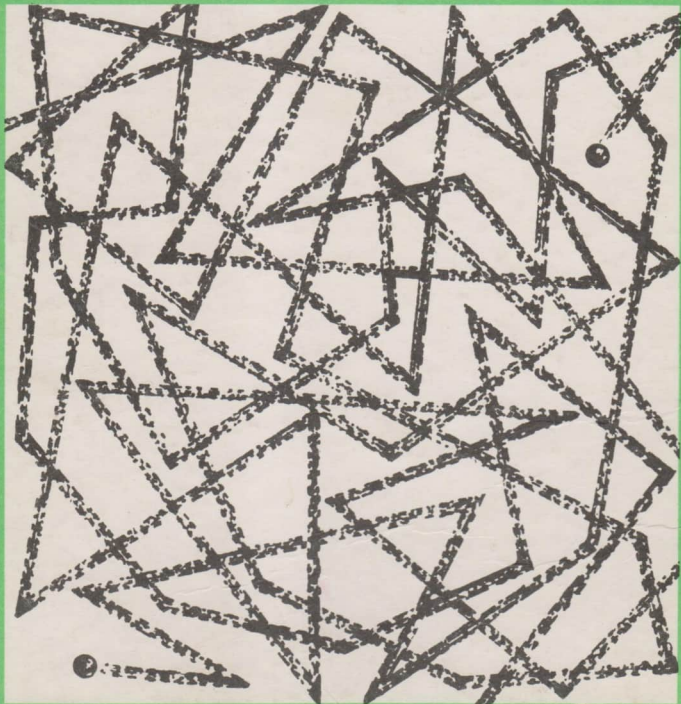
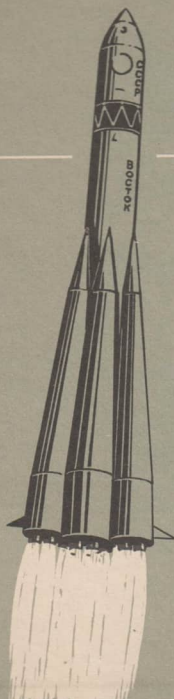
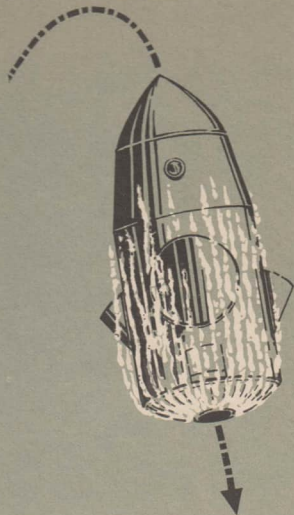


PHYSIK 11

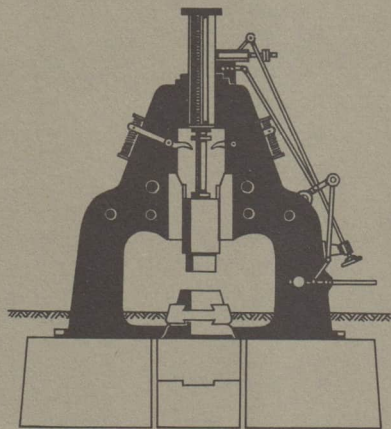
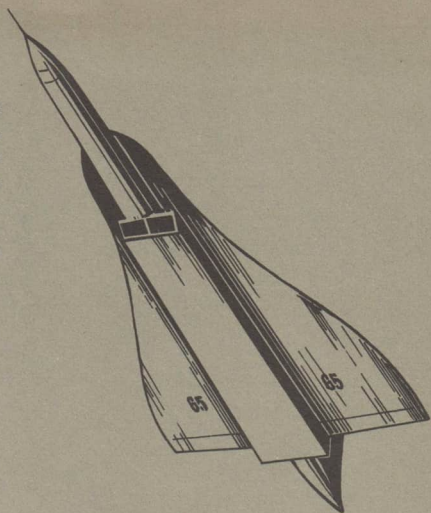


Die freiwerdende mechanische Energie
des niedergehenden Weltraumschiffes
wird durch Reibung in Wärme verwandelt.
Der Wärmeschutzschild verdampft.



Die Wärme
des in den Triebwerken verbrennenden Treibstoffes
wird über die kinetische Energie
der ausgestoßenen Verbrennungsgase
in die mechanische Energie
des gehobenen Weltraumschiffes umgewandelt.

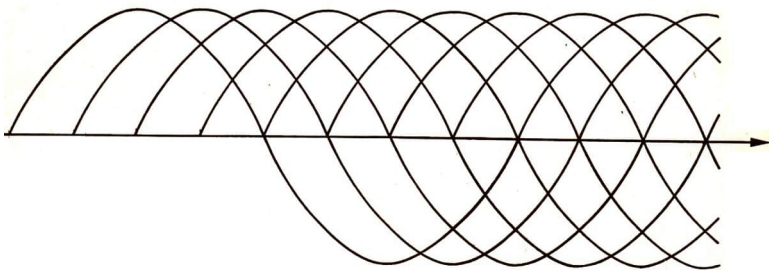
Nach dem Gesetz
von der Erhaltung des Impulses
wird das Flugzeug in die
der ausgestoßenen Antriebsgasmasse
entgegengesetzte Richtung bewegt.
Flugzeug und Gasmasse
bilden ein abgeschlossenes
System.



Beim unelastischen Stoß
des Hammerbärs
auf das Schmiedestück
und den Amboß
wird mechanische Energie
in Verformungsarbeit und
Wärme umgewandelt.

PHYSIK

Lehrbuch für Klasse 11



Volk und Wissen Volkseigener Verlag Berlin

1972

An der Entwicklung des Schulbuches waren beteiligt:

Dr. Friedrich Anacker	Welleneigenschaften des Lichtes
Hans Glaßl,	Quanteneigenschaften des Lichtes
Professor Dr. Dieter Pöltz	und Modelle für die Atomhülle
Herbert Glatz	Überblick über die historische Entwicklung der Lichttheorie
Professor Dr. Walter Kuhn	Welleneigenschaften von Teilchen
Professor Oskar Mader	Mechanik
Helmut Penzel	Schülerexperimente
Dr. Wolfgang Scholz	Wärmelehre

Bei der Bearbeitung einzelner Textstellen wurden die bisher erschienenen Schulbücher des Verlages zugrunde gelegt.

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

5. Auflage · Ausgabe 1969

Lizenz-Nr. 203/1000/71 (UN) · ES 11 H

Redaktion: Werner Golm · Günter Meyer

Einband und Vorsatz: Manfred Behrend

Technische Zeichnungen: Ingrid Schäfer

Printed in the German Democratic Republic

Satz: Leipziger Druckhaus · Grafischer Großbetrieb · III/18/203

Druck und Binden: Grafischer Großbetrieb Völkerfreundschaft Dresden (III/9/1)

Gesetzt aus der Bodoni-Antiqua

Redaktionsschluß: 19. 4. 1971

Bestell-Nr. 02 11 61-5 · Preis 3,10

Welleneigenschaften des Lichtes

6

Grundbegriffe der Wellenlehre 6 – Interferenz des Lichtes durch Beugung 11 – Anwendungsbeispiele zur Ultrarotstrahlung 18 – Beugung am Kreuzgitter – Röntgenbeugung 19 – Interferenz des Lichtes durch Reflexion 19 – Interferenz am Keil 24 – Interferometer 24 – Linear polarisiertes Licht 26 – Polarisation durch Filter 28 – Polarisation durch Reflexion und Brechung 28 – Polarisation durch Doppelbrechung 31 – Anwendungsbeispiele zur Polarisation 32

Welleneigenschaften von Teilchen

33

Das Doppelspaltexperiment mit Teilchen und Wellen 33 – Doppelspaltexperiment mit Teilchen 33 – Doppelspaltexperiment mit Wellen (Wasserwellen, Lichtwellen) 34 – Interferenzen mit Elektronenstrahlen 35 – Materiewellen 37 – Das Elektronenmikroskop 39

Quanteneigenschaften des Lichtes

41

Der äußere lichtelektrische Effekt 41 – Das Photonenmodell des Lichtes 43 – Das Plancksche Wirkungsquantum 44 – Die Heisenbergschen Unbestimmtheitsbeziehungen 47 – Energiestufen der Elektronenhülle 50 – Termdarstellung von Linienspektren 53 – Laser 56

Modelle für die Atomhülle

60

Das Bohrsche Atommodell 60 – Das wellenmechanische Atommodell 62 – Zusammenfassung 63

Überblick über die historische Entwicklung der Lichttheorien

64

Auffassungen von NEWTON und HUYGENS über das Licht 64 – Versuche zum Wellenmodell des Lichtes 66 – Messung der Lichtgeschwindigkeit 66 – Das Licht als elektromagnetische Welle 68 – Zur Quantentheorie des Lichtes 69

Kinetische Gas- und Wärmetheorie*Das Verhalten der Körper bei Temperaturänderungen*

74

Die Temperatur 74 – Längenänderung fester Körper 74 – Die Volumenänderung fester Körper 76 – Die Volumenänderung von Flüssigkeiten 76 – Die Volumenänderung der Gase 77 – Temperaturskalen 77 – Das Volumen-Temperatur-Gesetz 78 – Das Druck-Volumen-Gesetz 79 – Die Zustandsgleichung des idealen Gases 79 – Das Druck-Temperatur-Gesetz 81 – Zustandsänderungen 82 – Isotherme Zustandsänderung ($T = \text{konst.}$) 83 – Isochore Zustandsänderung ($V = \text{konst.}$) 83 – Isobare Zustandsänderung ($p = \text{konst.}$) 84 – Zusammenfassung 84 – Anwendungsbeispiele zu den Gasgesetzen 85

<i>Kinetische Wärmetheorie</i>	86
Makrophysikalische und mikrophysikalische Betrachtungsweise 86 – Die Brownsche Bewegung 87 – Die Diffusion 88 – Die molekulare Struktur der Gase 89 – Die Grundgleichung der kinetischen Gastheorie 91 – Die Geschwindigkeit der Moleküle 93 – Energie der Moleküle und Temperatur 94 – Wärmemenge und innere Energie 95	

<i>Hauptsätze der Wärmelehre</i>	98
Kalorimetrie 98 – Mischungstemperatur 99 – Umwandlung mechanischer Arbeit in Wärme 101 – Der erste Hauptsatz der Wärmelehre 103 – Die innere Energie der Gase 104 – Energieumwandlungen bei isobarer Erwärmung 105 – Die Arbeit bei isothermer Zustandsänderung 106 – Adiabatische Zustandsänderungen 108 – Verbrennungsmotoren 110 – Indikatordiagramme 111 – Der Wirkungsgrad 113 – Einige Probleme der Energiewirtschaft 115 – Bau und Einsatz von Wärmekraftmaschinen in der DDR 116 – Anwendungsbeispiele zu den Hauptsätzen der Wärmelehre 117 – Reversible und irreversible Vorgänge 118	

Mechanik

<i>Physikalische Grundbegriffe</i>	122
Geschwindigkeit und Beschleunigung 122 – Die Bewegungsgleichungen 125 – Kraft, Arbeit und Leistung 128 – Mechanische Energie 131	

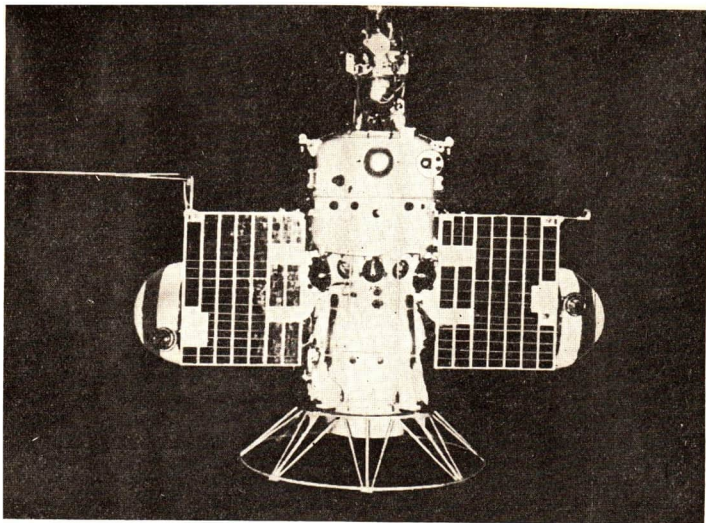
<i>Der Impuls</i>	134
Kraftstoß und Impuls 134 – Das Gesetz von der Erhaltung des Impulses 136 – Impuls und Rückstoß 138 – Der zentrale Stoß zweier Körper 143	

Versuche, Fragen, Aufgaben	147
Schülerexperimente	155
Lösungen	172
Register	175

Verwendete Symbole

- Fragen
- ▼ Versuche
- Beispiele
- ▷ Einfache Merksätze
- ▶ Merksätze mit besonderer Bedeutung

Im Abschnitt Aufgaben sind die Nummern der Fragen und Aufträge fett gedruckt, für die eine Lösung angegeben ist.



Der Dualismus von Welle und Teilchen

Die erste sowjetische Mars-Sonde wurde durch ein Ionenstrahl-Triebwerk gesteuert. Infolge der hohen Ausströmungsgeschwindigkeit der Ionen kann damit ein viel höheres Nutzlast-Verhältnis erzielt werden als bei herkömmlichen Antrieben. Noch günstiger liegen die Verhältnisse bei einem Photonentriebwerk (Lichtstrahl-Triebwerk), an dessen Entwicklung noch gearbeitet wird.

Lichtstrahlen zeigen unter bestimmten Bedingungen gleiche Eigenschaften wie schnellbewegte Teilchen. Andererseits können bei Teilchenstrahlen typische Wellenerscheinungen auftreten, wie wir sie vom Licht her kennen.

Lichtstrahlen und Teilchen sind verschiedene Erscheinungsformen der Materie. Sowohl das Teilchen- als auch das Wellenbild sind zweckmäßige Modelle zu ihrer Beschreibung.



Welleneigenschaften des Lichtes

Die schillernden Farben mancher Insekten, die Anlaßfarben, die bei der Wärmebehandlung von Stahl auftreten, die Farben eines Ölflecks auf dem Wasser sind optische Erscheinungen, die durch die Vorstellung des Lichtes als Welle erklärt werden können. Man nennt sie wellenoptische Erscheinungen im Gegensatz zu den strahlenoptischen Erscheinungen, zu deren Beschreibung man das Wellenmodell nicht benötigt.

Grundbegriffe der Wellenlehre

In Klasse 10 wurde nachgewiesen, daß einige Erscheinungen und Gesetzmäßigkeiten der Strahlenoptik formal mit entsprechenden Gesetzen der Wellenlehre übereinstimmen. Das Reflexionsgesetz und das Brechungsgesetz lassen sich aus einer Modellvorstellung herleiten, die das Licht wie eine Welle behandelt.

Um das Wellenmodell auch auf weitere optische Erscheinungen anwenden zu können, sollen zunächst die wichtigsten Begriffe und Gesetze der Wellenlehre wiederholt, vertieft und verallgemeinert werden.

Kenngrößen:

Periode T	Phase (Nullphasenwinkel) φ
Frequenz $f = \frac{1}{T}$	Kreisfrequenz $\omega = 2\pi \cdot f$
Amplitude y_{\max}	Wellenlänge λ
Elongation y	Ausbreitungsgeschwindigkeit c

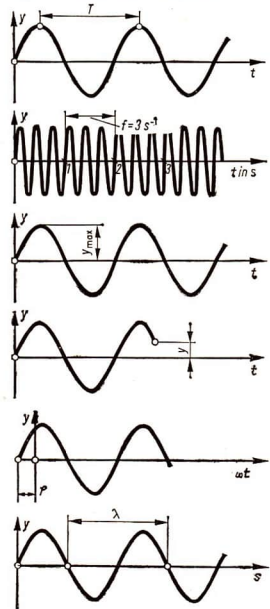
Definitionen:

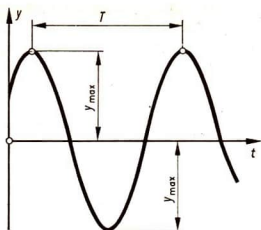
Die *Periode* T ist der zeitliche Abstand gleicher Zustände (an einem vorgegebenen Ort der Welle).

Die *Wellenlänge* λ ist der räumliche Abstand gleicher Zustände in der Welle zu einem vorgegebenen Zeitpunkt.

Die *Ausbreitungsgeschwindigkeit* c ist die Geschwindigkeit, mit der sich ein bestimmter Zustand in der Welle fortbewegt. Sie hat nichts zu tun mit der Geschwindigkeit der schwingenden Teilchen.

6/2 Verschiedene Kenngrößen





7/1 Grafische Darstellung einer harmonischen Schwingung

Welche Gemeinsamkeiten und Unterschiede lassen sich zwischen Bild 7/1 und den Teildarstellungen aus Bild 7/2 erkennen?

An einer Welle sind zwei Richtungen zu unterscheiden: Die *Schwingungsrichtung* der schwingenden physikalischen Größe und die *Ausbreitungsrichtung* der Schwingungsenergie. Beide Richtungen können zusammenfallen (*Longitudinalwelle*) oder senkrecht aufeinander stehen (*Transversalwelle*).

Suchen Sie physikalische Größen, die sich periodisch ändern können!

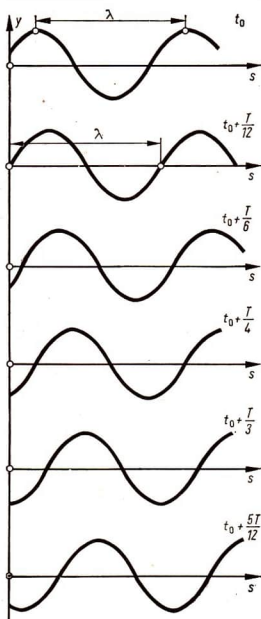
Prüfen Sie, ob die schwingenden Größen in räumlicher Verteilung auftreten können, ob sie also für eine Wellenbildung in Betracht kommen!

Für die Ausbreitung einer Welle gilt die

Grundgleichung der Wellenausbreitung $c = \lambda \cdot f$.

(1) ◀

7/2a bis e Darstellung einer Welle in Momentbildern



Schwingungen	Wellen
<p>Begriff:</p> <p>Eine Schwingung ist eine periodische Änderung einer physikalischen Größe. In gleichen Zeitabständen wiederholt sich der gleiche Zustand.</p>	<p>Eine Welle ist ein räumlich ausgedehntes System von Schwingungsvorgängen. Sie ist in der Zeit und im Raum periodisch. An einem beliebigen Punkt der Welle wiederholt sich der Zustand in gleichen Zeitabständen. Zu einem beliebigen Zeitpunkt haben die Stellen, an denen der gleiche Zustand herrscht, gleichen (räumlichen) Abstand.</p>
<p>Entstehung:</p> <p>Eine Schwingung entsteht im dialektischen Zusammenspiel zweier Energieformen. Bei mechanischen Schwingungen werden kinetische und potentielle, bei elektrischen Schwingungen elektrische und magnetische Energie periodisch ineinander umgewandelt.</p>	<p>Eine Welle entsteht beim räumlichen Ausbreiten eines Schwingungsvorgangs. Durch die Kopplung benachbarter Teilchen (bei mechanischen Wellen) bzw. Zustände wird die Schwingungsenergie von einem Punkt zum anderen übertragen.</p>

Viele Wellenerscheinungen können mit einer von CHRISTIAN HUYGENS entwickelten Vorstellung, dem sogenannten *Huygensschen Prinzip* erklärt werden:

▶ Jeder Punkt einer Welle ist Ursprung einer kreis- bzw. kugelförmigen Elementarwelle. Die Elementarwellen setzen sich zu Wellenfronten zusammen, deren Normale mit der Ausbreitungsrichtung zusammenfällt.

● Erklären Sie an Bild 8/1 die Reflexion und die Brechung einer Welle, und leiten Sie Reflexionsgesetz und Brechungsgesetz her!

Überlagerung — Interferenz. Werden in einem Medium gleichzeitig mehrere Wellen erregt, so breiten sie sich unabhängig aus, ohne einander zu stören, so, als sei jede von ihnen allein vorhanden. In den Punkten, in denen mehrere Wellen wirksam werden, addieren sich die Elongationen und ergeben einen resultierenden Wert.

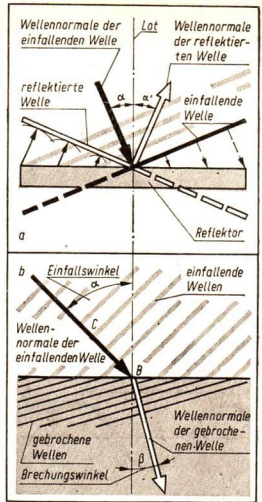
Die Bilder 8/2 und 8/3 zeigen im Foto und in der Konstruktion die Überlagerung kreisförmiger Oberflächenwellen mit gleicher Frequenz und gleicher Amplitude. Die Erregerzentren wirken dabei im gleichen Takt: Wellenberge oder -täler treten in den Zentren gleichzeitig auf.

In diesem Wellenfeld sind Gebiete zu beobachten, in denen die Wasseroberfläche völlig unbewegt bleibt. Einige dieser Stellen sind in der Zeichnung durch kleine Kreuze gekennzeichnet. An anderen Stellen (in der Konstruktion durch Kreise markiert) ist die Amplitude doppelt so groß, wie die Amplitude einer einzelnen Welle.

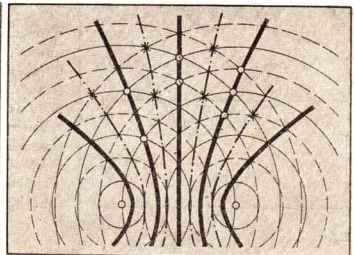
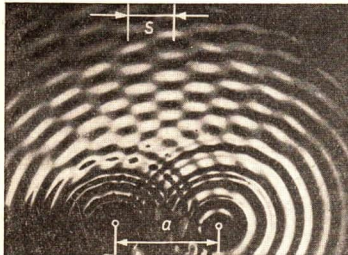
● Suchen Sie in der Zeichnung einen Punkt, in dem sich die Wellen verstärken! Wie groß ist die Differenz der Strecken zwischen den Erregerzentren und diesem Punkt? Begründen Sie das Ergebnis!

● Wie groß ist die Wegdifferenz für Auslöschung?

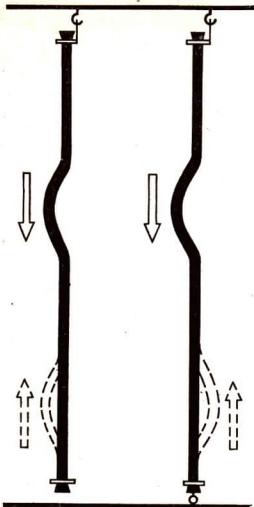
● Konstruieren Sie die Überlagerung von Kreiswellen für den Fall, daß die Erregerzentren im Gegentakt wirken! Verbinden Sie die Punkte, an denen Wellenauslöschung eintritt!



8/1a, b: Reflexion und Brechung einer ebenen Welle



8/2, 8/3 Überlagerung zweier kreisförmiger Oberflächenwellen



9/1 Reflexion am losen und am festen Ende

Ein besonderer Fall der Überlagerung tritt auf, wenn eine Welle so reflektiert wird, daß sie in ihrer Ausbreitungsrichtung zurückläuft. Am leichtesten läßt sich dies an Wellen beobachten, die sich nur in einer Richtung ausbreiten, z. B. an Seilwellen.

Ein 5 bis 10 m langer Gummischlauch, mit Wasser gefüllt und beiderseits verschlossen, wird im Treppenhaus senkrecht ausgespannt. Das obere Ende wird schnell und gleichmäßig hin und her bewegt, so daß eine Welle den Schlauch hinunterläuft. Diese wird am unteren Ende reflektiert.

Auf- und abwärts laufende Wellen überlagern sich zu einer stehenden Welle, die dadurch ausgezeichnet ist, daß an einigen Stellen, den Knoten, keine Schwingung auftritt, während andere Stellen, die Bäuche, sehr heftig schwingen.

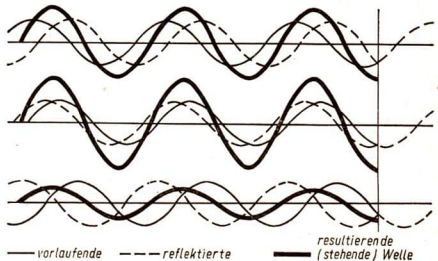
Einer der Knoten liegt am unteren Ende des Schlauches.

Wir lassen nun das untere Ende des Schlauches nach Versuch 1 frei hängen oder spannen es mit einem 1 bis 2 m langen, dünnen Bindfaden. Die Wiederholung des Vorganges zeigt wiederum eine stehende Welle, nur daß jetzt am unteren Ende ein Bauch vorliegt.

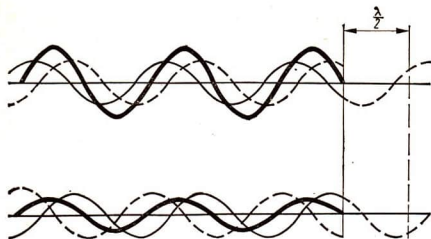
Schlagen wir den Schlauch nur einmal seitlich an, so daß ein einzelner Wellenzug hinab und herauf läuft, so kehrt dieser vom losen Ende in der gleichen Weise, vom festen Ende aber umgekehrt zurück (Bild 9/1). Diese Umkehrung wird als Phasensprung bezeichnet.

Bei der Konstruktion einer stehenden Welle werden in einer Reihe von Momentbildern ursprüngliche und reflektierte Welle einander überlagert. Hin- und rücklaufende Welle haben gleiche Frequenz und Amplitude, was die Konstruktion wesentlich erleichtert.

Am losen Ende wird eine Welle so reflektiert, als würde ihr weiterführender Teil an einer Reflexionswand gespiegelt. Aus Bild 9/2 ist zu ersehen, daß in allen Momentbildern die Elongation Null in der resultierenden Welle an den gleichen Stellen auftritt. Der erste Knoten hat vom losen Ende die Entfernung $\lambda/4$, der Abstand der Knoten untereinander beträgt $\lambda/2$.



9/2 Konstruktion einer stehenden Welle bei der Reflexion am losen Ende



10/1 Konstruktion einer stehenden Welle bei der Reflexion am festen Ende

Am festen Ende tritt bei der Reflexion der Phasensprung auf. Er äußert sich in der Konstruktion so, als würde aus dem weiterführenden Teil der Welle vor dem Spiegeln an der Reflexionswand ein Stück von einer halben Wellenlänge herausgeschnitten. Bild 10/1 zeigt die Konstruktion an einigen Beispielen. Die Knoten der stehenden Welle haben wiederum einen Abstand von $\lambda/2$.

Auch in flächenhaften oder räumlichen Medien können stehende Wellen auftreten. Nur hat es dann keinen Sinn mehr, von festem oder losem Ende zu sprechen. Ob ein Phasensprung auftritt oder nicht, hängt von der Ausbreitungsgeschwindigkeit in den beiden Medien ab, die an der Stelle der Reflexion aneinander grenzen.

Kommt eine mechanische Welle aus dem Medium mit der kleineren Ausbreitungsgeschwindigkeit und wird an dem mit der größeren reflektiert, so tritt ein Phasensprung auf, im entgegengesetzten Falle nicht.

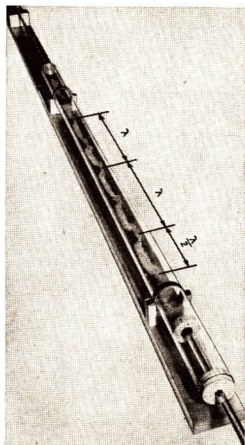
Aus historischen Gründen werden Stoffe, in denen die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen klein ist, auch als „wellenmäßig dicht“ bzw. im umgekehrten Falle als „wellenmäßig dünn“ bezeichnet. Diese Ausdrücke haben mit der physikalischen Größe „Dichte“ einer Substanz nichts zu tun.

3 Wir erzeugen eine stehende Oberflächenwelle in einem kreisrunden, flachen Gefäß, indem wir mit einem Stäbchen genau die Mitte zu Schwingungen anregen. Die Knotenlinien sind deutlich zu beobachten.

Auch die Schwingung einer Saite oder einer Luftsäule, z. B. in einem Blasinstrument, ist als eine stehende Welle zu betrachten. Da an den Enden der Saite stets Knoten vorliegen müssen, wird die Abhängigkeit der Frequenz von der Länge der Saite verständlich.

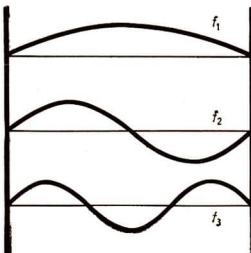
Solche Instrumente werden durch Verändern der Länge der schwingenden Körper gespielt.

● Welche höheren Frequenzen (Obertöne) im Verhältnis zu einer Grundschwingung können in einer Saite auftreten?



10/2 Im Kundtschen Rohr werden stehende Wellen zur Wellenlängenmessung benutzt. Die Stellen, an denen das Korkpulver liegen bleibt, sind Knoten der Welle; sie sind jeweils um $\lambda/2$ voneinander entfernt.

10/3 Grund- und Oberschwingungen einer Saite



Interferenz des Lichtes durch Beugung

In Klasse 10 wurde die Reflexion und die Brechung des Lichtes behandelt und festgestellt, daß sich diese Erscheinungen leicht mit dem Bild einer Welle erklären lassen. Die eigentliche Bedeutung des Denkmodells Welle zeigt sich jedoch erst, wenn auch solche typischen Wellenerscheinungen wie die Interferenz beobachtet werden können. Zwar kann man nicht erwarten, eine Wellenbewegung im einzelnen zu sehen; das Wellenbild ist ja lediglich als Beschreibungsmittel für die Lichterscheinungen anzusehen. Jedoch müßten sich bei der Überlagerung Gebiete der Verstärkung und solche der Auslöschung feststellen lassen. Als Verstärkung ist dabei ein Vergrößern der Helligkeit auf dem Aufgangschirm aufzufassen, als Auslöschung völlige Dunkelheit. Kohärenz des Lichtes. Auf Flächen, die gleichzeitig von mehreren Lichtquellen beleuchtet werden, können Interferenzerscheinungen, d. h. helle und dunkle Gebiete im Überlappungsbereich, nicht festgestellt werden. Der Grund dafür ist darin zu suchen, daß in der Wellenerzeugung zwischen den optischen Versuchen und denen mit Wasserwellen ein wesentlicher Unterschied besteht: Die Wasserwellen wurden mit mehreren Tupfern erregt (vgl. Bild 8/2), die miteinander mechanisch gekoppelt waren. Dadurch entstanden die verschiedenen Wellenzüge stets gleichzeitig, mit gleicher Frequenz und gleicher Phase.

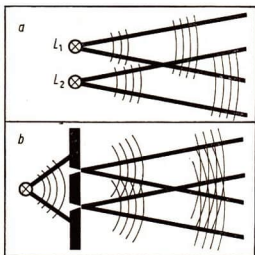
Bei zwei Lichtquellen ist eine derartige Kopplung der Wellenerreger nicht möglich. Man könnte beispielsweise Licht von zwei glühenden Drähten ausgehen lassen. Diese Drähte strahlen das Licht völlig unabhängig voneinander ab (Bild 11 a).

Die von den Drähten in unregelmäßigen Zeitintervallen ausgehenden Lichtwellenzüge überlagern sich zum Teil gar nicht, zum Teil interferieren sie zwar, bewirken jedoch infolge der willkürlichen und zufälligen Phasendifferenz einen raschen Wechsel in der Lage der hellen und dunklen Stellen auf einem in den Lichtweg gebrachten Bildschirm, so daß dieser gleichmäßig hell erleuchtet erscheint. Eine Interferenzerscheinung ist nicht wahrnehmbar.

Wahrnehmbare Interferenzerscheinungen können nur beim Überlagern kohärenter Wellenzüge auftreten. Man versteht darunter solche Wellenzüge, die an der gleichen Stelle des Raumes stets die gleiche Phasendifferenz aufweisen, bei denen also die Phasendifferenz nur vom Ort, nicht aber von der Zeit abhängt. In diesem Falle findet auch die Auslöschung bzw. Verstärkung stets an den gleichen Stellen statt, so daß die Interferenz auch beobachtet werden kann, Wellenzüge, die diese Eigenschaft nicht haben, heißen auch inkohärent.

11/1a, b Kohärenz als Vorbedingung für das Zustandekommen einer Interferenz

- a) inkohärentes Licht – keine Interferenz
- b) kohärentes Licht – Interferenz



▷ Wellenzüge heißen kohärent, wenn ihre Phasendifferenz nur vom Ort, nicht aber von der Zeit abhängt.

Kohärente Lichtwellenzüge oder auch kurz *kohärentes Licht* kann aus getrennten Lichtquellen nicht gewonnen werden.

● In welchen Kenngrößen müssen kohärente Wellenzüge übereinstimmen?

Beugung am Doppelspalt. Wellenzüge, die einander überlagern sollen, können auch noch auf eine andere Art gewonnen werden.

Stellt man einer Welle ein Hindernis mit einer schmalen Öffnung in den Weg, so muß dieser „Spalt“ nach dem Huygensschen Prinzip Ausgangspunkt einer neuen Kreiswelle werden (Bild 12/1). Die dabei auftretende Änderung in der Bewegungsrichtung der Welle wird auch als *Beugung* bezeichnet.

Zwei Spalte rufen entsprechend zwei Kreiswellen hervor, die ebensolche Interferenzfiguren zeigen wie die getrennt im gleichen Rhythmus erzeugten Wellen (Bild 12/2).

Dieses Verfahren läßt sich nun auf Licht übertragen. Fällt Licht einer Lichtquelle auf einen Doppelspalt, so entstehen aus jedem Wellenzug zwei kohärente Kreiswellen, deren Interferenz beobachtet werden kann (Bild 11/1b).

▷ Kohärentes Licht wird durch Aufspalten von Licht in mehrere Wellenzüge gewonnen.

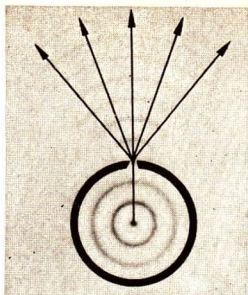
Ein Versuch soll diese Überlegungen bestätigen. Da sich Licht nicht – wie die Oberflächenwellen auf Wasser – nur in einer Ebene ausbreitet, sondern eine räumliche Ausdehnung hat, treten auch die Interferenzerscheinungen in räumlicher Verteilung auf. Deshalb kann man die Blendöffnungen durch langgestreckte, schmale Spalte (Doppelspalt) ersetzen.

Als Lichtquelle wählt man einen gestreckten, glühenden Draht oder einen hell beleuchteten schmalen Spalt (Leuchtspalt).

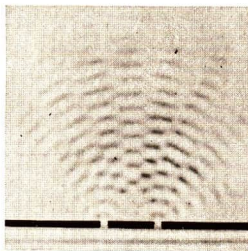
Die Stellen, an denen Auslöschung oder Verstärkung eintritt, kann man als zusammenhängende helle und dunkle Streifen auf einem Bildschirm nachweisen.

4 Der Doppelspalt besteht aus zwei 0,1 mm breiten Schlitzten von beispielsweise 0,5 mm Abstand, die in eine lichtundurchlässige Platte eingeschnitten sind. Auf dem Bildschirm erscheinen zu beiden Seiten der hellen Mitte die Verstärkungsgebiete V_1 , V_2 usw. als Lichtstreifen.

Man spricht von Streifen 1. Ordnung, 2. Ordnung usw. Die Streifen verlieren mit zunehmender Ordnung an Helligkeit.

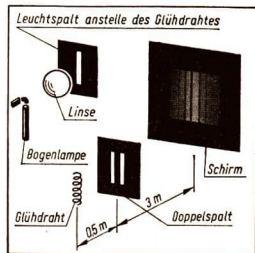


12/1 Beugung einer Wasserwelle am Spalt



12/2 Interferenz von Wasserwellen am Doppelspalt

12/3 Interferenz von Licht am Doppelspalt



Warum ist es nicht sinnvoll, im Versuch 4 eine ausgedehnte Lichtquelle, wie z. B. eine Glühlampe, zu verwenden? Überlegen Sie zunächst, welches Bild man erhalten würde, wenn der Doppelspalt mit zwei nebeneinander liegenden Glühdrähten beleuchtet würde!

Zwischen den Abständen der hellen und dunklen Streifen auf dem Bildschirm und dem Abstand der beiden Spalte besteht ein funktionaler Zusammenhang: Je dichter die Spalte zusammenrücken, desto weiter entfernen sich die Interferenzstreifen voneinander. Die Erklärung dafür gibt Bild 13/1.

Die Verstärkungsgebiete auf dem Bildschirm (M , V_1 , V_2 , V_1' usw.) befinden sich genau an den Stellen, an denen die von den Spalten A und B ausgehenden Wellenzüge mit gleicher Phasenlage eintreffen. Das ist aber gerade dann der Fall, wenn sich die Längen der Lichtwege nicht oder um ganzzahlige Vielfache der Wellenlänge voneinander unterscheiden (vgl. dazu auch Bild 8/3). Die Differenz der Lichtwege, gemessen in Wellenlängen des verwendeten Lichts, wird auch *Gangunterschied* genannt. In Bild 13/1 sind diese Lichtwege eingezeichnet. Für das Verstärkungsgebiet V_1 muß gelten: $\overline{AV_1} - \overline{BV_1} = \lambda$. Trägt man $\overline{AC_1} = \lambda$ auf $\overline{AV_1}$ ab, so ist das Dreieck BC_1V_1 gleichschenkelig. Nun ist bei allen derartigen Versuchen der Spaltabstand verschwindend klein gegenüber dem Abstand des Doppelspaltes von der Projektionsfläche. Im Versuch 4 beträgt das Verhältnis dieser Abstände 1 : 6 000! Die Strecken $\overline{AV_1}$ und $\overline{BV_1}$ können deshalb als parallel, das Dreieck ABC_1 als rechtwinklig angesehen werden. Die Dreiecke ABC_1 und V_1DM sind dann ähnlich, und man kann ablesen:

$$\frac{\lambda}{b} = \frac{s_1}{e_1}. \quad (2) \triangleleft$$

Eine analoge Betrachtung läßt sich für das Verstärkungsgebiet V_2 anstellen. Dort beträgt der Unterschied der Lichtwege 2λ , und es ergibt sich

$$\frac{2\lambda}{b} = \frac{s_2}{e_2}. \quad (3)$$

Allgemein gilt für die

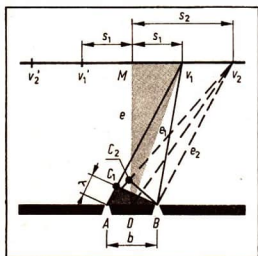
$$\text{Wellenverstärkung} \quad \frac{n \cdot \lambda}{b} = \frac{s_n}{e_n}. \quad (4) \triangleleft$$

Mitunter kann man Winkel einfacher und genauer messen als Streckenverhältnisse.

Bezeichnet man die Winkel MDV_n mit α_n , so gilt

$$\sin \alpha_n = \frac{s_n}{e_n} \quad (5)$$

$$\frac{n \cdot \lambda}{b} = \sin \alpha_n. \quad \triangleleft$$



- Wie müssen sich die Lichtwege für ein Auslöschungsgebiet unterscheiden? Geben Sie eine Gleichung für den ersten dunklen Streifen an!

Die gewonnenen Beziehungen kann man verwenden, um überschlägig die Wellenlänge zu ermitteln, die dem Licht zuzuschreiben ist. Im Versuch 4 wurden die ersten Interferenzmaxima in einem Abstand von $\overline{V_1 V_1'} \approx 6 \text{ mm}$ beobachtet.

Die Wellenlänge wird daraus wie folgt ermittelt:

■ Gegeben:

$$b = 0,5 \text{ mm}$$

$$e = 3 \text{ m}$$

$$s_1 = \frac{1}{2} \overline{V_1 V_1'} = 3 \text{ mm}$$

Gesucht:

Wellenlänge λ

Lösung:

$$\lambda = \frac{b \cdot s_1}{e}$$

$$\lambda = \frac{0,5 \text{ mm} \cdot 3 \text{ mm}}{3000 \text{ mm}}$$

$$\lambda = 0,0005 \text{ mm}$$

$$\lambda = \underline{\underline{0,5 \mu\text{m}}}$$

Die Wellenlänge des in diesem Versuch verwendeten Lichts beträgt etwa $0,5 \mu\text{m}$.

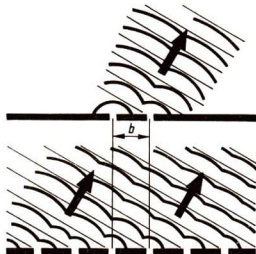
Die Beugungserscheinungen am Doppelspalt sind im allgemeinen recht lichtschwach und unscharf und daher nicht gut geeignet für die Bestimmung von Wellenlängen.

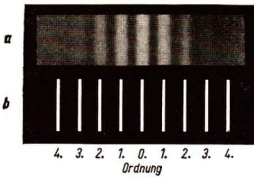
Beugung am Gitter. Besonders helle und klare Interferenzerscheinungen erhält man, wenn man an Stelle eines Doppelspaltes mit dem Abstand b mehrere Spalte in gleichen Abständen voneinander anordnet. Eine solche Anordnung nennt man ein optisches Gitter. Der Abstand b wird in diesem Falle auch *Gitterkonstante* genannt.

Die Richtungen, in denen das Licht verstärkt wird, sind beim Doppelspalt und beim Gitter die gleichen, sofern die Spaltabstände b übereinstimmen. Haben nämlich zwei benachbarte Wellenzüge die Lichtwegdifferenz λ , so beträgt der Unterschied zwischen der ersten und der dritten Welle 2λ , zwischen der ersten und vierten Welle 3λ usw. Alle Wellen tragen gleichmäßig zur Verstärkung bei. Die Verstärkungsgebiete können deshalb auch beim Gitter nach den obengenannten Gleichungen berechnet werden.

Dagegen ist in den Auslöschungsgebieten die Helligkeit beim Gitter anders verteilt als beim Doppelspalt. Der Grund dafür ist darin zu sehen, daß durch die Vielzahl der interferierenden Wellen schon bei sehr geringer Phasendifferenz völlige Auslöschung eintreten kann. Von Betrachtungen zum Dreiphasen-Wechselstrom her ist bekannt, daß die Summe dreier Sinusströme mit einer gegenseitigen Phasenverschiebung von je $1/3$ Periodendauer Null ist. Analog löschen sich am Gitter n Wellen aus, wenn der Gangunterschied benachbarter Wellen λ/n beträgt.

14/1 Interferenz am Doppelspalt und am Gitter





15/1 Interferenzbilder beim Doppelspalt und beim Gitter

Das Interferenzbild, das am Gitter entsteht, enthält deshalb schmale und lichtstarke Maxima, zwischen denen ausgedehnte Minima liegen.

Je größer die Anzahl der interferierenden Wellen ist, desto schmaler werden die Maxima. Man verwendet deshalb nach Möglichkeit Gitter mit vielen tausend Linien. Aber nicht nur deren Gesamtzahl, auch ihre Verteilung ist von großer Bedeutung.

Je geringer der Abstand benachbarter Linien, die Gitterkonstante, ist, desto weiter sind die Interferenzstreifen voneinander entfernt.

Begründen Sie dies mit der Gleichung (2)!

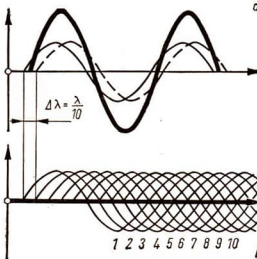
Gitter, die in physikalisch-technischen Laboratorien verwendet werden, bestehen aus Glasplatten, in die mit einem Diamanten parallele gerade Linien geritzt wurden. Die nicht geritzten Streifen bleiben lichtdurchlässig. Die geritzten Linien sind lichtundurchlässig.

Erklären Sie die Lichtundurchlässigkeit der geritzten Linien in einem optischen Gitter!

Man hat bisher eine Feinheit von 2000 Linien je Millimeter erreicht. Das in Jena besonders für Schulzwecke geritzte Reflexionsgitter hat 600 Linien je Millimeter bei einer Gesamtzahl von rund 24000 Linien. Es hat damit ein sehr hohes Auflösungsvermögen. Mit ihm können Wellenlängenunterschiede von 0,5 nm nachgewiesen werden.

Für geringe Ansprüche genügen fotografisch hergestellte Gitter. Wir können sie selbst leicht herstellen, indem wir ein schwarzweißes Streifenmuster fotografieren. Das Negativ kann direkt als Gitter verwendet werden. Auch Vogelfedern und dünne, feine Gewebe wirken wie Gitter.

Messen von Lichtwellenlängen. In einem Versuch soll die Wellenlänge von rotem Licht gemessen werden.



15/2 Interferenz von Wellen mit geringem Gangunterschied
a) zwei Wellen am Doppelspalt
b) viele Wellen am Gitter

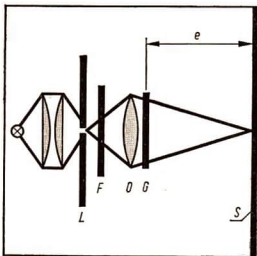
Um möglichst helle und scharfe Streifen zu erhalten, ändert man die Anordnung von Versuch 4 ab, indem man noch eine Sammellinse und ein Rotfilter in den Strahlengang einschaltet. Besonders einfach wird der Versuch, wenn man einen Spalt mit Hilfe eines Kleinbild-Projektors scharf auf der Bildfläche abbildet und dann das Gitter vor dem Objektiv anordnet. Auf dem Bildschirm erscheint neben dem ursprünglich erzeugten Spaltbild eine Reihe schmaler Interferenzstreifen.

Zur Auswertung bedienen wir uns der Gleichung (2).

Der Abstand der Spalte im Gitter, die Gitterkonstante, ist für ein Gitter gewöhnlich bekannt; in unserem Falle beträgt sie $b = 0,04 \text{ mm}$, d. h. auf einen Millimeter entfallen 25 Linien. Den Abstand e messen wir mit 2,50 m aus, den Abstand der beiden Streifen 2. Ordnung mit $2 \cdot s_2 = 17 \text{ cm}$.

Daraus ergibt sich die Wellenlänge des Rotfilterlichtes:

15/3



Gegeben:

$$b = 0,04 \text{ mm}$$

$$e = 2,50 \text{ m}$$

$$s_2 = 8,5 \text{ cm}$$

Gesucht:

Wellenlänge λ

Lösung:

$$\lambda = \frac{b \cdot s_2}{2e}$$

$$\lambda = \frac{0,04 \text{ mm} \cdot 85 \text{ mm}}{2 \cdot 2500 \text{ mm}}$$

$$\lambda = 0,00068 \text{ mm}$$

$$\lambda = \underline{\underline{680 \text{ nm}}}$$

Auf diese Weise können wir die Wellenlängen aller Lichtfarben bestimmen.

Wiederholt man den Versuch 5 mit Licht verschiedener Farben, so erhält man jedesmal schmale Interferenzstreifen, die die Wellenlänge der jeweiligen Farbe zu berechnen gestatten.

Bei sonst gleichen Versuchsbedingungen unterscheiden sich die Beugungsstreifen der verschiedenen Farben durch ihre Abstände vom Mittelstreifen, und zwar sind die Abstände s_R für rotes Licht am größten, die für violetttes Licht (s_V) am kleinsten.

