welchem Spektralbereich tritt es auf?
10. Vergleichen Sie die Interferenzmuster, die bei Verwendung von Lichtquanten auftreten, mit denen bei Elektronen!
11. Stellen Sie ausgehend von Bild 160/1 dar, wie sich Elektronen in einer Versuchsanordnung verhalten, bei der nacheinander beide Spalte geöffnet werden!
12. Beschreiben Sie anhand von Bild 161/1, wie sich das Interferenzmuster allmählich aufbaut, wenn ein extrem schwaches Elektronenbündel den Doppelspalt durchsetzt!
13. Stellen Sie die Ihnen bekannten Mikroobjekte zusammen!

Lösungen

Mechanik

Arbeit, Energie

4. Die Schubkraft F muß größer als die Gewichtskraft $F_G = m \cdot g$ sein.
   $F_G > 196$ kN
6. $F_S \approx 12$ kN
10. $W = 160$ kJ
11. $E_{kin1} = 24{,}5$ GJ
    $E_{kin2} = 0{,}5$ GJ
12. $s = \dfrac{v_2^2 - v_1^2}{2a}$
14. $\dfrac{1}{2} m \cdot v^2 = 2 \cdot \dfrac{1}{2} k \cdot s^2$
    $s = 12$ cm
15. $E_{pot} = \dfrac{1}{2} m \cdot g \cdot N^2 \cdot d$?
16. $v = 1{,}1 \cdot 10^3\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$
17. $E_{pot} = 2{,}82$ GJ $= 783$ kWh
18. $v = 1{,}6\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$

Kraftstoß, Impuls

1. $F_s = 4{,}9$ kN
2. $E_{kin} = \dfrac{p^2}{2m}$
3. $\dfrac{m_G}{t} = 1{,}6 \cdot 10^3\ \mathrm{kg \cdot s^{-1}}$
5. $^{226}_{88}\mathrm{Ra} \longrightarrow {}^{222}_{86}\mathrm{Rn} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$
   Der Tochterkern hat die Massenzahl 222.
   $m_\alpha \cdot v_\alpha = m_{Rn} \cdot v_{Rn}$
   $v_{Rn} = \dfrac{m_\alpha}{m_{Rn}} \cdot v_\alpha$
   $v_{Rn} = 2{,}7 \cdot 10^5\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$
6. $\Delta v = 0{,}25\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$
8. $v = 1{,}4 \cdot 10^3\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$
9. $S_2 > S_1$
10. $v_1 = 15\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$
    $v_2 = 9\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$

Stoßprozesse

1. $u_W = 1{,}2\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$
4. a) $u_1 = -2\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$
   $u_2 = 8\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$
   b) $u = 4\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$
6. $u_1 = 4{,}9\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$
   $u_2 = 9{,}9\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$
7. Wegen $m_2 \gg m_1$ gilt die Näherungsbeziehung
   $v_1 = \dfrac{m_2}{m_1} \sqrt{2g \cdot h}$
   $v_1 = 325\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$
8. $v_1 = 48\ \mathrm{km \cdot h^{-1}}$

Thermodynamik

1. $\Delta U = 500$ MJ
2. $\Delta h = 2{,}45$ m
3. a) $P = 1$ kW
   b) $W = 60$ kJ
   c) $\Delta T = 346$ K
4. a) $W_v = -3{,}5$ kJ
   b) $Q = -W_v$
6. $W_v = 2{,}4$ kJ
7. a) $P = 522$ W
   b) $t_z = 7{,}82$ min
8. $\vartheta_e = 36{,}25\ ^\circ\mathrm{C}$
11. $Q = 66{,}4$ MJ
12. $\vartheta_{a,A} = 934\ ^\circ\mathrm{C}$
14. $\vartheta_m = 50\ ^\circ\mathrm{C}$
15. $\vartheta_m = 24{,}2\ ^\circ\mathrm{C}$
16. $Q_v = 100$ MJ
17. $Q = 5{,}26$ MJ
18. a) $Q = 54100$ MJ
    b) $m = 3$ t
20. $\Delta l = 27{,}2$ mm
21. a) $V_e = 3{,}79\ V_a$
    b) $v_e = 1{,}26\ v_a$
22. a) $\Delta V = 2{,}10\ \mathrm{m^3}$
    b) $Q = 778$ kJ
23. $p_e = 3{,}27$ MPa
24. $d = 0{,}63$ cm
25. $T_e = 576$ K
26. $V = 4220$ l
27. $V_0 = 88{,}3$ l
28. a) $m = 1{,}29$ kg
    b) $Q_v = 0{,}926$ kJ
    c) $Q_p = 1{,}30$ kJ
    d) $\Delta V = 3{,}66$ l
    e) $W_v = -0{,}37$ kJ
29. $W_v = -22{,}2$ kJ
30. b) $T_e = 1048$ K
    c) $Q = 546$ kJ
31. b) $T = 199$ K
32. a) $P = m \cdot c_p (T_3 - T_2 - T_1 + T_4)$
    b) $\eta = 1 - \dfrac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$