● Erklären Sie diese Erscheinung mit Hilfe der Gleichung (2)!

Verwendet man weißes Licht (z. B. von einer Glühlampe oder einer Bogenlampe), so entsteht zwischen dem roten und dem violetten Streifen ein Lichtband, das alle Spektralfarben enthält, denn die Wellenlängen aller Farben, die im weißen Licht enthalten sind, liegen zwischen beiden Grenzen. Der Begriff des Spektrums wurde bereits in Klasse 10 erläutert. Damals wurden Spektren mit Hilfe von Prismen erzeugt. Wiederholt man den Versuch 5 noch einmal, wobei das Gitter durch ein Prisma ersetzt wird, stellt man fest: Durch das Prisma wird das rote Licht am wenigsten, das violette am stärksten abgelenkt. Im Dispersionsspektrum ist die Reihenfolge der Farben gegenüber dem Beugungsspektrum umgekehrt.

Das Dispersionsspektrum ist gegenüber dem Beugungsspektrum im blauen Teil gedehnt, im roten Teil zusammengedrückt. Die folgende Tabelle faßt die Kenntnisse über die Arten der Spektren nochmals zusammen.

Versucht man, die Helligkeit an verschiedenen Stellen eines Spektrums mit einem empfindlichen Belichtungsmesser zu bestimmen, so stellt man fest, daß das Spektrum an seinen sichtbaren Grenzen noch nicht endet. Auch in den dunklen Bereichen neben der roten und der violetten Grenze des Spektrums läßt sich ein Energiestrom nachweisen. In diesen Bereichen trifft Licht mit Wellenlängen über 800 nm bzw. unter 400 nm auf. Es wird als *ultrarotes* bzw. *ultravioletttes* Licht bezeichnet.

Spektralfarben und ihre mittlere Wellenlänge	
Spektralfarbe	Wellenlänge in nm
Rot	640
Orange	600
Gelb	580
Gelbgrün	550
Blaugrün	500
Blau	460
Violett	410

Einteilung der Spektren

<p>Nach Art der Zerlegung</p>	<p><i>Beugungsspektrum</i></p>	<p>entsteht durch Beugung an einem Gitter</p> <p>Unterscheidungsmerkmale: tritt paarweise in mehreren Ordnungen auf; rotes Licht ist am weitesten vom geraden Lichtweg weggebogen; die Wellenlängen sind fast linear über das Spektrum verteilt.</p>
	<p><i>Dispersionspektrum</i></p>	<p>entsteht durch Farbzerlegung (Dispersion) in einem Prisma</p> <p>Unterscheidungsmerkmale: tritt nur einfach auf; rotes Licht wird am wenigsten gebrochen; die Verteilung der Wellenlängen ist nicht linear, sie ist von der Glassorte des Prismas abhängig.</p>
<p>Nach dem Aggregatzustand des lichtaussendenden Stoffes</p>	<p><i>Kontinuierliches Spektrum</i></p>	<p>wird durch glühende feste oder flüssige Körper hervorgerufen.</p>
	<p><i>Linienpektrum</i></p>	<p>wird durch glühende oder ionisierte atomare Gase hervorgerufen.</p>
	<p><i>Bandenspektrum</i></p>	<p>wird durch glühende oder ionisierte molekulare Gase oder Dämpfe hervorgerufen.</p>
<p>Nach der Art des Mediums zwischen Lichtquelle und Schirm</p>	<p><i>Emissionspektrum</i></p>	<p>entsteht, wenn sich kein das Licht absorbierender Stoff zwischen Lichtquelle und Schirm befindet. Es gibt Auskunft über die Zusammensetzung der Lichtquelle.</p>
	<p><i>Absorptionspektrum</i></p>	<p>entsteht, wenn weißes Licht durch einen Stoff verläuft, der einzelne Bestandteile des Lichts absorbiert. Es gibt Auskunft über die Natur des absorbierenden Stoffes.</p>

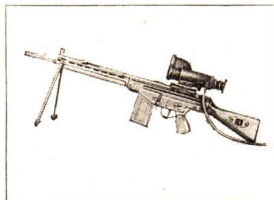
Ultrarot-Wärmeanlage. Ultrarotes Licht wird beim Auftreffen auf Stoffe in Wärmeenergie umgesetzt. Es wird deshalb auch *Wärmestrahlung* genannt.



Ultrarotlicht-Fotografie. Fotografische Schichten können für ultrarotes Licht empfindlich gemacht werden. Bei der Ultrarot-Fotografie wird das sichtbare Licht durch ein Filter vom Objektiv ferngehalten. Fernaufnahmen mit ultrarotem Licht sind sehr viel deutlicher, da dieses Licht von den Trübungen der Atmosphäre weniger als das sichtbare Licht gestreut wird.

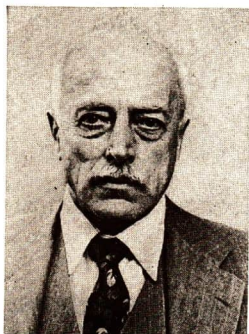


Ultrarot-Sichtanlage. Ultrarotes Licht wird durch Nebel weniger zerstreut als sichtbares Licht. Deshalb werden für militärische Zwecke zur Beobachtung bei schlechtem Wetter Ultrarot-Bildwandler eingesetzt. Sie werden in Verbindung mit einem Ultrarot-Scheinwerfer verwendet.



Ultraviolett-Bestrahlung. Ultraviolettes Licht ist sehr energiereich. Es vermag Krankheitskeime abzutöten und wird deshalb auch bei der Entkeimung angewendet. Der medizinische Einsatz mit Hilfe der Höhensonne bedient sich vor allem der Durchdringungsfähigkeit (Tiefenwirkung) des ultravioletten Lichtes.





19/1 MAX VON LAUE, 1879 bis 1960, erhielt 1914 den Nobelpreis für Physik. Er war einer der Initiatoren des Göttinger Appells (1957) gegen die westdeutsche Atomaufrüstung

Versuch 5 wird in leicht abgewandelter Form wiederholt. Statt des Spaltes projiziert man eine Lochblende von etwa 0,2 mm Durchmesser (mit einer Nadel in ein Stück Metallfolie oder Weißblech gestochen); das Gitter wird ersetzt durch ein Stück Drahtgaze oder Textilgewebe mit mindestens 5 Fäden je Millimeter. Dieses Geflecht wirkt als Kreuzgitter, d. h. wie zwei um 90° gegeneinander verdrehte Gitter mit gleicher Gitterkonstante. Als Ergebnis des Versuchs beobachtet man auf dem Bildschirm ein flächenhaft verteiltes System von Punkten bzw. bei Verwenden von weißem Licht ein entsprechendes System von Spektren.

Ähnlich wie ein Kreuzgitter wirken auch die Atome und Ionen, die in einem Kristall regelmäßig angeordnet sind. Allerdings sind ihre Abstände viel zu klein, als daß man mit sichtbarem Licht Interferenzerscheinungen hervorrufen könnte. Als erster kam der deutsche Physiker MAX VON LAUE (1879 bis 1960) auf den Gedanken, Kristalle zum Erzeugen von Röntgen-Interferenzen zu verwenden, da die Abstände in den Kristallgittern in der Größenordnung der Wellenlänge von Röntgenstrahlen liegen.

Die Anwendung der Röntgen-Interferenzen bietet dem Wissenschaftler die Möglichkeit, den kristallinen oder amorphen Zustand eines Stoffes, seine Kristallisationsform, die Abstände der Ionen, die das Kristallgitter bilden, und anderes mehr zu bestimmen. Darüber hinaus zeigen die Bilder oft die durch die verschiedenen Erzeugungs- und Bearbeitungsverfahren hervorgerufenen Veränderungen der Stoffe an, so daß sie dem Techniker ein wertvolles Hilfsmittel zur Werkstoffprüfung geworden sind.

Zeichnen Sie einige vereinfachte Atomgitterbilder verschiedener Stoffe (z. B. Chemie in Übersichten)!

Interferenz des Lichtes durch Reflexion

Für alle Interferenzversuche mit Licht ist es erforderlich, einen Wellenzug in mehrere kohärente Wellenzüge mit voneinander getrennten, scheinbaren Wellenzentren aufzuspalten.

Für diesen Zweck hat neben der Beugung auch die Reflexion eine sehr große Bedeutung erlangt.

Aus der Strahlenoptik ist bekannt, daß Licht, das von einer Lampe auf einen ebenen Spiegel fällt, von diesem so reflektiert wird, als käme es von einer Lampe hinter dem Spiegel her (virtuelles, scheinbares Bild).

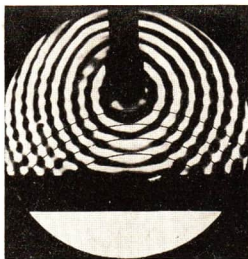
Gleiches trifft auch für Wellen zu. Trifft eine Kreiswelle auf ein ebenes Hindernis, so bewegt sie sich nach der Reflexion so, als läge ihr Erregerzentrum hinter diesem Hindernis. (↗ Lehrbuch Kl. 10, S. 28.)

Mehrere kohärente Wellenzüge erhält man durch mehrfache Reflexion. So erzeugte FRESNEL (1785 bis 1827) mit Hilfe zweier nebeneinander liegender, leicht gegeneinander geneigter Spiegel, des sogenannten *Fresnelschen Doppelspiegels*, kohärente Bündel, die miteinander interferieren konnten. Viel häufiger aber als diese Anordnung wird die Reflexion an hintereinander liegenden Flächen verwendet.

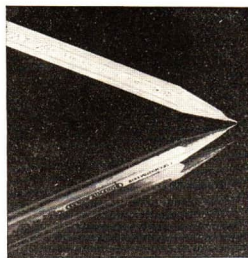
Die Reflexion des Lichtes an der Grenzfläche zwischen zwei verschiedenen optischen Medien ist meist unvollständig. Nur ein Teil der Lichtenergie wird zurückgeworfen, ein anderer Teil tritt in das andere Medium über und kann an einer weiteren Grenzfläche erneut reflektiert werden. Von dieser Tatsache kann man sich leicht überzeugen, wenn man die Reflexion an einem Doppelfenster oder auch an einem gewöhnlichen (an der Rückseite belegten) Spiegel aufmerksam beobachtet (Bild 20/2).

Wie hoch der Prozentsatz des reflektierten Lichtes, der *Reflexionskoeffizient*, ist, hängt von dem Verhältnis der Ausbreitungsgeschwindigkeiten, von der Art der verwendeten Stoffe (Metalle reflektieren sehr stark) und vom Einfallswinkel des Lichtes ab. So werden beim senkrechten Auftreffen von Licht an einer Grenzfläche zwischen Luft und Glas etwa 4% reflektiert; beim schrägen Einfall liegt der Anteil beträchtlich höher, er kann sogar 100% nahekommen.

Daß die beiden reflektierten Wellenzüge, die an zwei hintereinander liegenden Grenzflächen entstehen, auch miteinander interferieren können, soll Versuch 7 bestätigen.



20/1 Reflexion einer Kreiswelle an einem ebenen Hindernis

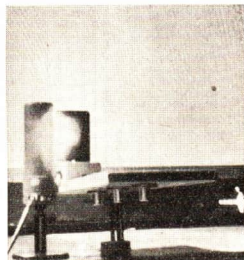


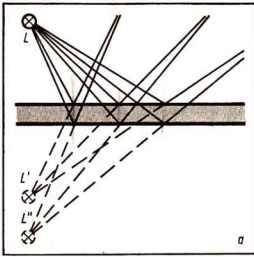
20/2 Doppelte Reflexion eines Bleistiftes an einem Spiegel

7 Einfarbiges Licht (z. B. aus einer Natriumdampfampe) fällt auf ein dünnes Glimmerplättchen. Das reflektierte Licht ruft auf einem Bildschirm große helle und dunkle Kreise hervor. Nach R. W. POHL wird dieser Versuch auch *Pohlischer Interferenzversuch* genannt.

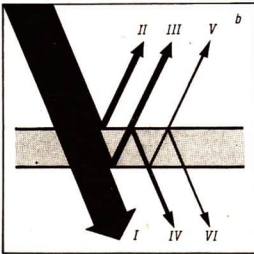
Interferenz an dünnen Schichten. Einen auch im täglichen Leben besonders häufig zu beobachtenden Fall bilden die Interferenzerscheinungen an dünnen Schichten. Man versteht darunter sehr dünne Schichten von durchsichtigen Medien, wie Luft, Öl, Wasser, Glas usw. Ein Beispiel für derartige Erscheinungen ist das Bild auf Seite 6. Die auftretenden hellen und dunklen Zonen sind nur im reflektierten Licht deutlich, im hindurchfallenden Licht sind sie meist sehr schwach zu beobachten.

20/3 Pohlischer Interferenzversuch





21/1a, b Reflexion an einer dünnen Schicht



Zur Erklärung der Erscheinungen dient Bild 21/1. Das Licht der Lichtquelle L wird in zwei Wellenzügen reflektiert, die von den virtuellen Bildern L' und L'' herzukommen scheinen. (Eigentlich wird das Licht noch mehrfach reflektiert; die weiteren Wellenzüge sind jedoch zu energiearm, als daß sie wesentlich zur Interferenz beitragen könnten.)

Die Energieverhältnisse zeigt Bild 21/1 b. Die reflektierten Lichtbündel II und III haben nahezu gleiche Intensität, d. h. die Wellen haben fast gleiche Amplituden. Dagegen sind die Amplituden der Wellen I und IV sehr verschieden, so daß kaum merkliche Interferenzen erwartet werden dürfen.

Die Amplitude von V ist gegenüber denen von II und III vernachlässigbar klein.

Ist das Reflexionsvermögen der Grenzfläche sehr groß (z. B. 95%), so sind die Verhältnisse gerade umgekehrt: Die reflektierten Wellenzüge zeigen sehr unterschiedliche Intensitäten, während die hindurchtretenden nahezu gleich stark sind.

Skizzieren Sie die Intensitäten der einzelnen Wellenzüge für großes Reflexionsvermögen der Grenzfläche!

Die interferierenden Wellenzüge ergeben Helligkeit, wenn sie keinen Gangunterschied aufweisen oder wenn der Gangunterschied gerade eine oder mehrere ganze Wellenlängen beträgt. Bei oberflächlichem Betrachten von Bild 21/1 könnte man meinen, das sei dann der Fall, wenn die Dicke der Seifenhaut verschwindend gering bzw. ein ganzzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge ist.

Dies widerspricht jedoch der Erfahrung.

Wenn die Seifenhaut ganz dünn geworden ist – dicht vor dem Abreißen – erscheint sie im auffallenden Licht dunkel. Auch Glimmerplättchen können so dünn abgespalten werden, daß sie im reflektierten Licht völlig schwarz erscheinen.

Bei der Erklärung muß man beachten, daß das Licht einmal (Bündel II) aus Luft kommt und an der Flüssigkeit gespiegelt wird, das andere Mal (Bündel III) aus der Flüssigkeit kommt und an der Grenzfläche zur Luft reflektiert wird. Im ersten Fall tritt zusätzlich ein *Phasensprung* von einer halben Wellenlänge auf im Unterschied zum Phasensprung bei der Reflexion mechanischer Wellen (S. 10). Wenn die Dicke der Seifenhaut ein geradzahliges Vielfaches einer Viertelwellenlänge beträgt, tritt Auslöschung ein. Verstärkung beobachtet man, wenn die Dicke ein ungeradzahliges Vielfaches einer Viertelwellenlänge ist.

$$\triangleright \text{Verstärkung: } d_V = (2m - 1) \cdot \frac{\lambda}{4} \quad (6)$$

$$\text{Auslöschung: } d_A = 2m \cdot \frac{\lambda}{4} \quad (7)$$

$$(m = 1, 2, 3, \dots)$$

Bei diesen Betrachtungen ist λ die Wellenlänge in der Seifenhaut.

- Inwiefern unterscheiden sich die Wellenlängen von Licht in verschiedenen Medien?

Die Wellenlänge λ in irgendeinem Medium hängt mit der Wellenlänge λ_0 desselben Lichtes im Vakuum durch die Beziehung

$$\lambda_0 = n \cdot \lambda \quad \text{zusammen.} \quad (8)$$

- Leiten Sie Gleichung (8) her, indem Sie die Definition der Brechzahl

$$n = \frac{c}{c_n} \quad \text{mit dem Gesetz der Wellenausbreitung } c = \lambda \cdot f \text{ vereinen!}$$

Da von Licht einer bestimmten Farbe im allgemeinen die Wellenlänge im Vakuum bekannt ist, werden die Gleichungen dahingehend umgeformt.

$$\triangleright \text{Verstärkung: } d_V = (2m - 1) \frac{\lambda_0}{4n} \quad (9)$$

$$\text{Auslöschung: } d_A = 2m \frac{\lambda_0}{4n} \quad (10)$$

- Wie dick muß eine Seifenhaut sein, damit bei der Reflexion von gelbem Licht ($\lambda_0 = 580 \text{ nm}$) Verstärkung eintritt?

Diese Forderung kann durch Maxima verschiedener Ordnung m erfüllt werden. Setzt man $m = 1; 2; 3; \dots$, so ergibt sich:

Gegeben:

$$\lambda_0 = 580 \text{ nm}$$

$$n = 1,33 \text{ (Wasser)}$$

$$m = 1; 2; 3; \dots$$

Gesucht:

$$d_{V1}, d_{V2}, d_{V3}, \dots$$

Lösung:

$$d_V = (2m - 1) \frac{\lambda_0}{4n}$$

$$d_{V1} = (2 \cdot 1 - 1) \cdot \frac{580 \text{ nm}}{4 \cdot 1,33}$$

$$d_{V1} = \frac{580 \text{ nm}}{4 \cdot 1,33}$$

$$\underline{\underline{d_{V1} = 109 \text{ nm}}}$$

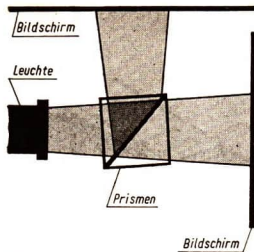
$$d_{V2} = (2 \cdot 2 - 1) \cdot \frac{580 \text{ nm}}{4 \cdot 1,33}$$

$$\underline{\underline{d_{V2} = 327 \text{ nm}}}$$

$$\underline{\underline{d_{V3} = 545 \text{ nm}}}$$

Gelbes Licht wird bei den Schichtdicken 109 nm, 327 nm, 545 nm usw. maximal reflektiert.

Die gleichen Erscheinungen wie bei einer Seifenhaut oder einer dünnen Glimmerplatte können auch durch eine dünne Luftschicht hervorgerufen werden. Man kann dazu den folgenden Versuch anstellen:



23/1

Zwei gleiche Glasprismen, deren Grundflächen rechtwinklig-gleichschenklige Dreiecke sind, werden mit den Hypotenusen-Flächen aufeinandergedrückt und mit schwach divergentem Licht durchstrahlt. Sowohl im durchfallenden als auch im seitlich reflektierten Licht sind farbige Streifen zu beobachten, die denen in der Seifenhaut gleichen. Die Farben im durchfallenden Licht sind denen im reflektierten Licht komplementär.

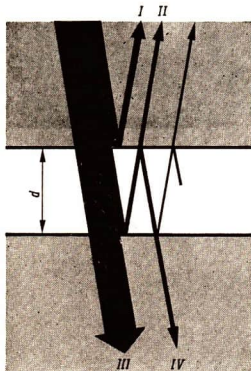
Die Erklärung der Erscheinungen entspricht der an der Seifenhaut. Als wesentlicher Unterschied ist lediglich zu nennen, daß die dünne Schicht jetzt *optisch dünner* ist, als die angrenzenden Medien. Auch die Berechnung erfolgt nach den gleichen Beziehungen, wobei die Brechzahl $n = 1$ gesetzt werden kann.

An welchen Grenzflächen in Bild 23/2 tritt ein Phasensprung auf? ●

In welchen Farben erscheinen Luftschichten von 150 nm und 800 nm Dicke bei senkrechtem Lichteinfall? ■

23/2 Reflexion und Brechung eines Lichtbündels an der Luftschicht zwischen zwei Glasplatten. Die beiden reflektierten Lichtbündel I und II haben nahezu gleiche Intensität, sie sind kohärent und interferieren miteinander. Je nach ihrem Gangunterschied verstärken oder schwächen sie sich.

Bei den hindurchtretenden Lichtanteilen dagegen ist der Wellenzug IV so schwach, daß eine Überlagerung mit dem Wellenzug III kaum merklich ist.



a) Gegeben:

$$d = 150 \text{ nm}$$

$$n = 1$$

$$m = 1$$

Gesucht:

$$\lambda_V$$

Lösung:

$$\lambda_V = \frac{4 \cdot n \cdot d}{2m - 1}$$

$$\lambda_V = 600 \text{ nm}$$

Licht mit einer Wellenlänge von 600 nm wird maximal reflektiert, während alle anderen in Betracht kommenden Wellenlängen außerhalb des sichtbaren Bereiches liegen. Die Schicht erscheint demzufolge orange.

b) Die Bedingungen für Verstärkung und Auslöschung werden in verschiedenen Ordnungen m erfüllt.

Gegeben:

$$d = 800 \text{ nm}$$

$$n = 1$$

$$m = 1; 2; \dots$$

Lösung:

$$\lambda_{V,m} = \frac{4 \cdot n \cdot d}{2m - 1}$$

$$\lambda_{V,3} = 640 \text{ nm}$$

$$\lambda_{V,4} = 457 \text{ nm}$$

$$\lambda_{A,m} = \frac{2 \cdot n \cdot d}{m}$$

$$\lambda_{A,3} = 533 \text{ nm}$$

$$\lambda_{A,4} = 400 \text{ nm}$$

Gesucht:

$$\lambda_A,$$

$$\lambda_V$$

Rotes und blaues Licht wird bei der Reflexion verstärkt, grünes und violettes ausgelöscht.

Die Schicht erscheint in einer braunen Mischfarbe.

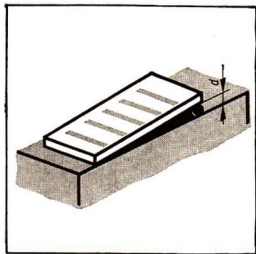
Je dicker die Schichten sind, desto vielfältiger werden die verstärkten bzw. ausgelöschten Lichtfarben, so daß schließlich (bei wenigen μm Dicke) im weißen Licht gar keine Interferenzen mehr beobachtet werden können.

Interferenzen am Keil

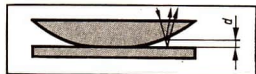
Technisch ist es schwierig, Glasplatten so genau zu schleifen und zu justieren, daß die zwischen ihnen liegende Luftschicht wirklich überall gleich dick ist. Sie ist vielmehr als ein sehr schlanker Keil aufzufassen. Deshalb erscheint sie bei Betrachtung auch nicht in einer einheitlichen Farbe, sondern zeigt zusammenhängende helle und dunkle (bzw. bei Verwenden weißen Lichtes farbige) Streifen. Ein derartiger Streifen überdeckt alle Stellen, an denen die Luftschicht die gleiche Dicke hat.

Benachbarte helle (oder dunkle) Streifen zeigen einen Dickenunterschied von $\lambda/2$ an.

Sind die begrenzenden Glasplatten eben, aber nicht ganz parallel, so sind die Interferenzstreifen parallel und zeigen überall den gleichen Abstand voneinander (Bild 24/1). Eine nur wenig gewölbte Linse auf einer ebenen Unterlage zeigt ein System konzentrischer Kreise, die nach außen hin immer dichter zusammenliegen. Sie sind als *Newtonsche Ringe* bekannt.



24/1 Interferenzstreifen am Luftkeil



24/2 Die Entstehung Newtonscher Ringe zwischen einer Linse und einer ebenen Glasplatte

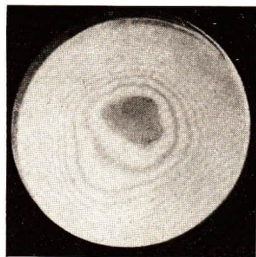
- Drücken Sie zwei Diagonalgläser fest aufeinander und deuten Sie die dabei entstehenden Interferenzfiguren!
- Erklären Sie, warum in Bild 24/2 in der Mitte ein schwarzer Fleck auftritt!

Die Newtonschen Ringe ermöglichen für die optische Industrie, aber auch in der Fertigung von Meßgeräten (Endmaßen) ein sehr empfindliches Prüfverfahren. So wird bei Verwenden gelben Lichtes eine Ungenauigkeit oder Unebenheit von 145 nm noch sicher angezeigt. Man legt dazu das zu prüfende Teil auf oder unter ein entsprechendes Probestück, also zwei ebene Flächen aufeinander oder eine konvexe Fläche auf eine konkave gleicher Krümmung. Je stärker die Form des Prüflings von der des Musters abweicht, um so mehr Ringe oder Streifen werden sichtbar.

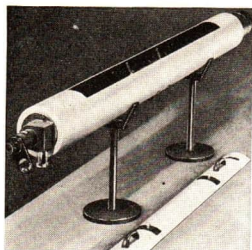
Das Auftreten von nur einem oder zwei Ringen zeigt eine sehr hohe Qualität an.

Interferometer. Mit Interferometern kann man Brechzahlen und Längen mit höchster, durch andere Geräte kaum erreichbarer Genauigkeit messen.

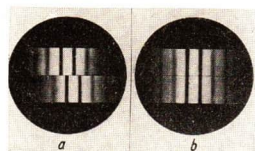
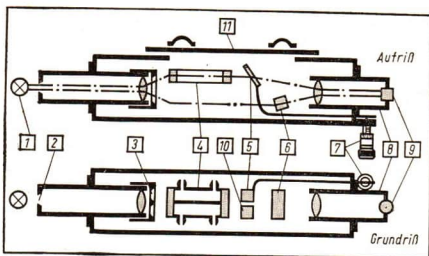
Interferometer sind im Prinzip so aufgebaut, daß ein Strahlenbündel durch Beugung, Brechung oder Reflexion in zwei kohärente Bündel aufgespalten wird. Die beiden Teilbündel durchlaufen unterschiedliche Wege und werden dann wieder vereinigt, wobei sie miteinander interferieren. Aus dem Interferenzbild kann man auf die Wegunterschiede schließen.



24/3 Prüfen einer Linse mit Newtonschen Ringen



25/1, 25/2 Laboratoriums-Interferometer des VEB Carl Zeiss Jena

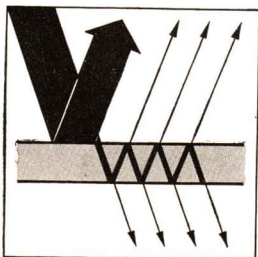


25/3 Interferenzbilder im Okular des Laboratoriums-Interferometers

a) Durch unterschiedliche optische Weglängen seitlich verschobenes oberes Interferenzbild

b) Durch Nachstellen erreicht man Übereinstimmung zwischen den beiden Interferenzbildern

25/4 Reflektierte und durchgehende Wellen an einem Interferenzfilter



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 25/3 dargestellten Interferenzbilder.

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 sind die Kompensatorplatten völlig gleich und nehmen 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.

Interferenzfilter. Interferenzfilter dienen dazu, aus weißem Licht einfarbiges, d. h. Licht eines sehr schmalen Wellenlängenbereiches auszufiltern. Metallinterferenzfilter bestehen aus einer dünnen, durchsichtigen Schicht, die beiderseits mit einer sehr dünnen, lichtdurchlässigen Silberschicht belegt ist. Die Silberschicht erhöht das Reflexionsvermögen, so daß ein eintretendes Lichtbündel mehrfach in der Schicht hin- und herreflektiert wird, ohne wesentlich an Intensität abzunehmen.

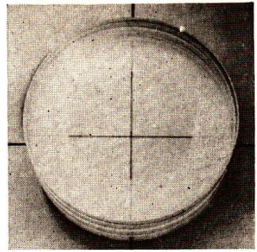
Die aus dem Filter austretenden Bündel haben nahezu gleiche Intensität und weisen untereinander gleiche Gangunterschiede auf. Sie sind damit den am Gitter entstehenden Wellenzügen analog. Durch die große Zahl der miteinander interferierenden Wellen

ergibt sich Verstärkung nur für wenige, sehr schmale Wellenlängenbereiche, während alle übrigen Wellenlängen ausgelöscht werden. Das Filter sieht wie ein Spiegel aus, da alle Wellenlängen außer einigen wenigen reflektiert werden.

Um von den durchgelassenen Wellenlängen, die man nach ihrer Ordnung unterscheiden kann, nur eine bestimmte auszusondern, kombiniert man die Interferenzfilter mit Glasfiltern.

Oberflächenvergütung von Linsen. Bei hochwertigen optischen Systemen wird die Interferenz an dünnen Schichten zur Entspiegelung der Oberflächen ausgenutzt. Man dampft im Vakuum auf die Glasoberfläche ($n_G = 1,5$) eine dünne Schicht einer Substanz mit der Brechzahl $n_S = 1,23$ auf. Durch Wahl einer passenden Schichtdicke ($d = \lambda/4$) erreicht man, daß die reflektierten Wellenzüge einander auslöschen.

Exakt ist das natürlich nur für eine bestimmte Wellenlänge erzielbar. Man wählt für λ_0 etwa 550 nm (Gelbgrün). Andere Wellenlängen werden noch geringfügig reflektiert, weshalb Linsen mit einem *Antireflex-Belag* stets einen bläulichen Schimmer zeigen.



26/1 Erhöhung der Lichtdurchlässigkeit durch Oberflächenvergütung

- An welchen Grenzflächen des Antireflex-Belages tritt ein Phasensprung auf?
- Erklären Sie, warum die Schicht eine Viertel-Wellenlänge dick sein muß?
- Berechnen Sie die Dicke für $n_S = 1,23$ und $\lambda_0 = 550$ nm!

Das Auslöschen der reflektierten Wellen kann nicht mit einer Vernichtung der Energie gleichgesetzt werden; das würde dem Gesetz von der Erhaltung der Energie widersprechen. Vielmehr ist zu erwarten, daß diese Energie zusätzlich im durchtretenden Licht wiederzufinden ist.

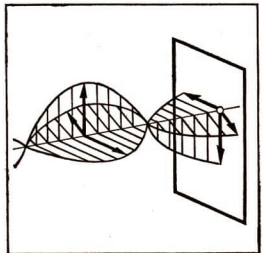
Bild 26/1 zeigt vier übereinandergelagte Glasplatten, deren Oberflächen in der mittleren Zone vergütet wurden. Sie haben an dieser Stelle eine Lichtdurchlässigkeit von etwa 92% gegenüber nur 62% in den unvergüteten Bereichen.

Linear polarisiertes Licht


Für die Erklärung der optischen Erscheinungen wurde ein Modell zu Hilfe genommen, das nicht sehr präzise ist. Ihm wurden allgemeine Welleneigenschaften zugeschrieben. Dabei wurde bisher versäumt, eine Vorstellung zu schaffen, was denn nun in dieser Welle schwingt; ja nicht einmal an eine bestimmte Wellenart wurde gedacht. Das war für die Erklärung der Interferenz auch nicht nötig, soll nun aber nachgeholt werden.

In Klasse 10 wurde das Licht in die Reihe der elektromagnetischen Wellen eingeordnet. Das deutet auf den Charakter des Lichtes als Transversalwelle hin; die folgenden Darlegungen und Versuche werden diese Hypothese bestätigen.


26/2 Beliebige Schwingungsrichtungen von Transversalwellen mit gleicher Ausbreitungsrichtung



Longitudinalwellen und Transversalwellen unterscheiden sich voneinander nur durch die gegenseitige Lage von Schwingungsrichtung und Ausbreitungsrichtung. Dabei ist für eine Längswelle mit der Angabe der Ausbreitungsrichtung auch die Schwingungsrichtung eindeutig festgelegt; beide fallen zusammen. Für eine Transversalwelle besteht diese eindeutige Zuordnung nicht. Zwei Transversalwellen mit gleicher Ausbreitungsrichtung können sich durchaus noch in ihren Schwingungsrichtungen unterscheiden. Die Anzahl der möglichen Schwingungsrichtungen spannt eine Ebene auf, auf der die Ausbreitungsrichtung senkrecht steht. Ein Modellversuch soll das verdeutlichen.

Ein etwa 1 m langer Gummifaden wird waagrecht ausgespannt. ⁹  Eines seiner Enden wird exzentrisch an der Achse eines Elektromotors befestigt, das andere an einem Stativ (Bild 27/1). Nachdem der Motor eine gleichbleibende Drehfrequenz erreicht hat, wird die Fadenspannung so lange verändert, bis die auftretende stehende Welle eine maximale Amplitude erreicht. Wir können feststellen, daß jede der möglichen Schwingungsrichtungen in der Welle auftritt.

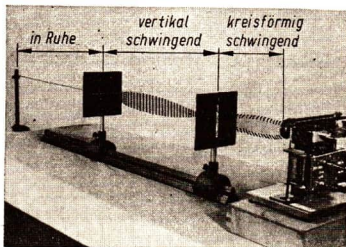
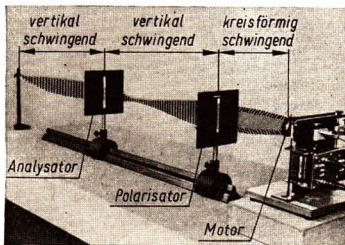
Erklären Sie die Veränderungen der Amplitude mit Hilfe der Resonanz! ●

Nach Versuch 9 wird in der Nähe eines Knotens ein schmaler Spalt über das schwingende Gummiseil geschoben. ¹⁰  Hinter dem Spalt – vom Motor aus gesehen – schwingt das Seil nur noch in einer Ebene (Bild 27/2). Alle Schwingungsrichtungen außer dieser einen sind durch den Spalt unterdrückt worden. Bringt man noch einen zweiten Spalt an, so bleibt hinter diesem die Schwingung bestehen oder verschwindet völlig, je nachdem, ob die Spalte parallel oder senkrecht zueinander stehen. Bei dazwischen liegenden Stellungen der Spalte ist die Amplitude der weiterlaufenden Welle geringer als die der auftreffenden.

27/1 Die Spalte stehen parallel. Eine linear polarisierte Querwelle durchsetzt den Analysator ungehindert.

27/2 Die Spalte stehen senkrecht aufeinander. Eine linear polarisierte Querwelle wird durch den Analysator ausgelöscht

Eine Transversalwelle, in der nur eine Schwingungsrichtung vorkommt, wird **linear polarisiert** genannt. Bei einer Längswelle hätte diese Bezeichnung keinen Sinn.

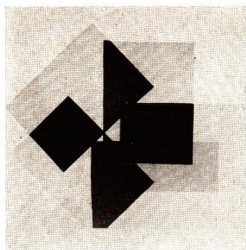


Wenn es gelingt, auch Licht zu polarisieren, d. h. eine Versuchsanordnung zu finden, in der Licht eine senkrecht zur Ausbreitungsrichtung liegende Vorzugsrichtung aufweist, so hat man damit den Nachweis erbracht, daß Licht durch eine **Transversalwelle** beschrieben werden kann.

Polarisation durch Filter. Bild 28/1 zeigt eine Aufnahme von fünf rechteckigen Stücken einer Polarisationsfolie, die teilweise übereinander gelegt wurden. An den Stellen, an denen die Stücke parallel angeordnet wurden, geht Licht nahezu ungeschwächt hindurch. Wo die Stücke rechtwinklig übereinander liegen, wird Licht völlig ausgelöscht. Für Licht, das eine derartige Folie einmal durchsetzt hat, sind augenscheinlich nicht alle Richtungen gleichwertig, es ist polarisiert.

Die Polarisationsfolien sind dabei den Spalten bei der Seilwelle analog zu setzen.

Manche Kristalle (z. B. Turmalin) haben die Eigenschaft, daß sie nur Licht einer bestimmten Schwingungsrichtung durchlassen, Licht mit anderen Richtungen aber absorbieren. Aus solchen Kristallen, die in eine Gelatineschicht eingebettet und künstlich ausgerichtet wurden, besteht eine Polarisationsfolie. Wird ein Stück davon eingefäßt, so spricht man von einem **Polarisationsfilter**.



28/1 Polarisationsfilter

¹¹ Wir blicken durch zwei hintereinander angeordnete Polarisationsfilter gegen eine Lichtquelle und drehen eines der Filter um die gemeinsame Achse. Bei einer vollen Umdrehung wird das Gesichtsfeld zweimal aufgehellt und zweimal völlig dunkel.

Das Filter, das zuerst von einem Lichtbündel durchsetzt wird, heißt auch *Polarisator*, das zweite *Analysator*.

▷ Licht ist polarisierbar; es ist als eine Transversalwelle aufzufassen.

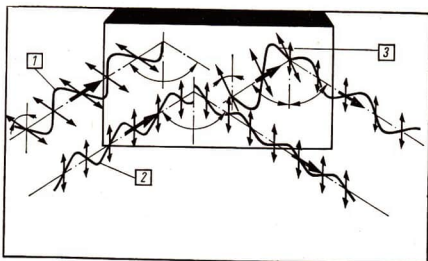
Das Licht eines Gas-Lasers, von dem noch an anderer Stelle die Rede sein wird, ist von vornherein linear polarisiert. Es ist außerdem sehr gut kohärent und monochromatisch, so daß es sich für sehr viele wellenoptische Versuche besonders gut eignet.

Polarisation durch Reflexion und Brechung

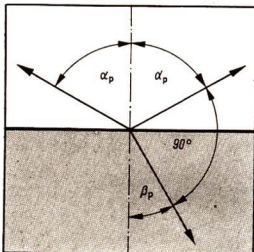
¹² Eine unverspiegelte Glasplatte wird mit Licht schräg angestrahlt. Das reflektierte Licht wird mit einem Polarisationsfilter analysiert. Beim Drehen des Filters werden helle und weniger helle Lichtbündel wahrgenommen. Das reflektierte Licht ist teilweise polarisiert.

Vollständige Polarisation erzielt man nur bei einem ganz bestimmten Einfallswinkel des Lichtes auf die Glasplatte (Bild 29/1).

29/1 Licht mit horizontaler Schwingungsebene (1) wird nicht reflektiert. Licht mit vertikaler Schwingungsebene (2) wird gut reflektiert. Von Licht mit zur Horizontalen und zur Vertikalen geneigten Schwingungsebene (3) wird nur der Anteil reflektiert, der der Projektion der geneigten Schwingungsebene auf die vertikale Schwingungsebene entspricht.



29/2



Diesen Winkel nennen wir *Polarisationswinkel* α_p . Er hängt sehr eng mit der Brechungszahl des reflektierenden Mediums zusammen. Der gesetzmäßige Zusammenhang wurde von BREWSTER (1781 bis 1868, spr.: bruhster) formuliert:

Der reflektierte Strahl ist vollständig linear polarisiert, wenn er mit dem gebrochenen Strahl einen rechten Winkel einschließt.

Daraus ergibt sich folgende Bedingung (vgl. Bild 29/2):

$$\text{Brechungsgesetz: } n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$$

$$n = \frac{\sin \alpha_p}{\sin \beta_p}$$

Gesetz von BREWSTER:

$$180^\circ - (\alpha_p + \beta_p) = 90^\circ$$

$$\beta_p = 90^\circ - \alpha_p \quad (11)$$

$$n = \frac{\sin \alpha_p}{\sin (90^\circ - \alpha_p)}$$

$$n = \frac{\sin \alpha_p}{\cos \alpha_p}$$

$$n = \tan \alpha_p \quad (12)$$

Für Glas ergibt sich damit beispielsweise:

$$n = 1,5$$

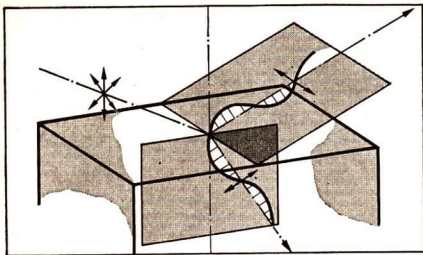
$$\tan \alpha_p = 1,5$$

$$\underline{\underline{\alpha_p = 56,3^\circ}}$$

Wenn Licht unter $56,3^\circ$ von Glas reflektiert wird, so wird es vollständig linear polarisiert.

Wie groß ist der Polarisationswinkel für Wasser ($n = 1,33$)?

Eine Glasscheibe wird unter dem Polarisationswinkel mit parallelem Licht beleuchtet. Das reflektierte Licht wird mit einem Filter analysiert. Tatsächlich kann durch Drehen des Filters völlige Dunkelheit erzielt werden. 13



30/1 Polarisation des Lichtes durch Reflexion und Brechung

Beim Analysieren des hindurchtretenden Lichtes erweist sich dieses als nur teilweise polarisiert. Um möglichst wenig Licht hindurchzulassen, muß das Filter gegenüber der Stellung beim reflektierten Licht um 90° verdreht werden.

Bei der Brechung wird das Licht auch unter dem Polarisationswinkel nur teilweise polarisiert. Durch mehrfache Brechung jedoch kann nahezu vollständige Polarisation erzielt werden. Man verwendet parallele, hintereinander angeordnete Glasplatten, einen Glaspattensatz.

Die Polarisation durch Reflexion und Brechung gibt die Möglichkeit, dem linear polarisierten Licht eindeutig eine Schwingungsrichtung zuzuordnen. Man hat sich dabei auf folgende Auffassung geeinigt:

Die Schwingungsrichtung des unter dem Polarisationswinkel reflektierten Lichtes ist parallel zur Glasoberfläche. Das Licht schwingt in einer Ebene, die die Ausbreitungsrichtung enthält und auf der Einfallsebene senkrecht steht.

Aus der Theorie für die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen läßt sich ableiten, daß die so definierte Polarisationsrichtung mit der Richtung der elektr. Feldstärke in der Welle übereinstimmt.

● Welche Ebene bezeichnen wir als Einfallsebene?

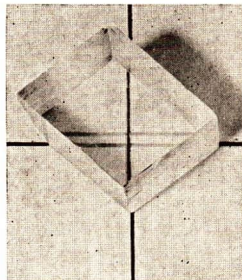
Dem durch Brechung an einem Glaspattensatz polarisierten Licht ordnet man die dazu senkrechte Schwingungsrichtung zu. Es schwingt also in der Einfallsebene.

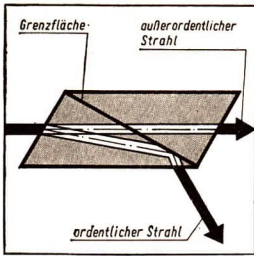
● Gibt es beim Übergang vom dichteren zum dünneren Medium auch einen Strahl, der dem Brewsterschen Gesetz genügt?

Die Polarisation durch Reflexion kann ausgenutzt werden, um störende Reflexe zu unterdrücken.

Beim Gas-Laser wird ein sogenanntes Brewsterfenster verwendet, d. h. eine Glasplatte, die vom Laserstrahl unter dem Polarisationswinkel durchsetzt wird. Diese kann Licht, das in der Einfallsebene polarisiert ist, nicht reflektieren, läßt es also verlustfrei hindurchtreten.

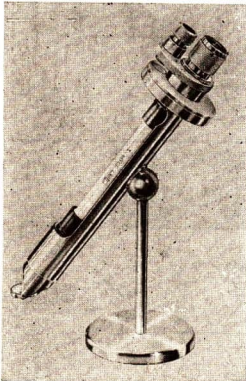
30/2 Doppelbrechender Kristall (Kalkspat)





31/1 Strahlengang im Nicolschen Prisma

31/2 Taschenpolarimeter des VEB Carl Zeiss Jena. Es enthält eine 20 cm lange Porzellanröhre, die an den Enden mit je einer Glasplatte abgeschlossen ist und die zu untersuchende Flüssigkeit aufnimmt. Ehe das Licht in die Porzellanröhre eintritt, durchläuft es ein Polarisationsfilter. Auf der anderen Seite der Röhre befindet sich der Analysator, der mit einer Präzisionskreisteilung versehen ist



Polarisation durch Doppelbrechung. Einige Minerale wie z. B. Kalkspat (kristallisiertes Kalziumkarbonat) zeigen die Eigenschaft der Doppelbrechung. Sie spalten ein einfallendes Lichtbündel in zwei zueinander geneigte Bündel auf. Dadurch werden von einem Gegenstand zwei Bilder erzeugt. Genauere Untersuchungen zeigen, daß die beiden Lichtanteile linear polarisiert sind. Beim Betrachten durch ein Polarisationsfilter und Drehen desselben verschwinden und erscheinen die beiden Bilder im Wechsel.

Von den beiden Strahlen folgt nur einer dem Brechungsgesetz. Er wird der ordentliche Strahl genannt, während der andere außerordentlicher Strahl heißt. Seine Ausbreitung kann erklärt werden, wenn man annimmt, daß für ihn die Ausbreitungsgeschwindigkeit im Kristall nicht in allen Richtungen gleich ist. Der Kristall ist optisch nicht *isotrop*. Will man einen der beiden Lichtanteile aussondern, so schneidet man einen Kristall in bestimmter Weise auseinander und kittet ihn wieder zusammen (Nicolsches Prisma). Der Kitt hat eine geringere Brechzahl als der Kristall. An der Grenzfläche wird der ordentliche Strahl total reflektiert. Er tritt seitlich aus dem Prisma heraus und wird in der Fassung absorbiert. Der außerordentliche Strahl durchsetzt das Prisma nahezu ungeschwächt.

Drehung der Polarisationsebene. Einige anorganische Kristalle wie z. B. Quarz, Gips, vor allem aber eine große Anzahl von organischen Substanzen haben die Eigenschaft, daß sie die Schwingungsrichtung von hindurchgehendem polarisiertem Licht verändern. Man nennt solche Stoffe *optisch aktiv*. Der Winkel, um den die Polarisationsrichtung geändert wird, ist der Dicke der durchsetzten Schicht proportional. Man kann sich die Erscheinung so vorstellen, als werde die Schwingungsrichtung wie auf einer Schraubenlinie gedreht.

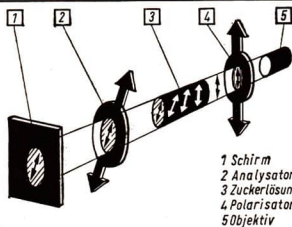
Die Drehung der Polarisationsebene hängt mit einem asymmetrischen Aufbau der Moleküle des Stoffes zusammen. Mit ihrer Hilfe kann die Anwesenheit solcher Stoffe wie Zucker oder organische Säuren in einer Flüssigkeit nachgewiesen werden.

Geräte, mit denen man den durch einen optisch aktiven Stoff hervorgerufenen Drehwinkel bestimmen kann, heißen Polarimeter.

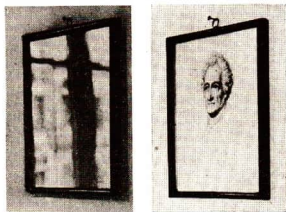
Bei der *Raumbildprojektion* werden gleichzeitig zwei geringfügig voneinander verschiedene Bilder auf einer Bildfläche erzeugt, für jedes Auge eines. Das Licht der beiden Teilbilder ist rechtwinklig zueinander polarisiert. Bei Verwendung einer Polarisationsbrille nimmt jedes Auge nur das richtige Teilbild wahr, so daß der Betrachter einen räumlichen Bildeindruck erhält.

Anwendungsbeispiele zur Polarisation

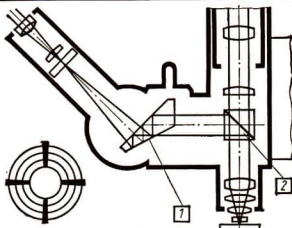
Polarimeter. Licht (5) geht durch einen Polarisator (4), dadurch wird das Licht nur in einer bevorzugten Schwingungsebene hindurchgelassen. Eine Zuckerlösung (3), z. B. aus Zuckerrüben, Harn von Zuckerkranken wirkt auf das polarisierte Licht; die Schwingungsebene wird gedreht. Mit dem Analysator (2) wird gemessen, wie groß die Drehung und damit wie hoch der Zuckergehalt ist.



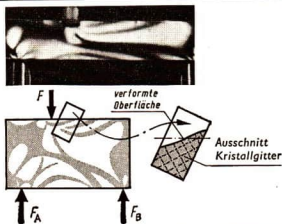
Polarisationsfilter. Von einer Glasscheibe reflektiertes Licht ist polarisiert und mitunter so stark, daß Licht von Gegenständen hinter der Reflexionsebene nicht mehr deutlich wahrgenommen werden kann. Mit einem Polarisationsfilter wird das reflektierte Licht ausgesondert und nur das von dem Gegenstand kommende unpolarisierte Licht durchgelassen.



Polarisationsmikroskop. Zur Beobachtung optischer Erscheinungen beim Untersuchen von Kristallen wird polarisiertes Licht verwendet. Die Interferenzbilder geben Aufschluß über optische Achsen von Kristallen.

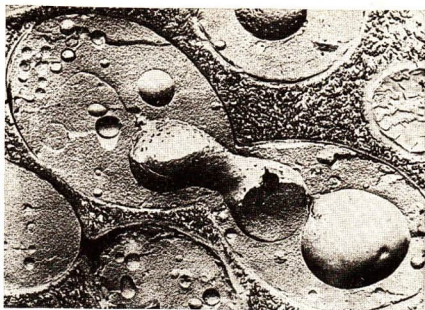


Spannungsdoppelbrechung. Durch mechanische Spannungen wird die Lage der Moleküle in einem Prüfkörper verändert. Polarisiertes Licht, das durch den als Modell aus Polystyrol hergestellten Prüfkörper geht, wird verschieden stark hindurchgelassen. Dieses Licht ergibt ein Bild mit dunklen und hellen Gebieten entsprechend der Spannungsverteilung im Körper.



Welleneigenschaften von Teilchen

Das Elektronenmikroskop wird in verschiedenen Bereichen der Naturwissenschaften und Technik verwendet. Mit ihm lassen sich Objekte und Strukturen (im nebenstehenden Bild eine Hefezelle in Teilung) abbilden, die in der Größenordnung von 10^{-7} bis 10^{-9} m liegen. Grundlegend für die Entwicklung der Elektronenmikroskopie war die Entdeckung der Welleneigenschaften von bewegten Elektronen.



Das Doppelspaltexperiment mit Teilchen und Wellen

Im vorangehenden Abschnitt wurde dargestellt, daß alle Schlüsse auf die Welleneigenschaften des Lichtes aus geeigneten Versuchen indirekt gezogen werden müssen, da im Gegensatz zu Wasseroberflächenwellen keine direkte Beobachtung der „Schwingungen“ in einem Lichtstrahl möglich ist. Die im Abschnitt „Welleneigenschaften des Lichtes“ behandelten Interferenz- und Beugungsversuche lassen solche Schlüsse zu. Um das zu verstehen, nehmen wir folgendes Gedankenexperiment vor:

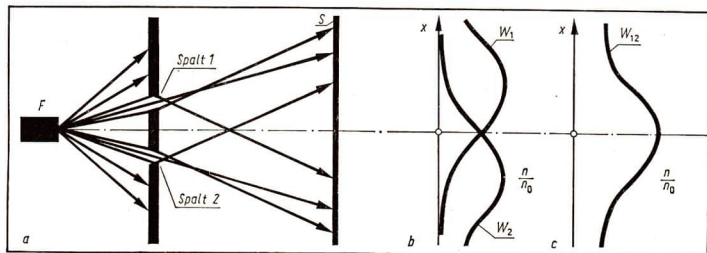
33/2a Doppelspaltexperiment mit Teilchen

33/2b Relative Teilchenzahl bei einem geöffneten Spalt

33/2c Relative Teilchenzahl am Doppelspalt

Doppelspaltexperiment mit Teilchen

Von einer Teilchenquelle F (Jagdgewehr) werden Teilchen (Schrotkugeln) auf eine Platte mit zwei Öffnungen gesandt. Die Teilchen sollen sich gegenseitig nicht beeinflussen. Die auf jedem Punkt des Schirms S auftreffende Anzahl der Teilchen wird registriert.



Es ist n_0 die Zahl der durch die Öffnungen hindurchgegangenen Teilchen und n die Zahl der am Orte x des Schirmes auftreffenden Teilchen. Zunächst ist jeweils nur ein Spalt geöffnet. Das Verhältnis $n : n_0$ zeigt Bild 33/2b. Anschließend sind beide Spalte geöffnet (Bild 33/2c).

Versuchsergebnis: Für jeden Ort x gilt für die relativen Teilchenzahlen (Wahrscheinlichkeiten)

$$w_{12} = w_1 + w_2. \quad (13)$$

Das ist verständlich, weil eine auf dem Schirm registrierte Kugel entweder durch den einen oder durch den anderen Spalt geflogen ist. Dabei ist es für die durch den Spalt 1 gegangene Kugel bedeutungslos, ob der Spalt 2 geöffnet ist oder nicht.

Um das Besondere und das Gemeinsame von Teilchen und Welle zu ermitteln, wird der Versuch 14 nun mit Wellen durchgeführt (↗ Welleneigenschaften des Lichtes, S. 6).

Doppelspaltexperiment mit Wellen

(Wasserwellen, Lichtwellen)

15

▼ Von einer Wellenquelle Q werden Wellen auf eine Platte mit zwei Spaltöffnungen gesandt (Bild 35/1).

Wellen beeinflussen sich gegenseitig nicht.

Die relative Teilchendichte aus Versuch 14 ist vergleichbar mit der Intensität („Helligkeit“ beim Licht) der Welle im Versuch 15. Die Intensität ist proportional dem Quadrat der Amplitude. Sie wird auf dem Schirm S registriert.

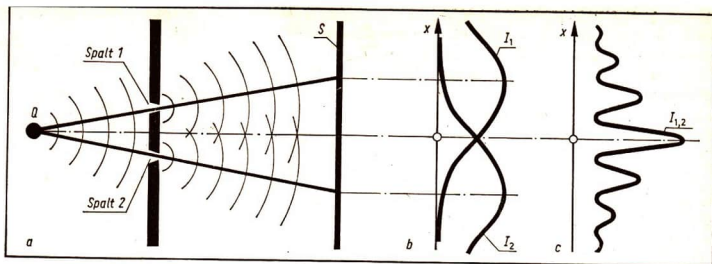
Qualitativ ist das im Bild 35/1b dargestellte Ergebnis dem Kurvenverlauf im Bild 33/2b ähnlich. Dagegen ist ein grundsätzlich anderes Ergebnis zu beobachten, wenn beide Spalte geöffnet sind (Bild 35/1c). Es gilt jetzt

$$I_{12} \neq I_1 + I_2. \quad (14)$$

Aus dem Abschnitt „Welleneigenschaften des Lichtes“ ist bekannt, daß sich die von den beiden Spaltöffnungen ausgehenden Teilwellen überlagern, d. h. es addieren sich die Amplituden, aber nicht die Intensitäten der Wellen. Bei den Wellen gibt es die Erscheinung der *Interferenz*.

Führt man nun ein solches Doppelspaltexperiment mit unbekanntem Objekten durch und erhält man ein der Kurve in Bild 35/1c analoges Ergebnis, dann ist der Schluß erlaubt:

Das Objekt zeigt unter diesen experimentellen Bedingungen Welleneigenschaften.



35/1a Doppelspaltexperiment mit Wellen

35/1b Intensitätskurven bei einem geöffneten Spalt

35/1c Intensitätskurve für Doppelspalt

Nach Versuch 15 und der Darstellung in Bild 35/1 kann man zusammenfassend feststellen:

Das Auftreten von Interferenzerscheinungen dient als Beweis für die Welleneigenschaften eines physikalischen Vorganges.

Interferenzen mit Elektronenstrahlen

Um die Allgemeingültigkeit der Erkenntnisse aus den Versuchen 14 und 15 zu prüfen, untersucht man eine beliebige Strahlenart, z. B. die leicht zu erzeugenden Elektronenstrahlen.

Bei der Behandlung der Katodenstrahlröhre (Kl. 9) wurde die Bewegung der freien Elektronen im Vakuum untersucht. Dazu wurden die Elektronen als **geladene Teilchen** betrachtet. Elektrische und magnetische Felder üben auf solche Teilchen Kräfte aus; in ihnen bewegen sie sich beschleunigt.

Wenn in einem Elektronenstrahl alle Elektronen die gleiche konstante Geschwindigkeit besitzen, bezeichnet man ihn als **monochromatischen Elektronenstrahl**.

Die kinetische Energie eines Elektrons ist

$$W_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (15)$$

mit m als Elektronenmasse.

Die Elektronengeschwindigkeit v nach dem Durchlaufen der Beschleunigungsstrecke (Katode–Anode) hängt von der angelegten Gleichspannung U ab.

Man erhält die kinetische Energie aus

$$\frac{1}{2} m \cdot v^2 = e \cdot U \quad (16)$$

mit e als Elektronenladung.

Im Prinzip wäre nach dieser Beziehung durch eine genügend hohe Spannung eine beliebig hohe Geschwindigkeit erreichbar. Das ist nicht der Fall. In Klasse 12 (spezielle Relativitätstheorie) wird erläutert, daß mit wachsender Geschwindigkeit auch die Elektronenmasse nach dem Gesetz

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (17)$$

zunimmt. Darin ist m_0 die Ruhmasse (das ist die Masse des Teilchens bei $v = 0$) und c die Vakuumlichtgeschwindigkeit.

Wenn $v \ll c$ ist, darf man in (16) näherungsweise die Ruhmasse m_0 des Elektrons einsetzen.

Dieser Teilchenvorstellung über die Elektronen steht die folgende experimentelle Erfahrung gegenüber:

16 C. J. DAVISSON ließ 1923 einen monochromatischen Elektronenstrahl unter einem Winkel von 45° auf eine Platin- oder Nickel-Einkristallfläche auffallen.

Mit einem Registriergerät (Galvanometer) wird der an der Oberfläche gestreute Elektronenstrahl in Abhängigkeit von dem Winkel β gemessen. Die Stromstärke ist ein Maß für die Anzahl der unter dem Winkel β gestreuten Elektronen.

Der Versuch 16 entspricht dem Gedankenexperiment im Versuch 14. Die Teilchenquelle ist durch die Elektronenquelle, der Schirm durch das Meßgerät und der Doppelspalt durch das Kristallgitter ersetzt.

DAVISSON beobachtete, daß neben dem Maximum bei $\beta = 45^\circ$ auch noch Maxima bei bestimmten anderen Winkeln β auftraten.

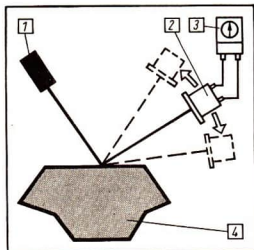
Die Bemühungen, dieses Ergebnis im Teilchenbild zu verstehen, blieben erfolglos. Hier führte eine von LOUIS DE BROGLIE 1924 aufgestellte Hypothese weiter:

► Jedem monochromatischen Elektronenstrahl ist eine „Elektronenwelle“ mit bestimmter Wellenlänge λ zuzuordnen, die mit der Masse m und der Geschwindigkeit v des Elektrons in folgendem Zusammenhang steht:

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v} \quad (18)$$

(h : Plancksches Wirkungsquantum, \nearrow Quanteneigenschaften des Lichtes, S. 45).

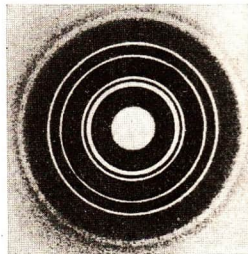
Im Wellenbild sind die auftretenden Nebenmaxima des DAVISSON-Experiments Interferenzstreifen der Elektronenwellen am Kristallgitter (vgl. Bild 35/1c) analog der Beugung von Röntgenwellen am Kristallgitter.

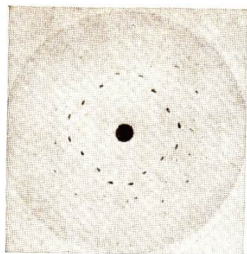


36/1 DAVISSON-Experiment
1 Elektronenquelle, 2, 3 Registriergerät, 4 Kristall



36/2 Elektroneninterferenz bei Durchstrahlung einer dünnen Kupferfolie





37/1 LAUE-Diagramm mit Elektronen an NaCl

Weitere Experimente bestätigten Gleichung (18) auch quantitativ.

Neben Elektroneninterferenzen (Bild 36/2) konnte auch die Elektronenbeugung (Bild 37/1) experimentell nachgewiesen werden.

Die Beziehung (18) gilt für beliebige Elektronengeschwindigkeiten. Ist $v \ll c$, dann darf in (18) die Ruhmasse eingesetzt werden.

Elektronen, die eine Beschleunigungsspannung U durchlaufen, haben nach (16) die Geschwindigkeit

$$v = \sqrt{\frac{2e \cdot U}{m}}$$

Mit $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}$

$m_e = 9,117 \cdot 10^{-27} \text{ g}$

$h = 6,625 \cdot 10^{-27} \frac{\text{g} \cdot \text{cm}^2}{\text{s}}$

erhält man für

U in V	v in $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	λ in cm
150	$7,27 \cdot 10^8$	$1,00 \cdot 10^{-8}$
10^4	$5,93 \cdot 10^9$	$1,23 \cdot 10^{-9}$

Materiewellen

Nach DE BROGLIE ist nicht nur den Elektronen, sondern jedem bewegten Teilchenstrom eine Wellenerscheinung zugeordnet, die – nicht korrekt wegen der Beschränkung des Materiebegriffs auf die stoffliche Seite – als **Materiewelle** bezeichnet wird.

Für Protonenstrahlen erhält man mit $m_p = 1,672 \cdot 10^{-24} \text{ g} = 1836 \cdot m_e$

die in der Tabelle aufgeführten Werte

U in V	v in $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	λ in cm
150	$1,70 \cdot 10^7$	$2,34 \cdot 10^{-10}$
10^4	$1,39 \cdot 10^8$	$2,86 \cdot 10^{-11}$

Die Protonenwellenlänge ist um den Faktor $\sqrt{1836}$ kleiner als die Elektronenwellenlänge.

Die Interferenz- und Beugungsexperimente mit Elektronen, Atomen und Molekülen zeigen, daß jedem bewegten Teilchenstrom unter diesen Versuchsbedingungen Welleneigenschaften zukommen.

Zwischen Masse, Geschwindigkeit und Wellenlänge besteht nach DE BROGLIE ein durch die Erfahrung gut gesicherter Zusammenhang (18):

- ▷ Die Wellenlänge eines bewegten Teilchens ist umgekehrt proportional dem Produkt aus Masse und Geschwindigkeit des Teilchens. Der Proportionalitätsfaktor ist das Plancksche Wirkungsquantum.

In der de Broglie-Beziehung werden Begriffe aus dem Teilchenmodell (Masse, Geschwindigkeit) und Wellenmodell (Wellenlänge) miteinander verknüpft.

Die Entdeckung der Welleneigenschaften von bewegten Teilchen ist in erkenntnistheoretischer Hinsicht ein Musterbeispiel des Zusammenwirkens experimenteller und theoretischer Forschungsmethoden.

LOUIS DE BROGLIE wurde am 15. 8. 1892 in Dieppe (Frankreich) geboren. Er studierte Rechtswissenschaft und später Physik. Von 1919 bis 1927 arbeitete er als Experimentalphysiker in dem Privatlaboratorium seines Bruders. 1928 erhielt er eine außerordentliche Professur an dem Henri-Poincaré-Institut der Sorbonne. 1932 wurde er zum ordentlichen Professor für theoretische Physik und Mitglied der Académie Française ernannt.

Die Schwedische Akademie der Wissenschaften verlieh LOUIS DE BROGLIE den Nobelpreis für Physik im Jahre 1929. Damit wurden seine Arbeiten über die Wellennatur der Elektronen und anderer bewegter Teilchen als ein wesentlicher Beitrag zur Erweiterung unseres Wissens über die Eigenschaften der Materie anerkannt und gewürdigt. Um sie aber historisch einordnen zu können, sei daran erinnert, daß es 1905 ALBERT EINSTEIN (Nobelpreis 1921) gelang, den Photoeffekt auf der Grundlage der Planckschen Quantenhypothese auf besonders einfache Weise zu erklären. 1923 zeigte ARTHUR HOLLY COMPTON (Nobelpreis 1927) ebenfalls den quantenhaften Charakter bei den elektromagnetischen Wellen, indem er die Frequenzänderung der Röntgenstrahlung bei der Streuung an Elektronen untersuchte. Diese experimentell gesicherten Ergebnisse des Nachweises der Teilchenstruktur bei elektromagnetischen Wellen lagen vor, als DE BROGLIE 1924 theoretisch die Frage untersuchte, ob nicht auch bewegte Teilchen unter bestimmten Bedingungen eine Wellenstruktur besitzen.

In seiner 1924 eingereichten Dissertation führte er den Begriff der Materiewelle ein und leitete den Zusammenhang zwischen der Wellenlänge und dem Impuls des bewegten Teilchens her. Seine Ideen gaben den Anstoß zur Entwicklung der Wellenmechanik (ERWIN SCHRÖDINGER 1926). Erst drei Jahre nach der Veröffentlichung der ersten Arbeiten DE BROGLIES über die Welleneigenschaften bewegter Elektronen konnte man die de Brogliesche Hypothese durch Interferenzversuche mit Elektronen bestätigen.

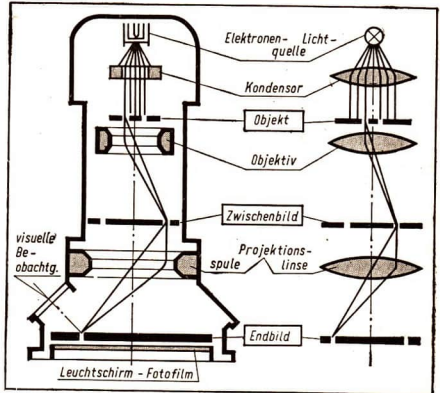
38/1 LOUIS DE BROGLIE, geb. 1892, Nobelpreis 1929



Das Elektronenmikroskop

In Analogie zur Anwendung der Röntgenstrahlen und besonders des Lichtes wurde ein sehr umfangreiches Anwendungsgebiet der Elektronenwellen, die Elektronenoptik, entwickelt.

Im Elektronenmikroskop wird ein Elektronenstrahl auf das Untersuchungsobjekt gelenkt. Um störende Einflüsse durch Luftmoleküle auszuschalten, befindet sich das Objekt im Vakuum. An dem in hauchdünner Stoffschicht verwendeten Objekt erfolgen Beugung und Interferenz der Elektronenstrahlen. Das auf einem Leuchtschirm auf-



39/1 Elektronenmikroskop mit magnetischen Linsen und Lichtmikroskop



39/2 Elektronenoptische Aufnahme der Oberfläche von Aluminiumkristallen

gefangene Beugungs- und Interferenzbild gibt eine Abbildung des Objekts.

Zur Vergrößerung des Bildes werden die vom Objekt kommenden Elektronenstrahlen auf Grund der elektrischen Ladung der Elektronen in elektrischen oder magnetischen Feldern wie Lichtstrahlen in einer Glaslinse abgelenkt.

Die elektronenoptische Vergrößerung liegt bei einer zweistufigen Abbildung zwischen $1 \cdot 10^4$ und $4 \cdot 10^4$.

Durch mehrstufige Abbildungen können bis zu 250 000fache Vergrößerungen erzielt werden.

Der Vorteil des Elektronenmikroskops gegenüber dem Lichtmikroskop besteht in der bedeutend kleineren **Auflösungsgrenze**. Darunter versteht man den Abstand zweier Punkte, die günstigstenfalls noch als getrennte Punkte wahrgenommen werden können.

Die Auflösungsgrenze ist proportional der Wellenlänge und wird durch Linsenfehler stark beeinflusst. Bei Lichtmikroskopen ist die Auflösungsgrenze etwa gleich der halben Wellenlänge des zur Abbildung verwendeten Lichtes. Die Auflösungsgrenze ist beim Elektronenmikroskop um den Faktor 10^2 bis 10^8 kleiner als beim Lichtmikroskop.

Es gibt verschiedene Abbildungsverfahren.

Organische Stoffe, die für Elektronenstrahlen durchlässig sind, werden in feinsten Schichten durchstrahlt, wobei Beugung und Interferenz am Untersuchungsobjekt stattfinden. Infolge der Erwärmung des Objekts kann jede Probe nur kurzzeitig, meist nur einmalig untersucht werden.

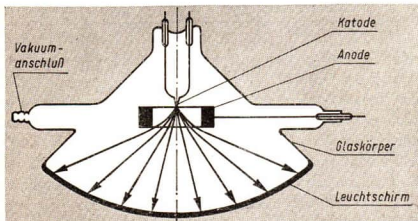
Metalle sind für Elektronenstrahlen undurchlässig. Zur Untersuchung fertigt man lackartige Oberflächenabzüge an, die reliefartig die Metalloberfläche darstellen und durchlässig für Elektronenstrahlen sind.

Für besondere Untersuchungen eignet sich das linsenlose

Feldelektronenmikroskop.

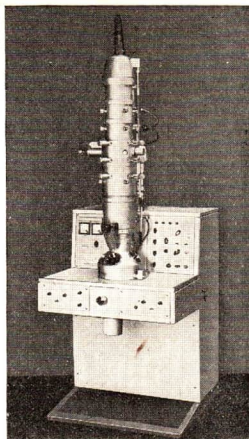
Die Katode (Bild 40/2) wird zu einer sehr feinen Spitze von etwa 10^{-7} m Krümmungsradius ausgearbeitet. Eine zwischen Katode und Anode angelegte Gleichspannung erzeugt an der kalten Katodenspitze sehr große Feldstärken, wodurch Elektronen aus der Spitze herausgelöst werden (Feldemission, Spitzenentladung), die durch die ringförmige Anode auf den Leuchtschirm gelangen und dort ein Bild zeichnen. Untersuchungsobjekt ist in diesem Fall nur das Material der Katodenspitze.

- Welche Eigenschaften müssen Stoffe haben, damit sie im Feldelektronenmikroskop untersucht werden können?



Die Vergrößerung wird durch das Verhältnis des Abstandes der Spitze vom Leuchtschirm zum Krümmungsradius der Spitze (Katode) bestimmt und erreicht Werte von $10^6:1$ (Bild 40/3).

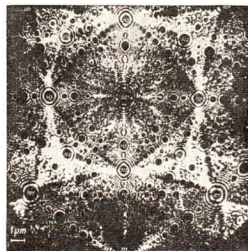
Mit dem Feldelektronenmikroskop ist es erstmals gelungen, Moleküle sichtbar zu machen.



40/1 Elektronenmikroskop SEM 3-2, VEB Werk für Fernselelektronik, Berlin, maximale Vergrößerung elektronenoptisch 200000:1, mit lichtoptischer Nachvergrößerung 1000000:1

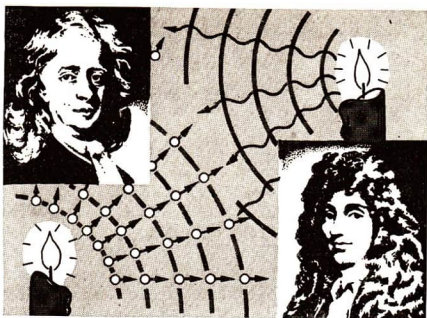
40/2 Feldelektronenmikroskop

40/3 Abbildung einer Platinspitze



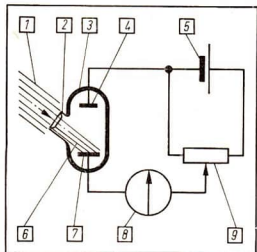
Quanteneigenschaften des Lichtes

Mehr als zwei Jahrhunderte dauerte der historische Streit über die Natur des Lichtes. Während nach der von NEWTON aufgestellten Korpuskulartheorie das Licht aus kleinen Teilchen, Korpuskeln genannt, bestehend betrachtet wurde, mußte man nach der von HUYGENS ausgearbeiteten Wellentheorie das Licht als Welle betrachten.



41/2 Versuch 17 zur Energiemessung beim äußeren lichtelektrischen Effekt

- 1 Lichtstrom
- 2 Quarzfenster
- 3 Vakuumröhre
- 4 Anode
- 5 Spannungsquelle
- 6 in die Röhre eintretender Lichtstrom
- 7 Metallplatte (Katode)
- 8 Galvanometer
- 9 Spannungsteiler



Der äußere lichtelektrische Effekt

Als man Beugung, Interferenz und Polarisation des Lichtes im Wellenmodell in Übereinstimmung mit den experimentellen Resultaten erklären konnte, schien der Streit über die Natur des Lichtes zugunsten der Wellentheorie entschieden. Das wurde aber bald wieder durch dieser Theorie widersprechende Beobachtungen in Frage gestellt.

Bei der Behandlung der Fotoemission (↗ Lehrbuch Physik, Kl. 9) wurde festgestellt, daß eine negativ aufgeladene Aluminiumplatte mit abgeschmirgelter Oberfläche bei Bestrahlung mit Licht entladen wird. Der gleiche Effekt wird festgestellt, wenn man an Stelle von Aluminium andere Metalle verwendet. Der Versuch liefert das Resultat:

Elektronen können aus Metallen durch Lichteinstrahlung herausgelöst werden. ◀

Diese Erscheinung bezeichnet man als **äußeren lichtelektrischen Effekt**.

Um die Frage zu entscheiden, ob diese Erscheinung auf der Grundlage des Wellenmodells des Lichtes erklärt werden kann und um die Energie zu bestimmen, die zum Herauslösen der Elektronen aus dem Metall notwendig ist, wird folgender Versuch durchgeführt: 17 ▼

An die beiden Elektroden (4, 7) einer Vakuumröhre (3) wird eine Spannung gelegt. Durch das Quarzfenster (2) fällt ein Lichtstrom (6) auf die Katode (7). Das Quarzfenster gewährleistet einen weitgehend ungehinderten Durchgang aller Lichtanteile der verschiedensten Wellenlängen. Das Meßgerät zeigt sofort beim Auftreffen des Lichtstromes einen Strom an.

Der Versuch 17, er wurde erstmals von HALLWACHS 1888 durchgeführt, liefert folgende Resultate:

1. Resultat

Die **Anzahl** der aus dem Metall herausgelösten Elektronen ist der **Intensität** (Helligkeit) des eingestrahnten Lichtes **proportional**.

2. Resultat

Führt man den Versuch 17 mit Licht verschiedener Frequenz (Farbe) durch, dann stellt man fest, daß erst dann, wenn die Frequenz des eingestrahnten Lichtes einen bestimmten Wert f_G erreicht oder überschreitet, aus dem Metall Elektronen herausgelöst werden. Auch bei Vergrößerung der Intensität des Lichtes tritt der äußere lichtelektrische Effekt erst auf, wenn die Grenzfrequenz f_G , die für verschiedene Metalle verschiedene Werte besitzt, erreicht ist.

Die kinetische Energie der aus dem Metall abgelösten Elektronen wird im Versuch 18 (Bild 41/2) bestimmt.

An das Gehäuse wird gegenüber der Katode eine veränderliche negative Spannung angelegt. Dadurch werden die Elektronen auf ihrem Weg zum Gehäuse gebremst.

Wählt man die Spannung so, daß das Galvanometer gerade keinen Stromfluß mehr anzeigt, dann haben die Elektronen offenbar kurz vor Erreichen des Gehäuses im elektrischen Gegenfeld ihre gesamte kinetische Energie verloren.

Für den im Versuch 18 herbeigeführten Zustand gilt, wenn man die angelegte Spannung mit U_0 bezeichnet,

$$\frac{m_e}{2} \cdot v^2 = e \cdot U_0. \quad (19)$$

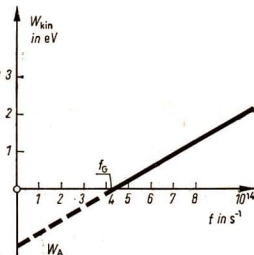
Der Versuch 18 zeigt, daß die kinetische Energie der aus dem Metall herausgelösten Elektronen (von f_G an gerechnet) der Frequenz f des eingestrahnten Lichtes proportional ist, aber nicht von dessen Intensität abhängt.

Trägt man in einem Diagramm die in Elektronenvolt angegebene kinetische Energie W_{kin} über der Frequenz f auf¹, so ergibt sich eine Gerade (Bild 42/1). Diese wird durch die Beziehung

$$\frac{1}{2} m_e \cdot v^2 = h \cdot f - W_A \quad (20)$$

¹ Als Maß für die Energie wird im atomaren Bereich häufig die Einheit Elektronenvolt (eV) verwendet. Ihr Zusammenhang mit der in der Makrophysik gebräuchlichen Energieeinheit Wattsekunde ist
 $1 \text{ Ws} = 1 \text{ V} \cdot 1 \text{ As} = 1 \text{ V} \cdot 6,2 \cdot 10^{18} \cdot e = 6,2 \cdot 10^{18} \text{ eV}.$

42/1 Abhängigkeit der Energie von der Frequenz



beschrieben, wobei W_A durch den Schnittpunkt der Geraden mit der Energie-Achse bestimmt wird, und die Konstante h die Steigung der Geraden charakterisiert. Die Grenzfrequenz f_G erhält man als Schnittpunkt der Geraden mit der Frequenz-Achse.

Die im Versuch 18 experimentell erzielten Resultate können auf der Grundlage des Wellenmodells des Lichtes nicht erklärt werden. Dieser Vorstellung entsprechend müßte die Energie der aus dem Metall abgelösten Elektronen nur von der Intensität (Helligkeit) des Lichtes abhängen, nicht aber von der Frequenz – im Widerspruch zu den experimentell gesicherten Resultaten.

Da die Praxis (Experiment) das Kriterium der Wahrheit ist, muß das Wellenmodell des Lichtes durch ein anderes Modell ersetzt werden, das mit den erzielten Resultaten nicht im Widerspruch steht.

Versucht man eine Erklärung der beobachteten Erscheinungen auf der Grundlage des aus der Newtonschen Mechanik bekannten Teilchenmodells, betrachtet also das eingestrahle Licht als einen Teilchenstrom, dann ist zwar verständlich, daß die kinetische Energie der herausgelösten Elektronen nicht von der Anzahl der Teilchen (Intensität), sondern von deren Energie abhängt, aber die Abhängigkeit der Energie von der Frequenz und die Existenz einer Grenzfrequenz bleiben auch in diesem Teilchenmodell unerklärbar.

Weder das Wellenmodell noch das Teilchenmodell der Makrophysik reichen allein aus, um die vielfältigen Erscheinungen des Lichtes vollständig zu beschreiben.

Das Photonenmodell des Lichtes

Die Lösung dieses Problems verdanken wir ALBERT EINSTEIN. Im Jahre 1905 entwickelte er das Photonenmodell des Lichtes.

Entsprechend diesem Modell besteht das Licht aus einzelnen Lichtquanten¹.

Die Lichtquanten bezeichnet man als **Photonen**. Jedes Photon besitzt die Energie

$$W = h \cdot f, \quad (21)$$

wobei h mit der in (20) verwendeten Konstanten übereinstimmt und das von PLANCK gefundene Wirkungsquantum

$$h = (6,6252 \pm 0,0005) \cdot 10^{-34} \text{ W s}^2$$

ist. f ist die Frequenz des Lichtes.

¹ Quant: Teil, Portion, Quantum.

Auf der Grundlage des Photonenmodells können die beim äußeren lichtelektrischen Effekt experimentell gefundenen Resultate folgendermaßen gedeutet werden:

Ein Lichtquant mit der Energie $h \cdot f$ tritt mit einem quasifreien Elektron² der Metallplatte in Wechselwirkung.

Dabei wird dem quasifreien Elektron die Energie des Lichtquants übertragen.

Zum Herauslösen eines Elektrons ist die Arbeit W_A erforderlich, die man als **Ablösearbeit** bezeichnet. Ist die Energie des Lichtquants kleiner als die Ablösearbeit, d. h. es gilt

$$h \cdot f < W_A, \quad (22)$$

dann kann auch bei Steigerung der Intensität, d. h. bei Vergrößerung der **Anzahl** der Lichtquanten, kein Elektron aus dem Metall herausgelöst werden.

Unabhängig von der Intensität des Lichtes ist eine Ablösung der Elektronen aus dem Metall erst dann möglich, wenn die Energie des Photons (und damit die Frequenz des eingestrahlten Lichtes) einen bestimmten Mindestwert erreicht hat, so daß gilt

$$h \cdot f_G = W_A. \quad (23)$$

Damit ist auch die Existenz einer Grenzfrequenz f_G erklärt.

Ist die Energie des einfallenden Photons größer als die Ablösearbeit, so erhalten die aus dem Metall herausgelösten Elektronen eine kinetische Energie

$$\frac{1}{2} m_e \cdot v^2 = h(f - f_G), \quad (24)$$

was unter Verwendung der Gleichung (23) auch in der von ALBERT EINSTEIN gefundenen Form geschrieben werden kann als

► Einsteinsche Gleichung

$$h \cdot f = \frac{1}{2} m_e \cdot v^2 + W_A. \quad (25)$$

Die auf der Grundlage des Photonenmodells entwickelte Beziehung (25) stimmt mit der experimentell gefundenen Beziehung (20) überein und ist eine wichtige Bestätigung der von PLANCK aufgestellten Quantenhypothese.

Das Plancksche Wirkungsquantum

Der äußere lichtelektrische Effekt ermöglicht eine experimentelle Bestimmung des für die gesamte Mikrophysik bedeutsamen Planckschen Wirkungsquantums h . Dazu ver-

² quasifrei: nicht wirklich frei, sondern nur unter bestimmten Voraussetzungen als sozusagen frei zu betrachten.

wendet man eine Photozelle, deren Aufbau und Wirkungsweise im Physiklehrbuch der Klasse 9, Seite 87, beschrieben wurde.

Bestrahlt man eine Photozelle mit Licht verschiedener Frequenzen f_1 und f_2 , dann besitzen die aus dem Metall herausgelösten Elektronen verschieden große Beträge an kinetischer Energie $\frac{1}{2} m_e \cdot v_1^2$ bzw. $\frac{1}{2} m_e \cdot v_2^2$. Legt man ein elektrisches Gegenfeld an (Bild 41/2), das gerade die kinetische Energie der Elektronen kompensiert, dann gilt mit v_1

$$e \cdot U_1 = \frac{1}{2} m_e \cdot v_1^2$$

und mit v_2

$$e \cdot U_2 = \frac{1}{2} m_e \cdot v_2^2 \quad (26)$$

und entsprechend der Gleichung (25)

$$h \cdot f_1 = e \cdot U_1 + W_A$$

und

$$h \cdot f_2 = e \cdot U_2 + W_A. \quad (27)$$

Da das gleiche Metall verwendet wird, ist die Ablösearbeit in beiden Fällen gleich. Subtrahiert man die Gleichungen (27) voneinander, so erhält man

$$h(f_1 - f_2) = e(U_1 - U_2), \quad (28)$$

und daraus für das

$$\text{Plancksche Wirkungsquantum } h = e \cdot \frac{(U_1 - U_2)}{(f_1 - f_2)}. \quad (29) \triangleleft$$

Zur experimentellen Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums h bestrahlt man z. B. ein Metall einmal mit dem Licht der blauen H_G-Linie ($\lambda_b = 436$ nm) und einmal mit dem Licht der gelben H_G-Linie ($\lambda_g = 578$ nm). Dabei muß im ersten Falle eine Gegenspannung von $U_b = 0,81$ V, im zweiten Falle eine Gegenspannung von $U_g = 0,13$ V angelegt werden, um die kinetische Energie der herausgelösten Elektronen zu kompensieren. Entsprechend der Beziehung

$$c = \lambda \cdot f$$

erhält man für die Frequenzen des verwendeten Lichtes die Werte

$$f_b = 6,88 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1} \text{ und}$$

$$f_g = 5,19 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}.$$

Es ist das Wirkungsquantum h zu bestimmen!

Gegeben:

Lösung:

$$f_b = 6,88 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$$

$$f_g = 5,19 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$$

$$U_b = 0,81 \text{ V}$$

$$U_g = 0,13 \text{ V}$$

$$h = e \cdot \frac{(U_g - U_b)}{(f_g - f_b)}$$

$$h = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}(0,81 - 0,13) \text{ V}}{(6,88 - 5,19) 10^{14} \text{ s}^{-1}}$$

$$h \approx \underline{\underline{6,66 \cdot 10^{-34} \text{ W s}^2}}$$

Gesucht:

h

Damit ist gezeigt, daß durch das Photonenmodell des Lichtes die beim äußeren lichtelektrischen Effekt beobachteten Erscheinungen in Übereinstimmung mit den experimentell ermittelten Resultaten erfaßt und auch quantitativ richtig beschrieben werden.

Zur Beschreibung der Beugung, Interferenz und Polarisation des Lichtes ist das Photonenmodell jedoch unbrauchbar. Diese experimentell gesicherten Erscheinungen können auf der Grundlage des Wellenmodells des Lichtes richtig gedeutet und verstanden werden.

Damit sind wir hier vor eine merkwürdige Situation gestellt.

Die vielfältigen Erscheinungen des Lichtes können weder durch das **Wellenmodell** noch durch das **Photonenmodell** allein vollständig erfaßt werden.

Zur Erklärung verschiedener Erscheinungen des Lichtes (äußerer lichtelektrischer Effekt – Beugung und Interferenz) sind verschiedene Modelle des Lichtes (Photonenmodell – Wellenmodell) notwendig, wobei keines dieser Modelle gegenüber dem anderen ausgezeichnet ist.

Diese Problematik, die als „**Korpuskel – Welle – Dualismus**“ bezeichnet wird, gewinnt noch dadurch an Bedeutung, daß sie nicht auf das Licht beschränkt, sondern für den gesamten Bereich der Mikrophysik charakteristisch ist.

Für die Entwicklung der Physik seit Beginn des 20. Jahrhunderts wird in immer stärkerem Maße die marxistische Dialektik bedeutsam. Die Entwicklung des Photonenmodells des Lichtes ist ein eindruckvolles Beispiel für das allgemeine Gesetz der Dialektik von der Negation der Negation im Bereich der Physik. Es löst den Widerspruch der gegensätzlichen Modelle von Teilchen und Welle der Makrophysik und enthält gleichzeitig gewisse (modifizierte) Aspekte dieser Modelle. Es stellt eine Höherentwicklung dar und erfaßt neue wichtige Erkenntnisse in Übereinstimmung mit den experimentell gesicherten Resultaten.

Die Heisenbergschen Unbestimmtheitsbeziehungen

Im Abschnitt Welleneigenschaften von Teilchen (\nearrow S. 33) wurde das Doppelspaltexperiment besprochen. Dabei wurden charakteristische Unterscheidungsmerkmale gefunden, die aussagen, wann man das Teilchenmodell und wann man das Wellenmodell zur Beschreibung physikalischer Sachverhalte verwenden muß.

Um mehr über die Natur der Mikroobjekte zu erfahren, wird jetzt dieses Gedankenexperiment für Elektronen betrachtet.

Ist nur der Spalt S_1 geöffnet, dann werden auf dem Schirm S einzelne, ¹⁹ scharf begrenzte, gleichartige „Einschläge“ registriert, die sehr regellos sind. Das bedeutet, daß dieser Vorgang diskontinuierlich verläuft. Man erhält in diesem Falle die Häufigkeitsverteilung I_1 (Bild 47/1).

Wird der Versuch bei geöffnetem Spalt S_2 und geschlossenem ²⁰ Spalt S_1 wiederholt, dann werden die gleichen Effekte festgestellt. Man erhält die Häufigkeitsverteilung I_2 (Bild 47/1).

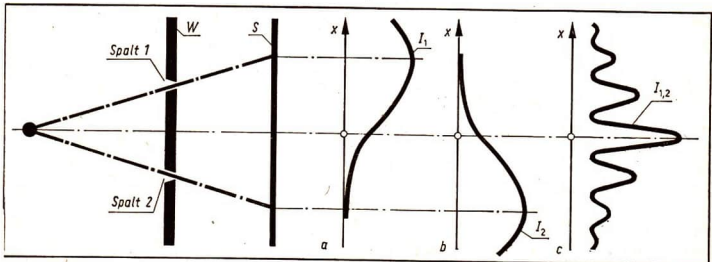
Die Beobachtungen in den Versuchen 19 und 20 legen nahe, daß für das Elektron das Teilchenmodell verwendet werden kann.

Was geschieht nun, wenn beide Spalte S_1 und S_2 gleichzeitig geöffnet sind? Das Experiment ergibt für diesen Fall die Häufigkeitsverteilung $I_{1,2}$ (Bild 47/1), die nicht durch einfache Überlagerung der Kurven I_1 und I_2 gewonnen werden kann.

47/1 Schematische Darstellung des Doppelspaltexperimentes

Es gilt also

$$I_{1,2} \neq I_1 + I_2. \quad (30)$$



Dieses Resultat bedeutet – in Analogie zum Wellenmodell der Makrophysik –, daß Interferenzerscheinungen auftreten, wie sie im Experiment auch beobachtet und durch die Kurve I_{12} dargestellt werden. Danach besitzt dieser Vorgang kontinuierlichen Charakter. Diese Beobachtungen deuten darauf hin, daß für Elektronen das Wellenmodell verwendet werden kann.

Da beide Effekte – Auftreffen diskreter Portionen auf die Wand (diskontinuierlicher Aspekt) und Interferenzerscheinungen (kontinuierlicher Aspekt) – gleichzeitig auftreten, kann das Verhalten der Elektronen weder durch das Teilchenmodell noch durch das Wellenmodell allein vollständig beschrieben werden.

Das Versuchsergebnis ändert sich qualitativ nicht, wenn die Zahl der emittierten Elektronen beliebig gehalten ist, oder wenn an Stelle von Elektronen andere Mikroobjekte verwendet werden. Damit besitzt dieser Versuch für die gesamte Mikrophysik grundsätzliche Bedeutung, dessen Resultat folgendermaßen formuliert werden kann:

- ▷ **Es gibt kein Experiment im Bereich der Mikrophysik, das einerseits eindeutig festlegt, durch welchen Spalt sich ein Mikroobjekt bewegt hat, und das andererseits gleichzeitig Interferenzerscheinungen erzeugt.**

Zur Überprüfung dieser Feststellung wird das Doppelspaltexperiment folgendermaßen abgeändert:

21

- ▼ Zwischen beide Spalte S_1 und S_2 wird hinter dem Schirm S eine starke Lichtquelle aufgestellt. Bewegt sich ein Elektron durch einen Spalt, dann stößt es mit den Photonen zusammen, die von der Lichtquelle ausgesandt werden, und an dieser Stelle wird ein Lichtblitz beobachtet. Hat sich das Elektron durch den Spalt S_1 bewegt, dann beobachtet man den Lichtblitz unmittelbar hinter dem Spalt S_1 . Ebenso wird ein Lichtblitz hinter dem Spalt S_2 beobachtet, wenn sich das Elektron durch den Spalt S_2 bewegt hat.

Der Versuch 21 liefert folgendes Resultat: Immer dann, wenn von einem Beobachter ein „Einschlag“ auf dem Schirm S registriert wird, beobachtet man auch einen Lichtblitz entweder in der Nähe von S_1 oder in der Nähe von S_2 , – aber nie gleichzeitig an beiden Stellen. Das aber bedeutet, daß bei dieser Abänderung des Doppelspaltexperimentes durch die Wechselwirkung der Elektronen mit dem Licht entschieden werden kann, ob sich ein Elektron durch den Spalt S_1 oder durch den Spalt S_2 bewegt hat.

Bei diesem Experiment ist jedoch etwas Merkwürdiges eingetreten. Durch die Veränderung des experimentellen Aufbaus – Aufstellen einer Lichtquelle und die dadurch bedingte Wechselwirkung der Elektronen mit den Photonen –

hat sich die Häufigkeitsverteilung $I_{1,2}$ wesentlich verändert. Man erhält eine Häufigkeitsverteilung, die durch die Kurve $I_{1,2}$ in Bild 33/2 beschrieben wird.

In diesem Falle gilt also

$$I_{1,2} = I_1 + I_2. \quad (31)$$

Das aber bedeutet, daß bei dieser Abänderung des Doppelspaltexperimentes keine Interferenzen auftreten!

Die Ursache dafür ist offenbar die Wechselwirkung der Elektronen mit dem Licht.

Man könnte nun versuchen, die Wechselwirkung der Elektronen mit den Photonen so zu verringern, daß sie die Erscheinungen nicht mehr wesentlich beeinflußt. Dann könnte entschieden werden, durch welchen Spalt das Elektron hindurchgegangen ist, und gleichzeitig würden die Interferenzerscheinungen entsprechend $I_{1,2}$ (Bild 47/1) wieder auftreten.

Nach dem Photonenmodell des Lichtes muß dazu energiearmes Licht, also Licht mit einer großen Wellenlänge (d. h. mit kleiner Frequenz) verwendet werden. Führt man diesen Versuch durch, dann beobachtet man erst dann wieder Interferenzen, d. h. die Häufigkeitsverteilung $I_{1,2}$ in Bild 47/1, wenn die Wellenlänge des verwendeten Lichtes größer oder gleich dem Abstand der Spalte S_1 und S_2 ist. Dann kann aber nicht mehr entschieden werden, durch welchen Spalt sich das Elektron bewegt hat.

Damit wird durch diesen Versuch das Resultat des Doppelspaltexperimentes bestätigt.

Die mathematische Formulierung dieses Sachverhaltes wurde 1927 von HEISENBERG gefunden. Sie lautet:

Heisenbergsche Unbestimmtheitsbeziehung

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{h}{2\pi}, \quad (32)$$

Δx ist dabei der Abstand der Spalte S_1 und S_2 , die Größe $\Delta p_x = m \cdot v_x$ bezeichnet man als Impuls (\nearrow Mechanik, S. 134), der für die mathematische Beschreibung der mechanischen Bewegung große Bedeutung besitzt. Durch die Heisenbergsche Unbestimmtheitsbeziehung konnten zahlreiche bis dahin unverständliche Sachverhalte erklärt werden. So z. B., daß ein freies Elektron kein Baustein des Atomkerns sein kann, obwohl in der Kernstrahlung Elektronen nachgewiesen werden; daß Elektronen bei ihrer Bewegung um den Atomkern nur bestimmte, diskrete Energiewerte besitzen können usw.

Diese Unbestimmtheitsbeziehung bedeutet u. a. auch, daß Begriffe der Makrophysik wie Teilchen, Welle, Bahn usw. im mikrophysikalischen Bereich ihren Sinn verlieren.