Optik

Strahlenoptik

1. 92°
2. 22°, 32°, 41°, 46°
9. 1,7 cm
15. $s' = 28{,}6$ cm; $y' = 1{,}4$ cm

5,13cm $y' = 2{,}6$ cm

Wellenoptik

1. $\lambda = 600$ nm
2. $b = 0{,}013$ mm
3. $s = 0{,}589$ cm
4. 200

Quantenhafte Absorption und Emission des Lichtes

1. $h = 1{,}602 \cdot 10^{-19}\ \text{As} \cdot \dfrac{0{,}70\ \text{V}}{1{,}69 \cdot 10^{14}\ \text{s}^{-1}}$

   $h = 6{,}6 \cdot 10^{-34}\ \text{Ws}^2$

   $W_A = 6{,}6 \cdot 10^{-34}\ \text{Ws}^2 \cdot 6{,}88 \cdot 10^{14}\ \text{s}^{-1}$

   $-1{,}602 \cdot 10^{-19}\ \text{As} \cdot 0{,}83\ \text{V}$

   $W_A = 32{,}1 \cdot 10^{-20}\ \text{Ws}$
2. $h = 6{,}0 \cdot 10^{-34}\ \text{Ws}^2$

   $W_A = 29 \cdot 10^{-20}\ \text{Ws}$

   $f_G = 4{,}7 \cdot 10^{14}\ \text{s}^{-1}$
3. $f_1 = 4{,}6 \cdot 10^{14}\ \text{s}^{-1}$

   $f_2 = 6{,}2 \cdot 10^{14}\ \text{s}^{-1}$

   $f_3 = 6{,}9 \cdot 10^{14}\ \text{s}^{-1}$

   $f_4 = 7{,}3 \cdot 10^{14}\ \text{s}^{-1}$
4. $f = 31 \cdot 10^{14}\ \text{s}^{-1}$ (UV-Bereich)
5. $f = 1{,}6 \cdot 10^{14}\ \text{s}^{-1}$ (IR-Bereich)
6. $f = 32 \cdot 10^{14}\ \text{s}^{-1}$

   $\lambda = 93$ nm
7. $\Delta E_1 = 4{,}9$ eV

   $\Delta E_2 = 6{,}7$ eV
8. $\lambda_1 = 250$ nm

   $\lambda_2 = 180$ nm
9. $f = 28 \cdot 10^{14}\ \text{s}^{-1}$ (UV-Bereich)

Register

Abbildungsgleichung 116 f.
Abbildungsmaßstab 117
Achse, optische 114
angeregter Zustand 147, 152, 156
Anomalie des Wassers 94
Anordnung 50
Anregung
– durch Elektronenstoß 151 ff.
– durch Licht 151
Arbeit 67, 68, 75
–, mechanische 15, 18 f.
Arbeitsvermögen 16
Atmung 64
Auflösungsvermögen 121, 162
Ausdehnungskoeffizient
–, kubischer 94
–, linearer 93
Ausgleichsvorgang 82
Austrittsarbeit 140

Ballistisches Pendel 41
Balmer, J. 147
Balmerserie 147
Beugung des Lichts 134
Beugungsgitter 130
Beschleunigung 12
Beschleunigungsarbeit 21
Besetzungszahlen 50
Betrachtungen, statistische 50, 55, 57
Betrachtungsweise
–, kinetisch-statistische 48
–, phänomenologische 48
Bezugssystem 10
Bild, reelles 116
–, virtuelles 116
-entstehung 115
-werfer 119
Brechungsgesetz 110, 112
Brechzahl 111
Brenn-punkt 114
– punktstrahl 114
– weite 114
Brownsche Bewegung 60
Bunsen, R. W. 145

Dampferzeuger 104
Dampfturbine 106
Diaskop 119
Dichte 67, 96
Dieselmotor 74, 100
Diffusion 56, 64, 81
Doppelspalt 125, 129 f.
Doppelspaltexperiment
– mit Elektronen 161 f.
– mit Licht 160 f.
Doppelspiegel 125
Drahtgitter 125
Druck 48, 67
– des idealen Gases 60, 62, 63
Druck-Volumen-Diagramm 69
Druck-Volumen-Gesetz 60, 62