Der Begriff Bahn, der an das Teilchenmodell gebunden ist, verlangt, daß Ort und Geschwindigkeit eines Objekts zu einem Zeitpunkt gleichzeitig mit beliebiger Genauigkeit festgestellt werden können. Für makrophysikalische Objekte, z. B. die sich in unserem Sonnensystem bewegenden Planeten, einen fallenden Stein usw. ist das auch möglich. Man kann dann mit Hilfe des entsprechenden Kraftgesetzes für jeden beliebigen Zeitpunkt den Ort eines solchen makrophysikalischen Körpers mit beliebiger Genauigkeit berechnen, also seine Bahn. Bei Mikroobjekten ist das prinzipiell nicht mehr möglich.

Aus den Resultaten des Doppelspaltexperiments folgt unmittelbar:

- **Ort und Geschwindigkeit eines Mikroobjekts können nicht gleichzeitig mit beliebiger Genauigkeit festgestellt werden.**

Das ist nicht etwa deshalb so, weil es keine entsprechenden Meßgeräte gibt, sondern weil diese makrophysikalischen Bestimmungsstücke – Ort und Geschwindigkeit – für ein Mikroobjekt nicht gleichzeitig existieren, daß man also ein Mikroobjekt nicht mit dem Teilchenbegriff erfassen kann. Damit wird im mikrophysikalischen Bereich der Bahnbegriff hinfällig.

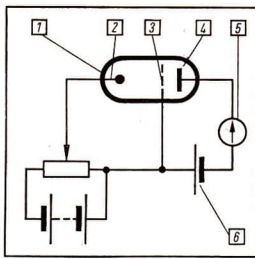
Daraus ergibt sich eine wichtige Schlußfolgerung, die den Unterschied zwischen Makro- und Mikrophysik deutlich hervorhebt. An die Stelle von präzisen Vorhersagen der Makrophysik treten in der Mikrophysik **Wahrscheinlichkeitsaussagen**.

Die Kurve $I_{1,2}$ (Bild 47/1) gibt für jeden Ort auf dem Schirm S die Wahrscheinlichkeit für das Auftreffen eines Elektrons bei Öffnung beider Spalte an. Diese Konsequenzen verlangt das Experiment, das als Kriterium der Wahrheit über die Richtigkeit oder Falschheit der Modelle entscheidet.

Energienstufen der Elektronenhülle

Zu einer Erkenntnis über den Aufbau der Elektronenhülle der Atome führten die Experimente von GUSTAV HERTZ und JAMES FRANCK aus dem Jahre 1914.

Die Deutung der Emission und Absorption des Lichtes führte zur Annahme von diskreten Energieniveaus W_n im Atom (Lehrbuch Kl. 9, S. 69). Wie vollzieht sich die Energieaufnahme der Atome, wenn Energie nicht in Form von Strahlung (Licht) zugeführt wird? FRANCK und HERTZ untersuchten den Stoß von Elektronen gegen Atome. Sie benutzten folgende Versuchsanordnung:



51/1

Von einer Glühkatode (2) gehen Elektronen aus, die durch eine veränderliche Spannung U in Richtung auf das Gitter (3) beschleunigt werden. Im Gefäß (1) befindet sich ein einatomiges Gas, z. B. Quecksilberdampf bei einer Temperatur von etwa 200°C unter einem Druck von etwa 10^{-4} Torr.

Durch die Batterie (6) wird zwischen Gitter (3) und Auffangelektrode (4) ein Gegenfeld gegen das positive Gitter von etwa $0,5\text{ V}$ erzeugt, das die durch (3) hindurchtretenden Elektronen verzögert. Im Schaltbild ist das Bezugspotential an (3) gelegt, um nicht eine ebenfalls variable Stromquelle an Stelle von (6) verwenden zu müssen. Nur diejenigen Elektronen können die Elektrode (4) erreichen, deren Energie größer als $0,5\text{ eV}$ ist ($1\text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19}\text{ Ws}$).

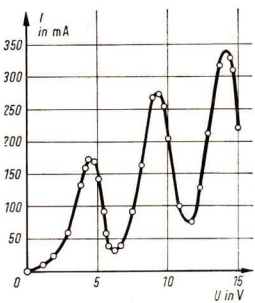
Auf dem Weg zum Gitter (3) stoßen die Elektronen viele Male mit den Hg-Atomen zusammen und erlangen, wenn man die Quecksilberatome näherungsweise als ruhend und zunächst als vollkommen elastisch ansieht, die Geschwindigkeit

$$v = \sqrt{2 \frac{e}{m} U} \quad (33)$$

Läßt man die Beschleunigungsspannung U langsam anwachsen, dann erhält man in einem U - I -Diagramm eine Kurve, die anfangs einer gewöhnlichen Stromstärke-Spannungskurve gleicht. Haben die Elektronen bei weiterem Erhöhen der Spannung U jedoch eine bestimmte Energie erreicht, dann sinkt die Stromstärke sehr schnell ab (bei $U = 4,9\text{ V}$). Es erreichen also nur noch wenige Elektronen die Auffangelektrode (4).

Bei weiterem Anwachsen der Beschleunigungsspannung steigt schließlich die Stromstärke wieder an, da jetzt die Elektronen durch die vergrößerte Beschleunigung wieder die Elektrode (4) erreichen können. Bei $U = 9,8\text{ V}$ nimmt die Stromstärke wiederum einen Maximalwert an und sinkt schließlich abermals ab. Man erhält so eine Stromstärke-Spannungs-Kurve, wie sie Bild 51/2 zeigt. Die Abstände der Stufen betragen im Quecksilberdampf $4,9\text{ V}$.

51/2 Stromstärke-Spannungsverlauf beim FRANCK-HERTZ-Versuch



Dieses Ergebnis kann wie folgt beschrieben werden:

Die Hüllenelektronen der Quecksilberatome tauschen nur dann Energie mit den freien Elektronen aus, wenn dabei der Energiebetrag von $4,9\text{ eV}$ aufgenommen werden kann. Mit dem Rest der Energie fliegen die freien Elektronen weiter.

Die Stromstärkeminima entstehen dann, wenn dabei die freien Elektronen fast ihre ganze Bewegungsenergie verloren haben und nicht mehr gegen das elektrische Feld anlaufen können.

Das bedeutet jedoch für die Hüllenelektronen der Quecksilberatome:

Atome vermögen nicht beliebige, sondern nur diskrete Energiewerte aufzunehmen.

Bezeichnet man mit W_1 die Energie des Atoms, bevor das erste Stromstärkemaximum aufgetreten ist, so besitzt das nächstmögliche Energieniveau die Energie

$$W = W_1 + 4,9 \text{ eV}.$$

Die Beschleunigungsspannung 4,9 eV heißt **Anregungsspannung** oder **Resonanzpotential** des Quecksilberatoms.

Wie FRANCK und HERTZ durch eine leichte Änderung des Versuchsaufbaus zeigen konnten, gibt es außer der Mindestenergie W_1 auch noch andere diskrete Energiebeträge, wie Tabelle 52/1 zeigt.

Diese Energiewerte sind aber nur Kombinationen der beiden Energiewerte W_1 und W_2 . Zum Beispiel ist $W_3 = 2W_1$, $W_4 = W_1 + W_2$, $W_5 = 2W_2$, $W_8 = W_1 + 2W_2$ usw.

Das Ergebnis des FRANCK-HERTZ-Versuches ist auch für andere Atome gültig:

Die Energie der Hüllenelektronen kann nicht stetig verändert werden.

Das Atom vermag kleinere als die der Anregungsspannung entsprechende Energiebeträge nicht aufzunehmen.

Der niedrigste Energiezustand, in dem sich ein Atom befinden kann, heißt Grundzustand, alle höheren Energiezustände werden als erster, zweiter, . . . angeregter Zustand bezeichnet.

Aus einem angeregten Energiezustand W_2 kehrt das Atom nach etwa 10^{-8} s in den Grundzustand W_1 zurück. Die Differenz $\Delta W = W_2 - W_1$ wird in Form eines Lichtquants abgegeben.

Experimentell beobachtet man dabei eine Spektrallinie mit der Frequenz

$$f = \frac{\Delta W}{h}. \quad (34)$$

■ Welche Frequenz und welche Wellenlänge gehören zur Anregungsenergie von $\Delta W = 4,9 \text{ eV}$?

Gegeben:

$$\Delta W = 4,9 \text{ eV}$$

$$h = 6,66 \cdot 10^{-34} \text{ W s}^2$$

Gesucht!

f

λ

Lösung:

$$f = \frac{\Delta W}{h} = \frac{4,9 \text{ eV}}{6,66 \cdot 10^{-34} \text{ W s}^2}$$

$$f = 1,18 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1}$$

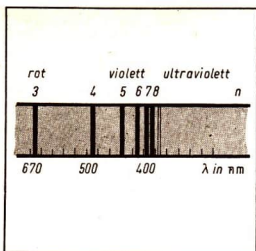
$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^{17} \text{ nm} \cdot \text{s}^{-1}}{1,18 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1}}$$

$$\lambda = 253,7 \text{ nm}$$

Diese im Ultraviolett gelegene Linie haben FRANCK und HERTZ bei ihrem Versuch tatsächlich gefunden.

n	W_n in eV
1	4,9
2	6,7
3	9,8
4	11,2
5	13,5
6	14,7
7	16
8	17,6
9	19,3
10	21,2

Tabelle 52/1



53/1 Balmerspektrum des Wasserstoffs

Termdarstellung von Linienspektren

KIRCHHOFF und BUNSEN hatten 1859 entdeckt, daß jedes chemische Element im gasförmigen Aggregatzustand bei Anregung ein ganz bestimmtes, nur für dieses Element charakteristisches Spektrum aussendet.

Der im sichtbaren Bereich gelegene Teil des besonders einfachen Linienspektrums des Wasserstoffs zeigt, daß die Frequenzen der ausgesandten Linien irgendwelchen Gesetzmäßigkeiten gehorchen müssen.

1885 hatte J. BALMER aus dem vorliegenden Beobachtungsmaterial empirisch gefunden, daß die beobachteten Frequenzen f der Gleichung

$$f = \frac{R}{2^2} - \frac{R}{n^2}; \quad n = 3, 4, 5, \dots \quad (35)$$

genügen. Die Konstante hat den Wert

$$R = 3,288 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1}.$$

Die gefundene Gesetzmäßigkeit (35) läßt sich zunächst verallgemeinert schreiben als

$$f = \frac{R}{m^2} - \frac{R}{n^2}, \quad (n, m \text{ ganzzahlig}) \quad (36)$$

mit dem Spezialfall $m = 2$. Führt man die Bezeichnungen $T_m = -\frac{R}{m^2}$, $T_n = -\frac{R}{n^2}$ ein, dann erhält man mit (36) die Gleichung

$$f = T_n - T_m. \quad (37)$$

Die Größen T_m und T_n heißen **Spektraltermine**. Hieraus geht hervor, daß das Balmer-Spektrum des Wasserstoffs durch die Folge der Terme T_n gekennzeichnet werden kann. Für die atomtheoretische Deutung der Linienspektren hat sich die grafische Darstellung ihrer Termwerte als günstig erwiesen. Dabei werden die Terme durch horizontale Linien nach wachsenden Zahlen n geordnet. Da die Termwerte umgekehrt proportional den Quadraten der Zahlen n sind, nehmen sie betragsmäßig von oben nach unten zu. Zu $n \rightarrow \infty$ gehört der Termwert $T_\infty \rightarrow 0$, zu $n = 1$ der betragsmäßig größte Termwert $T_1 = R$. Auf diese Weise entsteht das Termschema des Wasserstoffatoms.

Nach Gleichung (37) ist die Frequenz einer Spektrallinie als Differenz zweier Terme bestimmt, z. B.

$$f_{23} = T_3 - T_2. \quad (38)$$

Damit läßt sich aus den gemessenen Wellenlängen bzw. Frequenzen das Termschema eines Atoms entwickeln. (Die Angaben der linken und rechten Ordinaten in Bild 54/1 werden weiter unten erläutert.)

Eine gesetzmäßige Folge von Spektrallinien, wie sie etwa durch die Gleichung (35) dargestellt wird, bezeichnet man als **Serie**.

Weitere Serien erhält man aus (36) für $m = 1, 3, 4, 5$.

Es sind dies mit

$m = 1$: die Lyman-Serie (Linien liegen im nicht sichtbaren Ultraviolettbereich)

$m = 3$: die Paschen-Serien, $m = 4$: die Brackett-Serie,

$m = 5$: die Pfundt-Serie.

Die Linien der drei letztgenannten Serien liegen im ultraroten Bereich.

Aus dem FRANCK-HERTZ-Versuch ist bekannt, daß ein atomares System seine Energie nur ändern kann, wenn mit dem Übergang von einem zum anderen Zustand eine Emission (oder Absorption) von Strahlung verknüpft ist. Deren Frequenz ist mit der Energieänderung durch die Beziehung

$$h \cdot f = W_a - W_e \quad (39)$$

verbunden. Die Indizes a und e entsprechen dem Anfangs- und dem Endzustand.

Division durch h liefert:

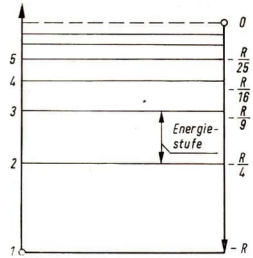
$$f_{ea} = \frac{W_a}{h} - \frac{W_e}{h}. \quad (40)$$

Ein Vergleich mit der Serienformel (37) läßt die Bedeutung der Terme erkennen: Die Terme T_n sind den Energiezuständen W_n des Atoms proportional:

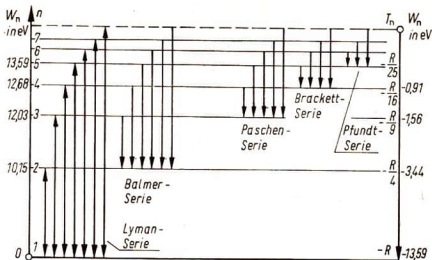
$$T_n = \frac{1}{n} \cdot W_a. \quad (41)$$

Damit kann man das Termschema eines Atoms auch als Energieniveauschema bezeichnen und zu jedem Termwert direkt den entsprechenden, durch Multiplikation mit h entstehenden Energiewert anschreiben. Diese Werte sind in Bild 55/1 grafisch dargestellt, und zwar sind sie in der rechten Ordinate abwärts nach betragsmäßig steigenden Werten für das H-Atom geordnet.

In der linken Ordinate ist der Nullpunkt um den Wert 13,59 eV verschoben. Statt 0 heißt es 13,59 eV, statt 3,44 eV heißt es 10,15 eV usw. Auf diese Weise gibt die linke Ordinate den Zuwachs der Energie des Atoms gegenüber dem Wert des Grundzustandes an. Es lassen sich die Anregungsenergien direkt ablesen. Die Frequenzen der Spektrallinien ergeben sich dann aus der Differenz zwischen zwei aufeinanderfolgenden Termen.



54/1 Termschema des Wasserstoffatoms



Lesen Sie in Bild 55/1 den Energiezuwachs des Wasserstoffatoms ab, wenn es vom Grundzustand auf den Energiezustand T_n gehoben wird!

Jedoch nicht alle möglichen Kombinationen ergeben tatsächlich vorkommende Linien.

Bei der Aufstellung der Energieniveauschemata für komplizierte Atome hat sich trotzdem ein Kombinationsprinzip bei dieser mühsamen Arbeit als guter Wegweiser erwiesen. Bei derartigen Atomen kommt man allerdings nicht mit einem einfachen Termschema wie beim Wasserstoffatom aus, da jetzt die Wechselwirkung des angeregten Elektrons mit der Anordnung und dem Verhalten aller Elektronen der Atomhülle zusätzlich zu berücksichtigen ist.

Wie die Gleichung (36) und die nach ihr aufgestellten Termschemata zeigen, werden die Stufen nach oben immer kleiner, wobei für $n \rightarrow \infty$ eine Häufung derselben bei einer bestimmten Grenze stattfindet.

Diese Grenze bezeichnet man als **Seriengrenze**.

An die Seriengrenze schließt sich nach oben für nicht mehr gebundene Zustände ein Energiebereich an, der der kinetischen Energie freier Elektronen entspricht. Dieser Bereich stellt einen kontinuierlichen Energiebereich dar, da alle Geschwindigkeiten vorkommen können. Die Energiewerte W_n der rechten Ordinate in Bild 55/1 charakterisieren mithin die Bindungsenergie eines Elektrons im betreffenden Zustand n .

Die Energiewerte W_n der linken Ordinate kennzeichnen die Anregungsenergien, wobei W_∞ dem Term $T_n = 0$ entspricht und den Zustand des ionisierten, vom Kern abgetrennten Elektrons charakterisiert.

W_∞ heißt dementsprechend **Ionisierungsenergie**.

Die Ionisierungsenergie ist betragsmäßig gleich der Bindungsenergie des im Grundzustand befindlichen Elektrons.

Erklären Sie den Begriff Grundzustand!

Die Ionisierungsenergie ist eine typische „äußere“ Eigenschaft der Atome, da es sich um die Ablösung von Elektronen handelt. Es bleibt ein positives Ion zurück. Wie alle äußeren Eigenschaften z. B. Atomvolumen, Schmelztemperatur, linearer Ausdehnungskoeffizient, Kompressionsmodul usw., zeigt auch die Ionisierungsenergie eine periodische Abhängigkeit von der Ordnungszahl des Systems der Elemente.

Laser

Ein freies Atom kann sich, wie die letzten Abschnitte zeigten, in verschiedenen Energiezuständen befinden. Einfachheit halber seien hier nur zwei derartige Zustände betrachtet. Befindet sich zur Zeit t das Atom im Zustand W_2 , so kann es im darauffolgenden Zeitelement Δt entweder im Zustand W_2 verbleiben oder aber unter Aussenden eines Lichtquants der Frequenz $f = \frac{1}{h}(W_2 - W_1)$ in den Zustand W_1 übergehen. Übergänge dieser Art, die also ohne äußere Einwirkung erfolgen, werden **spontane Übergänge** genannt (Bild 56/2).

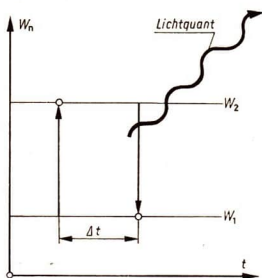
Wirkt jedoch auf die Atome eine äußere elektromagnetische Strahlung ein, so ruft diese, betrachtet im Termschema, Übergänge sowohl von höheren nach niederen als auch von niederen nach höheren Energieniveaus hervor. Derartige Übergänge werden als **induzierte Emission** bzw. **induzierte Absorption** bezeichnet.

Bei Beschränkung auf Übergänge zwischen einfachen Energiezuständen liefert die Erfahrung, daß die Übergangswahrscheinlichkeiten für die induzierte Emission und Absorption gleich sind. Die ausgestrahlte Wellenlänge λ errechnet sich aus der Frequenz f der Spektrallinie, die beim 2-1-Übergang ausgesandt wird (Bild 56/3). Die induzierte Emission gewinnt große praktische Bedeutung dadurch, daß man auf ihrer Grundlage Strahlungsquellen bauen kann, die vollkommen kohärentes und monochromatisches Licht liefern. Man nennt sie Laser.

Eine solche Laser-Strahlungsquelle ist z. B. ein Rubinkristall (Aluminiumoxid Al_2O_3), in dem zum Teil die Al-Atome durch 3wertige Chromionen (Cr^{+++}) ersetzt wurden. Bei der Lichtabsorption gehen die Chromionen vom Grundzustand W_1 in einen angeregten Zustand W_2 über (Bild 57/1). Von hier aus finden strahlungsfreie Übergänge der Chromionen auf den Zwischenzustand W_M statt. Die Energiedifferenz wird dabei an das Gitter des Rubinkristalls abgegeben. Die mittlere Lebensdauer eines Elektrons auf W_M beträgt etwa 10^{-3} s. Die übliche Lebensdauer eines angeregten Zustandes liegt jedoch bei nur 10^{-8} s. Die relativ große Lebensdauer des Zwischenzustandes führt dazu, daß sich

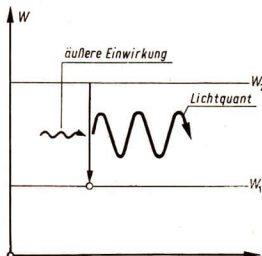
Element	W in eV
Wasserstoff	13,6
Helium	24,6
Lithium	5,4
Beryllium	9,3
Bor	8,3
Kohlenstoff	11,3
Stickstoff	14,5
Sauerstoff	13,6
Fluor	17,4
Neon	21,6

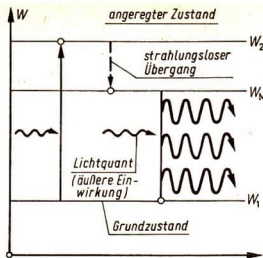
Tabelle 56/1 Ionisierungsenergien einiger Elemente



56/2 Spontaner Übergang eines freien Atoms unter Aussenden eines Lichtquants

56/3 Induzierte Emission





57/1 Entstehung des Laser-Lichtes

in diesem eine große Anzahl angeregter Ionen befindet. Ist dabei die Anzahl der angeregten Ionen größer als die der Ionen im Grundzustand, dann veranlaßt ein eingestrahletes Lichtquant der Energie W_M die angehäuften Elektronen zur Rückkehr in den Grundzustand. Das Eingangssignal löst also die im Niveau W_M gespeicherte Energie aus. Es wird ein intensives Leuchten auf Grund induzierter Übergänge beobachtet.

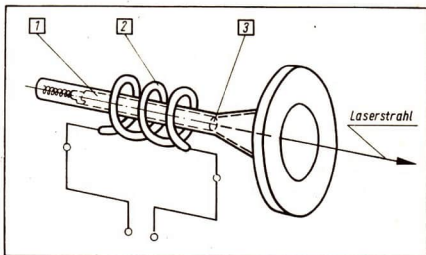
Eine Laser-Strahlungsquelle muß hiernach im wesentlichen drei Bestandteile aufweisen:

1. **Energiespeicher** – Material mit einem geeigneten Energie-Niveau-Schema (beispielsweise Al_2O_3),
2. **Energiequelle** – etwa eine Xenon-Lampe,
3. **Energieausgeber** – den Resonator, der in dem hier betrachteten Beispiel der Rubinstab selbst mit hochpolierten, ebenen und verspiegelten Stirnflächen ist. Zwischen den Stirnflächen des Rubinstabes bilden sich stehende Lichtwellen aus. Die eine Fläche ist für Licht nur halbdurchlässig verspiegelt. Hier kann die entstehende Laser-Strahlung den Rubinstab verlassen.

Die Laserstrahlung hat eine Reihe bemerkenswerter Eigenschaften. Sie ist nahezu parallel. Bei einer vom Laserlichtstrahl durchlaufenen Strecke von 10 km verbreitert er sich um etwa 1,5 m. Der Durchmesser des von einem guten Scheinwerfer ausgehenden Lichtbündels beträgt dagegen bereits nach 1 km Strecke 15 m und mehr. Da die Winkeldivergenz des Laserstrahls also sehr klein ist, bleibt dessen Leuchtdichte groß, so daß es möglich ist, auch kleinere Objekte auf dem Mond von der Erde aus mit Laserstrahlen erkennbar zu beleuchten. Der Lichtstrom von Rubinlasern beträgt rund $10^4 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$. Fokussiert man solches Licht auf eine Fläche von einigen Hundertstel Quadratmillimetern Größe, so kann man dort Energien konzentrieren, die 10^3 - bis 10^4 mal größer sind als diejenigen,

57/2 Schema eines Rubin-Lasers

- 1 Energiespeicher
- 2 Energiequelle
- 3 Energieausgabe



die sich durch Fokussierung des Sonnenlichtes erzielen lassen (Punktschweißen).

Eine weitere wichtige Eigenschaft der Laserstrahlen ist die mit anderen Mitteln nicht erreichbare Qualität der Monochromasie.

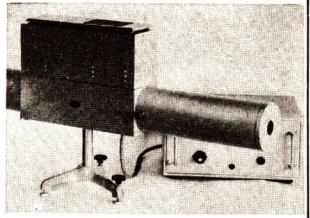
Außerdem ist die hierbei durch induzierte Emission entstehende **Laser-Strahlung** (im Gegensatz zur spontanen Emission) **räumlich völlig kohärent**.

Die Laser werden vielseitig in den Naturwissenschaften angewendet, so z. B. in der Molekülforschung, bei Plasmauntersuchungen, Steuerung chemischer Vorgänge, gleichzeitiger Übertragung verschiedenartigster Informationen, Herstellung kosmischer Verbindungen usw. In der Medizin werden Laser zur Zeit bei der Behandlung von Netzhautablösungen und bei Krebsbekämpfungen herangezogen. Für die Biologie ist die Laserstrahlung zur Herbeiführung von Mutationen und dabei für die Erbforschung von Interesse.

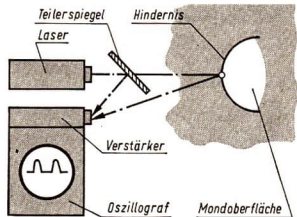
Für wissenschaftlich-technische Zwecke der genauen Längenmessung eignet sich Laserlicht ausgezeichnet. So wurde z. B. auf dem Mond mit Laserlicht ein Lichtfleck von nur 1,6 km Durchmesser erzeugt. Auf der Mondoberfläche konnten dabei Höhenunterschiede mit einem Meßfehler von nur 1,5 m gemessen werden.

Anwendungsbeispiele zum Laser

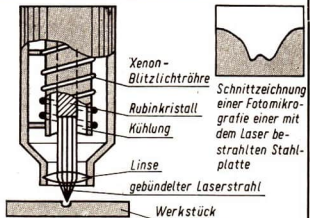
Längenmessung. Die Kohärenzlänge des Lichtes eines Gaslasers liegt in der Größenordnung von 10^2 bis 10^4 km. Meßvorrichtungen mit Laser und Interferometer gestatten, Längen bzw. Längendifferenzen auf Bruchteile einer Lichtwellenlänge genau zu messen.



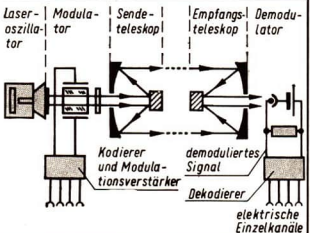
Entfernungsmessung. Für militärische Zwecke werden Lasergeräte zum Entfernungsmessen eingesetzt. Die Genauigkeit der Vorrichtung ist so groß, daß bei einer Meßstrecke von 15000 m die Abweichung des Ergebnisses nur ± 4 m beträgt, das heißt der Fehler beträgt nur etwa 0,3 Prozent.



Schweißen. Die Erwärmung im Brennpunkt eines Laserstrahls reicht aus, um alle absorbierenden Materialien zu schmelzen. Die Intensität steigt auf 10^{13} bis 10^{14} Ws \cdot cm $^{-2}$. Mit Hilfe derartig konzentrierter Laser lassen sich Bleche aus schwerschmelzenden Metallen durchbohren, Drähte verschweißen, Hochtemperaturoxide schmelzen und Diamanten bohren.



Nachrichtenübermittlung. Ein Sender erzeugt eine monochromatische Welle konstanter Amplitude. Die zu übertragende Nachricht wird dem Laserstrahl mit einem Modulator aufgeprägt und das modulierte Signal in ein Sendeteleskop eingespeist. Im Empfänger wird das Signal wieder demoduliert.





Modelle für die Atomhülle

Mit Hilfe der Atom- und Kernphysik können die Grundlagen der elektrischen Leitfähigkeit geklärt und Werkstoffeigenschaften verstanden werden. Beziehungen zwischen der Makrophysik und der Mikrophysik wurden bereits 1934 von Nobelpreisträger Prof. Dr. P. A. TSCHERENKOW (rechts) mit der sogenannten Überlichtgeschwindigkeit der Elektronen erkannt, die sich in der Tscherenkowstrahlung zeigt.

Das Bohrsche Atommodell

Mit der Erklärung des Periodensystems der Elemente und der Theorie der chemischen Bindung auf der Grundlage der Atomphysik wurden wichtige Methoden der Molekülforschung entwickelt. Die Astrophysik ist praktisch angewandte Atomphysik. Auf atomphysikalischen Kenntnissen basieren die Verstärker-, Schalt-, Kontakt- und Fernmeldetechnik.

Die in den voranstehenden Zeilen angeführten Beispiele machen die Wechselwirkung zwischen Atomphysik, Technik und Naturwissenschaft deutlich und zeigen, daß die Anwendungen der Atomphysik noch gewaltig zunehmen werden. Ein wesentliches theoretisches Hilfsmittel der Wissenschaftler bildeten in den einzelnen Etappen der Erschließung dieser Energieform verschiedene Modelle vom Atom und seiner Hülle.

Bis zum Jahre 1913 waren seit der Entdeckung der Spektralanalyse eine Menge von Daten über Spektrallinien angehäuft. Man hatte weitgehend empirisch Gesetzmäßigkeiten gefunden. Es galt, die in Zahlen niedergelegten Beobachtungen und die aufgestellten Spektralformeln durch ein entsprechendes Atommodell physikalisch zu beschreiben.

Aufbauend auf dem Atommodell von ERNEST RUTHERFORD, nach dem die Elektronen auf Kreisbahnen den Kern umlaufen, gelang es NIELS BOHR, durch kühne, jedoch mit der Erfahrung in Einklang stehende Festsetzungen, das Spektrum des Wasserstoffs befriedigend zu erklären. Nach dem von BOHR aufgestellten und von SOMMERFELD weiter entwickelten Modell umlaufen die Elektronen den Atomkern auf Kreis- und Ellipsenbahnen. Um erklären zu kön-



61/1 NIELS BOHR

nen, weshalb die Atome Spektren aussenden, die aus einzelnen scharfen Linien bestehen, forderte BOHR die strenge Gültigkeit folgender Postulate:

1. Es gibt **strahlungsfreie Bahnen**.
2. Es ist nur eine **diskrete Zahl** solcher Bahnen möglich.
3. **Energieausstrahlung** erfolgt nur beim Übergang (Sprung) des Elektrons von einer kernferneren zu einer kernnäheren Bahn ($h \cdot f = W_2 - W_1$).

Auf der Grundlage dieser Postulate können viele Eigenschaften der wasserstoffähnlichen Atome (1. Gruppe des Periodensystems der Elemente) aus Bewegungsvorgängen der Elektronen innerhalb der Atomhülle des Modells mit der Erfahrung in Einklang befindlich dargestellt werden. Jedoch zeigt sich die Unzulänglichkeit der Bohrschen Theorie bereits darin, daß an das unverändert aus der Mechanik übernommene Teilchenbild Zusatzforderungen gestellt werden, für die sich keine Begründung angeben läßt. Außerdem versagt die Theorie vollkommen bei Anwendung auf kompliziertere Probleme. So stellt sich heraus, daß mit den Bohrschen Vorschriften schon das relativ einfache Spektrum des Heliums nicht richtig berechnet wird. Auch die Behandlung der Drehimpulse (Spins) führt zu Abweichungen gegenüber den Erfahrungswerten. Eine weitere Lücke im Verständnis ist darin zu sehen, daß bei Energieausstrahlung das Elektron von einer zu einer anderen Bahn springen muß. Mit der Bohrschen Theorie ist man ferner nicht in der Lage, die Intensität der vom Atom ausgesandten Spektrallinien zu berechnen.

Diese Unzulänglichkeiten liegen in einem grundsätzlichen Mangel des Bohrschen Modells: Die Vorgänge in der Atomhülle werden beschrieben durch ein makrophysikalisches Denkmodell. In diesem werden die Elektronen als Teilchen angesehen, die den Kern auf bestimmten Bahnen umlaufen. Dieses mechanisch-anschauliche Bild von den Elektronen als Teilchen und deren Bahnen widerspricht aber den Erkenntnissen, die von den Mikroobjekten bekannt sind (Doppelspaltexperiment, Welle-Teilchen-Dualismus).

Nach diesen Erkenntnissen ist die Vorstellung, Mikroobjekte, also die Elektronen im Bohrschen Modell, als Teilchen anzusehen, falsch. Zur Erklärung des vom Wasserstoffatom ausgesandten diskreten Spektrums ist bei BOHR der Bahnbegriff notwendig. Zur Festlegung der Bahn eines Mikroobjekts ist jedoch die gleichzeitige Angabe des Ortes und der Geschwindigkeit Voraussetzung. Dies ist aber auf Grund der Heisenbergschen Unbestimmtheitsbeziehung unmöglich. Auch bezüglich der Bahn eines Elektrons liegt mithin ein im Bohrschen Modell auftretender Widerspruch gegenüber der Erfahrung vor.

NIELS HENRICK DAVID BOHR wurde am 7. Oktober 1885 in Kopenhagen geboren. Dort studierte er an der Universität und behandelte in seiner Doktorarbeit (1911) eine neue Theorie über den Aufbau der Materie. 1913 gelang es BOHR, das Spektrum des Wasserstoffs befriedigend zu erklären und aus seiner Theorie verschiedene andere Eigenschaften des Atoms zu gewinnen. Wenige Jahre später wurde er Professor für Theoretische Physik an der Universität Kopenhagen und Direktor des Physikalischen Institutes. Durch seine Erfolge bei der Erklärung der Atom- und Molekülspektren wurde Bohrs Institut bald zum Zentrum für Physiker aus allen Teilen der Welt. Im Jahre 1922 erhielt BOHR für seine „Forschungsarbeit über die Atomstruktur und die von den Atomen ausgesandte Strahlung“ den Nobelpreis. In den Jahren 1933 bis 1939 widmete er sich hauptsächlich der Theorie des Atomkerns. Sein Kernmodell erwies sich als fast ebenso bedeutungsvoll, wie seine früheren Ideen es für die Hülle des Atoms gewesen waren.

Nach Ausbruch des Krieges und der Besetzung Dänemarks von den Faschisten blieb BOHR in Dänemark. Er nahm am Widerstand gegen die Eindringlinge teil und schützte die in Dänemark arbeitenden emigrierten Wissenschaftler. Am 29. September 1943 brachten Mitglieder der dänischen Widerstandsbewegung BOHR nach Schweden, von wo er nach England und später nach den USA auswanderte. Die Faschisten suchten in seinem Hause vergeblich nach Spuren seiner Forschung.

Im Jahre 1945 kehrte BOHR nach Europa zurück. Sein leidenschaftliches Wirken für den Weltfrieden findet seinen Ausdruck in einem offenen Brief Bohrs an die Vereinten Nationen vom Juni 1950.

NIELS BOHR ist am 18. 11. 1962 in Carlsberg in Dänemark verstorben.

Das wellenmechanische Atommodell

Bei diesem Modell macht man sich eine völlig andere Vorstellung von den Elektronen im Atom, als es im Bohrschen Teilchenmodell der Fall ist. Im Abschnitt „Welleneigenschaften von Teilchen“ werden Wellenerscheinungen behandelt, die mit monochromatischen Elektronenstrahlen verknüpft sind. Nach DE BROGLIE sollen auch den im Atom an den Kern gebundenen Elektronen Wellen zugeordnet werden und zwar derart, daß man auf dem Umfang eines Kreises um den Atomkern eine ganzzahlige Anzahl von

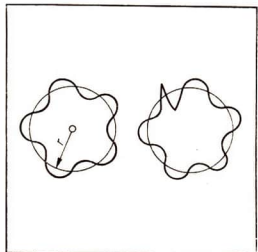
de-Broglie-Wellenlängen $\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$ des bewegten Elektrons unterbringen kann. Die zugehörige Welle kommt entlang des Kreises mit sich selbst zur Interferenz (Bild 62/1). Auslöschung darf nicht eintreten; denn diese käme einem Verschwinden des Elektrons gleich. Es muß also

$$2\pi \cdot r = n \cdot \lambda, \quad n = 1, 2, 3 \quad (42)$$

sein. Setzt man den Wert von λ ein, so erhält man

$$2\pi \cdot m \cdot r \cdot v = n \cdot h, \quad n = 1, 2. \quad (43)$$

62/1



Das ist die Bedingung für die Bestimmung strahlungsfreier Bahnen, die BOHR durch eine Zusatzannahme fand. Wenn dem Elektron stehende Wellen zugeordnet werden, ist die Strahlungslosigkeit der Bohrschen „Bahnen“ verständlich.

Hier wurde die Wellenvorstellung in besonders einfacher Form verwendet. Die Welle ist eindimensional längs einer Kreislinie um den Atomkern verlaufend angenommen. Das Atom stellt aber ein räumliches Gebilde dar, weshalb dem Elektron im Atom eine dreidimensionale stehende Welle zugeordnet wird. Eine zweidimensionale Veranschaulichung stehender Wellen findet man bei den Eigenschwingungen von Platten (Chladnische Klangfiguren).

Auf diesem Gedanken aufbauend, kann ein dem Bohrschen Modell entgegengesetztes Wellenmodell für das Atom konstruiert werden. In diesem wird z. B. das Elektron des Wasserstoffatoms als ein um den Atomkern „verschmieretes“ Gebilde mit einer von Ort zu Ort unterschiedlichen Ladungsdichte betrachtet.

Auch dieses Wellenmodell kann nur einige Aspekte der tatsächlich beobachteten Erscheinungen beschreiben.

Die ihm zugrunde liegenden Vorstellungen führen ebenfalls zu einem krassen Widerspruch mit der Erfahrung. In letzter Konsequenz läßt nämlich das Wellenmodell eine Teilung des Elektrons zu. Nach dem Doppelspaltexperiment werden jedoch grundsätzlich Bruchteile des Elektrons hinsichtlich seiner Masse und seiner Ladung nicht beobachtet.

Zusammenfassung

Zur Beschreibung der Vorgänge in der Atomhülle wurden das Bohrsche Atommodell und das wellenmechanische Atommodell benutzt. Im Bohrschen Modell werden wesentliche Züge des makrophysikalischen Teilchenmodells (Bahn-begriff) verwendet. Andererseits treten Begriffe auf, die in diesem Modell nicht erklärt sind. Durch die Zusatzforderungen stellt das Bohrsche Atommodell ein modifiziertes, weiterentwickeltes makrophysikalisches Teilchenmodell dar, mit dem einige experimentell gesicherte Erscheinungen erklärt werden können, das aber zur Beschreibung anderer Erfahrungen ungeeignet ist.

Der gleiche Sachverhalt liegt auch beim Wellenmodell des Atoms vor, das sich vom makrophysikalischen Wellenmodell durch die Aufnahme der de-Broglie-Beziehung unterscheidet. Die Weiterentwicklung im Vergleich zu den entsprechenden makrophysikalischen Modellen besteht darin, daß physikalische Größen wechselseitig aus beiden Modellen miteinander verknüpft werden. Letztlich sind das Bohrsche und das wellenmechanische Atommodell Versuche,

die besonderen Gesetzmäßigkeiten im Mikrokosmos durch mehr oder weniger makroskopisch-anschauliche Modelle zu erfassen.¹

Eine den heutigen Erfahrungen der Atomhülle und den Molekülen genügende Beschreibung wird durch eine wesentlich abstraktere Theorie, die Quantentheorie, gegeben, die 1927 in den Grundlagen von BOHR, HEISENBERG, BORN, JORDAN und SCHRÖDINGER ausgearbeitet vorlag. Diese Theorie arbeitet streng nur mit solchen Elementen, die einer Beobachtung zugänglich sind und schließt alle im Mikrobereich prinzipiell nicht meßbaren Begriffe, wie z. B. Teilchenbahnen, grundsätzlich aus.

Die historische Entwicklung der Lichttheorien

Die Optik ist neben der Mechanik das älteste Teilgebiet der Physik. Da das Auge zu den wichtigsten Sinnesorganen gehört, haben sich die Menschen schon zeitig über das Licht, die Lichtstrahlen und über das Sehen Gedanken gemacht. Seit GALILEI (1564 bis 1642) ist die Physik als eine experimentelle Naturwissenschaft anzusehen. In der Optik führten die experimentellen Untersuchungen (u. a. mit dem damals gerade gebauten Fernrohr) zu der Frage nach dem Wesen des Lichtes. Man versuchte, sich eine anschauliche Vorstellung, ein **Modell vom Licht** zu schaffen. Wegen der überragenden Bedeutung, die die Mechanik in der damaligen Physik hatte, drängten sich zwei mechanische Lichtmodelle auf: Licht als Welle oder als Teilchen. Um zu entscheiden, welches Modell den natürlichen Gegebenheiten am besten entspricht, versuchte man, alle bekannten optischen Erscheinungen und Gesetzmäßigkeiten mit Hilfe des einen oder anderen Modelles in möglichst einfacher Weise zu beschreiben und zu verstehen.

Schon PIERRE GASSENDI (1592 bis 1655) war der Meinung, daß von leuchtenden Körpern kleine, damals als Lichtatome bezeichnete kugelförmige Körperchen ausgehen. Sie sollten sich mit sehr großer Geschwindigkeit ausbreiten und beim Auftreffen und Eindringen ins Auge dort die Lichtempfindung hervorrufen.

Dieses **Teilchenmodell des Lichtes** wurde von ISAAC NEWTON (1643 bis 1727) aufgegriffen und weiter ausgebaut. Er spricht von Lichtteilchen, die „periodische Anwandlungen leichter Reflexion und periodische Anwandlungen leichter Eindringung“ (sogenannte „fits“) erfahren. Newtons Licht-

¹Das gleiche gilt auch für das vom Chemieunterricht her bekannte Orbitalmodell.

teilchen sind also durch eine bestimmte Periodizität gekennzeichnet. Die „Periodenlänge“ ist der Weg eines Lichtteilchens zwischen zwei „fits“ gleicher Art.

Die Reflexion wurde im Teilchenbild wie das Zurückwerfen elastischer Kugeln durch eine Wand gedeutet.

Die Brechung wurde mit Hilfe der Anziehungskräfte der Medien auf die Lichtteilchen erklärt:

An der Grenzfläche zwischen einem optisch dünneren und einem optisch dichteren Medium tritt eine Bahnänderung auf, weil die Lichtteilchen vom dichteren Medium stärker angezogen werden als vom dünneren.

Mit Newtons Teilchenmodell ist so also zwingend die Behauptung verbunden, daß die Lichtgeschwindigkeit mit der Dichte des Mediums zunimmt. Das konnte zur damaligen Zeit aber experimentell noch nicht untersucht werden.

Die ersten Gedanken zum **Wellenmodell des Lichtes** stammen von FRANCESCO GRIMALDI (1618 bis 1663), der auch zum ersten Mal Interferenzstreifen beobachtet und beschrieben hat.

Den eigentlichen großen Fortschritt stellen die von CHRISTIAN HUYGENS (1629 bis 1695) formulierten Gedanken zur Ausbreitung von Wellen mit Hilfe von Elementarwellen dar.

HUYGENS kann mit seiner Theorie geradlinige Ausbreitung, Reflexion und Brechung des Lichtes erklären. Auch für die damals schon bekannte Erscheinung der Doppelbrechung am Kalkspat findet er eine Erklärung.

Wiederholen Sie die Erklärung von Reflexion und Brechung des Lichtes mit dem Huygensschen Prinzip!

Aus seiner Darstellung der Brechungserscheinungen folgt im Gegensatz zur Newtonschen Theorie, daß die Lichtgeschwindigkeit im optisch dichteren Medium geringer ist als im optisch dünneren Medium.

Während des gesamten 18. Jahrhunderts konnten die Widersprüche der aufgestellten Lichttheorien (Newtons Teilchentheorie und Huygens' Wellentheorie) nicht gelöst werden. NEWTON konnte die geradlinige Ausbreitung des Lichtes nicht mit einer Wellenauffassung vereinigen. Auch erschien ihm die Vorstellung vom **Lichtäther** zu hypothetisch. HUYGENS wiederum schienen die Durchlässigkeit vieler Stoffe für Licht und die erfahrungsgemäß doch sehr große Lichtgeschwindigkeit gegen das Teilchenbild zu sprechen. Die Bemühungen um eine Lösung der Widersprüche auf dem Gebiet der Lichttheorien stellen eine wichtige Etappe im historischen Erkenntnisprozeß der Physik dar. Sie kennzeichnen zugleich den dialektischen Charakter dieses Prozesses.

Versuche zum Wellenmodell des Lichtes

Nach 1800 wurden viele Untersuchungsergebnisse bekannt, mit denen die bis dahin beobachteten Interferenzerscheinungen mit Hilfe der Wellenauffassung des Lichtes leicht und eindeutig erklärt werden konnten.

THOMAS YOUNG (1773 bis 1829) erklärte Grimaldis Beobachtungen durch Beugung von Lichtwellen. Bei der Erklärung der Newtonschen Ringe aus dem Wellenmodell bekam er als erster eine ungefähre Größenbestimmung der Lichtwellenlängen.

YOUNG war auch der Unterschied zwischen kohärenten und inkohärenten Lichtstrahlen bekannt.

Diese Untersuchungen wurden ab 1815 von AUGUSTIN JEAN FRESNEL (1788 bis 1827) umfassend weitergeführt.

1809 hat ETIENNE L. MALUS (1775 bis 1812) bei der Untersuchung von reflektierten Sonnenstrahlen mit einem doppelbrechenden Kristall die **Polarisation** des Lichtes entdeckt. Er fand, daß die Polarisation an einen bestimmten Reflexionswinkel gebunden ist und konstruierte den aus zwei Glasspiegeln bestehenden Polarisationsapparat.

Durch diese Untersuchungen wurde wiederum YOUNG 1817 veranlaßt, die **Transversalität** der Lichtwellen auszusprechen, so sehr eine solche Vorstellung auch den gewohnten Anschauungen widersprach. Diese Ansicht wurde von FRESNEL und ARAGO (1786 bis 1853) bestätigt, denen 1819 der Nachweis gelang, daß senkrecht zueinander polarisierte Strahlen nicht interferieren. Damit war für das Licht mit der transversalen Welle das am besten geeignete Modell gefunden.

Schwierigkeiten mit diesem Modell entstanden nun aber bei der Darstellung des Lichtäthers, den man sich bislang als eine elastische Flüssigkeit vorstellte. Da elastische Transversalwellen nur in festen Körpern auftreten können, mußte man dem Lichtäther eine Form-Elastizität zuschreiben.

Messung der Lichtgeschwindigkeit

Im 17. Jahrhundert war, angeregt durch astronomische Untersuchungen, eine viel diskutierte Frage die, ob das Licht für seine Ausbreitung eine bestimmte Zeit benötigt oder nicht. DESCARTES verneinte diese Frage, GALILEI bejahte sie.

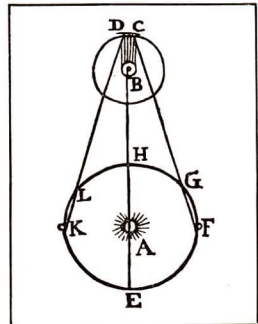
Beide hatten für eine experimentelle Untersuchung noch nicht die notwendigen Mittel zur Verfügung.

OLAF RÖMER (1644 bis 1710) fand 1676 bei astronomischen Erkundungen erstmalig, daß das Licht eine endliche



66/1 AUGUSTIN JEAN FRESNEL

66/2 Originalzeichnung Römers



1671		
Marz 19	9. 1. 44	Emerio r
Apr. 27	7. 42. 30	Em.
May 4	9. 42. 30	Emen.
Oct. 24	18. 15. 0	Imm.
Oct. 16	15. 72	
Jan. 3	12. 42. 36	Imm.
Jan. 10	14. 32. 14	Imm.
Jan. 12	18. 57. 22	Imm.
Feb. 11	10. 57. 6	Imm. d. b.
Feb. 20	7. 20. 26	Imm. d. a.
Marz 7	7. 58. 25	Emen.
Mar. 14	9. 52. 30	Emen.
Mar. 23	6. 18. 14	Emen.
Mar. 28	13. 45. 30	Emen.
Mar. 30	8. 14. 46	Emen.
Apr. 6	10. 11. 22	Emen.
Apr. 13	12. 8. 8	Emen.

67/1 Auszug aus dem Tagebuch von OLAF RÖMER

Ausbreitungsgeschwindigkeit hat. Er ermittelte die Zeit zwischen aufeinanderfolgenden Verfinsterungen eines Jupitermondes, die durch dessen Eintritt in den Jupiterschatten verursacht wurden. RÖMER wollte untersuchen, ob diese Verfinsterungen von der Schifffahrt für die Bestimmung geografischer Längen benutzt werden können.

In der Nahestellung H der Erde (Bild 66/2) auf ihrer Bahn um die Sonne fand er für die Zeit zwischen zwei Verfinsterungen 42,5 Stunden. Nach Ablauf eines halben Jahres sind 130 Verfinsterungen einander gefolgt. Die 131. Verfinsterung trat 1320 Sekunden später ein als berechnet. RÖMER erklärte das dadurch, daß sich die Erde inzwischen von der Stellung H in die Stellung E, also um einen Erdbahndurchmesser vom Jupitermond entfernt hat. Er meinte, die Verfinsterung ist um die Zeit verzögert, die das Licht braucht, um diesen Weg zurückzulegen.

Er fand für die Lichtgeschwindigkeit ungefähr

$$c = 220000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Damit war zunächst die Größenordnung dieser Geschwindigkeit im leeren Raum richtig gefunden worden.

Die erste experimentelle Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit auf der Erde gelang 1849 ARMAND FIZEAU (1819 bis 1896). Sie war ihm und LÉON FOUCAULT als Forschungsaufgabe von der französischen Akademie gestellt worden.

Bei diesem Experiment wurde Licht von einer Lichtquelle über einen unter 45° aufgestellten halbdurchlässigen Spiegel zu einem Reflexionspiegel und von dort zurück zu einem Beobachter geschickt. In den Strahlengang brachte FIZEAU ein rotierendes Zahnrad, das den Lichtstrahl abwechselnd unterbrach und wieder durchließ. Bei einer bestimmten Umdrehungszahl trifft das durch eine Lücke hindurchgelassene Licht nach der Reflexion gerade auf einen Zahn, so daß der Beobachter das Licht nicht sieht. Verdoppelt man die Umdrehungszahl des Zahnrades, kann das reflektierte Licht jeweils durch die nächste Lücke wieder hindurchtreten, wodurch der Beobachter das reflektierte Licht wieder sieht.

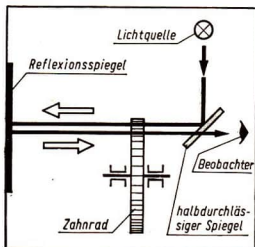
Ist f die Umdrehungsfrequenz und z die Anzahl der Zahnradlücken, dann ergibt sich für die Laufzeit des Lichtes vom Zahnrad bis zum Spiegel und zurück zur nächsten Lücke

$$t = \frac{1}{f \cdot z}.$$

Die Lichtgeschwindigkeit bekommt man dann aus

$$c = \frac{2s}{t} = 2s \cdot f \cdot z.$$

In Fizeaus Originalversuch war $z = 720$ und $s = 8,633 \text{ km}$.



67/2 Bestimmen der Lichtgeschwindigkeit nach FIZEAU

FIZEAU fand als Mittelwert $c = 315320 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$.

Der Nachteil der Fizeauschen Methode war der relativ lange Lichtweg. Um die Lichtgeschwindigkeit in anderen Medien, z. B. in Wasser, bestimmen zu können, benötigte man eine Versuchsanordnung, bei der das Licht nur wenige Meter zurückzulegen hat.

1862 wurde die Methode von LÉON FOUCAULT (1819 bis 1868) bekannt. Danach fällt ein paralleles Lichtbündel auf einen drehbaren Spiegel, der das Licht zu einem Hohlspiegel reflektiert. Von diesem Hohlspiegel, dessen Krümmungsmittelpunkt im Drehpunkt des ebenen Spiegels liegt, läuft das Licht wieder zum ebenen Spiegel zurück. Wird dieser in schnelle Rotation versetzt, so trifft das vom Hohlspiegel zurückkommende Licht den Spiegel in einer etwas anderen Stellung als beim Hingang an. Das macht sich in einer Ablenkung des Lichtes bemerkbar. Die vom Licht zum Zurücklegen der Strecke $2r$ benötigte Zeit t kann aus der Drehzahl des Spiegels und dem Winkel α berechnet werden. Die Lichtgeschwindigkeit ergibt sich dann aus

$$c = \frac{2r}{t}.$$

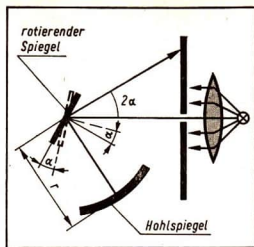
FOUCAULT fand für $c = 298000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$.

Da die Strecke r nur etwa zwei Meter lang war, konnte FOUCAULT dort eine Wassersäule anbringen und die Lichtgeschwindigkeit in Wasser zu $0,75 c$ bestimmen. Dieses Ergebnis stand im Einklang mit den Forderungen des Wellenmodells des Lichtes und im Gegensatz zum Teilchenmodell. Die Untersuchungen von FIZEAU und FOUCAULT stellten für ihre Zeit experimentelle Spitzenleistungen dar. Sie zeigen, wie im physikalischen Erkenntnisgang theoretische Widersprüche durch gezielte Experimente überwunden werden können.

Das Licht als elektromagnetische Welle

Das Licht war also als eine transversale Wellenbewegung erkannt worden, die sich mit einer sehr großen, aber endlichen Geschwindigkeit in einem besonderen Medium, dem Lichtäther, ausbreitet. Dieser mechanische Träger der Wellen mußte die Eigenschaften eines elastischen Festkörpers haben. Bei äußerst geringer Dichte mußte er härter sein als Stahl. Zugleich mußten sich die Gestirne mit großer Geschwindigkeit und ohne spürbare Reibung durch ihn bewegen können. Das alles führte zu großen Schwierigkeiten der mechanischen Ätherauffassung.

1865 zog JAMES CLARK MAXWELL (1831 bis 1879) aus seiner Theorie der Elektrizität und des Magnetismus den zunächst mathematischen Schluß, daß es elektromagnetische Wellen



68/1 Bestimmen der Lichtgeschwindigkeit nach FOUCAULT

geben müsse, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Er knüpfte dabei an die Faradayschen Feldauffassungen und die Oerstedtschen Untersuchungen an. Auch das Licht war nach MAXWELLS Auffassung eine elektromagnetische Welle, die sich nicht mehr in einem mechanisch aufzufassenden, sondern in einem **elektromagnetischen Äther** ausbreitet. MAXWELL lenkte also die Aufmerksamkeit auf einen sehr tiefen Zusammenhang zwischen der Ausbreitung elektromagnetischer und optischer Erscheinungen. Diesen Zusammenhang zu beweisen, hat die Akademie zu Berlin im Jahre 1879 als Forschungsaufgabe gestellt. Die zunächst nur theoretisch vorliegenden Ergebnisse MAXWELLS hat HEINRICH HERTZ (1857 bis 1894) in einer langen Reihe von zunächst völlig erfolglosen Experimenten bestätigt. Er wies 1888 die elektromagnetischen Wellen zunächst an Drähten und später im Raum nach und zeigte, daß sie die Eigenschaften des Lichtes haben: Reflexion, Brechung, Beugung, Interferenz und Polarisation. HERTZ bestätigte auch MAXWELLS Voraussage, daß diese Wellen sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Er schließt die Darlegung seiner Untersuchungen mit den Worten: „Mir wenigstens erscheinen die beschriebenen Versuche in hohem Grade geeignet, Zweifel an der Identität von Licht, strahlender Wärme und elektrodynamischer Wellenbewegung zu beseitigen.“

Damit war die Richtigkeit der Maxwellschen Theorie bestätigt. Die beiden bis dahin unabhängigen Gebiete der Elektrizitätslehre und der Optik waren zu einem geworden. Das war ein weiterer Schritt in der Richtung auf eine einheitliche Auffassung des physikalischen Geschehens. Die Erkenntnisse von HERTZ leiteten die bis in unsere Zeit anhaltende gewaltige Entwicklung der Nachrichtentechnik und weiterer Gebiete der Elektrotechnik ein.

Zur Quantentheorie des Lichtes

Im letzten Jahrzehnt des vorigen Jahrhunderts suchten viele namhafte Physiker nach der Ableitung eines Gesetzes, das die experimentell gesicherten Ergebnisse der Energieverteilung bei der Wärmestrahlung richtig wiedergibt. MAX PLANCK (1858 bis 1947) gelang im Jahre 1900 die Aufstellung einer **Strahlungsformel**, die sich bewährt hat. Er mußte dabei aber völlig neuartige Annahmen über die Energieausstrahlung machen:

1. Die Abgabe und Aufnahme von Strahlungsenergie durch die Atome erfolgt nur in bestimmten „Portionen“, den Energiequanten.
2. Die Energiequanten sind der Frequenz der Strahlung proportional: $W = h \cdot f$.

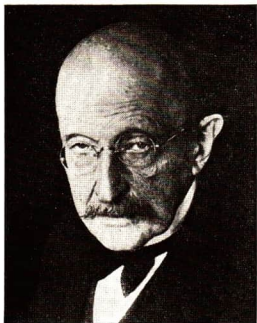
Diese Gedanken Plancks über un stetige Energieänderungen bedeuteten einen tiefen Einschnitt in der Entwicklung der Physik. Man konnte mit ihrer Hilfe später zu einem der Physik bis dahin verschlossenen Verständnis vieler Vorgänge im atomaren Bereich gelangen.

Eine sehr wesentliche Fortführung der Planckschen Hypothese gelang im Jahre 1905 ALBERT EINSTEIN (1879 bis 1955) mit der Annahme, daß die Energie nicht nur bei Abgabe und Aufnahme durch die Atome, sondern auch in der Strahlung quantenhaft erscheint. Er entwickelte die Lehre von den **Lichtquanten** oder Photonen.

EINSTEIN konnte damit den **lichtelektrischen Effekt** theoretisch erklären. Schon 1887 hatte HERTZ bemerkt, daß ultraviolettes Licht, wenn es auf eine Funkenstrecke fällt, den Überschlag erleichtert. Damit waren erste Hinweise auf elektrische Wirkungen des Lichtes gegeben.

1888 bzw. 1899 kam es zu den bereits beschriebenen Ergebnissen (S. 41) von HALLWACHS (1859 bis 1922) und LENARD (1862 bis 1947), die durch die klassische Wellentheorie des Lichtes nicht erklärt werden konnten. Faßt man mit EINSTEIN das Licht als Strom von Lichtquanten der Energie $h \cdot f$ auf, dann kann man das Auslösen von Elektronen durch Licht so beschreiben, wie es das Experiment 17 zeigt.

Es wurde gezeigt, daß mit dem **klassischen Wellenmodell** Brechung, Beugung, Interferenz und Polarisation beim Licht erklärt werden können. Der lichtelektrische Effekt ist wiederum mit Hilfe des **Teilchenmodells** zu verstehen. Man kann also sagen, daß sich das Licht nicht mit allen seinen experimentell gefundenen Eigenschaften mit einem einzigen **klassischen Denkmodell** veranschaulichen läßt. Man hat das mit dem Ausdruck **Welle-Teilchen-Dualismus** umschrieben. Zwischen dem Wellenmodell und dem Teilchenmodell besteht der allgemeine dialektische Widerspruch zwischen Kontinuität und Diskontinuität. Damit ist jedoch nicht gemeint, daß das Licht in der Realität in zwei Teile oder Prozesse zerfällt. Es ist eine natürliche Erscheinung, die, wie viele andere Erscheinungen, von den Physikern im Laufe der Zeit durch die ständigen wechselseitigen Beziehungen zwischen Theorie und Praxis immer genauer beschrieben werden konnte. Mit Einsteins **Quantenmodell** des Lichtes zeigt sich ein weiteres Mal die Dialektik in der Entwicklung der Physik. Das Quantenmodell zeigt gewisse abgewandelte Eigenschaften sowohl des Teilchens als auch des Wellenmodells. Damit werden Begriffe zweier, in der klassischen Physik sich unvereinbar gegenüberstehender Modelle verknüpft und auf die physikalische Erscheinung Licht bezogen, um es an Hand der modernen



71/1 MAX PLANCK

Experimente beschreiben zu können. Auch hier zeigt sich die Dialektik der physikalischen Erkenntnisgewinnung.

Im Abschnitt „Materiewellen“ wurde erläutert, daß auch für alle Mikroobjekte mit scheinbar ausgesprochenem Teilchencharakter (Elektronen, Atome, Neutronen) Beobachtungen gemacht wurden, die nur im Wellenbild befriedigend beschrieben werden können.

Die **de-Broglie-Beziehung** verknüpft Begriffe aus dem Teilchenbild (Masse, Geschwindigkeit) mit der Wellenlänge, einem Begriff aus dem Wellenbild. Hier kommt ebenfalls die schon beim Licht, aber auch sonst in der Physik erkannte Dialektik der Naturbeschreibung zum Ausdruck.

MAX PLANCK wurde am 23. April 1858 in Kiel als Sohn eines Universitätsprofessors geboren. Seine Schulzeit verbrachte er in München. Nach dem Abitur stand für ihn nicht gleich fest, ob er sich dem Studium der Musik oder der Naturwissenschaften widmen sollte. Er entschied sich für die Physik, ist aber sein Leben lang ein großer Musikliebhaber geblieben.

Nach dem Studium in München und Berlin promovierte er 1879 mit einer Arbeit „Über den zweiten Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie“. 1885 wurde PLANCK Professor für theoretische Physik in Kiel und 1889 Nachfolger Kirchhoffs in Berlin. Ab 1896 arbeitete er besonders über die Theorie der Wärmestrahlung. Am 14. Dezember 1900 trug er in einer Sitzung der Physikalischen Gesellschaft seine Quantenhypothese vor, die als Anfang eines neuen Abschnittes der Physik gilt.

1918 erhielt PLANCK den Nobelpreis. Nach 1933 bewährte sich bei verschiedenen Gelegenheiten seine aufrechte antifaschistische Gesinnung. Sein Sohn ist 1945 als Mitglied einer Widerstandsgruppe hingerichtet worden. MAX PLANCK starb 1947 in Göttingen.

ALBERT EINSTEIN wurde am 14. 8. 1879 in Ulm geboren. Sein Vater besaß dort eine kleine Werkstatt für elektrotechnische Geräte. Nach dem Abitur studierte EINSTEIN von 1896 bis 1900 an der Technischen Hochschule Zürich Physik.

Von 1902 bis 1909 war er am Patentamt in Bern als Gutachter tätig.

Im Jahr 1905 promovierte EINSTEIN an der Universität Zürich mit einer Arbeit über „Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen“.

Im gleichen Jahr erschien Einsteins Untersuchung „Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt“. In dieser und in

späteren Arbeiten wandte er die Plancksche Quantenhypothese auf das Licht an und entwickelte die Quantentheorie des Lichtes. Für seine Untersuchungen zum lichtelektrischen Effekt wurde EINSTEIN 1922 der Nobelpreis für Physik verliehen.

Die berühmtesten Leistungen Einsteins sind seine Gedanken und Untersuchungen zur Relativitätstheorie, die 1905 bekannt wurden.

Ab 1914 wirkte EINSTEIN in Berlin als Akademiemitglied und als Professor an der Universität. 1933 hat er Deutschland aus politischen Gründen verlassen. Er ist am 18. April 1955 in Princeton (USA) gestorben.

EINSTEIN war einer der fortschrittlichsten Gelehrten seiner Zeit. Er war ein bedingungsloser Gegner des Krieges, und er stand dem preußisch-deutschen Militarismus unversöhnlich gegenüber.

Von nationalistisch-antisemitischen Kreisen der Weimarer Republik wurde er in beschämender Weise beleidigt und bekämpft. So war es nur konsequent, daß er 1933 nach der Machtergreifung des Hitlerfaschismus Deutschland den Rücken kehrte.

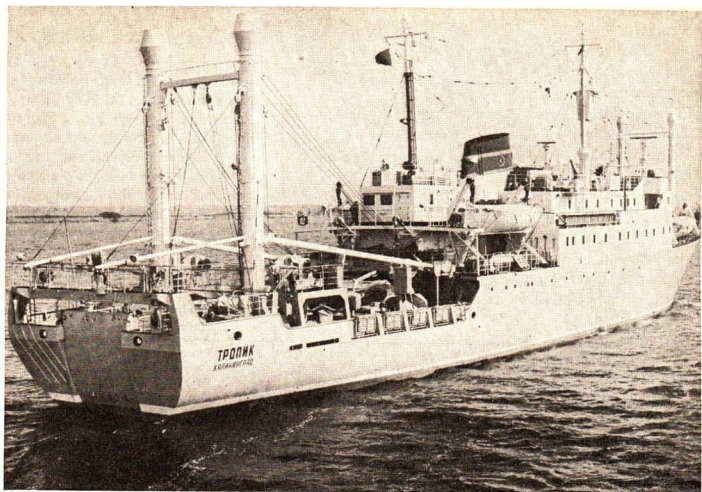
Nach dem Kriege trat er für ein Verbot der Kernwaffen und für die friedliche Koexistenz von Staaten mit unterschiedlicher Gesellschaftsordnung ein.



72/1 ALBERT EINSTEIN

„Jeden Tag denke ich daran,
daß mein äußeres und inneres Leben
auf der Arbeit der jetzigen
und der schon verstorbenen Menschen beruht,
daß ich mich anstrengen muß,
um zu geben,
im gleichen Ausmaß,
wie ich empfangen habe
und noch empfangen.“

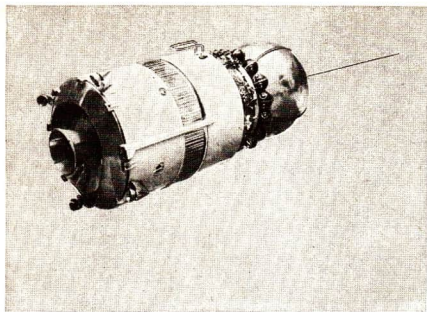
Albert Einstein



Kinetische Gas- und Wärmetheorie

Kühlschiffe der „Tropik“-Serie werden in der DDR gebaut. Die Kältetechnik ist für die moderne Lebensmittelindustrie unentbehrlich geworden. In unserer Republik werden jährlich große Beträge für die Errichtung und den weiteren Ausbau von Kühlanlagen investiert. Solche Kühlanlagen entziehen dem Kühlgut Wärme. Bei tiefen Temperaturen wird der zerstörende Einfluß von Mikroorganismen auf die Nahrungs- und Genußmittel weitgehend eingeschränkt. Besonders das Schnellgefrieren hat gegenüber anderen Verfahren zur Haltbarmachung von Lebensmitteln den Vorteil, daß Vitamine und Aromastoffe erhalten bleiben. In der Medizin sind zuverlässige Kühlanlagen zur Lagerung von Blutkonserven und Gewebepreparaten für chirurgische Zwecke erforderlich.

Die tiefen Temperaturen werden vorwiegend mit Hilfe von Zustandsänderungen geeigneter Gase erreicht. In jüngerer Zeit werden für Kühlsysteme auch Halbleiterbauelemente eingesetzt.



Das Verhalten der Körper bei Temperaturänderungen

Am 12. April 1961 brachte eine sowjetische Rakete das 4725 kg schwere Raumschiff Vostok mit dem Fliegermajor Juri Gagarin an Bord auf eine Satellitenbahn um die Erde.

Am Gelingen dieses ersten Vorstoßes eines Menschen in den Kosmos waren zahlreiche wissenschaftliche Disziplinen beteiligt. So benötigt man für die Konstruktion von Raketentriebwerken genaueste Kenntnisse über das Verhalten der Körper bei hohen Temperaturen und großen Drücken.

Die Temperatur

Um die mit der Erwärmung oder Abkühlung von Körpern zusammenhängenden physikalischen Vorgänge und Erscheinungen quantitativ zu erfassen, wird die Grundgröße **Temperatur** eingeführt.

Die Meßverfahren für die Temperatur beruhen vorwiegend darauf, daß viele physikalische Eigenschaften der Körper temperaturabhängig sind, z. B. das Volumen und der spezifische elektrische Widerstand.

- Beschreiben Sie die Wirkungsweise der Flüssigkeitsthermometer und auf welche Weise deren Skale festgelegt wird!

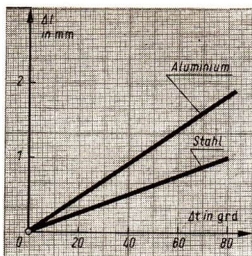
Längenänderung fester Körper

Beim Erwärmen oder Abkühlen ändern sich alle Abmessungen eines festen Körpers, so z. B. der Durchmesser einer Kugel, die Länge einer beliebigen Kante eines Quaders, die Länge der Raumdiagonale eines Würfels.

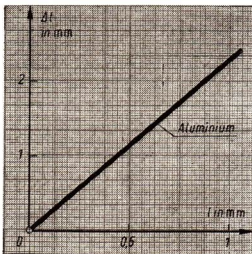
Solche Veränderungen der Abmessungen werden als Längenänderungen bezeichnet.

Die Veränderungen sind darauf zurückzuführen, daß sich mit zunehmender Temperatur die mittleren Abstände zwischen den Molekülen des Körpers infolge der thermischen Bewegung vergrößern.

Durch Versuche kann festgestellt werden, wie sich die Länge von Stäben aus Metall, Glas oder anderen Stoffen mit der Temperatur verändert.



75/1 Diagramm der Längenänderung von Metallstäben. Die Stäbe haben bei der Anfangstemperatur die Länge 1 m



75/2 Diagramm der Längenänderung eines Stabes bei einer Temperaturänderung um 100 grad

Entwerfen Sie eine Vorrichtung zum Messen der sehr kleinen Längenänderung eines Stabes!

Hierbei ist zu erkennen:

Die Längenänderung eines Stabes ist der Differenz von End- und Anfangstemperatur proportional (Bild 75/1).

$$\Delta l \sim \Delta t \quad (44)$$

Die Längenänderung ist bei gleichen Temperaturdifferenzen der Anfangslänge proportional (Bild 75/2).

$$\Delta l \sim l \quad (45)$$

Beide Proportionalitäten werden zusammengefaßt:

$$\Delta l \sim l \cdot \Delta t \quad (46)$$

Hieraus erhält man die Gleichung:

$$\Delta l = \alpha \cdot l \cdot \Delta t \quad (47)$$

Den Proportionalitätsfaktor nennt man

linearer Ausdehnungskoeffizient $\alpha = \frac{\Delta l}{l \cdot \Delta t}$. (48) ◀

Beispiel für die Berechnung eines Ausdehnungskoeffizienten: ■

Aus dem Diagramm (Bild 75/1) ist abzulesen:

Gegeben:

Aluminiumstab $l = 1 \text{ m}$

$\Delta t = 80 \text{ grad}$

$\Delta l = 1,84 \text{ mm}$

Gesucht:

α

Lösung:

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

$$\alpha = \frac{1,84 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{1 \text{ m} \cdot 80 \text{ grad}}$$

$$\alpha = \underline{\underline{2,3 \cdot 10^{-5} \text{ grad}^{-1}}}$$

Der Zahlenwert des linearen Ausdehnungskoeffizienten hängt davon ab, bei welcher Temperatur die Länge l gemessen wird.

Im allgemeinen bezieht man sich auf die Länge l_0 bei 0°C .

In diesem Falle gilt:

$$\Delta l = l - l_0 \text{ und } \Delta t = t$$

$$\Delta l = l_0 \cdot \alpha \cdot t \quad (49)$$

$$l = l_0(1 + \alpha \cdot t) \quad (50)$$

Zeigen Sie, daß aus (50) die Näherungsgleichung

$$l_2 = l_1[1 + \alpha \cdot (t_2 - t_1)] \quad (51)$$

folgt!

Welche Vernachlässigung ist notwendig? ●

Die Volumenänderung fester Körper

Bei einer Temperaturerhöhung von 0°C aus vergrößern sich alle Abmessungen eines festen Körpers um den gleichen Faktor $(1 + \alpha \cdot t)$. Aus diesem Grunde bleibt ein Körper beim Erwärmen seiner Ausgangsgestalt geometrisch ähnlich. Die Volumina ähnlicher Körper verhalten sich wie die 3. Potenzen ihrer linearen Abmessungen:

$$V : V_0 = l^3 : l_0^3. \quad (52)$$

Setzt man in diese Proportion den Ausdruck für l aus Gleichung (50) ein, erhält man

$$V = V_0(1 + \alpha \cdot t)^3. \quad (53)$$

- Überzeugen Sie sich davon, daß bei der Berechnung der dritten Potenz des Binoms das quadratische und das kubische Glied gegenüber dem linearen Glied vernachlässigt werden können! Verwenden Sie hierzu die Tabelle der Ausdehnungskoeffizienten im Tafelwerk!

Nach dieser Vernachlässigung gilt nunmehr

$$V = V_0(1 + 3\alpha \cdot t). \quad (54)$$

Wenn der räumliche Ausdehnungskoeffizient

$$\gamma = 3\alpha \quad (55)$$

eingeführt wird, ergibt sich als Zusammenhang zwischen dem Volumen eines Körpers und der Temperatur die Gleichung für das

▷ Volumen eines Körpers

$$V = V_0 (1 + \gamma \cdot t). \quad (56)$$

- Wie hängt das Volumen eines Hohlraumes in einem festen Körper von der Temperatur ab?

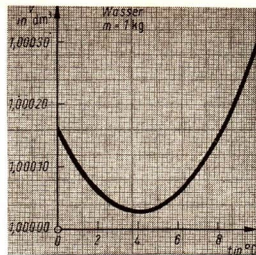
Die Volumenänderung von Flüssigkeiten

Auch für Flüssigkeiten gilt mit wenigen Ausnahmen in guter Näherung die Gleichung (56).

- Vergleichen Sie an Hand des Tafelwerks die Ausdehnungskoeffizienten von Flüssigkeiten und Festkörpern!

Bei der Bestimmung des Ausdehnungskoeffizienten von Flüssigkeiten (Bild 76/2) muß berücksichtigt werden, daß auch das Volumen des Gefäßes von der Temperatur abhängt.

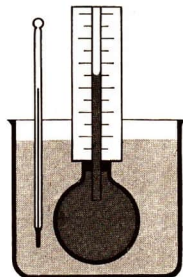
Diese Tatsache wird bei der Fertigung von Flüssigkeitsthermometern beachtet.

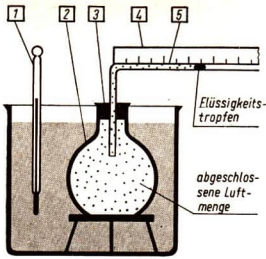


76/1 Das anomale Verhalten des Wassers zeigt die Kurve im Diagramm. Das Volumen von 1 kg Wasser ist als Funktion der Temperatur dargestellt.

Die besondere Temperaturabhängigkeit der Dichte des Wassers beruht darauf, daß sich zwei oder mehr Moleküle zu Gruppen mit verschiedenartigen Strukturen vereinigen. Zwischen 4°C und 0°C nimmt der Anteil solcher Molekülgruppen mit großem Volumenbedarf zu. Derartige Besonderheiten des thermischen Verhaltens treten auch bei einigen anderen Stoffen auf.

76/2





77/1 Messung der Ausdehnung eines Gases. Der Gasdruck ist unabhängig von der Temperatur gleich dem äußeren Luftdruck.

- 1 Thermometer
- 2 Rundkolben
- 3 Stopfen
- 4 Volumenskala
- 5 offenes Glasrohr

Die Volumenänderung der Gase

Gase lassen sich leicht komprimieren. Daher muß beim Messen der Temperaturabhängigkeit des Volumens ein gleichbleibender Druck herrschen.

Die durch den Flüssigkeitstropfen abgeschlossene Gasmenge (Luft) wird erwärmt. Hierbei werden mehrmals Temperatur und Volumen gleichzeitig abgelesen.

Ebenso wie bei festen Körpern und Flüssigkeiten besteht auch bei Gasen in sehr guter Näherung ein linearer Zusammenhang zwischen Volumen und Temperatur.

Diese bei konstantem Druck gültige Beziehung nennt man nach einem ihrer Entdecker **Volumen-Temperatur-Gesetz** von GAY-LUSSAC.

$$V = V_0(1 + \gamma \cdot t) \quad (57)$$

Die meisten Gase haben nahezu gleiche Ausdehnungskoeffizienten

$$\gamma \approx \frac{1}{273} \text{ grad}^{-1} \approx 0,00366 \text{ grad}^{-1}.$$

Größere Abweichungen vom Volumen-Temperatur-Gesetz treten bei großen Gasdichten und vor der Verflüssigung auf.

Weshalb braucht man die Volumenänderung des Gefäßes (Bild 77/1) nur bei sehr genauen Messungen zu berücksichtigen?

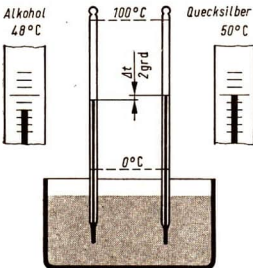
Temperaturskalen

Die Entwicklung des Temperaturbegriffs und der Temperaturmessung ist ein Beispiel dafür, wie ein physikalischer Begriff präzisiert und die Meßtechnik ständig vervollkommen wird.

Bei der Temperaturmessung mit Quecksilberthermometer wurde bisher vorausgesetzt, daß durch die gleichmäßige Skalenteilung auch eine gleichmäßige Teilung der Temperaturdifferenz 100 grad zwischen Eispunkt und Siedepunkt des Wassers erreicht wird.

Die Annahme, daß bei Quecksilber oder einer anderen Thermometerflüssigkeit eine lineare Beziehung zwischen Temperatur und Volumen gilt, ist aber willkürlich (Bild 77/2). Gase sind wegen der nahezu gleichen und außerdem sehr großen Ausdehnungskoeffizienten besser als Thermometer-substanzen geeignet. Um auch noch die geringen Unterschiede im thermischen Verhalten der Gase auszuschalten, bezieht man sich bei der Teilung der Temperaturdifferenz zwischen den Fixpunkten auf die Ausdehnung des idealen Gases. Das ideale Gas ist eine Modellsubstanz, bei der vom Eigenvolumen der Moleküle abgesehen wird. Es wird festgelegt, daß für das ideale Gas das Volumen-Temperatur-Gesetz (57) erfüllt sein soll.

77/2 Quecksilber- und Alkoholthermometer mit übereinstimmendem Fundamentabstand (z. B. 0 °C bis 100 °C) und gleichmäßiger Skale würden bei gleicher Temperatur verschiedene Anzeigen liefern.



Der Ausdehnungskoeffizient des idealen Gases ergibt sich, wenn man untersucht, welchem Wert der Ausdehnungskoeffizient realer Gase bei immer kleineren Dichten des Gases zustrebt. Für solche Messungen werden vor allem Wasserstoff und Helium herangezogen.

► **Ausdehnungskoeffizient des idealen Gases**

$$\gamma = \frac{1}{273,15} \text{ grad}^{-1}.$$

Das Volumen des idealen Gases würde bei der Temperatur $t_0 = -\frac{1}{\gamma} = -273,15^\circ\text{C}$ verschwinden (Bild 78/1). Diese Temperatur wird als **absoluter Nullpunkt** bezeichnet.

Aus experimentellen und theoretischen Untersuchungen geht hervor, daß der absolute Nullpunkt unerreichbar ist. Jedoch kann die Temperatur eines Körpers dem absoluten Nullpunkt beliebig nahe kommen.

Der absolute Nullpunkt ist Ausgangspunkt der **Kelvin-Temperaturskala**. Für Temperaturangaben in dieser Skale wird das Formelzeichen T verwendet. Die Einheit wird mit Grad Kelvin ($^\circ\text{K}$), Temperaturdifferenzen werden mit Grad (grad) bezeichnet.¹

Zwischen den Temperaturangaben in der Kelvin- und Celsius-Skale besteht die Beziehung

$$\Delta \frac{T}{^\circ\text{K}} = \frac{t}{^\circ\text{C}} + 273,15. \quad (58)$$

Für den Eispunkt gilt speziell $T_0 = 273,15^\circ\text{K}$.

Die auf das thermische Verhalten des idealen Gases gegründete Temperaturskale entspricht der **thermodynamischen Temperaturskale**, die in der Tafel der gesetzlichen Einheiten festgelegt wurde. Diese Skale kann auch unabhängig von Thermometersubstanzen definiert werden.

Das Volumen-Temperatur-Gesetz erhält eine einfachere Gestalt, wenn statt der Celsius-Skale die Kelvin-Temperaturskale herangezogen wird:

$$V = V_0(1 + \gamma \cdot t)$$

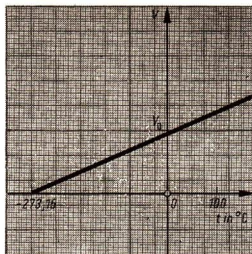
$$V = V_0 \left(1 + \frac{t}{T_0} \right)$$

$$V = V_0 \frac{T_0 + t}{T_0}$$

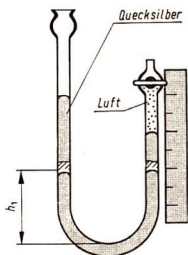
$$V = V_0 \cdot \frac{T}{T_0}$$

► **Volumen-Temperatur-Gesetz** $\frac{V}{V_0} = \frac{T}{T_0} \quad (59)$

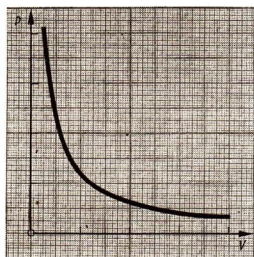
¹ In Größengleichungen (z.B. γ, R) können die Einheiten $^\circ\text{C}$ und $^\circ\text{K}$ durch grad ersetzt werden, da jede Temperatur auch als Temperaturdifferenz zum Nullpunkt der Skale betrachtet werden kann.



78/1 Temperaturabhängigkeit des Volumens beim idealen Gas



79/1



79/2 Druck-Volumen-Diagramm des idealen Gases bei konstanter Temperatur

Das Druck-Volumen-Gesetz

Mit der Versuchsanordnung Bild 79/1 kann gemessen werden, wie bei gleichbleibender Temperatur Druck und Volumen einer bestimmten Gasmenge voneinander abhängen.

Über einem Quecksilberbrett wird bei geöffnetem Hahn zunächst Quecksilber bis zur Höhe h_1 eingefüllt und dann der Hahn geschlossen.

Der auf die eingeschlossene Luftsäule wirkende Druck wird durch Zugießen von Quecksilber vergrößert. Wenn der Druck verdoppelt wird, ist das Volumen der Luftsäule nur noch halb so groß wie beim Anfangsdruck.

Für alle Gase gilt in sehr guter Näherung das **Druck-Volumen-Gesetz** von BOYLE:

Druck-Volumen-Gesetz $T = \text{konst.}$

$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2 \quad (60)$$

Im Abschnitt kinetische Wärmetheorie (S. 93) wird nachgewiesen, daß vom idealen Gas das Druck-Volumen-Gesetz streng erfüllt wird.

Die Zustandsgleichung des idealen Gases

Der Zustand von Gasen, Flüssigkeiten und festen Körpern wird mit den Größen Druck, Volumen und Temperatur beschrieben. Diese werden daher in der Wärmelehre als **Zustandsgrößen** bezeichnet. Für das ideale Gas bestehen zwischen den Zustandsgrößen die Beziehungen

$$V \sim T \quad \text{Bedingungen: } p = \text{konst.}; m = \text{konst.}$$

$$V \sim 1/p \quad \text{Bedingungen: } T = \text{konst.}; m = \text{konst.}$$

Die Bedingung $m = \text{konst.}$ ist erfüllt, weil das Druck-Volumen-Gesetz und das Volumen-Temperatur-Gesetz für abgeschlossene Gasmengen gelten.

Bei allen homogenen Körpern besteht zwischen Volumen und Masse der Zusammenhang

$$V \sim m \quad \text{Bedingungen: } p = \text{konst.}; T = \text{konst.}$$

Begründen Sie die zuletzt genannten Bedingungen!

Die drei für das Volumen geltenden Beziehungen lassen sich zusammenfassen:

$$V \sim m \frac{T}{p} \quad (61)$$

Werden jeweils zwei der Größen (m , p , T) als konstant betrachtet, ergeben sich wieder die einzelnen Proportionalitäten.

Durch Einführen einer Proportionalitätskonstanten R entsteht die Gleichung

$$V = R \cdot m \cdot \frac{T}{p}.$$

Diese bezeichnet man als

► **Zustandsgleichung des idealen Gases** $p \cdot V = m \cdot R \cdot T.$ (62)

Die Größe R wird **Gaskonstante** genannt. Die Gaskonstante kann aus vier zusammengehörigen Werten der Größen p , V , T , m berechnet werden.

$$R = \frac{p \cdot V}{T \cdot m}.$$
 (63)

Die Gaskonstante erhält man mit Hilfe der

Normalbedingungen $p_0 = 760 \text{ Torr} = 1 \text{ atm}$
für Gase $T_0 = 273,15 \text{ °K}.$

Statt m und V werden die molaren Größen m_{mo} und V_{mo} herangezogen.

Aus dem Chemieunterricht ist bekannt, daß bei diesen Normalbedingungen das molare Volumen

$V_{\text{mo}} = 22,4 \text{ m}^3 \cdot \text{kmol}^{-1}$ beträgt.

Die Gaskonstante hat damit folgende Form:

$$R = \frac{p_0 \cdot V_{\text{mo}}}{T_0} \cdot \frac{1}{m_{\text{mo}}}.$$
 (64)

Man bezeichnet das erste Glied der Gleichung (64) als

► **molare Gaskonstante** $R_0 = \frac{p_0 \cdot V_{\text{mo}}}{T_0}.$ (65)

Die molare Gaskonstante soll nun mit den oben angeführten Werten berechnet werden:

$$R_0 = \frac{1 \text{ atm} \cdot 22,4 \text{ m}^3 \cdot \text{kmol}^{-1}}{273,15 \text{ °K}}$$

$$R_0 = 0,0821 \frac{\text{atm} \cdot \text{m}^3}{\text{kmol} \cdot \text{°K}}$$

Gas	Molare Masse m_{mo} in $\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$	Gaskonstante R in $\text{kpm} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{grad}^{-1}$
Wasserstoff	2,016	420,5
Helium	4,003	211,81
Sauerstoff	32,000	26,49
Stickstoff	28,014	30,26
Kohlenoxid	28,009	30,28
Kohlendioxid	44,008	19,27

Tabelle 80/1

Durch die Umrechnung

$$1 \text{ atm} = 1,033 \text{ kp} \cdot \text{cm}^{-2} = \frac{1,033 \cdot 9,81 \text{ N}}{10^{-4} \text{ m}^2} \\ = 1,013 \cdot 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$$

erhält man die Ausdrücke

$$R_0 = 8314 \frac{\text{Ws}}{\text{kmol} \cdot \text{grad}} \quad (66)$$

$$R_0 = 848 \frac{\text{kpm}}{\text{kmol} \cdot \text{grad}} \quad (67)$$

Die Gaskonstante für ein beliebiges Gas (Tabelle 80/1) ist nach Gleichung (64)

$$R = R_0 \cdot \frac{1}{m_{m_0}} \quad (68)$$

Die Zustandsgleichung wird in Physik, Chemie und Technik vielfältig angewendet:

Eine Stahlflasche enthält bei 20 °C und 120 at Druck 40 l Sauerstoff. Wie groß ist die Masse m des Gases? (Man betrachte Sauerstoff genähert als ideales Gas.)

Gegeben:

Lösung:

$$t = 20 \text{ °C}$$

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

$$p = 120 \text{ at}$$

$$m = \frac{p \cdot V \cdot m_{m_0}}{R_0 \cdot T}$$

$$m = \frac{120 \cdot 10^4 \text{ kp} \cdot 40 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kmol} \cdot \text{grad} \cdot 32 \text{ kg}}{\text{m}^2 \cdot 8,48 \cdot 10^2 \text{ kpm} \cdot 293 \text{ grad} \cdot \text{kmol}}$$

Gesucht:

$$m = \frac{120 \cdot 10^4 \text{ kp} \cdot 40 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{kmol} \cdot \text{grad} \cdot 32 \text{ kg}}{\text{m}^2 \cdot 8,48 \cdot 10^2 \text{ kpm} \cdot 293 \text{ grad} \cdot \text{kmol}}$$

m

$$m = \underline{\underline{6,2 \text{ kg}}}$$

Die Zustandsgleichung ist ein Beispiel dafür, daß spezielle Gesetze in einem allgemeinen Gesetz zusammengefaßt werden können und in diesem als Sonderfälle enthalten sind.

Erläutern Sie diese Aussage!

Aus der Zustandsgleichung folgt außerdem noch eine weitere Beziehung, das **Druck-Temperatur-Gesetz** von GAY-LUSSAC: Der Druck des idealen Gases ist bei konstantem Volumen der Kelvin-Temperatur proportional.

$$p \sim T$$

Bedingungen: $V = \text{konst.}; m = \text{konst.}$

Druck-Temperatur-Gesetz

$$\frac{p}{p_0} = \frac{T}{T_0} \quad (69)$$

Wird in das Druck-Temperatur-Gesetz die Celsius-Temperatur eingeführt, ergibt sich

$$p = p_0 \left(1 + \frac{t}{T_0} \right) \\ p = p_0 (1 + \gamma \cdot t) \quad (70)$$

Der Druck p_0 muß in diesem Falle nicht 760 Torr betragen, bezieht sich aber auf den Zustand bei 0°C . γ wird in diesem Zusammenhange **Spannungskoeffizient** genannt. Aus einem Vergleich mit dem Druck-Volumen-Gesetz geht hervor:

Beim idealen Gas stimmen Ausdehnungs- und Spannungskoeffizient überein.

Für zwei Zustände einer abgeschlossenen Gasmenge gilt zwischen den Zustandsgrößen die

► **Zustandsgleichung**
$$\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2} \quad (71)$$
 der Gase

Diese spezielle Form der Zustandsgleichung wird besonders in der Chemie bei der Reduktion eines Gasvolumens auf den Normzustand angewendet.

■ Bei der Elektrolyse verdünnter Schwefelsäure wurden an der Anode 500 ml Sauerstoff aufgefangen. Die Temperatur betrug 20°C , der Luftdruck 746 Torr, die Höhe der Wassersäule im Gefäß 20 cm. Welches Volumen nimmt der Sauerstoff im Normzustand ein?

Gegeben:

$$V = 500 \text{ ml}$$

$$t_1 = 20^\circ\text{C}$$

$$p_L = 746 \text{ Torr}$$

$$p_W = 20 \text{ mm WS}$$

Gesucht:

$$V_0$$

Lösung:

Der Gasdruck ist gleich der Differenz von Luftdruck und Schweredruck der Wassersäule

$$p_1 = p_L - p_W$$

$$p_1 = \frac{746}{760} \cdot 1,033 \text{ at} - 20 \cdot 10^{-4} \text{ at}$$

$$p_1 = 1,012 \text{ at}$$

Aus der Zustandsgleichung folgt

$$V_0 = V_1 \cdot \frac{p_1}{p_0} \cdot \frac{T_0}{T_1}$$

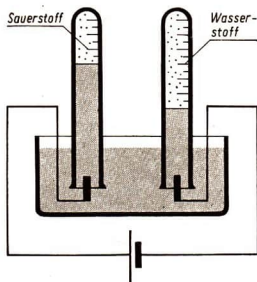
$$V_0 = 500 \text{ ml} \cdot \frac{1,012 \text{ at}}{1,033 \text{ at}} \cdot \frac{273,15^\circ\text{K}}{293,15^\circ\text{K}}$$

$$\underline{\underline{V_0 = 457 \text{ ml}}}$$

Zustandsänderungen

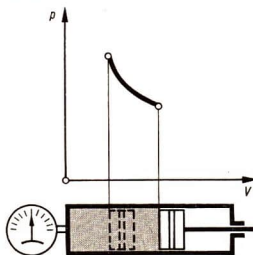
In der Wärmelehre werden Vorgänge, bei denen sich die Temperatur, das Volumen oder der Druck eines Körpers verändern, als **Zustandsänderungen** bezeichnet. In diesem Abschnitt wurden bereits spezielle Zustandsänderungen des idealen Gases untersucht, bei denen eine der drei Zustandsgrößen konstant blieb:

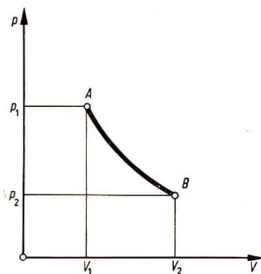
Konstante Zustandsgröße	Bezeichnung des Vorganges
Temperatur T	isotherme Zustandsänderung
Volumen V	isochore Zustandsänderung
Druck p	isobare Zustandsänderung



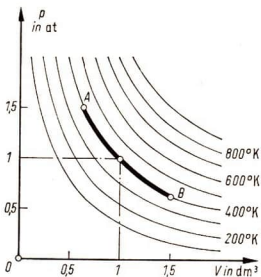
82/1

82/2 Aufnahme des p - V -Diagramms 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.



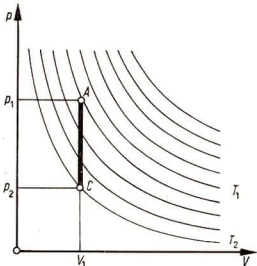


83/1



83/2 Isothermenschar für eine abgeschlossene Menge des idealen Gases, das bei $p = 1$ at und $T = 400^\circ\text{K}$ das Volumen $V = 1$ dm³ einnimmt.

83/3



Alle Zustandsgrößen können sich auch gleichzeitig ändern. Zustandsänderungen verschiedenster Art finden z. B. in Wärmekraftmaschinen, in Dampfzeugern sowie in der Atmosphäre statt. Solche Vorgänge im einzelnen zu untersuchen ist Aufgabe der technischen Thermodynamik und der Meteorologie.

Der Zusammenhang zwischen den Zustandsgrößen während einer Zustandsänderung kann in Diagrammen veranschaulicht werden (Bilder 82/2 und 83/1).

Bei diesen Darstellungen wird vorausgesetzt, daß die Zustandsänderung hinreichend langsam abläuft. Nur in diesem Falle besteht während der Zustandsänderung thermisches Gleichgewicht, d. h. im gesamten Körper herrschen ständig einheitliche Werte der Temperatur und des Drucks. Bei schnellen Zustandsänderungen treten dagegen Temperatur- und Druckunterschiede innerhalb des Körpers auf.

Durch die folgende Übersicht zu speziellen Zustandsänderungen des idealen Gases wird nochmals der Inhalt der Zustandsgleichung verdeutlicht.