Einstein, A. 139, 143, 155
Einsteinsche Gerade 142, 144
Einsteinsche Gleichung 140, 142, 144
Elektronen-mikroskop 162 f.
-stoßexperiment 150 ff., 163
-volt 137
Elemente, optische 108
Energie
– der Fotoelektronen 136 f., 139
–, innere 48, 49, 59, 67, 77, 84
–, kinetische 16, 21, 49, 73
–, mechanische 15
–, mittlere kinetische 58, 62
–, potentielle 16, 22 f., 73
–, stoffgebundene 71, 72
-bilanz 73
-erhaltungssatz 72, 76
-erhaltungssatz der Mechanik 16, 25
-niveauschema 148 f.
-verteilung 50, 57 f.
-verteilungskurve 63
-zustände der Elektronenhülle 148
Episkop 119
Erhaltungsgrößen 25
Erhitzer 102
Erstarrung 90
Erstarrungstemperatur 90
Expansion 68, 101

Faseroptik 113
Federkonstante 20
Fernrohr 119
Feuerzeug, pneumatisches 100
Flammenfärbung 145 f.
Foto-elektronen 136 ff., 139
-strom 135
-zelle 135 f., 138, 141
Franck, J. 152 ff.
freier Fall 27

Gas
–, ideales 95
–, reales 63, 95
-konstante, spezifische 96
-thermometer 106
Gasturbinenprozeß 101, 102
Gegenfeld 136 f., 151
Gegenspannung 137 f.
Generator 106
Gesamtenergie, mechanische 16
Gesamtimpuls 34
Geschwindigkeit, mittlere 11, 12, 63
Gesetz, statistisches 50, 54, 55
– der räumlichen Verteilung 54, 56
– dynamisches 55
Gitter 130
-konstante 130
-spektralapparat 132
Gleichgewicht, statisches 9
Gleichgewichtszustand 82
gleichförmige Kreisbewegung 13
Gleichverteilung 54
Gravitationsgesetz 9
Grenzfrequenz 138, 142
Grundgesetz der Dynamik 13
Grundzustand 147, 152, 156

Häufigkeit 51
–, relative 51
Häufigkeitsverteilung 52
Hauptmaxima 131
Hauptsatz der Thermodynamik, erster 72, 75
–, zweiter 80, 83
Heizkraftwerk 84
Heliumspektrum 148
Hertz, G. 152 ff.
Hertz, H. 155
Hubarbeit 16
Huygens, C. 134, 155
Hypothese 134

Induzierte Emission 156
inkohärent 128
Instrumente, optische 108
Interferenz 125 f., 128
– des Lichts 134, 143
-figur, stationäre 127
-gleichung 130
-ringe 128
-streifen 128

Interferometer 132
Impuls 30
Impulsänderung 61
Impulserhaltungssatz 34
Irreversibilität 56
Isotopentrennung 57, 64

Joule (Energieeinheit) 17, 76

Kalorimeter 80
Kältemaschine 106
Kamera 119
Kernstrahlung 145
Kirchhoff, G. R. 145
Kohärenz 127
Kompression 68, 82, 101
Kondensation 90
Kondensationstemperatur 90
Kondensator 104
kontinuierliches Spektrum 150
Korpuskulartheorie des Lichts 134
Kraft 29
-stoß 29
-werksprozeß 104
Kreisprozeß 101
Krümmungsmittelpunkt 114
Kühlturm 104

Längenänderung 92, 93
Laser 145, 156 ff., 163
–, Anwendung 145, 158 f.
Licht 107
–, kohärentes 126 f.
-bündel, divergentes 108
-bündel, konvergentes 109
-leitstab 112
-mikroskop 162 f.
-quanten 138 f., 142 ff., 155 ff., 160 f., 163
-strahl 109
Linienspektren 145, 149, 153
Linse, optische 114
Lupe 118 f.

Malus, E. L. 155
Masse 13
-strom 31
Maxima 129
Maxwell, J. C. 155
Meßmikroskop 108
Messung, kalorimetrische 79, 92
Mikroskop 120
Mikrospektralanalysator 149, 158
Mittelpunkt, optischer 114
Mittelpunktstrahl 114
Modell, ideales Gas 49, 63
Momentangeschwindigkeit 12

Nebenmaxima 130
Newton, Isaac 7, 134, 155
Newton (Krafteinheit) 13
Nitrierhärten 64
Normale 133
Nutzarbeit eines Kreisprozesses 102

Optik, klassische 107
–, physikalische 107

Parallelstrahl 114
Pascal 48
Perpetuum mobile, 1. Art 76
–, 2. Art 84
Phase 88
Phasenübergang 88
Photonen 138 f., 142 ff., 155 ff., 160 f., 163
Planck, M. 139, 155
Plancksches Wirkungsquantum 139, 141 f., 144, 153 f.
potentielle Energie
– einer gespannten Schraubenfeder 23
– im Gravitationsfeld 22
Prismenfernrohr 120
Prognose 134
Prozeß, irreversibler 15, 81, 83
–, natürlicher 81
–, reversibler 81, 83
-größe 16, 17, 67, 71
Pumpe 103, 104