Isotherme Zustandsänderung ($T = \text{konst.}$)

Anfangszustand A p_1, V_1, T_1
Endzustand B p_2, V_2, T_1

Während der isothermen **Expansion** wandert der Punkt, mit dem der Zustand der Gasmenge dargestellt wird, auf einem Hyperbelast von A nach B. (Die umgekehrte Zustandsänderung B – A ist eine isotherme Kompression). Die durchlaufene Kurve wird **Isotherme** genannt.

Werden in einem Diagramm (Bild 83/2) isotherme Zustandsänderungen einer abgeschlossenen Gasmenge für mehrere Temperaturen dargestellt, ergibt sich eine **Isothermenschar**. Mit Hilfe der Isothermenschar ist zu erkennen, welche Temperatur den Punkten im p - V -Diagramm zuzuordnen ist.

Isochore Zustandsänderung ($V = \text{konst.}$)

Anfangszustand A p_1, V_1, T_1
Endzustand C p_2, V_1, T_2

Im p - V -Diagramm (Bild 83/3) ergibt sich eine Parallele zur p -Achse. Mit Hilfe der dünn eingezeichneten Isothermenschar kann verfolgt werden, wie sich die Temperatur verändert.

Man erkennt, daß A – C eine isochore Abkühlung darstellt. Aus der Zustandsgleichung folgt für den Zusammenhang

zwischen Druck und Temperatur bei isochoren Zustandsänderungen

$$\frac{p}{T} = \frac{p_1}{T_1} \quad (72)$$

- Überprüfen Sie, ob im Diagramm diese Bedingung erfüllt ist!

Isobare Zustandsänderung

($p = \text{konst.}$)

Anfangszustand A p_1, V_1, T_1

Endzustand D p_1, V_2, T_2

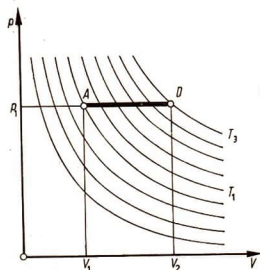
Die Darstellung im p - V -Diagramm (Bild 84/1) ergibt eine Parallele zur V -Achse.

Aus der Isothermenschar geht hervor, daß A – D eine isobare Erwärmung darstellt.

Nach der Zustandsgleichung gilt für isobare Zustandsänderungen des idealen Gases der Zusammenhang

$$\frac{V}{T} = \frac{V_1}{T_1} \quad (73)$$

Die mit den Zustandsänderungen eines Körpers verbundenen Energieumwandlungen werden im Abschnitt Kinetische Gas- und Wärmetheorie untersucht.



84/1

Zusammenfassung

- Geben Sie die mit einer eingeklammerten Ziffer versehenen Zusammenhänge in Worten wieder!

(Beispiel für (8): Bei konstantem Volumen verhalten sich die Drücke einer abgeschlossenen Gasmenge wie ...).

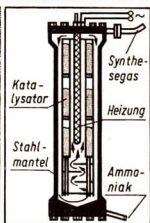
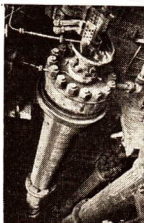
Benennung	Volumen-Temperatur-Gesetz	Druck-Temperatur-Gesetz	Druck-Volumen-Gesetz
Zustandsänderung	isobar	isochor	isotherm
Bedingung	$p = \text{konst.}$	$V = \text{konst.}$	$T = \text{konst.}$
Formulierung für einen Zustand	$V = V_0(1 + \gamma \cdot t) \quad (1)$	$p = p_0(1 + \gamma \cdot t) \quad (2)$	$p \cdot V = \text{konst.} \quad (3)$
Proportionalität	$V \sim T \quad (4)$	$p \sim T \quad (5)$	$p \sim \frac{1}{V} \quad (6)$
Formulierung für zwei Zustände	$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (7)$	$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (8)$	$\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1} \quad (9)$

Anwendungsbeispiele zu den Gasgesetzen

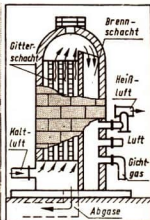
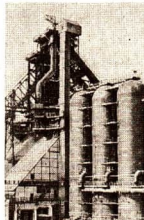
Thermik. Bei intensiver Sonneneinstrahlung wird die bodennahe Luft sehr stark erwärmt. Die Luft dehnt sich aus und steigt infolge ihrer verkleinerten Dichte empor. In der dabei auftretenden thermischen Luftströmung finden viele Segelvögel (Bussard, Adler, Geier, Storch u. a.) und die Segelflieger den zum Höhengewinn erforderlichen Aufwind.



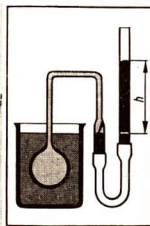
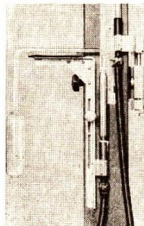
Ammoniak-Kontaktverfahren. In der chemischen Industrie laufen viele Reaktionen bei hohen Temperaturen und Drücken ab, damit eine maximale Ausbeute erzielt wird. Die verwendeten Gase unterliegen dabei verschiedenen Zustandsänderungen, die mit Hilfe der Gasgesetze erfaßt werden können.

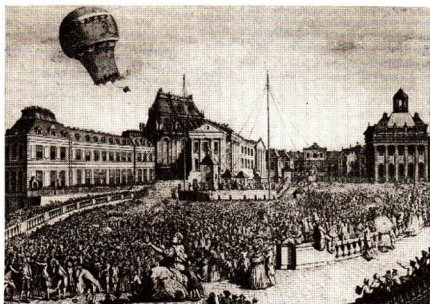


Winderhitzer. Die vom Gebläse dem Hochofen zugeführte Verbrennungsluft wird im Winderhitzer bei gleichbleibendem Druck auf etwa 800 °C erwärmt. Das Volumen der Luft nimmt bei dieser isobaren Zustandsänderung zu (↗ Aufgabe 53).



Gas thermometer. Der gasgefüllte Rundkolben wird zunächst auf die Temperatur $T_0 = 273,15 \text{ K}$ gebracht und danach in den Stoff, 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. Die Temperatur kann dann nach Gleichung 69 errechnet werden.





Kinetische Wärmetheorie

Der erste bemannte Ballon erhob sich im Jahre 1783 vom Erdboden. Die in der Kugel enthaltene Luft wurde erwärmt. Hierbei verkleinerte sich ihre Dichte, bis schließlich das Gewicht des Ballons mit Füllung und Gondel kleiner als das Gewicht der verdrängten Luft wurde.

In dieser Zeit war noch die Vorstellung vorherrschend, die Wärme sei eine unwägbar Substanz, das *Caloricum*. Erst im folgenden Jahrhundert erkannte man endgültig die Bewegung der Moleküle als das Wesen der Wärme.

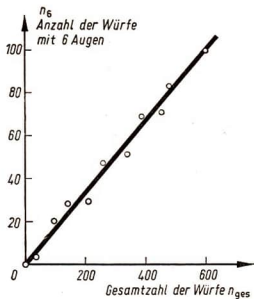
Makrophysikalische und mikrophysikalische Betrachtungsweise

Die Aussagen über den Temperaturbegriff und die thermischen Eigenschaften der Körper gingen bisher im wesentlichen aus einer **makrophysikalischen Betrachtungsweise** hervor:

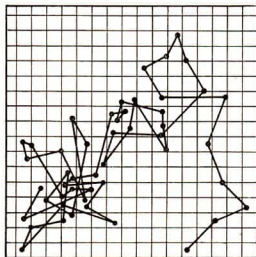
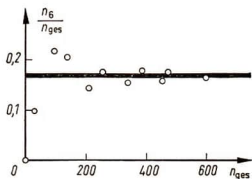
Bei der mathematischen Darstellung der mit Hilfe von Experimenten aufgefundenen Gesetzmäßigkeiten wurden Zustandsgrößen und Materialkonstanten herangezogen, die sich jeweils auf den gesamten betrachteten Körper beziehen. Die **Struktur** des Körpers blieb unberücksichtigt.

Ein wesentlich tieferes Verständnis der Begriffe Temperatur und Wärme vermittelt eine *mikrophysikalische Betrachtungsweise*. Das mechanische und thermische Verhalten der Körper wird durch die Eigenschaften und die Bewegung ihrer Moleküle erklärt. Das hiermit umrissene Teilgebiet der Physik wird **kinetische Wärmetheorie** genannt. In dieser Theorie wird gezeigt, daß die Gesetze der Wärmelehre auf mechanische Gesetze zurückführbar sind.

Makroskopische Körper bestehen aus einer überaus großen Anzahl von Molekülen oder Atomen. Für ein Molekül ist der Bewegungszustand, d. h. Ort und Geschwindigkeit in einem bestimmten Zeitpunkt, grundsätzlich nur mit begrenzter Genauigkeit feststellbar. Um das Verhalten aller Moleküle eines Körpers quantitativ zu erfassen, müssen deshalb Hilfsmittel der Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik herangezogen werden. Vor allem wird mit **Mittelwerten** molekularer Größen, z. B. der Geschwindigkeit der

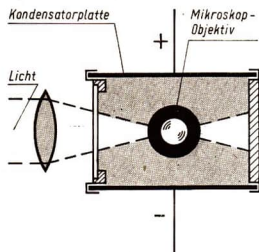


87/1 Statistische Gesetze gelten z. B. beim Würfeln: Je mehr Würfe mit einem Würfel ausgeführt werden, desto weniger weicht die Anzahl der Würfe mit einer bestimmten Augenzahl (z. B. 6) von $\frac{1}{6}$ der Gesamtzahl der Würfe ab.



87/2 Die Lage eines Teilchens bei der Brownschen Bewegung ist in gleichen Zeitabständen registriert worden. Dazwischen bewegt sich das Teilchen nicht geradlinig. Der Streckenzug ist daher nur genähert die Bahnlinie.

87/3



Moleküle, gearbeitet. Auf dieser Grundlage gelangt man zu Gesetzen statistischen Charakters. Diese sind um so genauer erfüllt, je größer die betrachtete Teilchenzahl ist. Wie in jeder anderen wissenschaftlichen Theorie spielen auch im Rahmen der kinetischen Wärmetheorie Modelle eine wichtige Rolle. Als Beispiel sei der Modellbegriff des idealen Gases angeführt. Derartige Modelle spiegeln wesentliche Züge der Wirklichkeit wider und ermöglichen ein tieferes Verständnis für die physikalischen Begriffe und Erscheinungen.

Die Brownsche Bewegung

Wenn feinste, in einer Flüssigkeit oder in einem Gas schwebende Körper mit dem Mikroskop betrachtet werden, erkennt man eine unregelmäßige Bewegung, die nach ihrem Entdecker Brownsche Bewegung genannt wird. Man bemerkt, daß die kleinsten Körper am lebhaftesten umherzittern.

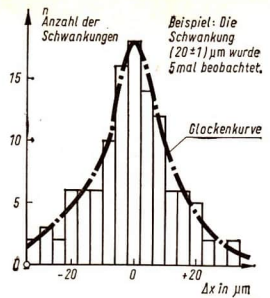
Die Bewegung kleiner Öltröpfchen in Luft kann in folgender Weise beobachtet werden:

Mit einem Zerstäuber werden Tröpfchen erzeugt und in eine kleine Kammer gesaugt. An den von der Seite her beleuchteten Tröpfchen wird das Licht gebeugt. Sie erscheinen bei einer Betrachtung mit dem Mikroskop als helle Pünktchen auf dunklem Grunde. Die Tröpfchen sind durch den Zerstäubungsvorgang elektrisch geladen. Durch das elektrische Feld zwischen den Kondensatorplatten wird verhindert, daß die beobachteten Tröpfchen unter dem Einfluß der Schwerkraft absinken.

Die Brownsche Bewegung wird durch die ständigen Stöße der Flüssigkeits- oder Gasmoleküle gegen die im Mikroskop sichtbaren Körper verursacht. Die Anzahl dieser Stöße in einem bestimmten Zeitabschnitt, die Stoßrichtungen und Stoßkräfte unterliegen ständigen Schwankungen. Diese sind um so größer, je weniger Moleküle das Teilchen gleichzeitig treffen, d. h. je kleiner das Teilchen ist.

Durch die resultierenden Stoßkräfte wird das Teilchen in ständig wechselnden Richtungen beschleunigt und wieder verzögert.

Die Brownsche Bewegung liefert so gleichsam ein Bild der unsichtbaren Molekülbewegung.



Die Diffusion

Moleküle verschiedener Gase, die sich in einem Raum befinden, verteilen sich im Laufe der Zeit ohne äußeren Einfluß immer gleichmäßiger über das gesamte Volumen. Ein solcher Vorgang wird **Diffusion** genannt.

- Bei der Diffusion dringen die Moleküle eines Körpers infolge ihrer ständigen Bewegung in einen angrenzenden Körper ein.

Die Diffusion ist auch bei Flüssigkeiten, vor allem bei Lösungen zu beobachten. Wegen der dichten Packung der Flüssigkeitsmoleküle laufen diese Vorgänge sehr langsam ab (Bild 88/2).

Bei festen Körpern ist die Diffusion meist auf eine dünne Grenzschicht beschränkt.

88/1 Es ist dargestellt, wie oft jede Veränderung Δx der x -Koordinate eines Körpers bei 120 Messungen auftrat. Die Glockenkurve läßt vermuten, daß die Schwankungen einer statistischen Gesetzmäßigkeit unterliegen. Diese wurde von ALBERT EINSTEIN im Jahre 1905 erkannt und zur Bestimmung der Teilchenmenge eines Gases genutzt.

26

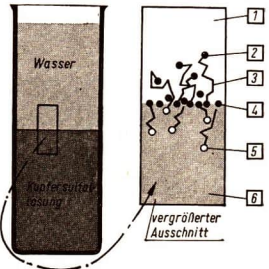
- ▼ Eine konzentrierte wäßrige Kupfersulfatlösung (6) wird mit reinem Wasser (1) übersichtet. Im Laufe mehrerer Wochen verteilen sich die gelösten Teilchen (2 und 5) in der gesamten Flüssigkeit. Die Teilchen treten auf unregelmäßigen Bahnen (3) durch die Grenzschicht (4).

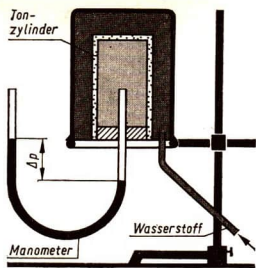
Diffusionsvorgänge treten auch bei elektrisch geladenen Teilchen auf. Zum Beispiel entsteht in Halbleiterdioden die Grenzschicht zwischen p- und n-leitendem Bereich durch die Diffusion der Elektronen und Defektelektronen.

Der folgende Versuch gibt Einblick in den Diffusionsvorgang bei Gasen.

Um zu verhindern, daß die Diffusion durch Strömungsvorgänge gestört wird, trennt man die beiden Gase durch poröse Wände.

88/2





89/1

An einen unglasierten Tonzylinder ist ein Flüssigkeitsmanometer angeschlossen. Zunächst herrscht im Zylinder der gleiche Luftdruck wie in der Umgebung. Über den Tonzylinder wird ein Becherglas gestülpt. Leitet man in das Glas kurzzeitig Wasserstoff ein, zeigt das Manometer eine Druckerhöhung im Zylinder an, die rasch wieder zurückgeht. Wird danach das Becherglas entfernt, entsteht im Tonzylinder für kurze Zeit ein Unterdruck.

Der Überdruck beim ersten Teil des Versuches 27 entsteht, weil zunächst in gleichen Zeitabschnitten mehr Wasserstoffmoleküle in den Zylinder als Moleküle der Luftbestandteile nach außen gelangen. Nach kurzer Zeit haben sich innerhalb und außerhalb des Zylinders Wasserstoff und Luft in gleichem Verhältnis gemischt. Der Druckunterschied hat sich ausgeglichen.

In beiden Richtungen diffundiert während gleicher Zeitabschnitte die gleiche Anzahl von Molekülen des Wasserstoffs und der Luft.

Erklären Sie, wie der Unterdruck nach dem Abheben des Becherglases entsteht!

Die Ursache für das unterschiedliche Verhalten der Gase besteht darin, dass die leichten Moleküle des Wasserstoffs im Mittel größere Geschwindigkeiten als die schwereren Moleküle der Luftbestandteile aufweisen. Diese Erklärung wird durch das Ergebnis einer theoretischen Untersuchung der Molekülgeschwindigkeit (↗ Seite 94) bestätigt.

Die Diffusion wird vielfach technisch genutzt.

Als Beispiele seien die Zuckergewinnung und die Herstellung von Halbleiterbauelementen sowie von „Zementstahl“, Temperguß und das Einsatzhärten genannt.

Große Bedeutung haben Diffusionsvorgänge für die Isotopentrennung. Schließlich spielt die Diffusion bei der Nährstoffaufnahme der Lebewesen sowie bei der Atmung eine wichtige Rolle.

Die molekulare Struktur der Gase

Aus den mechanischen Eigenschaften der Gase, der Brownschen Bewegung und der Diffusion sind wesentliche Erkenntnisse über den molekularen Aufbau der Gase abzuleiten. Diese bilden die Grundlage der **kinetischen Gastheorie**.

Die Abstände der Moleküle sind bei Gasen im Mittel sehr viel größer als bei Flüssigkeiten und Festkörpern. Deshalb wirken nur sehr kleine Kohäsionskräfte.

Die Moleküle sind im Gasvolumen gleichmäßig verteilt, wenn keine äußeren Kräfte, z. B. die Schwerkraft, wirksam sind.

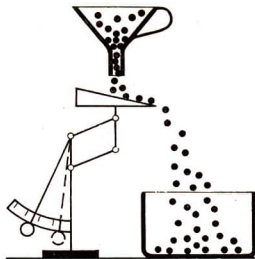
Die Stöße der Moleküle gegen die Gefäßwand äußern sich makroskopisch als Gasdruck (Bild 90/1). Bei den häufigen Zusammenstößen der Moleküle ändern sich im allgemeinen Betrag und Richtung der Geschwindigkeit beider Stoßpartner. Aus diesem Grunde streuen die Beträge der Geschwindigkeit aller Moleküle über einen großen Bereich. Alle Richtungen der Geschwindigkeit sind gleich häufig vertreten.

Ferner ist noch zu beachten, daß bei den Molekülen außer der fortschreitenden Bewegung auch Drehbewegungen und innere Schwingungen auftreten können.

Mit kleinen Stahlkugeln kann ein einfaches Modell eines Gases hergestellt werden (Bild 90/2).

Durch das Auf- und Abwärtsbewegen des Kolbens (5) werden die Stahlkugeln (4) in unregelmäßige Bewegung gesetzt. Sie demonstrieren die Bewegung von Gasmolekülen.

An der Skale (1) kann eine „Moleküldruckkraft“ abgelesen werden.



90/1 Modellversuch zum Entstehen des Gasdruckes. Unter dem Hagel der auf den Briefwaagenteller fallenden Stahlkugeln zeigt die Waage eine konstante Kraft an. Diese Kraft nimmt zu, wenn die Kugeln mit größerer Geschwindigkeit auftreffen oder eine größere Masse haben.

- Wie kann mit dem Modell in Bild 90/2 die Brownsche Bewegung dargestellt werden?

Zwischen der Bewegung der Moleküle eines Gases und der Wärme besteht ein enger Zusammenhang. Um diesen Zusammenhang mechanischer und thermischer Größen genauer betrachten zu können, ist es notwendig, Abmessung, Anzahl und Geschwindigkeit der Moleküle zu bestimmen.

Atome sind Teilchen, deren Durchmesser im Bereich von 10^{-7} mm liegt. Für Gasmoleküle gilt der gleiche Bereich, da sie aus nur wenigen Atomen bestehen.

Die Anzahl der Moleküle in der Masse m_K eines Körpers hängt ab von der Art des Stoffes und damit von der Massenzahl A der Atome, deren Einheit $u = 1,66 \cdot 10^{-27}$ kg ist. Außerdem ist die Anzahl der Atome im Molekül zu berücksichtigen, die aus der Molekulargleichung hervorgeht.

- Wie groß sind die Masse m_x eines Sauerstoffmoleküls (O_2) und die Anzahl N der Moleküle von 1 kg Sauerstoff?

Gegeben:

$$A = 16$$

$$m_K = 1 \text{ kg}$$

$$u = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Gesucht:

$$m_x$$

$$N$$

Lösung:

$$m_x = \sum A \cdot u$$

$$m_x = 2 \cdot 16 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

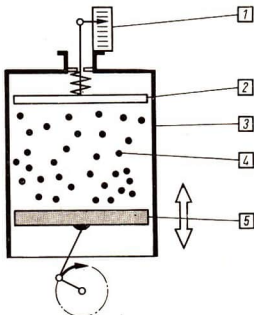
$$m_x = 5,3 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$$

$$N = \frac{m_K}{m_x}$$

$$N = \frac{1 \text{ kg}}{5,3 \cdot 10^{-26} \text{ kg}}$$

$$N = 1,88 \cdot 10^{25}$$

90/2 1 Skale zum Anzeigen eines Druckes,
2 federnd gelagerter Zylinderboden,
3 Zylinder,
4 Molekülmodell,
5 Kolben zum Erzeugen einer Molekülbewegung im Modellgas



Die Grundgleichung der kinetischen Gastheorie

Mit dem Modellversuch nach Bild 90/1 ist erläutert worden, wie infolge ständiger Stöße der Moleküle die Wand des Gefäßes eine gleichbleibende Kraft erfährt. Diese Druckkraft soll anhand einfachster Modellvorstellungen für ein Gas berechnet werden. Die Gasmoleküle werden hierbei als Punktmassen betrachtet, die keine Kräfte aufeinander ausüben und sich ungeordnet bewegen. Da das Eigenvolumen der Moleküle vernachlässigt wird, kann auch von Zusammenstößen abgesehen werden. Durch diese Annahmen wird der Modellbegriff „ideales Gas“ definiert. Dieses Modell spiegelt in guter Näherung auch die Eigenschaften realer Gase wider, wenn deren Zustand hinreichend weit von der Verflüssigung entfernt ist.

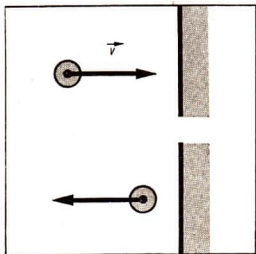
Für die Rechnung wird das Modell noch weiter spezialisiert und vereinfacht:

In einem Hohlwürfel der Kantenlänge l seien N Gasmoleküle enthalten. Diese mögen die gleiche Masse m_x und den gleichen Betrag der Geschwindigkeit v aufweisen. Es soll angenommen werden, daß sich je ein Drittel aller Moleküle parallel zu den drei Raumachsen des Würfels bewegt, so daß sich ständig $N/6$ Moleküle nach jeder Seitenfläche hin bewegen.

Der einheitliche Betrag der Geschwindigkeit ist als ein Mittelwert zu betrachten; die Annahme einer gleichgerichteten Bewegung für je $N/6$ der Moleküle entspricht einer Zerlegung der Geschwindigkeiten aller Moleküle in Komponenten parallel zu den Würfelkanten.

Schließlich wird noch vorausgesetzt, daß sich die kinetische Energie eines Moleküls beim Stoß gegen die Wand des Gefäßes nicht verändert. Es wird somit von dem ständigen Energieaustausch zwischen den Molekülen des Gases und der festen Wand abgesehen (Bild 91/1).

91/1



Nach diesen vorbereitenden Betrachtungen wird die Rechnung in drei Teilschritten ausgeführt.

1. Welche Kraft erfährt die Seitenfläche des Würfels beim senkrechten Stoß eines einzelnen Moleküls?

Während der sehr kurzen Zeitdauer des Stoßvorganges wird das Molekül zuerst auf die Geschwindigkeit Null verzögert und danach bis zum ursprünglichen Betrag der Geschwindigkeit beschleunigt. Die Geschwindigkeitsrichtung wird umgekehrt, die Geschwindigkeitsänderung beträgt $2v$. Vereinfachend werde angenommen, daß während des Stoßes das Molekül eine konstante Beschleunigung mit dem Betrag a erfährt.

$$\text{Beschleunigung} = \frac{\text{Geschwindigkeitsänderung}}{\text{Stoßdauer}}$$

$$a = \frac{2v}{T} \quad (74)$$

Um diese Beschleunigung hervorzurufen, muß von der Wand auf die Moleküle die Kraft $F_0 = m_x \cdot a$ ausgeübt werden. Nach dem Wechselwirkungsgesetz (Mechanik Kl. 9) erfährt die Wand durch das Molekül eine Gegenkraft gleichen Betrages

$$F_0 = m_x \frac{2 \cdot v}{T} \quad (75)$$

2. Wieviel Moleküle ΔN stoßen in der Zeitspanne Δt auf eine Seitenfläche des Würfels? (Δt sei viel größer als die Stoßdauer).

Alle $N/6$ Moleküle, die sich zur Seitenfläche hin bewegen, legen während Δt die Strecke $\Delta s = v \cdot \Delta t$ zurück. Die Wand kann im betrachteten Zeitintervall nur von jenen Molekülen erreicht werden, deren Abstand von der Wand nicht größer als Δs ist.

Die während Δt auf die Wand treffenden Moleküle befinden sich somit in einem Teilvolumen des Würfels

$$\Delta V = A \cdot \Delta s$$

$$\Delta V = A \cdot v \cdot \Delta t$$

$$\Delta V = l^3 \cdot v \cdot \Delta t.$$

Da die Moleküle im Gesamtvolumen gleichmäßig verteilt sind, erhält man ΔN aus der Proportion

$$\Delta N : \frac{N}{6} = \Delta V : V \quad (76)$$

$$\Delta N = \frac{N}{6} \cdot \frac{v \cdot \Delta t}{l} \quad (77)$$

3. Welche Druckkraft wird von den ΔN Molekülen hervorgerufen, die während der Zeit Δt auf eine Seitenfläche des Würfels treffen?

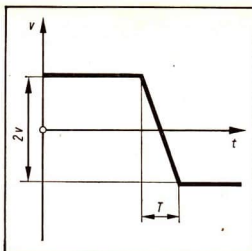
Auch in sehr kurzen Zeitabschnitten Δt finden noch sehr viele Stöße statt (s. Aufgabe 71). Daher treffen auch während der Dauer eines Stoßes zahlreiche Moleküle gleichzeitig auf die Wand. Die Anzahl $\Delta N'$ der gleichzeitig ablaufenden Stoßvorgänge ergibt sich aus der Proportion

$$\Delta N' : \Delta N = T : \Delta t \quad (78)$$

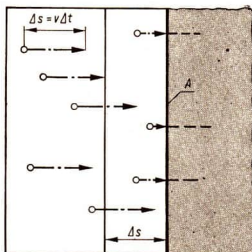
$$\Delta N' = \Delta N \cdot \frac{T}{\Delta t} \quad (79)$$

Hieraus folgt für die gesuchte Gesamtkraft

$$F = F_0 \cdot \Delta N' \quad (80)$$

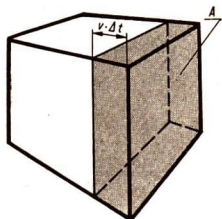


92/1



92/2

92/3



Durch Einsetzen der oben berechneten Werte für $\Delta N'$ und F_0 erhält man

$$F = \frac{N \cdot m_x \cdot v^2}{3 l} \quad (81)$$

Division durch die Fläche $A = l^2$ ergibt den Druck, der auf die Seitenflächen des Würfels ausgeübt wird:

$$p = \frac{N}{3} \cdot \frac{m_x \cdot v^2}{l^3} \quad (82)$$

Aus dieser Gleichung erhält man die

Grundgleichung der kinetischen Gastheorie

$$p = \frac{N}{3} \cdot \frac{m_x \cdot v^2}{V} \quad (83)$$

Wird jeweils nur eine der rechts stehenden Größen als veränderlich betrachtet, folgen aus der Grundgleichung die Aussagen:

Der Gasdruck ist proportional der Anzahl, Masse und dem Quadrat der Geschwindigkeit der Moleküle.

Der Gasdruck ist umgekehrt proportional dem Gasvolumen.

Diese zweite Beziehung ist das Druck-Volumen-Gesetz. An die Stelle der makroskopischen Bedingung konstanter Temperatur tritt die Bedingung konstanter Geschwindigkeit der Moleküle.

Durch diese Übereinstimmung mit der Erfahrung werden die Grundgedanken der kinetischen Gastheorie eindrucksvoll bestätigt. Zugleich ist hieraus zu schließen, daß die Grundgleichung auch bei beliebiger Form des Gefäßes und ungeordneter Bewegung der Moleküle gültig ist. Es kann hier nur mitgeteilt werden, daß die einheitliche Geschwindigkeit der Moleküle in diesem Falle durch die Wurzel aus dem arithmetischen Mittel aller Geschwindigkeitsquadrate zu ersetzen ist. Diese soll abkürzend mittlere Geschwindigkeit genannt werden.

Die Geschwindigkeit der Moleküle

Mit Hilfe der Grundgleichung kann die mittlere Geschwindigkeit der Moleküle aus makroskopischen Größen berechnet werden. Hierzu wird das Produkt $N \cdot m_x$ durch die Masse m der abgeschlossenen Gasmenge ersetzt:

$$p = \frac{1}{3} \cdot \frac{m}{V} \cdot v^2 \quad (84)$$

Wird diese Gleichung nach der Geschwindigkeit v der

Moleküle aufgelöst, ist das gestellte Ziel erreicht:

$$v = \sqrt{\frac{3p \cdot V}{m}} \quad (85)$$

Der Radikand kann mit Hilfe der Zustandsgleichung $p \cdot V = m \cdot R \cdot T$ umgeformt werden. Man erhält hierdurch

$$v = \sqrt{3R \cdot T}. \quad (86)$$

Diese Gleichung besagt:

- ▷ Für ein bestimmtes Gas ist die mittlere Geschwindigkeit der Moleküle der Wurzel aus der Kelvin-Temperatur proportional.

Mit Gleichung (68) gilt außerdem:

- ▷ Bei konstanter Temperatur ist die mittlere Geschwindigkeit der Moleküle der Wurzel aus der molaren Masse umgekehrt proportional.

$$v \sim \frac{1}{\sqrt{m_{\text{mo}}}} \quad \text{oder} \quad v_1 : v_2 = \sqrt{m_{\text{mo}_2}} : \sqrt{m_{\text{mo}_1}} \quad (87)$$

Durch diesen Zusammenhang werden die Folgerungen aus dem Diffusionsversuch Bild 89/1 bestätigt.

- Berechnen Sie die mittlere Geschwindigkeit von Sauerstoffmolekülen bei Zimmertemperatur!

Gegeben:

$$R = 8314 \frac{\text{Ws}}{\text{kmol} \cdot \text{grad}} \cdot \frac{1}{m_{\text{mo}}}$$

$$T = 291 \text{ grad}$$

$$1 \text{ Ws} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2}$$

Lösung:

$$v = \sqrt{3R \cdot T}$$

$$v = \sqrt{\frac{3 \cdot 8314 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot 291 \text{ grad} \cdot \text{kmol}}{\text{s}^2 \cdot \text{kmol} \cdot \text{grad} \cdot 32 \text{ kg}}}$$

$$v = \underline{\underline{476 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}}$$

Gesucht:

v

Das Ergebnis liegt in der Größenordnung der Schallgeschwindigkeit in Luft!

Bild 94/1 gibt einen Einblick in die wirkliche Geschwindigkeitsverteilung der Moleküle.

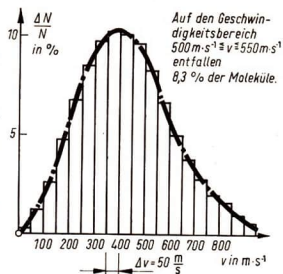
Energie der Moleküle und Temperatur

Wird die Grundgleichung der kinetischen Gastheorie

$$p \cdot V = \frac{1}{3} N \cdot m_x \cdot v^2 \quad (88)$$

mit der Zustandsgleichung des idealen Gases

$$p \cdot V = \frac{m \cdot R_0}{m_{\text{mo}}} T$$



94/1 Die Streifenlänge zeigt, wieviel Prozent aller Moleküle den einzelnen Geschwindigkeitsbereichen angehören. Werden die Geschwindigkeitsbereiche immer kleiner gewählt, entsteht schließlich die eingezeichnete Kurve.

verknüpft, gewinnt man eine vertiefte Einsicht in das Wesen des Temperaturbegriffs. Durch Gleichsetzen der rechten Seiten beider Gleichungen erhält man nach einer kleinen Umformung

$$\frac{1}{2} \cdot m_x \cdot v^2 = \frac{3}{2} \cdot \frac{m \cdot R_0 \cdot T}{N \cdot m_{\text{mo}}} \quad (89)$$

Auf der rechten Seite dieser Gleichung kann zunächst $\frac{m}{N} = \frac{m_{\text{mo}}}{L}$ gesetzt werden. Der Quotient aus der molaren Gaskonstanten R_0 und der Loschmidtschen Konstanten L wird **Boltzmannkonstante** $k = \frac{R_0}{L}$ genannt.

Mit den oben angegebenen Zahlenwerten erhält man die

Boltzmannkonstante

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Ws} \cdot \text{grad}^{-1}. \quad (90)$$

Da die Boltzmannkonstante nicht von der Stoffart abhängt, wird sie als **universelle Konstante** bezeichnet.

Es gilt nunmehr

$$\frac{1}{2} m_x \cdot v^2 = \frac{3}{2} k \cdot T. \quad (91)$$

Die mittlere kinetische Energie der Moleküle des idealen Gases ist der Kelvin-Temperatur proportional.

Durch diese Gleichung wird die Temperatur vollständig auf molekulare Größen zurückgeführt. Zugleich erkennt man die energetische Bedeutung des absoluten Nullpunktes.

Wärmemenge und innere Energie

Aus den Erkenntnissen über das Wesen der Temperatur ist zu folgern, daß bei einer Wärmezufuhr die kinetische Energie der Moleküle des idealen Gases vergrößert wird. Beim Erwärmen von realen Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern müssen wegen der zwischenmolekularen Kräfte auch Änderungen der potentiellen Energie der Moleküle berücksichtigt werden. Damit wird die grundlegende Aussage der kinetischen Wärmetheorie verständlich:

Wird einem Körper eine Wärmemenge zugeführt, so vergrößert sich die mechanische Energie seiner Moleküle.

Die kinetische Wärmetheorie vertieft somit die Erkenntnis, daß die Wärme eine Form der Energie ist.

Jeder erwärmte Körper kann nunmehr als Energiespeicher betrachtet werden. Sein Energievorrat wird als **innere Energie** W_i bezeichnet.

► **Die innere Energie eines Körpers ist gleich der Summe der Energien aller Moleküle.**

Außer der mechanischen Energie muß z. B. bei chemischen Reaktionen auch die Bindungsenergie berücksichtigt werden. Die innere Energie ist eine neue Zustandsgröße:

Jedem Zustand des Körpers, beschrieben durch Druck, Volumen und Temperatur ist ein bestimmter Wert der inneren Energie zugeordnet.

Besonders leicht kann die innere Energie des idealen Gases berechnet werden. Diese ist gleich der Summe der kinetischen Energien der Moleküle:

$$W_i = N \cdot \frac{m_x}{2} \cdot v^2$$

Mit Hilfe der Grundgleichung der kinetischen Gastheorie erhält man hieraus die

► **innere Energie**
$$W_i = \frac{3}{2} m \cdot R \cdot T. \quad (92)$$

Die innere Energie des idealen Gases ist proportional der Temperatur und unabhängig vom Volumen und vom Druck des Gases.

Der berechnete Wert der inneren Energie des idealen Gases gilt in sehr guter Näherung auch für einatomige reale Gase. Bei mehratomigen Gasen ist zu berücksichtigen, daß auch Drehbewegungen der Moleküle zur kinetischen Energie beitragen.

Für zweiatomige Gase gilt

$$W_i = \frac{5}{2} m \cdot R \cdot T. \quad (93)$$

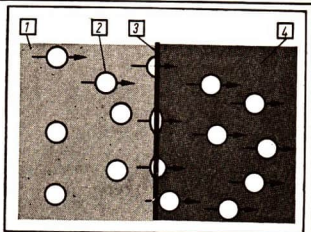
Die Untersuchungen zur inneren Energie werden im Abschnitt 1. Hauptsatz der Wärmelehre weitergeführt.

Durch den hier beendeten Abschnitt des Lehrbuches wurde ein Einblick in das Wesen einer wissenschaftlichen Theorie gegeben. Es wurde gezeigt, wie zahlreiche Beobachtungsergebnisse und Erfahrungen mit Hilfe eines Denkmodells zusammengefaßt werden können. Aus der theoretischen Untersuchung der Eigenschaften dieses Modells gingen neue Erkenntnisse über das Wesen physikalischer Begriffe und Gesetzmäßigkeiten hervor. Diese Erkenntnisse fordern wiederum Überprüfungen in der Praxis, d. h. zunächst durch Experimente und Vergleiche mit schon vorhandenem Erfahrungsmaterial. Auf dieser Grundlage sind dann die Anwendungen in der Technik und Produktion möglich.

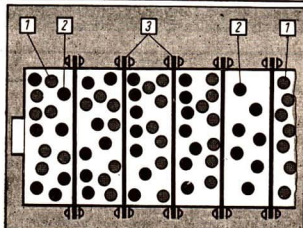
Es ist zu erkennen, daß eine physikalische Theorie nicht einfach eine Beschreibung der Naturvorgänge liefert, sondern überhaupt erst tiefere Einblicke in das Naturgeschehen und die inneren Zusammenhänge der Wirklichkeit ermöglicht.

Diffusionsvorgang. Leicht bewegliche Teilchen (2), die sich in einem Körper (1) befinden, sind in der Lage, in einen anderen Körper (4) überzutreten.

Infolge der thermischen Bewegung der Teilchen und der molekularen Struktur der Körper ist ein Hindurchwandern durch die Körper möglich. Zwischen beiden Körpern liegt die Grenzschicht (3). Man bezeichnet sie entsprechend ihrer Funktion als Membran, Zellwand, Oberfläche (bei festen oder flüssigen Körpern).

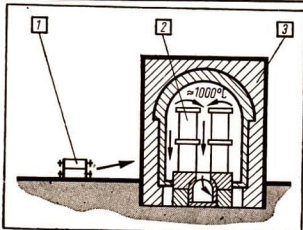


Isotopentrennung. Leichte Moleküle (1) diffundieren schneller als schwere (2), da die Geschwindigkeit ihrer thermischen Bewegung größer ist. Bei Isotopen Atomen wie z. B. ^{235}U und ^{238}U ist dieser Unterschied nur gering, aber man kann ihn nutzen, um mit vielen Diffusionsstufen (3) die beiden Isotope voneinander zu trennen und den Kernenergieträger ^{235}U (1) rein zu gewinnen.

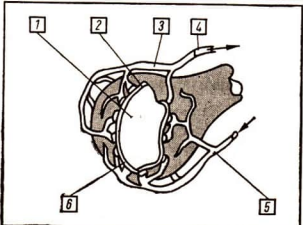


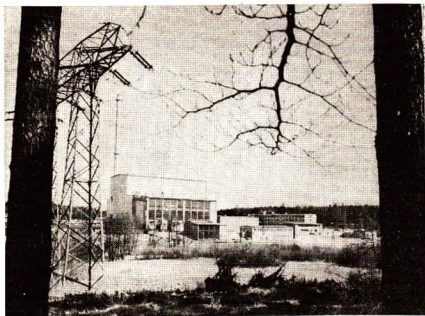
Tempern. Maschinenteile aus Grauguß erhalten stahlähnliche Eigenschaften, wenn dem Grauguß ein Teil des Kohlenstoffes entzogen wird.

Die in Tempertöpfe (2) verpackten Graugußteile (1) werden einige Tage bei etwa $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ zusammen mit Eisenoxid geblüht. Beim Tempern diffundiert Sauerstoff in das Gußstück und verbindet sich dort mit Kohlenstoff. Das entstehende Kohlenmonoxid verläßt das Kristallgefüge wieder durch Diffusion.



Atmung. Jedes Lungenbläschen (1) ist von einem Netz feinsten Blutgefäße (6) umgeben. Beim Einatmen strömt sauerstoffreiche Luft in die Lungenbläschen. Durch die Wand des Bläschens (2) diffundiert Sauerstoff in das durch die Lungenarterie (5) herangeführte Blut. Zugleich gelangt das auszuscheidende Kohlendioxid durch Diffusion in die Lungenbläschen. Das mit Sauerstoff angereicherte Blut fließt über die Lungenvene (4) und das Herz zu den Organen und Geweben des Körpers.





Hauptsätze der Wärmelehre

Am 27. 6. 1954 wurde bei Obuminski in der Nähe von Moskau das erste Kernkraftwerk der Welt in Betrieb genommen. 1964 betrug die Gesamtleistung der Kernkraftwerke in der Welt bereits etwa 12000 Megawatt. In unserer Republik wird z. Z. das zweite Kernkraftwerk errichtet. Die Kernenergie wird zunächst in Wärmeenergie, danach in mechanische Energie und schließlich in elektrische Energie umgewandelt.

Kalorimetrie

Zur Wiederholung und Vertiefung werden in diesem Abschnitt einige Grundlagen der Kalorimetrie behandelt. Dieses Teilgebiet der Wärmelehre umfaßt die Verfahren, Wärmemengen zu messen und den Wärmeaustausch zwischen Körpern verschiedener Temperatur zu untersuchen. Als Einheit der Wärmemenge wird vorerst die Kilokalorie (kcal) verwendet.

In einer für viele Zwecke ausreichenden Näherung gilt:

- ▷ Durch Zuführen der Wärmemenge einer Kilokalorie wird die Temperatur von einem Kilogramm Wasser um einen Grad erhöht.

Genauere Angaben zur Einheit Kilokalorie befinden sich auf Seite 102 im Abschnitt Umwandlung mechanischer Energie in Wärme.

Die aus Versuchsergebnissen abgeleitete Gleichung

$$W = m \cdot c \cdot \Delta t \quad (94)$$

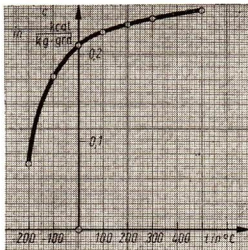
beschreibt den Zusammenhang zwischen der einem homogenen Körper der Masse m zugeführten Wärmemenge W und der hierdurch verursachten Temperaturänderung $\Delta t = t_2 - t_1$.

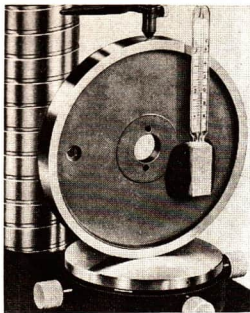
Die Größe c ist die spezifische Wärme, eine vom Stoff abhängige Konstante mit der Einheit $\text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{grad}^{-1}$.

Aus genauen Messungen geht hervor, daß die spezifische Wärme aller Stoffe von der Temperatur abhängt. Die Tabellenwerte beziehen sich zumeist auf die Temperatur 18°C und können nur in einem begrenzten Temperaturbereich verwendet werden.

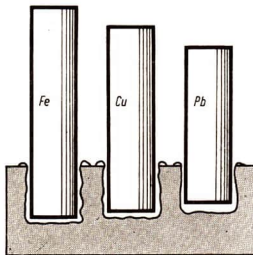
Die Besonderheiten der spezifischen Wärme von Gasen werden im Zusammenhange mit dem ersten Hauptsatz der Wärmelehre geklärt.

98/2 Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärme von Aluminium



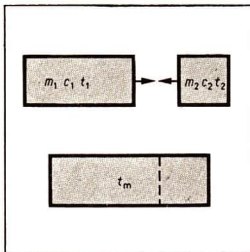


99/1 Körperthermometer



99/2 Die Metallzylinder haben gleiche Massen. Sie wurden in siedendem Wasser auf 100 °C erwärmt und danach auf den Paraffinblock gestellt. Erklären Sie das Versuchsergebnis!

99/3



Welche Aussagen ergeben sich aus der Gleichung (94) für eine einem Körper zugeführte Wärmemenge unter der Voraussetzung a) $m = \text{konst}$, $c = \text{konst}$ und b) $\Delta t = \text{konst}$, $c = \text{konst}$?

Stellen Sie in einem Diagramm die spezifische Wärme von reinen Metallen als Funktion der relativen Atommassen dar und diskutieren Sie anhand des Diagramms den Zusammenhang beider Größen!

Die Wärmekapazität K eines Körpers ist der Quotient aus der zugeführten Wärmemenge und der bewirkten Temperaturänderung

$$K = \frac{W}{\Delta t} \quad (95)$$

Aus dieser Definition folgt, daß für homogene Körper die Wärmekapazität das Produkt aus Masse und spezifischer Wärme ist:

$$K = m \cdot c \quad (96)$$

Die Einheit der Wärmekapazität ist $\text{kcal} \cdot \text{grad}^{-1}$.

Was versteht man unter einem homogenen Körper?

Entwerfen Sie ein Streifendiagramm für das Volumen von Körpern mit übereinstimmenden Wärmekapazitäten $K = 1 \text{ kcal} \cdot \text{grad}^{-1}$ aus verschiedenen Stoffen!

Berühren sich mehrere Körper verschiedener Temperatur, erfolgt ein Wärmeaustausch, bis eine einheitliche Temperatur erreicht ist. Hierbei geht keine Wärme verloren.

Erläutern Sie die Funktion eines Körperthermometers!

Die von den Körpern höherer Temperatur abgegebene Wärmemenge ist gleich der den Körpern tieferer Temperatur zugeführten Wärmemenge.

$$W_{\text{ab}} = W_{\text{zu}} \quad (97)$$

Diese Aussage ist ein Spezialfall des Energieerhaltungssatzes, dessen Anwendung in der Wärmelehre im folgenden Abschnitt noch ausführlich behandelt wird.

Besonders einfache Bedingungen liegen vor, wenn nur zwei Körper am Wärmeaustausch beteiligt sind (Bild 99/3). In diesem Falle gilt:

$$W_{\text{zu}} = m_1 \cdot c_1 (t_m - t_1) \quad (98)$$

$$W_{\text{ab}} = m_2 \cdot c_2 (t_2 - t_m) \quad (99)$$

Da beide Wärmemengen übereinstimmen, ergibt sich aus den beiden Gleichungen (98) und (99)

$$m_1 \cdot c_1 (t_m - t_1) = m_2 \cdot c_2 (t_2 - t_m) \quad (100)$$

Hieraus berechnet man die

► **Mischungstemperatur**

$$t_m = \frac{m_1 \cdot c_1 \cdot t_1 + m_2 \cdot c_2 \cdot t_2}{m_1 \cdot c_1 + m_2 \cdot c_2} \quad (101)$$

Diese Beziehung wird als Richmannsche Mischungsregel bezeichnet.

Bei den meisten kalorimetrischen Untersuchungen wird mit Flüssigkeiten gearbeitet. In diesem Falle ist zu berücksichtigen, daß auch das Gefäß am Wärmeaustausch beteiligt ist (Bild 100/1).

Bei der rechnerischen Auswertung des Wärmeaustauschvorganges wird $t_2 > t_1$ vorausgesetzt.