Quantenhafte Absorption von Licht 134 ff.
quantenhafte Emission von Licht 145 ff.
Quecksilber-Diffusionsluftpumpe 65

Radialbeschleunigung 13
Raketen-triebwerk 31
-technik 32
Rauschen 60
Reflexion, elastische 43, 44
Reflexionsgitter 146
Regeneration 103, 104
Reibung 81
Reibungsarbeit 16
Richmannsche Mischungsregel 79, 80
Ringe, Newtonsche 128
Ritzgitter 125
Römer, O. 155

Röntgenstrahlung 145
Rückstoß 37

Sammellinse 114
Schmelzen 88, 90
Schmelz-temperatur 88
-wärme 91
Schubkraft 31
Schwankungserscheinung, statistische 59 f.
Schwingung, elektromagnetische 122
–, mechanische 122
Siedetemperatur 89, 90
Spaltbreite 129, 130
Spannarbeit 20
Spektral-analyse 145, 149 f., 158
-tafel 149
Spektrometer 149
spontane Emission 156
Stegbreite 129, 130
Steighöhe 27
Stoß
–, elastischer 39, 42 f., 61
–, gerader 39
–, schiefer 39
–, unelastischer 39, 40 f.
–, zentraler 39
-pendel 41
-zeit 61
Strahlenoptik 108
Strahlungsenergie 71, 72
Systeme
–, mechanische 14
–, optische 108
–, thermodynamische 47
System-element 15
-grenze 47

Teilchenanzahl 54
–, relative 58
-dichte 54
Teilchenmodell 136, 139, 143 f., 162
Temperatur 48, 62 f., 67
-ausgleich 81
-nullpunkt, absoluter 99
-skale 99
thermische Anregung 151
Totalreflexion 112
Turbine 102, 104
Turbinenleistung 106

Umgebung 47
Umweltbelastung 104
Urmeter 133

Verbreiterung der Spektrallinien 150
Verbrennungskraftmaschine 106
Verdampfen 89, 90
Verdampfungswärme 91, 92
Verdichter 102
Verformung, plastische 81
Verhalten, thermodynamisches 87, 88, 91
Verschiebungsarbeit 22
Verteilung, räumliche 50, 59
–, gleichmäßige 53
Verteilungskurve 54
Volumen 48
-arbeit 68, 69
Vorgang, irreversibler 56
Vorzeichenregelung 69, 71, 74

Wahrscheinlichkeit 53, 56
Wasser 88
-stoffspektrum 146 ff.
Wärme 70, 71
-kapazität, spezifische 77, 78
-kapazität des Kalorimeters 80
-kraftwerk 84, 104
-übertrager 71
-übertragung 70, 71, 74
Wechselwirkungsgesetz 8, 9
Welle 123
Wellen-bauch 126
-knoten 126
-modell 136, 139, 142 ff., 162
-modell des Lichtes 126, 134
-theorie des Lichtes 134
Welle-Teilchen-Verhalten von Mikroobjekten 160 ff., 163
Werkzeugmikroskop 120
Wirkungsgrad, thermischer 84, 85, 102, 103
Wurf, senkrechter 27

Young, T. 155

Zustand 47
–, wahrscheinlichster 53
Zustandsänderung, adiabatische 100
–, isobare 99
–, isochore 98
–, isotherme 97
–, quasistatische 82, 83
Zustandsgleichung, kalorische 77
– des idealen Gases, thermische 96, 97
Zustandsgröße 16 f., 47, 67, 71
Zustandslinie 70, 83
Zielgeräte, optische 120

Quellennachweis der Abbildungen

Armbrüster/Potsdam: 50/1, 50/3, 58/1 · Deutsches Museum/München: 66/1 · Ende/Jena: 145/1 · Fotothek/Dresden: 45/1 · Junge Welt/Berlin: 36/1, 87/1 · Meyer/Berlin: 24/4 · Militärverlag/Berlin: 33/1, 33/2, 37/3, 38/1, 44/1 · Seifert/Berlin: 106/2 · Sportverlag/Berlin: 37/2 · VWV-Archiv: 7/1, 8/1, 10/3, 24/3, 28/1, 37/1, 43/2, 44/2, 74/2, 106/1, 106/4, 119/1, 122/1, 125/3, 127/1, 129/2, 131/1, 132/3, 150/3, 154/2, 159/1 · Zentralbild/Berlin: 7/1, 46/1 · Zimmer/Leipzig: 24/2.

Kurzwort: 02.11.63 Lehrb. Physik Kl. 11