Am Temperaturengleich sind die folgenden Wärmemengen beteiligt:

Vom Körper höherer Temperatur
abgegebene Wärmemenge

$$W_{ab} = m_2 \cdot c_2 (t_2 - t_m)$$

Der Flüssigkeit zugeführte
Wärmemenge

$$W_{zu, Fl} = m_1 \cdot c_1 (t_m - t_1)$$

Dem Kalorimeter und Zubehör
zugeführte Wärmemenge

$$W_{zu, K} = K \cdot (t_m - t_1)$$

Zwischen diesen Wärmemengen
besteht die Beziehung

$$W_{ab} = W_{zu, Fl} + W_{zu, K}$$

Hieraus folgt die Gleichung

$$m_2 \cdot c_2 (t_2 - t_m) = (m_1 \cdot c_1 + K)(t_m - t_1) \quad (102)$$

- Überzeugen Sie sich davon, daß die Gleichung (102) auch unter der Voraussetzung $t_2 < t_1$ gültig ist!

Die Wärmekapazität des Kalorimeters wird bei kalorimetrischen Untersuchungen zumeist experimentell bestimmt. Hierfür mischt man eine im Kalorimeter enthaltene Wassermenge (Masse m_1 , Temperatur t_1) mit Wasser höherer Temperatur (Masse m_2 , Temperatur t_2). Die beiden Massen, die Anfangstemperaturen und die Mischungstemperatur werden gemessen.

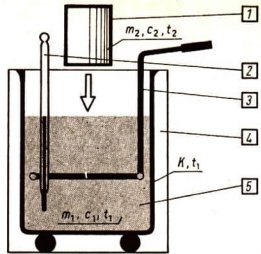
Zur Auswertung dient die Gleichung (102) für den Wärmeaustausch mit $c_1 = c_2 = c_W$:

$$m_2 \cdot c_W (t_2 - t_m) = (m_1 \cdot c_W + \underline{K})(t_m - t_1) \quad (103)$$

In dieser Gleichung ist nunmehr K die einzige unbekannte Größe.

- Berechnen Sie die Wärmekapazität!

An Stelle der Wärmekapazität des Gefäßes wird oft der Wasserwert w verwendet, wenn Wasser als Kalorimeterflüssigkeit dient.



100/1 Schema einer kalorimetrischen Messung

Mit K wird die Wärmekapazität des Kalorimeters einschließlich Zubehör (Thermometer, Rührer) bezeichnet
1 Körper höherer Temperatur, 2 Thermometer, 3 Rührer, 4 Kalorimeter, 5 Körper niedriger Temperatur.

Der Wasserwert eines Körpers ist gleich der Wassermasse, die den Körper beim Wärmeaustausch vertreten kann.

Aus dieser Definition folgt als Beziehung zwischen der zugeführten Wärmemenge und der Temperaturänderung bei einem Körper mit dem Wasserwert w

$$W = w \cdot c_w \cdot \Delta t. \quad (104)$$

Aus einem Vergleich mit der Definition der Wärmekapazität ist zu erkennen:

$$K = w \cdot c_w \quad (105)$$

Vergleichen Sie Zahlenwerte und Einheiten der Wärmekapazität und die Zahlenwerte und Einheiten des Wasserwertes eines Körpers miteinander!

Mit der Gleichung für den Wärmeaustausch kann auch noch bei zahlreichen anderen Fragestellungen gearbeitet werden. In jedem Falle wird eine in der Gleichung enthaltene Größe gesucht, während die übrigen auf Grund von Messungen oder bestimmten Vorbedingungen als bekannt vorausgesetzt werden können.

Erläutern Sie, wie die spezifische Wärme eines Stoffes bestimmt werden kann!

Tabelle 101/1

Beispiel	Verallgemeinerung
Beim Bremsen erwärmen sich die Bremsbeläge eines Fahrzeuges.	Wenn Reibungskräfte einen Körper verzögern, wird kinetische Energie in Wärme umgewandelt.
Mit Hilfe eines Rührwerks (Mixer) kann die Temperatur einer Flüssigkeit erhöht werden.	Die gegen eine Reibungskraft verrichtete mechanische Arbeit wird in Wärme umgewandelt.
Bei Treibarbeiten erwärmt sich das Werkstück.	Bei unelastischer Verformung (\neq Mechanik) wird ein Teil der aufgewendeten mechanischen Arbeit in Wärme umgewandelt.

In einem Gefäß der Wärmekapazität K befindet sich eine Wassermenge der Masse m_1 mit der Temperatur t_1 . Wieviel Wasser der Temperatur t_2 muß zugefüllt werden, damit sich eine Mischungstemperatur t_m ergibt?

Gegeben:

Lösung:

Gleichung (101)

Umstellen der Gleichung (101)

Gesucht:

m_2

Geben Sie die Lösung in Satzform!

Umwandlung mechanischer Energie in Wärme

Die Erkenntnis, daß Wärme eine Energieform ist, folgt aus zahlreichen Erfahrungen (Tabelle 101/1).

Nennen Sie weitere Beispiele besonders aus dem Bereiche der Produktion!

Mit einer Versuchsanordnung gemäß Bild 102/1 bestimmte der englische Naturforscher JOULE im Jahre 1847, welche Wärmemenge einem bestimmten Betrag mechanischer Arbeit gleichwertig ist.

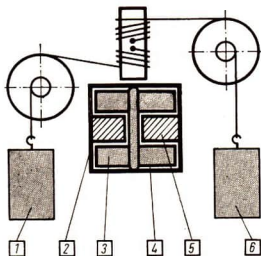
Von der Schwerkraft wird bei n -maliger Abwärtsbewegung des Körpers die mechanische Arbeit

$$W = m \cdot g \cdot h \cdot n \quad (106)$$

verrichtet. Das Gefäß wird als Kalorimeter der Wärmekapazität K betrachtet. Die der Flüssigkeit durch den Reibungsvorgang zugeführte Wärmemenge ergibt sich aus

$$W = (m_{\text{Fl}} \cdot c_{\text{Fl}} + K) \Delta t. \quad (107)$$

JOULE erhielt aus zahlreichen Messungen Ergebnisse, die durch spätere Untersuchungen mit anderen Hilfsmitteln nahezu bestätigt werden konnten:



▷ Die Wärmemenge 1 kcal kann aus der mechanischen Arbeit 4187 Joule gewonnen werden.

Auf eine besondere Einheit für die Energieform Wärme könnte nunmehr verzichtet werden. Da das Wasser sowohl als Kalorimetersubstanz wie auch als Arbeitsstoff für Wärmekraftmaschinen eine besonders wichtige Rolle spielt, wird vorerst die Einheit Kilokalorie noch weiter verwendet. In der Tafel der gesetzlichen Einheiten wird die Einheit Kilokalorie definiert als

▷ 1 kcal = 4186,8 J = 4186,8 kg · m² · s⁻².

Mit einer für technische Zwecke ausreichenden Genauigkeit gilt, daß durch diese Wärmemenge 1 kg Wasser um einen Grad erwärmt wird.

Bereits im Jahre 1842 war es dem deutschen Arzt JULIUS ROBERT MAYER gelungen, auf Grund theoretischer Überlegungen die Wärmemenge zu berechnen, die einem bestimmten Betrag mechanischer Arbeit gleichwertig ist. MAYER erkannte auch, daß bei allen Vorgängen in der Natur die Energie erhalten bleibt. Diese Forschungsergebnisse stießen zunächst auf das Unverständnis und den Widerspruch der meisten Zeitgenossen. Erst HERMANN VON HELMHOLTZ verhalf durch seine 1847 veröffentlichte Schrift „Über die Erhaltung der Kraft“ dem Energieprinzip zu immer breiterer Anerkennung. HELMHOLTZ verallgemeinerte den in der Mechanik gültigen Satz von der Erhaltung der Energie auf alle zu dieser Zeit bekannten physikalischen Erscheinungen:

Energie kann nicht erzeugt oder vernichtet werden, sondern nur von einem Körper auf einen anderen übergehen oder ihre Erscheinungsform verändern.

Unabhängig von MAYER hatte HELMHOLTZ das Energieprinzip aus der Erfahrung entwickelt, daß trotz vielfältiger Bemühungen

102/1 Versuchsanordnung von JOULE
Das Schaufelrad (3) und die radialen Zwischenwände (5) des Kalorimetergefäßes (2) haben einen sehr kleinen Abstand. Daher sind bei der Drehung des Rades in der Flüssigkeit (4) sehr große Reibungskräfte zu überwinden. Die Körper (1) und (6) mit der Masse m erreichen nur eine sehr kleine Geschwindigkeit; ihre kinetische Energie kann vernachlässigt werden.

zahlreicher Erfinder kein perpetuum mobile konstruiert werden konnte. Der Energieerhaltungssatz kann daher auch als Satz von der Unmöglichkeit eines perpetuum mobile ausgesprochen werden!

Es gibt keine Vorrichtung, die dauernd mechanische Arbeit abgibt, ohne einen gleichwertigen Betrag einer anderen Energieform aufzunehmen.

Die Verallgemeinerung des Energiebegriffs und die Entdeckung des Energieprinzips gehören zu den bedeutendsten Leistungen der Physik des 19. Jahrhunderts. Das Energieprinzip ist zugleich ein hervorragender Beitrag zur Entwicklung eines materialistischen Weltbildes.

Der erste Hauptsatz der Wärmelehre

Das Gesetz von der Erhaltung der Energie wird jetzt angewendet, um die Energieumwandlungen bei Zustandsänderungen eines Körpers zu untersuchen. Hierbei wird vorausgesetzt:

1. Der Körper befindet sich in Ruhe.

Er besitzt in diesem Falle keine kinetische Energie und seine potentielle Energie verändert sich nicht. Somit bleibt die gesamte mechanische Energie des Körpers konstant und braucht bei der Untersuchung der Energieumwandlungen nicht berücksichtigt zu werden.

2. Dem Körper kann Wärme W_w zugeführt oder entzogen werden (Bild 103/1).

Hierzu muß er in Kontakt mit einem anderen Körper höherer oder tieferer Temperatur gebracht werden.

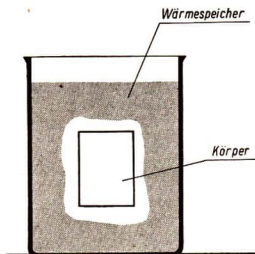
3. Der Körper vermag eine mechanische Arbeit W_{mech} zu verrichten oder aufzunehmen (Bild 103/2).

Dieser Vorgang soll am Beispiel eines Gases erläutert werden. Dieses sei in einem Zylinder mit beweglichem Kolben eingeschlossen. Während der Kolben nach oben läuft, verrichtet die Druckkraft des Gases eine Arbeit. Hierdurch kann z. B. die potentielle und kinetische Energie des auf dem Kolben liegenden Körpers mit der Masse m erhöht werden. Die Änderung der potentiellen Energie des Gases kann vernachlässigt werden.

4. Der Körper vermag Energie in Form von innerer Energie W_i zu speichern.

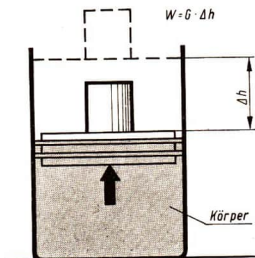
Für Rechnungen mit dem 1. Hauptsatz wird für einen Körper vereinbart:

- zugeführte Wärmemengen zählen positiv ($W_w > 0$)
 - abgegebene Wärmemengen zählen negativ ($W_w < 0$)
 - zugeführte mechanische Arbeiten zählen negativ ($W_{mech} < 0$)
 - abgegebene mechanische Arbeiten zählen positiv ($W_{mech} > 0$)
- Veränderung der inneren Energie (ΔW_i).



103/1

103/2



Nach dem Gesetz von der Erhaltung der Energie besteht zwischen den Größen W_w , W_{mech} und W_i eine Beziehung; man bezeichnet sie als

Erster Hauptsatz der Wärmelehre:

- Die einem Körper zugeführte Wärmemenge W_w ist gleich der Summe aus der Änderung ΔW_i der inneren Energie und der abgegebenen Arbeit W_{mech}

$$W_w = \Delta W_i + W_{\text{mech}} \quad (108)$$

Die innere Energie der Gase

Zur Untersuchung der inneren Energie W_i wird die isochore Erwärmung eines Gases betrachtet (Bild 104/1).

- 28
▼ Ein Gas wird in einem geschlossenen Druckgefäß erwärmt. Das Volumen bleibt bei der Erwärmung konstant. Bei diesem Vorgang wird keine mechanische Arbeit abgegeben. Nach dem ersten Hauptsatz wird durch die zugeführte Wärmemenge nur die innere Energie des Gases erhöht.

$$W_w = \Delta W_i = W_{i2} - W_{i1} \quad (109)$$

Die zugeführte Wärmemenge kann auch aus der Temperaturerhöhung des Gases berechnet werden:

$$W_w = m \cdot c_v \cdot (T_2 - T_1) \quad (110)$$

Der Index v weist darauf hin, daß diese spezifische Wärme bei isochorer Erwärmung des Gases gültig ist. Diese Kennzeichnung ist erforderlich, weil die spezifische Wärme der Gase vom Verlauf des Erwärmungsvorganges abhängt. Außer c_v wird im folgenden noch die bei konstantem Druck gemessene spezifische Wärme c_p verwendet.

Aus der nebenstehenden Tabelle geht hervor, daß $c_p > c_v$ gilt.

- Weshalb kann bei festen Körpern und Flüssigkeiten im allgemeinen auf die Unterscheidung von c_p und c_v verzichtet werden?

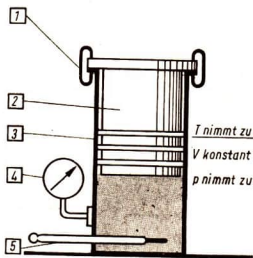
Durch Gleichsetzen der beiden Ausdrücke für die Wärmemenge bei isochorer Erwärmung erhält man

$$W_{i2} - W_{i1} = m \cdot c_v \cdot (T_2 - T_1) \quad (111)$$

Aus der im Abschnitt kinetische Wärmetheorie entwickelten Gleichung (92) für die innere Energie folgt:

$$W_{i2} - W_{i1} = \frac{3}{2} m \cdot R(T_2 - T_1)$$

Mit diesen beiden Gleichungen läßt sich die Größe c_v bestimmen.



- 104/1 1 Kolbenverriegelung
2 Kolben
3 Zylinder
4 Manometer
5 Thermometer

Tabelle 104/2:
Spezifische Wärme einiger Gase

Gas	c_v in	c_p in
	kcal / kmol · grd · $\frac{1}{m_{\text{mo}}}$	
Argon	2,96	4,95
Helium	3,01	5,00
Kohlenoxid	4,98	6,97
Sauerstoff	5,01	7,01
Stickstoff	4,96	6,95
Wasserstoff	4,98	6,89

Ein Vergleich beider Ausdrücke für die Änderung der inneren Energie ergibt

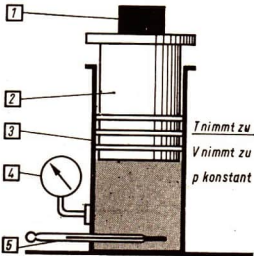
$$c_v = \frac{3}{2} R$$

$$c_v = \frac{3 \cdot 8314 \text{ J}}{2 \text{ kmol} \cdot \text{grd}} \cdot \frac{1}{m_{\text{mo}}} \quad (112)$$

$$c_v \approx 3 \frac{\text{kcal}}{\text{kmol} \cdot \text{grd}} \cdot \frac{1}{m_{\text{mo}}}$$

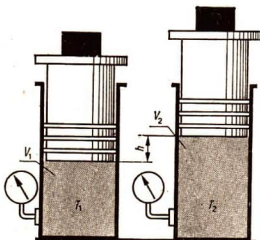
Diese spezifische Wärme findet man in der Tabelle in guter Näherung bei den einatomigen Gasen.

Durch die hier gefundene weitgehende Übereinstimmung zwischen den von der Theorie gelieferten Werten und den aus Messungen hervorgegangenen Tabellenwerten werden die Grundgedanken der kinetischen Wärmetheorie überzeugend bestätigt.



- 105/1 1 Wägestück
2 Kolben
3 Zylinder
4 Manometer
5 Thermometer

105/2 Anfangs- und Endzustand bei isobarer Erwärmung



Energieumwandlungen bei isobarer Erwärmung

Die beim isobaren Erwärmen eines Gases erzielte Temperaturänderung kann mit Hilfe der spezifischen Wärme c_p berechnet werden:

$$W_w = m \cdot c_p (T_2 - T_1) \quad (113)$$

In einem durch einen beweglichen Kolben abgeschlossenen Zylinder wird ein Gas erwärmt. Dem Gas wird Wärmeenergie zugeführt. Hierbei erhöhen sich die Temperatur und das Volumen des Gases.

Wegen $c_p > c_v$ muß dem Gas bei konstantem Druck eine größere Wärmemenge als bei konstantem Volumen zugeführt werden, um die gleiche Temperaturänderung hervorzurufen. Ursache dafür ist, daß das Gas Arbeit verrichtet, während es sich ausdehnt (Bild 105/2).

Der Kolben bewegt sich beim Erwärmen des Gases unter dem Einfluß der konstanten Druckkraft $F = p \cdot A$ um die Strecke h weiter. Das Gas verrichtet hierbei die Arbeit

$$W_{\text{mech}} = p \cdot A \cdot h. \quad (114)$$

Das Produkt $A \cdot h$ ist gleich der Volumenänderung $V_2 - V_1$ des Gases. Für die Arbeit erhält man damit

$$W_{\text{mech}} = p(V_2 - V_1). \quad (115)$$

Dieses Produkt aus Druck und Volumenänderung kann im p - V -Diagramm durch eine Rechteckfläche unter der Isobaren dargestellt werden (Bild 106/1).

Es sei hervorgehoben, daß nur die vom Gas verrichtete Arbeit berechnet worden ist. Falls sich oberhalb des Kolbens Luft befindet, wird ein Teil dieser Arbeit benötigt, um die Luft zu verdrängen.

Ein anderer Teil kann durch Reibung zwischen Zylinder und Kolben wieder in Wärme umgewandelt werden.

Energiebilanz für die isobare Erwärmung eines Gases

Zugeführte Wärmemenge $W_w = m \cdot c_p(T_2 - T_1)$

Änderung der inneren

Energie $W_{i2} - W_{i1} = m \cdot c_v(T_2 - T_1)$

Abgegebene Arbeit $W_{\text{mech}} = p(V_2 - V_1)$

Aus dem ersten Hauptsatz folgt

$$m \cdot c_p(T_2 - T_1) = m \cdot c_v(T_2 - T_1) + p(V_2 - V_1)$$

$$c_p - c_v = \frac{p(V_2 - V_1)}{m(T_2 - T_1)}$$

Mit Hilfe der Zustandsgleichung kann die rechte Seite dieser Gleichung weiter umgeformt werden:

$$p(V_2 - V_1) = m \cdot R(T_2 - T_1)$$

Damit erhält man für die Differenz der spezifischen Wärmen

$$c_p - c_v = R \quad (117)$$

Aus Tabelle 104/2 ist zu entnehmen

$$c_p - c_v \approx 2 \frac{\text{kcal}}{\text{kmol} \cdot \text{grad}} \cdot \frac{1}{m_{\text{mo}}}$$

Durch Gleichsetzen mit dem Ausdrücken (66) und (68) für die Gaskonstante ergibt sich die Beziehung

$$2 \text{ kcal} \approx 8314 \text{ Js}$$

Hieraus folgt nahezu die auf Seite 102 angegebene Umrechnungszahl zwischen den Einheiten Kilokalorie und Joule.

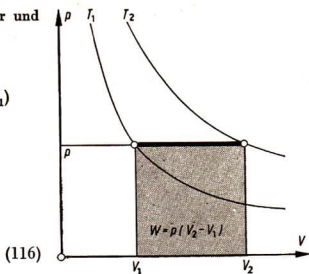
Die in diesem Abschnitt erläuterten Energieumwandlungen hatte erstmalig R. MAYER an Hand eines Gedankenversuchs zur isobaren Erwärmung erkannt und damit die einer mechanischen Arbeit gleichwertige Wärmemenge bestimmt.

Die Arbeit bei isothermer Zustandsänderung

Auch bei einer isothermen Expansion (S. 103) wird von einem Gas Arbeit abgegeben. Während dieser Zustandsänderung verringern sich der Gasdruck und die auf den Kolben wirkende Druckkraft. Die abgegebene Arbeit kann nicht mehr einfach als Produkt von Kraft und Weg berechnet werden.

30

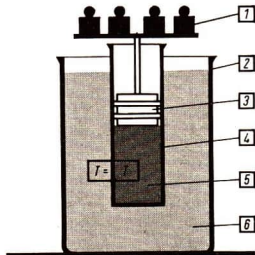
Das Gas befindet sich in einem Zylinder mit wärmeleitendem Mantel. Die Temperatur wird mit Hilfe eines großen Wärmespeichers konstant gehalten. Wenn die von außen auf den Kolben wirkende Kraft verkleinert wird, findet eine Expansion statt.



106/1

106/2 Isotherme Zustandsänderung eines Gases

- 1 Wägestück
- 2 Wärmespeicher
- 3 Kolben
- 4 Arbeitszylinder
- 5 komprimiertes Gas
- 6 Wasser



Um die verrichtete Arbeit zu bestimmen, denke man sich die Expansion in mehreren Teilschritten ausgeführt. Hierbei möge das Gasvolumen jedesmal um ΔV zunehmen. Während jedes Schrittes ändert sich der Druck annähernd linear.

Druck und Druckkraft können durch das arithmetische Mittel \bar{p} des Anfangs- und Endwertes ersetzt werden.

Für die Arbeit, die das Gas bei einem Teilschritt der Expansion verrichtet, erhält man

$$\Delta W = \bar{F} \cdot \Delta s$$

$$\Delta W = \bar{p} \cdot A \cdot \Delta s$$

$$\Delta W = \bar{p} \cdot \Delta V. \quad (118)$$

Diese Arbeit kann durch die Fläche eines schmalen Rechtecks im p - V -Diagramm dargestellt werden (Bild 107/1). Die gesamte Arbeit bei der isothermen Expansion ist die Summe aller Teilarbeiten.

Damit ist nachgewiesen:

Auch bei der isothermen Expansion wird die vom Gas verrichtete Arbeit durch die Fläche unter der Isothermen dargestellt.

Allgemein gilt:

Die von einem Gas während einer Zustandsänderung verrichtete Arbeit ist durch die Fläche unter der Kurve im zugehörigen p - V -Diagramm darstellbar.

Die Arbeit läßt sich somit durch Auszählen der Flächeneinheiten im p - V -Diagramm bestimmen.

Im Diagramm Bild 107/2 findet man z. B.

$$V\text{-Achse} \quad 1 \text{ cm} \triangleq 1,6 \text{ dm}^3$$

$$p\text{-Achse} \quad 1 \text{ cm} \triangleq 1 \text{ at}$$

$$1 \text{ cm}^2 \triangleq 1,6 \text{ dm}^3 \cdot 1 \frac{\text{kp}}{\text{cm}^2} = 16 \text{ kpm}.$$

Mit Hilfe des Energieerhaltungssatzes kann festgestellt werden, aus welchem Energievorrat die Arbeit entnommen wird, die ein Gas bei isothermer Expansion abgibt.

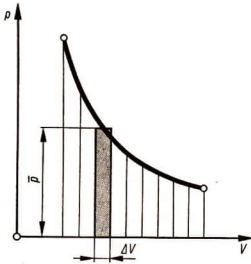
Da die Temperatur des Gases konstant bleibt, ändert sich auch die innere Energie nicht:

$$W_{i2} - W_{i1} = 0 \quad (119)$$

Aus dem ersten Hauptsatz der Wärmelehre folgt damit

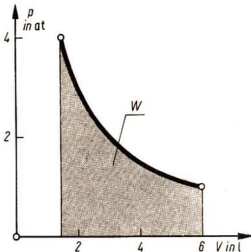
$$W_w = W_{\text{mech}}. \quad (120)$$

Erläutern Sie nochmals den ersten Hauptsatz der Wärmelehre!



107/1 Arbeit bei isothermer Expansion

107/2



▷ Bei isothermer Expansion eines Gases ist die innere Energie konstant. Die abgegebene Arbeit entstammt der zugeführten Wärmemenge und ist dieser gleich.

- Formulieren Sie die Energiebilanz für eine isotherme Kompression!
- Vergleichen Sie die Energieumwandlungen bei der isothermen Kompression eines Gases und dem Spannen einer Schraubenfeder!
- Weshalb muß der Wärmespeicher Bild 106/2 eine sehr große Wärmekapazität haben?

Adiabatische Zustandsänderungen

Bei der isothermen Expansion war es notwendig, dem Gas Wärme zuzuführen. Wird diese Wärmezufuhr unterbunden, findet eine **adiabatische** Expansion statt. Allgemein gilt die Definition

▷ Bei adiabatischen Zustandsänderungen wird keine Wärme zwischen dem Gas und der Umgebung ausgetauscht.

Da es keine vollkommene Wärmeisolation gibt, können adiabatische Vorgänge nur angenähert verwirklicht werden. Sehr schnelle Zustandsänderungen verlaufen nahezu adiabatisch, weil in den sehr kurzen Zeitabschnitten nur ein geringer Wärmeaustausch mit der Umgebung möglich ist.

31
▼ In einem pneumatischen Feuerzeug wird der Kolben (2) sehr schnell zur Verschlusskappe (5) hin bewegt. Die Luft (4) erwärmt sich dabei sehr stark. Diese Wärme kann nicht so schnell nach außen abgegeben werden, wie die Kompression erfolgt, so daß sich der mit Schwefelkohlenstoff getränkte Wattebausch entzündet. Es findet eine annähernd adiabatische Kompression statt. Dieser Versuch veranschaulicht den Zündungsvorgang beim Dieselmotor.

Der erste Hauptsatz der Wärmelehre gibt Auskunft über die Energieumwandlungen bei adiabatischen Vorgängen. Gemäß der oben gegebenen Definition ist $W_w = 0$.

Hieraus folgt

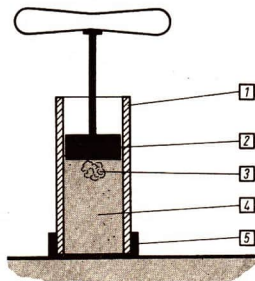
$$0 = W_{i2} - W_{i1} + W_{\text{mech}}$$

$$W_{\text{mech}} = W_{i1} - W_{i2} \quad (121)$$

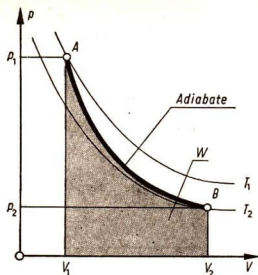
▷ Die bei adiabatischer Expansion abgegebene Arbeit entstammt der inneren Energie des Gases.

- Formulieren Sie eine entsprechende Aussage für die adiabatische Kompression!

Die Abnahme der inneren Energie bei der adiabatischen



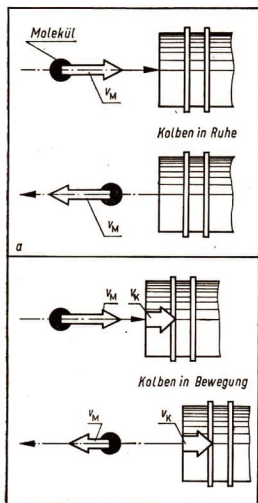
108/1 Pneumatisches Feuerzeug
 1 Zylinder
 2 Kolben
 3 Watte
 4 Luft
 5 Verschlusskappe



109/1 p - V -Diagramm einer adiabatischen Expansion

109/2a

109/2b



Expansion ist an der Abkühlung des Gases erkennbar. Die Temperaturänderung ist aus der Gleichung

$$W_{\text{mech}} = m \cdot c_v(T_1 - T_2) \quad (122)$$

zu errechnen.

Die Kurve im p - V -Diagramm einer adiabatischen Zustandsänderung wird **Adiabate** genannt.

Die Energiebilanz zeigt, daß beim Expansionsvorgang die Adiabate von einer Isothermen höherer Temperatur zu einer Isothermen tieferer Temperatur führen muß. Die Adiabate verläuft somit steiler als die Isotherme.

Der Zusammenhang zwischen Druck und Volumen des idealen Gases während einer adiabatischen Zustandsänderung wird durch eine Gleichung beschrieben, die hier ohne Herleitung angegeben wird:

$$p \cdot V^\kappa = \text{konst}$$

$$p_1 \cdot V_1^\kappa = p_2 \cdot V_2^\kappa$$

zweiatomige Gase haben den Adiabatenexponenten

$$\kappa = 1,4$$

Die Abnahme der Temperatur während einer adiabatischen Expansion ist auch mit Hilfe der kinetischen Gastheorie zu erklären:

Die Moleküle des Gases prallen fortwährend an die Wände des Zylinders und an den Kolben. Befindet sich der Kolben in Ruhe, hat jedes Molekül nach dem Stoß den gleichen Geschwindigkeitsbetrag wie vorher (Bild 109/2a).

Bewegt sich der Kolben nach außen (Expansion), ist der Geschwindigkeitsbetrag der Moleküle nach Stößen gegen den Kolben kleiner als vorher (Bild 109/2b).

Eine solche Geschwindigkeitsänderung kann z. B. auch beim Stoppen eines Fuß- oder Tischtennisballs beobachtet werden.

Erläutern Sie, was mit der Energie geschieht, die bei einem solchen Vorgang vom Ball abgegeben wird!

Wenden Sie diese Überlegungen auf die Energie der Moleküle des expandierenden Gases an!

Mit der Geschwindigkeit verringert sich auch die kinetische Energie der Moleküle – die Temperatur des Gases nimmt ab. Die hier beschriebenen Veränderungen der Molekül-Geschwindigkeit müssen zunächst auch bei isothermer Expansion auftreten. Durch die Zufuhr von Wärmeenergie werden die Verluste an innerer Energie aber ständig ausgeglichen.

Erklären Sie die Temperaturerhöhung bei adiabatischer Kompression eines Gases mit Hilfe der kinetischen Gastheorie!

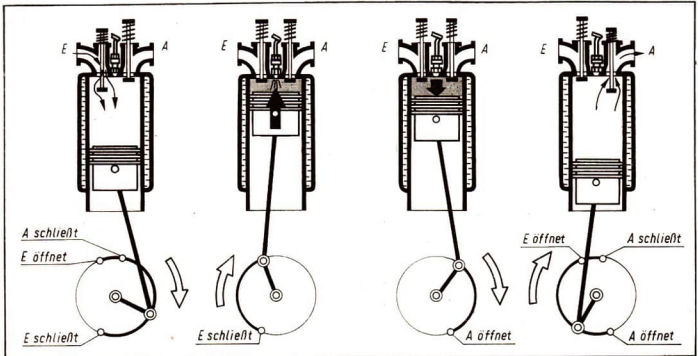
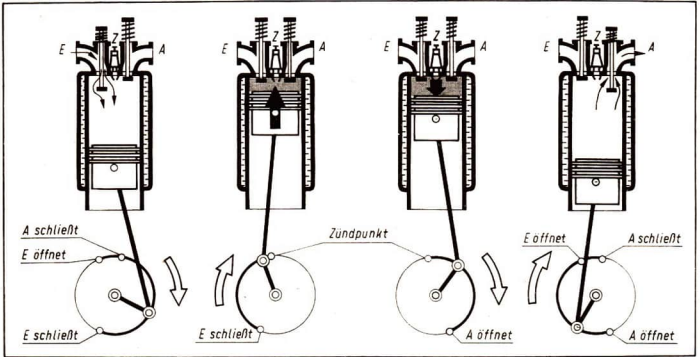
Verbrennungsmotoren

In Wärmekraftmaschinen wird Wärmeenergie in mechanische Energie umgewandelt. Die Wärmekraftmaschinen lassen sich nach ihren konstruktiven Merkmalen in **Kolbenmaschinen** und **Turbinen** einteilen. Im folgenden wollen wir uns vor allem mit der Arbeitsweise der **Brennkraft-Kolbenmaschinen** beschäftigen.

110/1 Arbeitsweise des Viertakt-Otto-Motors

Erläutern Sie anhand der Bilder 110/1 und 110/2 den Aufbau und die Wirkungsweise des Viertakt-Otto- und des -Diesel-Motors!

110/2 Arbeitsweise des Viertakt-Diesel-Motors



Indikatordiagramme

Einen tieferen Einblick in die Arbeitsweise der Motoren erhält man durch p - V -Diagramme der im Zylinder ablaufenden Vorgänge.

Solche Diagramme können mit Hilfe eines Elektronenstrahl-oszillographen aufgenommen werden.

Die horizontale Ablenkung des Elektronenstrahls wird durch die Kolbenbewegung gesteuert, die vertikale Ablenkung durch die im Zylinder eingebauten elektrischen Druckmeßgerät.

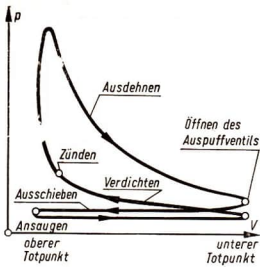
Die gesamte Anordnung wird **Indikator** genannt, das Oszillogramm **Indikatordiagramm**.

111/1 Indikatordiagramm eines Viertakt-Otto-Motors

Während des Ansaugens und Ausschlebens herrscht im Zylinder ein nahezu konstanter Druck. Das Gas im Zylinder wird hierbei aber nicht isobar erwärmt oder abgekühlt, wie nach einem Vergleich mit Bild 106/1 angenommen werden könnte. Es ist zu beachten, daß beim ersten und vierten Takt das im Zylinder enthaltene Gas ausgewechselt wird. Deshalb entsprechen die zugehörigen Abschnitte des Indikatordiagramms nicht der Zustandsänderung einer abgeschlossenen Gasmenge.

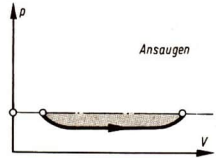
111/2 Arbeiten während der 4 Takte des Motorzyklus (schematische Darstellung)

a) Ansaugen, b) Verdichten, c) Ausdehnen, d) Ausschleiben



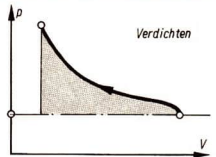
Beim Ansaugen aufgewandte Arbeit

a)



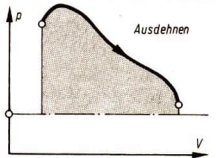
Beim Verdichten aufgewandte Arbeit

b)



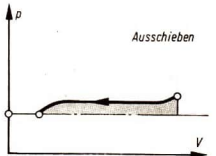
Bei Verbrennen und Ausdehnen abgegebene Arbeit

c)



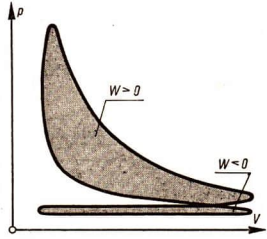
Beim Ausschleiben aufgewandte Arbeit

d)



Bei der Beschreibung des Motorzyklus wurde angenommen, daß an der Außenseite des Kolbens ständig der Druck 1 at herrscht.

Der Kolben bewegt sich	nach außen <i>nach unten</i>	einwärts <i>nach oben</i>
Die auf den Kolben ausgeübte Druckkraft ist der Geschwindigkeit	<i>von Hubraum weg</i>	entgegengerichtet
Bei der Kolbenbewegung wird Arbeit	abgegeben	zugeführt
Die Arbeit zählt	positiv $W_{\text{mech}} > 0$	negativ $W_{\text{mech}} < 0$



112/1

Die auf den Kolben wirkende Kraft ist die Resultierende aus der Druckkraft der Gase im Zylinder und der Druckkraft der Luft. Hierbei werden wiederum abgegebene Arbeiten positiv, zugeführte Arbeiten negativ gezählt. Aus Bild 112/1 ist nach dieser Vereinbarung abzulesen:

- Die beim Durchlaufen des Motorzyklus am Kolben verrichtete Arbeit wird durch die Fläche dargestellt, die das Indikator diagramm einschließt.
- Weisen Sie nach, daß dem Flächenstück, das beim Ansaugen und Ausschieben ausfahren wird, eine negative Arbeit entspricht!

Für theoretische Untersuchungen werden die Vorgänge im Motor oft vereinfacht und als Zustandsänderungen des idealen Gases betrachtet. Bild 112/2 zeigt das p - V -Diagramm eines solchen Vergleichsprozesses für den Viertakt-Otto-Motor.

Die im Diagramm erkennbaren Unterschiede zwischen dem wirklichen Prozeß und dem Vergleichsprozesse haben mehrere Ursachen:

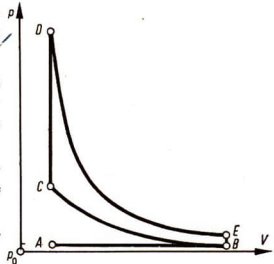
Für das Ansaugen ist ein Unterdruck, für das Ausstoßen ein Überdruck gegenüber dem äußeren Luftdruck erforderlich. Die Zündung erfolgt bereits vor dem Erreichen des oberen Totpunktes.

Die Verbrennung nimmt eine Zeitspanne in Anspruch, während der sich der Kolben weiterbewegt. Daher kann keine isochore Erwärmung stattfinden.

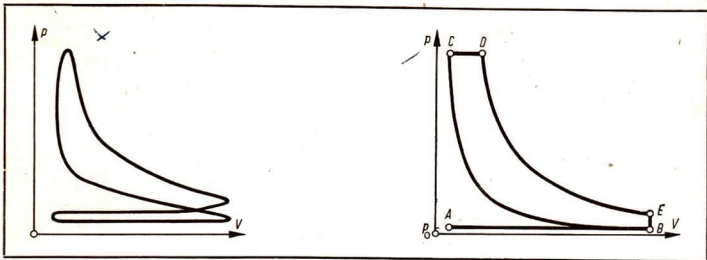
Beim Verdichten und Ausdehnen kann das Gas Wärme abgeben bzw. aufnehmen.

112/2 Vereinfachtes Indikator diagramm (Vergleichsprozesse) für den Viertakt-Otto-Motor

- A-B Ansaugen $p = p_0$ (Luftdruck)
- B-C Adiabatische Kompression
- C-D Isochore Erwärmung
- D-E Adiabatische Expansion
- E-B Isochore Abkühlung
- B-A Ausschieben $p = p_0$ (Luftdruck)



Erläutern Sie anhand der Bilder 113/1 und 113/2 die Unterschiede zwischen den Vorgängen in einem Diesel-Motor und in einem Otto-Motor!



113/1 Indikatordiagramm des Viertakt-Diesel-Motors

113/2 Vereinfachtes Indikatordiagramm (Vergleichsprozess) für den Viertakt-Diesel-Motor

- A-B Ansaugen $p = p_0$ (Luftdruck)
- B-C Adiabatische Kompression
- C-D Isobare Erwärmung
- D-E Adiabatische Expansion
- E-B Isochore Abkühlung
- B-A Ausschleiben

Der Wirkungsgrad

Die von einem Diesel- oder Otto-Motor abgegebene mechanische Arbeit entsteht durch Umwandlung eines Teiles der Wärmeenergie, die beim Verbrennen des Treibstoffes frei wird. Diese Wärmeenergie kann aus dem Heizwert H und der Masse m des Treibstoffes errechnet werden:

Wärmeenergie

$$W = m \cdot H \quad (123)$$

Vergaser- und Dieselkraftstoffe haben nahezu übereinstimmende Heizwerte $H \approx 10000 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Aus der Wärmeenergie ergibt sich die dem Motor zugeführte

$$\text{Wärmeleistung} \quad P_{\text{zu}} = \frac{W}{t} = \frac{m \cdot H}{t} \quad (124)$$

Der Seitenbordmotor „Tümmler“ verbraucht in einer Stunde 1 Liter Vergaserkraftstoff der Dichte $0,8 \cdot \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$.

Wie groß ist die Wärmeleistung?

Gegeben:

$$V = 1 \text{ l}$$

$$\rho = 0,8 \text{ kg} \cdot \text{dm}^{-3}$$

$$t = 1 \text{ h}$$

$$H = 10^4 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Gesucht:

$$P_{\text{zu}}$$

Lösung:

$$P_{\text{zu}} = \frac{m \cdot H}{t} = \frac{\rho \cdot V \cdot H}{t}$$

$$P_{\text{zu}} = \frac{0,8 \text{ kg} \cdot 1 \text{ dm}^3 \cdot 10^4 \text{ kcal}}{\text{dm}^3 \cdot 3600 \text{ s} \cdot \text{kg}}$$

$$P_{\text{zu}} = 2,2 \text{ kcal} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$P_{\text{zu}} = \underline{\underline{9,2 \text{ kW}}}$$

Die vom Motor abgegebene nutzbare Leistung ist mit einer Bremsvorrichtung meßbar (Bild 114/1).

32

Der Motor (1) wird in Betrieb gesetzt. Über die Welle (2) oder eine auf die Welle gesetzte Bremsscheibe wird ein Bremsband (3) gelegt.

Die Kräfte F_1 und F_2 und die Drehzahl n werden gemessen. Dabei ist zu beachten, daß die Motordrehzahl den Betriebsbedingungen (normale Drehzahl, normaler Kraftstoffverbrauch) entspricht. Das Bremsband erwärmt sich sehr schnell und sehr stark, deshalb kann der Motor nur kurzzeitig abgebrems werden.

Die am Mantel des Bremszylinders angreifende Reibungskraft beträgt

$$F_R = F_1 - F_2 \quad (125) \quad 114/1 \text{ Leistungsmessung}$$

Während ein Punkt auf dem Zylindermantel den Weg s zurücklegt, verrichtet der Motor gegen die Reibungskraft die Arbeit

$$W = (F_1 - F_2) s \quad (126)$$

Werden beide Seiten dieser Gleichung durch die Zeitdauer dieses Vorgangs dividiert, ergibt sich die abgegebene Leistung des Motors

$$P_{ab} = (F_1 - F_2) \frac{s}{t}$$

$$P_{ab} = (F_1 - F_2) v$$

v ist die Umfangsgeschwindigkeit des Bremszylinders, im Versuch 32 am Umfang der Schraubenwelle.

Das Verhältnis von abgegebener Leistung P_{ab} zu zugefügter Leistung P_{zu} bezeichnet man als

▷ Wirkungsgrad $\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}}$ (127)

Für den Außenbordmotor „Tümmler“ wird vom Hersteller eine Leistung von 1,5 PS angegeben.

■ Berechnen Sie den Wirkungsgrad dieses Motors!

Gegeben:

$$P_{zu} = 9,2 \text{ kW}$$

$$P_{ab} = 1,5 \text{ PS}$$

Gesucht:

η

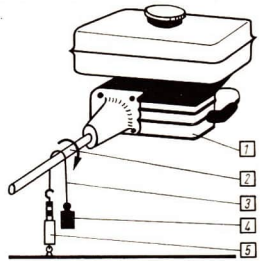
Lösung:

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}}$$

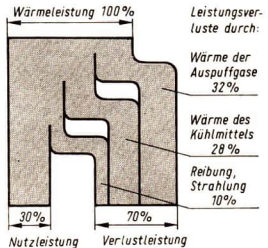
$$\eta = \frac{1,1 \text{ kW}}{9,2 \text{ kW}}$$

$$\underline{\underline{\eta = 0,12}}$$

Die Nutzleistung kann nicht mit Hilfe des Indikatordiagramms bestimmt werden, weil ein Teil der am Kolben verrichteten Arbeit durch die Reibung und den Antrieb der Hilfseinrichtungen (Zündung, Einspritzpumpe) im Motor verbraucht wird.

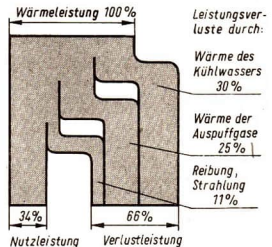


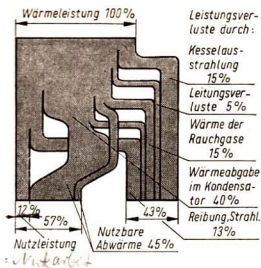
114/1 Leistungsmessung



114/2 Energiediagramm eines Viertakt-Otto-Motors

114/3 Energiediagramm eines Viertakt-Diesel-Motors





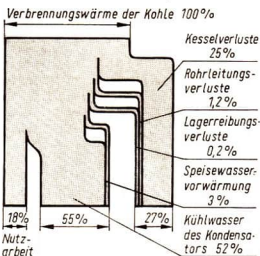
115/1 Energiediagramm einer Kolbendampfmaschinenanlage

Die Ergebnisse von Energieberechnungen und Leistungsmessungen können besonders übersichtlich in Streifen-
diagrammen zusammengefaßt werden. Die Leistung wird
hierbei gleichsam als Stärke eines Energiestromes betrach-
tet. Die Diagramme zeigen die Verzweigungen dieses Ener-
giestromes. Durch die Diagramme wird weiterhin der Wirk-
ungsgrad des betreffenden Motors veranschaulicht.

Bei den Verbrennungskraftmaschinen fallen die Verluste
fort, die bei Dampfmaschinen- und Dampfturbinenanlagen
schon mit der Dampferzeugung verbunden sind.

Die höchsten Wirkungsgrade bis etwa 42% werden mit
Dieselmotoren erreicht.

Die Wirtschaftlichkeit einer Dampfturbinenanlage kann
entscheidend verbessert werden, indem Niederdruckdampf
für Heizungs- und Trocknungszwecke entnommen wird.
Hierdurch sind bis zu 75% der vom Kessel abgegebenen
Wärmeenergie nutzbar.



115/2 Energiediagramm einer Dampfturbine

Erläutern Sie den in den vier Energiediagrammen angezeigten
Energiefluß und deuten Sie die Möglichkeiten zur Erhöhung der
Energieausnutzung an!

Einige Probleme der Energiewirtschaft

Die Energiewirtschaft unserer Republik ist ein Teilsystem
der Volkswirtschaft, das mit allen übrigen Bereichen der
Produktion eng verbunden ist. Die planmäßige Entwick-
lung der Energieproduktion ist eine wesentliche Voraus-
setzung für die technische Revolution.

Erläutern Sie die Bedeutung der Elektroenergie!

Die wichtigste Rohenergiebasis der DDR ist die Braunkohle. Mehr als 80% der erzeugten Elektroenergie wird von
Wärmekraftwerken geliefert. Die installierte Kraftwerks-
leistung stieg in den Jahren 1946 bis 1966 von 3 024 MW auf
fast 11 000 MW; während der gleichen Zeit wurde der Auf-
wand an Wärmeenergie je Kilowattstunde elektrischer
Energie von 3 755 kcal auf 3 375 kcal gesenkt. Grundlage für
die schnelle Steigerung der Energieerzeugung sind neu-
errichtete moderne Großkraftwerke.

Bestimmen Sie den Standort der wichtigsten Kraftwerke der DDR!

Großkraftwerke erfordern relativ niedrige Baukosten.
Die großen Kesselanlagen und Turbogeneratoren arbeiten
mit günstigeren Wirkungsgraden als kleine Anlagen. Die
Fortschritte im Kraftwerksbau werden an der folgenden
Gegenüberstellung deutlich:

Kraftwerk	Dampfdruck	Dampf-temperatur	Dampf-menge
Klingenberg (1926)	35 at	430 °C	85 t · h ⁻¹
Lübbenau (1964)	113 at	540 °C	350 t · h ⁻¹

Der Wirkungsgrad betrug um 1930 etwa 17%, heute werden Höchstwerte von 37% erreicht. In diesen Werten kommen die wissenschaftlichen und technischen Erfolge der Werktätigen unserer Volkseigenen Betriebe beim Bau von Groß-Dampferzeugern und Turbinen zum Ausdruck. Diese Produktionszweige mußten unter den schwierigen Bedingungen der Nachkriegszeit größtenteils völlig neu aufgebaut werden.

Die weitere Entwicklung beim Bau von Wärme-Kraftwerken ist darauf gerichtet, die Vorräte an Salzkohle und Ballastkohle mit geringen Heizwerten zu nutzen.

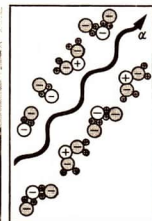
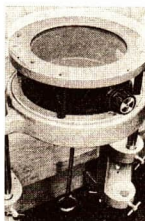
Die Prognosen für das Jahr 1980 sehen einen Spitzenbedarf an elektrischer Leistung von 27000 MW vor. Eine solche gewaltige Steigerung ist durch den Neubau von Wärme-kraftwerken allein nicht mehr erreichbar, da die Kohle-förderung nicht beliebig erhöht werden kann. Aus diesem Grunde müssen in zunehmendem Maße Atomkraftwerke in Betrieb genommen werden.

Das erste Atomkraftwerk der DDR bei Rheinsberg hat eine Reaktorleistung von 265 MW und gibt eine elektrische Leistung von 70 MW an das Netz. Ein weiteres Atomkraftwerk befindet sich bei Greifswald zur Zeit im Bau, während der Bau weiterer Atomkraftwerke mit sowjetischer Hilfe geplant ist.

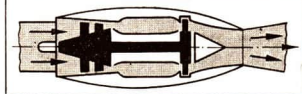
Verbrennungskraftmaschinen. Die Modellmotoren zum Antrieb von Funktionsmodellen haben einen Hubraum von $0,5 \text{ cm}^3$ bis $2,5 \text{ cm}^3$ und eine Leistung von $0,12 \text{ PS}$ bis $0,54 \text{ PS}$ bei Drehzahlen zwischen 15000 bis 23000 min^{-1} . Die Zündung erfolgt durch eine genähert adiabatische Kompression des Treibstoff-Luft-Gemisches.



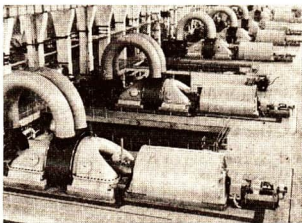
Nebelkammer. In der Expansions-Nebelkammer befindet sich mit Wasserdampf gesättigte Luft. Bei einer schnellen, annähernd adiabatischen Expansion kühlt sich die Luft ab; es tritt eine Übersättigung mit Wasserdampf ein. Geladene atomare Teilchen oder Röntgenstrahlen hinterlassen beim Durchqueren der Kammer zahlreiche Gasionen. Diese sind Kondensationskeime, an denen die Wassertröpfchen eine Nebelspur bilden.



Luftstrahltriebwerk. Die angesaugte Luft wird vom Verdichter des Triebwerks komprimiert. Beim Verbrennen des zugeführten Treibstoffs findet eine isobare Erwärmung statt. Während der nachfolgenden adiabatischen Expansion wird Energie an die Turbine und den ausgestoßenen Gasstrahl abgegeben. Die von der Turbine abgegebene mechanische Energie dient zum Antrieb des Verdichters. Der Gasstrahl liefert durch Rückstoß die Schubkraft.



Dampfturbine. Ähnlich wie bei der Gasturbine wird die, in diesem Falle mit Wasserdampf, zugeführte Wärme teilweise in mechanische Energie umgewandelt und zum Antrieb von Maschinen oder Generatoren genutzt. Die abgebildeten Turboaggregate bestehen aus einer Dampfturbine, die mit einem elektrischen Generator gekoppelt ist. Die Wirtschaftlichkeit beim Bau und der Ausrüstung von Kraftwerken vergrößert sich mit der Leistung dieser Aggregate. Heute werden bereits Turbinenleistungen von 1000 Megawatt erreicht.



Reversible und irreversible Vorgänge

Das Energieprinzip schließt im Naturgeschehen jede Möglichkeit aus, Energie zu erzeugen oder zu vernichten. Nicht alle Vorgänge, bei denen der Energieerhaltungssatz erfüllt wäre, laufen aber in der Natur wirklich ab. Die beiden in der Tabelle 118/1 angeführten Beispiele sollen diese Aussage erläutern.

Mit dem ersten Beispiel wird das Wesen eines **irreversiblen** (nicht umkehrbaren) Vorganges beschrieben. Das zweite Beispiel erläutert zum Vergleich einen nahezu **reversiblen** (umkehrbaren) Vorgang.

Diese Überlegungen lassen sich verallgemeinern:

► **In der Natur gibt es reversible und irreversible Vorgänge. Nur bei reversiblen Vorgängen ist eine Rückkehr in den Ausgangszustand möglich, ohne daß bleibende Veränderungen auftreten.**

Da sich Reibungseinflüsse nicht ganz ausschalten lassen, sind die in der Tabelle 119/1 angeführten makroskopischen Vorgänge nur annähernd reversibel.

Die Erfahrungen über reversible und irreversible Vorgänge können in einem Naturgesetz, dem zweiten Hauptsatz der Wärmelehre, zusammengefaßt und verallgemeinert werden. Durch dieses Gesetz werden alle jene makroskopischen Vorgänge für unmöglich erklärt, mit denen eine Umkehrung irreversibler Prozesse erzielbar wäre. Der zweite Hauptsatz läßt sich in verschiedenen Formen aussprechen, z. B.:

1. Wärme kann niemals von selbst, d. h. ohne äußere Einwirkung von einem Körper niedriger Temperatur auf einen Körper höherer Temperatur übergehen; in einem gleichmäßig temperierten Körper entstehen nicht von selbst Temperaturunterschiede.

(CLAUSIUS 1850)

2. Es ist unmöglich, eine periodisch arbeitende Maschine zu konstruieren, die weiter nichts bewirkt, als Abkühlung eines Wärmespeichers und Heben einer Last.

(PLANCK 1905)

Die Gleichwertigkeit der beiden Formulierungen ist zu erkennen, wenn man beachtet, daß die Maschine selbst zu den an der Energieumwandlung beteiligten Körpern gehört. Das wird an einem Beispiel deutlich:

Zwei Körper mögen nach einem Wärmeaustauschvorgang (irreversibler Prozeß!) die gleiche Temperatur erreicht haben.

Mit Hilfe der für unmöglich erklärten Maschine könnte

Tabelle 118/1

Beispiel 1

Ein Dachziegel fällt zur Erde. Die anfangs vorhandene potentielle Energie wird zuerst in kinetische Energie und beim Aufschlag in Wärme und Verformungsarbeit umgewandelt. Die Temperatur des Ziegels und der Umgebung steigt. Niemals ist zu beobachten, daß die Körper sich von selbst wieder abkühlen und dadurch der Ziegel in seine ursprüngliche Lage zurückkehrt. In Wirklichkeit gleicht sich die Temperatur aus. Der Ziegel kann nur durch Aufwenden einer Arbeit wieder gehoben 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 in potentielle Energie der Schwerkraft umgewandelt, bis fast wieder die Ausgangslage erreicht ist. Eine Wärmeentwicklung wie in Beispiel 1 ist in diesem Umfange nicht zu beobachten.

Irreversible Vorgänge
Umwandlung von mechanischer Energie in Wärme durch Reibung oder unelastischen Stoß. Temperaturlausgleich zwischen Körpern verschiedener Temperatur Diffusion
Reversible Vorgänge
Ungedämpfte Schwingungen eines Pendels oder Federschwingers. Stoß zwischen elastischen Körpern Bewegung der Planeten

der eine Körper auf seine Anfangstemperatur abgekühlt werden. Die hierbei abgegebene mechanische Arbeit könnte dazu dienen, den anderen Körper z. B. durch einen Reibungsvorgang wieder zu erwärmen, so daß schließlich der Ausgangszustand erreichbar wäre.

Der erste Hauptsatz der Wärmelehre drückt die Erfahrung aus, daß es auch unter Einbeziehung thermischer Vorgänge kein *perpetuum mobile* geben kann. Die durch den zweiten Hauptsatz als unmöglich erklärte Art der Energieumwandlung hätte fast den gleichen Wert wie ein *perpetuum mobile*. Die in der zweiten Aussageform des 2. Hauptsatzes genannte Maschine würde es z. B. gestatten, dem Meerwasser fortwährend Wärme zu entziehen und diese vollständig in mechanische Arbeit umzuwandeln. Eine solche Vorrichtung nennt man deshalb *perpetuum mobile* 2. Art.

Ein *perpetuum mobile* zweiter Art würde keine anderen bleibenden Veränderungen bewirken, als daß einem Körper Wärme entnommen und dafür eine gleichwertige mechanische Arbeit verrichtet wird.

Der zweite Hauptsatz der Wärmelehre kann nunmehr auch in der Form ausgesprochen werden.

Ein *perpetuum mobile* zweiter Art kann es nicht geben. ◀

Die Aussage „Wärme kann nicht vollständig in mechanische Arbeit umgewandelt werden“ ist eine unzutreffende Formulierung des zweiten Hauptsatzes. Auf Seite 106 wurde nachgewiesen, daß bei isothermer Expansion des idealen Gases die zugeführte Wärme vollständig in mechanische Arbeit umgesetzt wird. Damit ist jedoch kein *perpetuum mobile* 2. Art verwirklicht. Bei der Zustandsänderung findet nicht nur die Energieumwandlung statt, sondern es vergrößert sich auch das Gasvolumen und verkleinert sich der Gasdruck.

Mit Hilfe des zweiten Hauptsatzes kann nunmehr darüber entschieden werden, ob ein bestimmter Vorgang reversibel oder irreversibel ist: Alle Vorgänge, die nur durch Einsatz eines *perpetuum mobile* zweiter Art rückgängig gemacht werden könnten, sind irreversibel.

Aus dem zweiten Hauptsatz sind wichtige Folgerungen für den Wirkungsgrad von Wärmekraftmaschinen ableitbar. Das *perpetuum mobile* zweiter Art kann als „Wärmekraftmaschine mit dem Wirkungsgrad 1 betrachtet werden. Dieser Wirkungsgrad ist auf Grund des zweiten Hauptsatzes bei Wärmekraftmaschinen nicht erreichbar:

Mit einer periodisch arbeitenden Wärmekraftmaschine kann Wärme nicht vollständig in mechanische Arbeit umgewandelt werden. ◀

Die Arbeitsweise der Wärmekraftmaschinen wird in sehr allgemeiner Form durch Bild 120/1 beschrieben.

Einem Wärmespeicher hoher Temperatur T_1 (z. B. Dampfkessel) wird eine Wärmemenge W_1 entnommen. Ein Teil davon wird in mechanische Arbeit umgewandelt. Der Rest geht als Abwärme W_2 an einen Wärmespeicher tieferer Temperatur T_2 (z. B. Kondensator). Mit Hilfe des zweiten Hauptsatzes ist nachweisbar, daß der Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine höchstens den Wert

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (128)$$

erreichen kann. Diese Erkenntnis veranlaßt dazu, bei der Konstruktion von Wärmekraftmaschinen immer höhere Temperaturen T_1 anzustreben, da T_2 nur durch zusätzlichen Energieaufwand unter die Umgebungstemperatur gesenkt werden kann.

Beim Dieselmotor ergibt sich mit $T_1 \approx 2273 \text{ °K}$, $T_2 \approx 273 \text{ °K}$ etwa die Hälfte des höchstmöglichen Wirkungsgrades, der diesem Temperaturgefälle entspricht:

$$\eta_{\max} = 0,88$$

Der tatsächlich erreichte Wirkungsgrad beträgt nur $\eta = 0,4$.

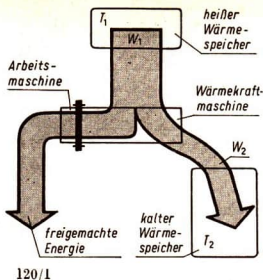
Die Tatsache, daß in der Natur ständig irreversible Vorgänge stattfinden, führte zu Auffassungen, daß schließlich einmal alle makroskopischen Bewegungen aufhören und alle Temperaturunterschiede ausgeglichen sein müßten. Der nach diesen Hypothesen eintretende Endzustand wird als „Wärmetod der Welt“ bezeichnet.

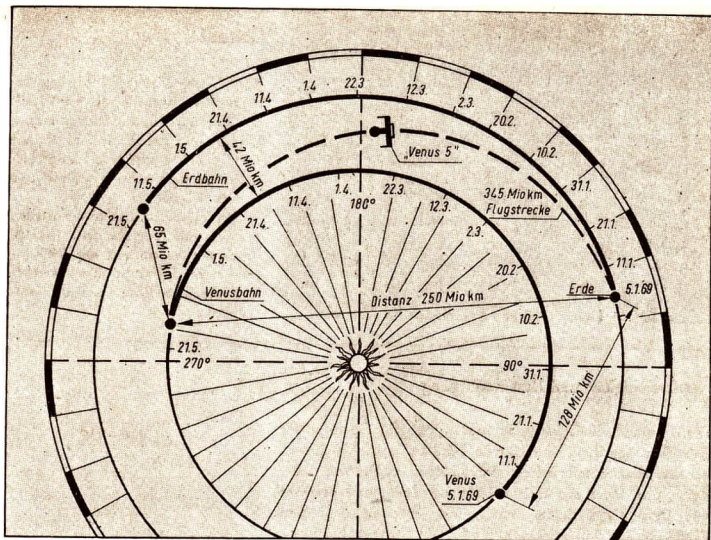
Die modernen Erkenntnisse der Atom- und Astrophysik zeigen jedoch, daß eine so weittragende, das gesamte Weltall betreffende Schlußfolgerung nicht zulässig ist. So gibt es z. B. keine begründete Annahme, daß der Energievorrat des Weltalls endlich ist.

Friedrich Engels schrieb zu dieser Frage:

„Die Unzerstörbarkeit der Bewegung kann nicht bloß quantitativ, sie muß auch qualitativ gefaßt werden; eine Materie, deren rein mechanische Ortsveränderung zwar die Möglichkeit in sich trägt, unter günstigen Bedingungen in Wärme, Elektrizität, chemische Aktion, Leben umzuschlagen, die aber außerstande ist, diese Bedingungen aus sich selbst zu erzeugen, eine solche Materie hat Bewegung eingebüßt; eine Bewegung, die die Fähigkeit verloren hat, sich in die ihr zukommenden verschiedenen Formen umzusetzen, hat zwar noch Dynamis (Möglichkeit), aber keine Energiea (Wirksamkeit) mehr, und ist damit teilweise zerstört worden. Beides aber ist undenkbar“.

Engels, F., Dialektik der Natur, Berlin 1955, Seite 25.

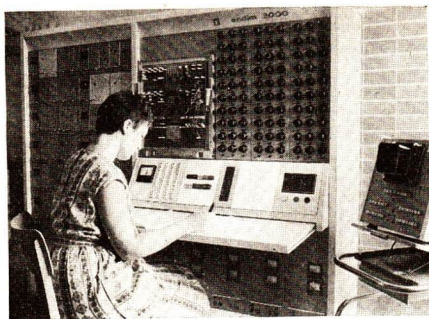




Mechanik

Die Mechanik gehört zu den ältesten Teilgebieten der Physik. Sie hat ihre Bedeutung als Grundlage für viele andere Gebiete der physikalischen Wissenschaft und Technik behalten.

Ihre Entwicklung ist eng mit den Fortschritten der mathematischen Wissenschaft verbunden. Heute bedient man sich in der Mechanik umfangreicher mathematischer Hilfsmittel; zum Beispiel setzt die Berechnung der Bahn eines Raumschiffes eine vielseitige Anwendung mathematischer Erkenntnisse voraus und erfordert einen Umfang an rechnerischer Tätigkeit, wie er nur mit Hilfe moderner elektronischer Rechenautomaten bewältigt werden kann. Die großartigen Erfolge der sowjetischen Raketentechnik und Kosmonautik zeugen von dem hohen Stand, den die Anwendung der Mathematik in der Physik und in der wissenschaftlich-technischen Praxis der Gegenwart erreicht hat.



Physikalische Grundbegriffe

Eine tiefere Einsicht in die gesetzmäßigen Zusammenhänge der Physik und eine rationelle Anwendung der Erkenntnisse in der Praxis sind nur auf der Grundlage exakt definierter Begriffe und mathematisch formulierter Gesetze möglich.

In den folgenden Abschnitten werden grundlegende Begriffe und Gesetze durch die Anwendung der Differential- und Integralrechnung vertieft und in größere Zusammenhänge eingeordnet.

Geschwindigkeit und Beschleunigung

Die Dynamik, die Lehre von den Bewegungsänderungen der Körper unter dem Einfluß von Kräften, abstrahiert von konkreten Besonderheiten der Körper, z. B. von ihrer Form und ihrer stofflichen Beschaffenheit, und arbeitet mit Denkmodellen, in denen sich jene physikalischen Eigenschaften widerspiegeln, die für die Untersuchung der Bewegungsvorgänge bedeutsam sind. Zu diesen physikalischen Eigenschaften gehören der Ort des Körpers im Raum und sein Trägheitsverhalten; letzteres ist gekennzeichnet durch die Masse des Körpers.

Die Abstraktion von anderen Eigenschaften, wie Abmessungen, Material, Form u. a. führt zum Denkmodell der *Punktmasse*: Die gesamte Masse des Körpers wird in einem Punkt vereinigt gedacht.

Die Aussagen, die für die Punktmasse ausgesprochen werden, kennzeichnen unter dieser Voraussetzung die wesentlichen Seiten des Bewegungszustandes des Körpers. Bei diesen Überlegungen steht die Punktmasse sozusagen stellvertretend für den Körper. In der Regel wird die Masse im *Massenmittelpunkt* (Schwerpunkt) des Körpers konzentriert angenommen.

Um die Bewegung eines Körpers oder einer Punktmasse zu kennzeichnen, ist ein *Bezugssystem* erforderlich. Es ist auch bekannt, daß es zu jeder Bewegung ein Bezugssystem gibt, gegenüber dem sich der Körper oder die Punktmasse in Ruhe befindet. Ruhe und Bewegung sind relativ; diese Begriffe haben nur im Hinblick auf ein Bezugssystem Sinn, eine absolute Ruhe gibt es nicht.

Bei allen Bewegungen legt ein Körper (Punktmasse) im Laufe der Zeit einen Weg zurück. Dabei besteht eine eindeutige Zuordnung zwischen diesen beiden physikalischen Größen. Deshalb läßt sich der Weg als Funktion der Zeit $s = f(t)$ mathematisch beschreiben. Diese Funktion kann man grafisch in einem Weg-Zeit-Diagramm, in einfachen Fällen auch analytisch darstellen.

Die Geschwindigkeit ist eine physikalische Größe, die den Bewegungszustand eines Körpers oder einer Punktmasse charakterisiert.

Die Geschwindigkeit ist eine vektorielle Größe und als solche durch Betrag und Richtung bestimmt. Zur Vereinfachung kann man die Richtung der Vektorgrößen als gegeben ansehen und in diesem Falle nur mit den Beträgen rechnen.

Bei der gleichförmigen Bewegung ist die Geschwindigkeit konstant. Ist die Geschwindigkeit nicht konstant, wird die Bewegung als ungleichförmig bezeichnet.

Sind bei der gleichförmigen Bewegung der Gesamtweg s und die Gesamtzeit t bekannt, so ergibt sich die Geschwindigkeit v als Quotient aus dem Weg und der Zeit (Lb. 9, S. 17/18):

$$v = \frac{s}{t} \quad (129)$$

Das Weg-Zeit-Diagramm einer gleichförmigen Bewegung ist im kartesischen Koordinatensystem eine Gerade; ihr Anstieg kennzeichnet die Geschwindigkeit (Bild 123/1).

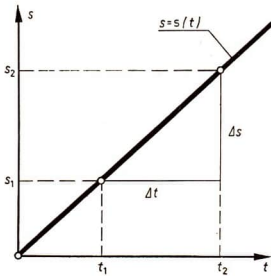
Bildet man bei einer ungleichförmigen Bewegung den Quotienten aus dem Gesamtweg und der Gesamtzeit, so erhält man die Durchschnittsgeschwindigkeit der Bewegung. Werden diese Überlegungen nicht auf den gesamten Bewegungsvorgang bezogen, sondern auf eine Wegänderung Δs und die zugehörige Zeitspanne Δt (Bild 123/2), so ergibt der Quotient dieser Differenzen die Durchschnittsgeschwindigkeit \bar{v} für den Zeitabschnitt Δt :

$$\bar{v} = \frac{s_2 - s_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (130)$$

Zur Augenblicksgeschwindigkeit v für einen bestimmten Zeitpunkt (t_1 in Bild 123/2) gelangt man, indem man den Grenzwert dieses Differenzenquotienten für eine gegen Null strebende Zeitspanne Δt bildet:

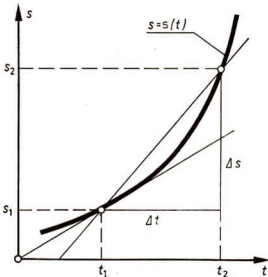
$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt} \quad (131) \triangleleft$$

Die Geschwindigkeit ist der Differentialquotient des Weges nach der Zeit.



123/1

123/2



Die Geschwindigkeit hat die Einheit $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Die Beschleunigung ist eine physikalische Größe, welche die Änderung des Bewegungszustands eines Körpers oder einer Punktmasse zum Ausdruck bringt.

Eine Bewegung, bei der die Beschleunigung konstant ist, d. h. bei der sich die Geschwindigkeit in gleichen Zeitabschnitten Δt um den gleichen Wert Δv ändert (Bild 124/1), heißt *gleichmäßig beschleunigt*. Beispiele hierfür sind der freie Fall oder der lotrechte Wurf nach oben oder unten. Ist die Beschleunigung nicht konstant, so wird die Bewegung *ungleichmäßig beschleunigt* genannt.

Bei der gleichmäßig beschleunigten Bewegung ergibt sich die Beschleunigung a als Quotient aus der Endgeschwindigkeit v und der Gesamtzeit t , vorausgesetzt, daß die Anfangsgeschwindigkeit v_0 gleich 0 ist:

$$a = \frac{v}{t} \quad \text{für } v_0 = 0. \quad (132)$$

Bildet man bei einer beliebigen beschleunigten Bewegung diesen Quotienten unter der gleichen Voraussetzung, so erhält man die *Durchschnittsbeschleunigung*. Werden diese Überlegungen nicht auf den gesamten Bewegungsvorgang bezogen, sondern auf eine Geschwindigkeitsänderung Δv und die zugehörige Zeitspanne Δt (Bild 124/2), so ergibt der Quotient dieser Differenzen die Durchschnittsbeschleunigung \bar{a} für den Zeitabschnitt Δt :

$$\bar{a} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (133)$$

- Erklären Sie, weshalb die Gültigkeit der Gleichung (133) nicht mehr an die Voraussetzung $v_0 = 0$ gebunden ist!

Zur Augenblicksbeschleunigung a gelangt man – analog zur Augenblicksgeschwindigkeit – indem für einen bestimmten Zeitpunkt der Grenzwert dieses Differenzenquotienten für eine gegen Null strebende Zeitspanne Δt gebildet wird. Somit ist

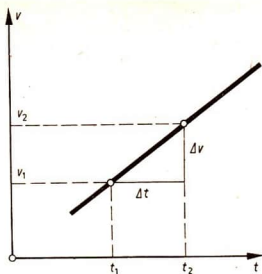
$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt}. \quad (134)$$

Mit (131) folgt daraus

$$\triangleright a = \frac{dv}{dt} = \frac{ds}{dt^2}. \quad (135)$$

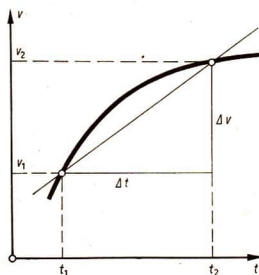
Die Beschleunigung ist der Differentialquotient der Geschwindigkeit nach der Zeit und damit der zweite Differentialquotient des Weges nach der Zeit.

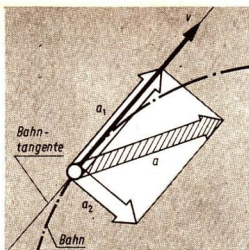
Die Beschleunigung hat die Einheit $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.



124/1

124/2





125/1 Geschwindigkeit (v) und Beschleunigung (a); Zerlegung des Beschleunigungsvektors \vec{a} in eine Komponente in Richtung der Geschwindigkeit \vec{a}_1 und eine dazu senkrechte Komponente \vec{a}_2

Wie die Geschwindigkeit ist auch die Beschleunigung als vektorielle Größe durch Betrag **und** Richtung charakterisiert. Die vorstehenden Betrachtungen berücksichtigen jedoch nur die Beträge.

Fällt die Richtung der Beschleunigung mit der Bewegungsrichtung, d. h. mit der Richtung der Geschwindigkeit zusammen, so ändert sich die Bewegungsrichtung nicht, die Bewegung verläuft geradlinig. Hat die Beschleunigung dabei den gleichen Richtungssinn wie die Geschwindigkeit (d. h. ist sie positiv), so wächst der Betrag der Geschwindigkeit an. Ist der Richtungssinn der Beschleunigung dem Richtungssinn der Geschwindigkeit entgegengesetzt (d. h. ist die Beschleunigung negativ), so nimmt der Betrag der Geschwindigkeit ab; in diesem Falle ist die Bewegung verzögert.

Veranschaulichen Sie sich diesen Zusammenhang am Beispiel des freien Falles, des lotrechten Wurfes aufwärts und abwärts!

Welchen Wert hat die Beschleunigung bei der geradlinigen gleichförmigen Bewegung?

Weicht die Richtung der Beschleunigung dagegen von der Richtung der Geschwindigkeit ab, so ändert sich die Bewegungsrichtung und damit auch die Richtung des Geschwindigkeitsvektors; die Bewegung verläuft krummlinig. Jede krummlinige Bewegung ist somit als eine beschleunigte Bewegung aufzufassen.

Als vektorielle Größe läßt sich die Beschleunigung in Komponenten gegebener Richtung zerlegen; deren Beträge können nach der Parallelogramm-Methode grafisch oder trigonometrisch ermittelt werden. Für die Änderung des *Betrages* der Geschwindigkeit ist die Beschleunigungskomponente in Geschwindigkeitsrichtung, für die Änderung der *Richtung* der Geschwindigkeit die Beschleunigungskomponente senkrecht zur Geschwindigkeitsrichtung maßgebend (Bild 125/1).

Gibt es beschleunigte Bewegungen, bei denen sich der Betrag der Geschwindigkeit nicht ändert?

Die Bewegungsgleichungen

Wiederholen Sie (↗ Lehrbuch Klasse 9 bzw. ↗ Tafelwerk) den Abschnitt „Die Grundgesetze der Mechanik“!

Gleichförmige Bewegung. Wirken auf einen in Bewegung befindlichen Körper **keine Kräfte** ($\sum F = 0$), so erfolgt nach dem Trägheitsgesetz die Bewegung **gleichförmig**.

Nach dem Grundgesetz der Mechanik ist in diesem Falle

$$F = m \cdot a = 0, \quad (136)$$

das heißt aber, es ist $a = 0$, denn für jeden Körper ist stets $m > 0$.

Eine gleichförmige Bewegung hat die Beschleunigung Null.

Ist die Ableitung einer Funktion bekannt, so kann man durch Integration die Stammfunktion bestimmen. Aus

$$\frac{dv}{dt} = a = 0$$

erhält man somit

$$v = \text{konst.}$$

Aus Gleichung (129) kann man damit durch nochmalige Integration das Weg-Zeit-Gesetz der gleichförmigen Bewegung herleiten:

$$ds = v \cdot dt, \quad (137)$$

wird integriert:

$$\int ds = \int v \cdot dt \quad (138)$$

Führt man diese Integration aus, so ergibt sich

$$s = v \cdot t + c. \quad (139)$$

Diese Funktionsgleichung gilt für alle Zeitpunkte t der gleichförmigen Bewegung. Betrachtet man den Zeitpunkt $t_0 = 0$, d. h. den Anfang der gleichförmigen Bewegung, so erkennt man, daß die Integrationskonstante c die Wegstelle s_0 , den Anfangsort der gleichförmigen Bewegung angibt.

► **Weg-Zeit-Gesetz
der gleichförmigen Bewegung**

$$s = v \cdot t + s_0 \quad (140)$$

Dies ist eine lineare Funktion $s = s(t)$. Ihre Darstellung in einem kartesischen Koordinatensystem ist eine Gerade.

● Was bedeutet es, wenn diese Gerade mehr oder weniger steil steigt, horizontal verläuft oder fällt?

Muß diese Gerade durch den Ursprung verlaufen?

● Welchen Sinn hat es, ein Stück dieser Geraden im 2., 3. oder 4. Quadranten zu zeichnen?

Gleichmäßig beschleunigte Bewegung ($F = \text{konst.}$). Wirkt auf einen Körper eine **konstante Kraft**, so bewegt er sich **gleichmäßig beschleunigt**. Nach dem Grundgesetz der Mechanik ist in diesem Falle

$$F = m \cdot a = \text{konst.} \quad (141)$$

Da die Masse eines Körpers als unveränderlich angesehen werden kann, $m = \text{konst}$, ist auch $a = \text{konst}$.

Aus Gleichung (135) folgt $dv = a \cdot dt$.

Durch Integration und Berücksichtigung der Anfangsbedingung folgt hieraus das

Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz $v = a \cdot t + v_0$ (142) ◀
der gleichmäßig beschleunigten Bewegung

Führen Sie die Integration aus!

Auch dies ist eine lineare Funktion $v = v(t)$, ihr Bild in einem kartesischen Koordinatensystem ist eine Gerade. ●

Stellen Sie ähnlich wie auf Seite 126 Überlegungen zum Verlauf des Funktionsbildes an!

Aus Gleichung (142) erhält man durch weitere Integration das ●

Weg-Zeit-Gesetz $s = \frac{1}{2} a \cdot t^2 + v_0 \cdot t + s_0$ ◀
der gleichmäßig beschleunigten Bewegung (143)

Was für eine Funktion ist $s = s(t)$ und was für ein Bild hat sie in einem kartesischen Koordinatensystem?

Überlegen Sie, welchen Verlauf das Kurvenbild haben muß, wenn man für s_0, v_0, a bestimmte Werte (positive, negative, Null) annimmt. ●
 Beschreiben Sie für jeden dieser Fälle den Bewegungsablauf!

Bei einem Bremsversuch wurde ein PKW mit der Geschwindigkeit $72 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ auf einem Bremsweg von 25 m zum Stillstand gebracht. Welche Beschleunigung wirkte? Wie lange dauerte der Bremsvorgang? Wie groß war die Bremskraft? ■

Gegeben:

$$v_0 = 72 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} = 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$s = 25 \text{ m}$$

$$v = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \text{ (Endgeschwindigkeit)}$$

s_0 wird Null gesetzt. Begründen Sie das!

Gesucht:

$$a$$

$$t$$

$$F$$

Lösung:

$$v = a \cdot t + v_0$$

$$a = \frac{v - v_0}{t}$$

$$a = -\frac{v_0}{t}$$

wird in $s = \frac{1}{2} a \cdot t^2 + v_0 \cdot t$

eingesetzt: $s = \frac{1}{2} \frac{-v_0}{t} t^2 + v_0 \cdot t$

$$s = \frac{1}{2} \cdot v_0 \cdot t,$$

d. h. gleich dem Wege, der mit der Durchschnittsgeschwindigkeit

$$\frac{1}{2} \cdot v_0 \text{ zurückgelegt würde!}$$

$$t = \frac{2s}{v_0} = \frac{2 \cdot 25 \text{ m}}{20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}} = \underline{2,5 \text{ s}}$$

$$a = \underline{\underline{-8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}}$$

Die Schwerkraftbeschleunigung g beträgt angenähert $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, der Betrag der Bremsbeschleunigung ist etwa $\frac{1}{5}$ davon, die Bremskraft $m \cdot a = F$ beträgt also etwa $\frac{1}{5}$ des Gewichtes des Wagens. Berechnen Sie nach diesem Beispiel die Bremszeit und den Bremsweg für $v_0 = 15,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ und $a = 0,84 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$!

Stellen Sie für diese Bewegung das Weg-Zeit- und das Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm auf!

Ungleichmäßig beschleunigte Bewegung. Wirkt auf einen Körper eine zeitlich **veränderliche Kraft** $F = F(t)$, so bewegt er sich ungleichmäßig beschleunigt, d. h. auch die Beschleunigung a ist dann zeitabhängig.

Bei beliebigen ungleichförmigen Bewegungen, bei denen die Beschleunigung als Funktion der Zeit gegeben ist, kann in gleicher Weise wie im voranstehenden Abschnitt vorgegangen werden.

Oftmals ist die Beschleunigung jedoch von der Geschwindigkeit abhängig, z. B. bei den Bewegungen in einem bremsenden Medium wie beim Flug eines Geschosses oder beim Fallschirmsprung. Die Lösung solcher Aufgaben ist kompliziert und erfordert meist mathematische Kenntnisse, die über den Lehrstoff der Erweiterten Oberschule hinausgehen.

Kraft, Arbeit und Leistung

▷ Die Arbeit ist eine physikalische Größe, die zum Ausdruck bringt, daß längs eines Weges ein Widerstand überwunden wird.

Bewegt sich ein Körper oder eine Punktmasse unter der Wirkung einer Kraft, so ist unter den Voraussetzungen, daß Krafrichtung und Wegrichtung zusammenfallen und daß die Kraft F längs des Weges s konstant ist, die mechanische Arbeit W das Produkt aus der Kraft F und dem Weg s :

$W = F \cdot s$ für $F = \text{konst}$, F, s gleichgerichtet (Bild 128/1).
Fallen Kraft und Weg nicht in gleiche Richtung, wird nur die in Wegrichtung wirkende Kraftkomponente berücksichtigt. Sie ergibt sich als die (senkrechte) Projektion des Kraftvektors auf eine mit dem Weg gleichgerichtete Gerade (Bild 128/2).

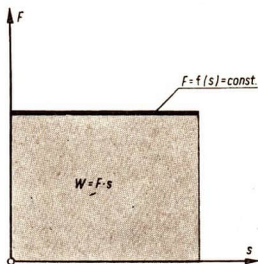
Entsprechend den Gesetzen der Projektion gilt allgemein $W = F \cdot s \cdot \cos(F, s)$.

Die Arbeit hat die Einheit 1 Newtonmeter oder Joule (J):

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}.$$

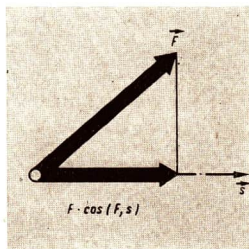
● Skizzieren Sie Beispiele aus der Praxis, wo Krafrichtung und Wegrichtung nicht zusammenfallen!

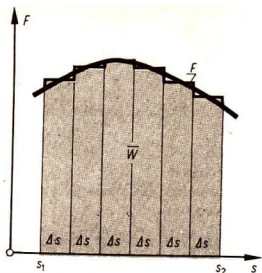
Ist die Kraft – oder die in Wegrichtung fallende Kraftkomponente – längs des Weges *nicht konstant*, sondern



128/1 Bestimmung der Arbeit aus einem Kraft-Weg-Diagramm ($F = \text{konst}$)

128/2





129/1 Zur Bestimmung der Arbeit bei örtlich veränderlicher Kraft

veränderlich, wie z. B. beim Zusammendrücken einer Schraubenfeder, so kann die Größe der Arbeit durch folgende Überlegung ermittelt werden: Man denkt sich den Weg zwischen s_1 und s_2 (Bild 129/1) in n kleine Teilstücke Δs zerlegt und nimmt längs dieser kleinen Wegstücke jeweils die Kraft als konstant an. Dann ist die Arbeit W_k für jedes Wegstück

$$W_k = F_k \cdot (\Delta s)_k. \quad (144)$$

Darin bedeutet k irgendeine ganze Zahl zwischen 1 und n ; F_k ist die als konstant angenommene, durchschnittliche Kraft innerhalb des Wegstücks $(\Delta s)_k$.

Die Arbeit längs des gesamten Weges s wird durch den Wert \bar{W} angenähert, den man durch Summation aller W_k erhält:

$$\bar{W} = \sum_{k=1}^{k=n} F_k \cdot (\Delta s)_k \quad (145)$$

Je kleiner man die Teilstücke Δs annimmt, das heißt je größer n ist, desto näher kommt im allgemeinen der Wert \bar{W} dem tatsächlichen Wert der Arbeit W .

Man erhält W als Grenzwert dieser Summe für ein gegen Unendlich strebendes n ; dieser Grenzwert ist aber das bestimmte Integral der Kraft längs des Weges, erstreckt über die Grenzen s_1 bis s_2 :

$$W = \int_{s_1}^{s_2} F \cdot ds \quad (146)$$

Die Leistung ist eine physikalische Größe, welche die Schnelligkeit ausdrückt, mit der die Arbeit verrichtet wird. ◀

Erläutern Sie Beispiele aus der Praxis, wo die Kraft längs eines Weges nicht konstant ist und welche Wirkungen sich daraus ergeben! ●

Wird in gleichen Zeitabschnitten stets die gleiche Arbeit verrichtet, so ist die Leistung P der Quotient aus Arbeit W und Zeit t :

$$P = \frac{W}{t}$$

Bei zeitlich veränderlicher Leistung ergibt dieser Quotient die Durchschnittsleistung während der gegebenen Zeit t . Allgemein nennt man den Grenzwert des Quotienten aus der Veränderung der Arbeit ΔW und der entsprechenden Zeitspanne Δt für $t \rightarrow 0$ die

$$\text{Augenblicksleistung } P = \frac{dW}{dt}. \quad (147) \quad \triangleleft$$

Dementsprechend folgt für die Arbeit bei einer gegebenen Leistung

$$W = \int P \cdot dt. \quad (148) \quad \triangleleft$$

● Was folgt aus Gleichung (148) für eine Leistung $P = \text{konst.}$?

Die Leistung ist wie die Arbeit eine skalare Größe. Ihre Einheit ist das Watt (W):

$$1 \text{ W} = 1 \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$$

Wegen des Zusammenhanges der Einheiten Joule und Watt wird die Arbeitseinheit Joule auch als Wattsekunde (Ws) bezeichnet.

Zur Ermittlung der Arbeit bei örtlich veränderlicher Kraft oder bei zeitlich veränderlicher Leistung werden in der Praxis häufig grafische oder numerische Verfahren angewendet, da eine analytische Lösung meist zu kompliziert ist.

■ Ein Beispiel für die Verwendung grafischer Methoden zur Ermittlung der Arbeit aus gegebenen Daten (Meßwerten) ist die Auswertung des Indikatorgramms (Bild 130/1).

In Indikatorgrammen kann der Zusammenhang zwischen der Druckkraft und dem Kolbenweg gegeben sein, aber auch, wie in Bild 130/1, der Zusammenhang zwischen dem Druck und dem jeweiligen Volumen im Zylinder.

Zwischen der Kraft F , der Arbeit W und dem Weg s gilt, wenn F längs des Wegstückes Δs als konstant angenommen wird,

$$\Delta W = F \cdot \Delta s.$$

Aus dieser Gleichung und aus dem Zusammenhang zwischen dem Weg und der Geschwindigkeit für eine beliebige Bewegung kann man eine wichtige Folgerung treffen.

Dividiert man beide Seiten dieser Gleichung durch die Zeitspanne Δt , in der der Weg Δs zurückgelegt wurde, so erhält man

$$\frac{\Delta W}{\Delta t} = F \cdot \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

Strebt Δt gegen Null, so treten an die Stelle der Differenzenquotienten die Differentialquotienten, und es ergibt sich

$$\frac{dW}{dt} = F \cdot \frac{ds}{dt},$$

oder wegen der physikalischen Bedeutung der beiden Differentialquotienten

$$P = F \cdot v. \quad (149)$$

▷ Die Leistung ist gleich dem Produkt aus Kraft und Geschwindigkeit.

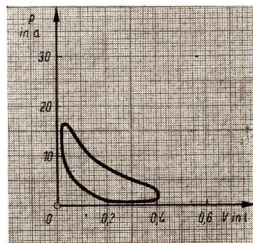
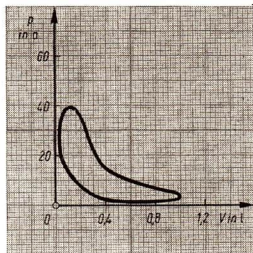
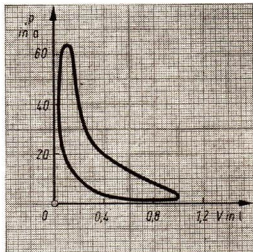
Diese Gesetzmäßigkeit wird in der Fahrzeugtechnik häufig angewendet, da man mit ihrer Hilfe aus der Geschwindigkeit des Fahrzeuges und der gemessenen Kraft unmittelbar die Leistung oder bei bekannter Leistung die Zug- oder Schubkraft errechnen kann.

● Welche Meßgeräte und Meßvorrichtungen werden benötigt, um an einem Kraftfahrzeug eine Leistungsmessung durchführen zu können?

● Skizzieren Sie den Meßversuch!

130/1 Indikatorgramme (schematisiert)

- a) Dieselmotor
- b) Ottomotor
- c) Kolbendampfmaschine (Expansionsbetrieb)



Mechanische Energie

Als *Energie* bezeichnen wir die Fähigkeit eines Körpers oder eines Systems von Körpern, Arbeit zu verrichten. Energie ist sozusagen gespeicherte und wiedergewinnbare Arbeit.

Für die Energie wie für die Arbeit werden das gleiche Formelzeichen und die gleichen Einheiten verwendet.

In der Mechanik unterscheiden wir **potentielle Energie** und **kinetische Energie**.

131/1 Hubarbeit und potentielle Energie im Schwerfeld der Erde

$$W = \int_{s_1}^{s_2} F \cdot ds.$$

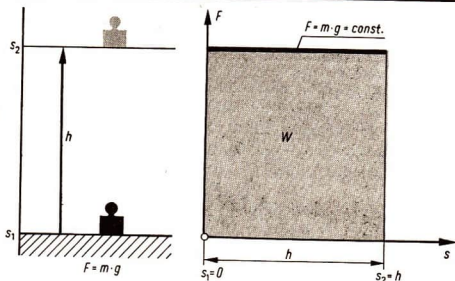
Beim Heben um eine kleine Strecke im Schwerfeld der Erde ist

$$F = m \cdot g = \text{konst.}$$

also

$$W_{\text{pot}} = W = \int_{s_1}^{s_2} m \cdot g \cdot ds \\ = m \cdot g (s_2 - s_1)$$

$$W_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h$$



131/2 Spannarbeit und potentielle Energie an einer Schraubenfeder

$$W = \int_{s_1}^{s_2} F \cdot ds$$

Beim Spannen einer Feder gilt das Hookesche Gesetz in der Form

$$F = k \cdot s$$

also

$$W_{\text{pot}} = W = \int_{s_1}^{s_2} k \cdot s \cdot ds \\ = \frac{1}{2} k (s_2^2 - s_1^2)$$

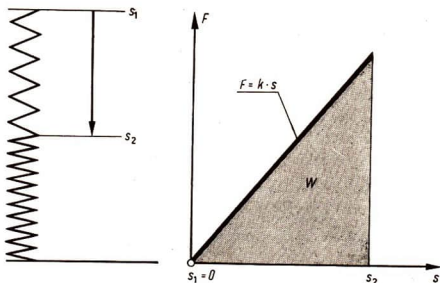
und weil $s_1 = 0$

$$W_{\text{pot}} = \frac{1}{2} k \cdot s_2^2$$

oder nach dem Hookeschen Gesetz

$$F = k \cdot s$$

$$W_{\text{pot}} = \frac{1}{2} F_2 \cdot s_2$$



Potentielle Energie ist vorhanden, wenn ein Körper durch Verschiebungsarbeit gegen eine Kraft in einen Zustand versetzt wird, aus der er durch das Wirken dieser Kraft wieder Arbeit verrichten kann, zum Beispiel wenn der Körper gehoben oder verformt (gespannt, zusammengedrückt, gedreht) wurde.

Der Zuwachs an potentieller Energie ist gleich der zugeführten Verschiebungsarbeit.

Beim Zurückführen des Körpers auf das Ausgangsniveau wird die betreffende potentielle Energie wieder umgewandelt. Wird der Körper aber nicht auf das Ausgangsniveau, sondern auf ein anderes, dazwischenliegendes Niveau geführt, so wird nur ein Teil seiner potentiellen Energie umgesetzt.

Kinetische Energie ist vorhanden, wenn ein Körper durch Beschleunigungsarbeit in Bewegung versetzt wurde.

Der Zuwachs an kinetischer Energie ist gleich der zugeführten Beschleunigungsarbeit. Beschleunigt man einen Körper der Masse m auf die Geschwindigkeit v , so beträgt die Beschleunigungsarbeit und damit auch die kinetische Energie

$$W_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m \cdot v^2. \quad (150)$$

- Leiten Sie diese Gleichung aus den Gleichungen $W = F \cdot ds$;

$$F = m \cdot a = \text{konst. und } s = \frac{a}{2} \cdot t^2 \text{ her!}$$

Beim Abbremsen des Körpers auf die Geschwindigkeit Null wird die kinetische Energie wieder umgewandelt. Wird der Körper aber nicht vollständig, sondern nur teilweise abgebremst, so wird nur ein Teil seiner kinetischen Energie umgesetzt.

Da die Geschwindigkeit eines Körpers oder einer Punktmasse vom Bezugssystem abhängt, ist auch die kinetische Energie eine vom Bezugssystem abhängige physikalische Größe.

Potentielle Energie und kinetische Energie werden zusammengefaßt als *mechanische Energie* bezeichnet.

Für mechanische Vorgänge, d. h. für Vorgänge, bei denen im betreffenden System keine Umwandlung mechanischer Energie in eine andere Energieform auftritt, gilt das Gesetz von der Erhaltung der mechanischen Energie

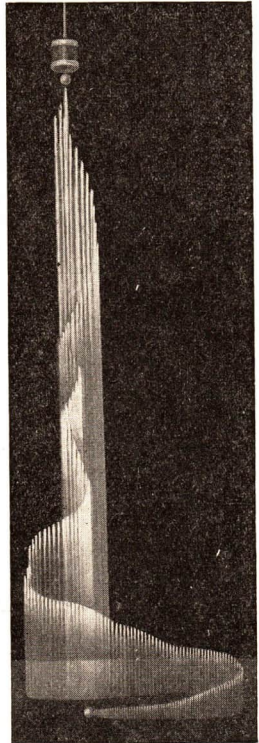
$$W_{\text{pot}} + W_{\text{kin}} = \text{konst.} \quad (151)$$

Dieses Gesetz ist ein Sonderfall des allgemeinen Gesetzes von der Erhaltung der Energie.

- Warum kann man die Bewegung der Planeten als reversiblen Vorgang bezeichnen?

Die Umwandlung potentieller Energie in kinetische Energie und umgekehrt kann an der Bewegung einer Elfenbein- oder

Bild 132/1 Das Bild enthält die Bahnspur einer hüpfenden Stahlkugel, fotografiert über einen längeren Zeitraum hinweg. Die Sprunghöhe nimmt dabei ab, da eine Umwandlung von mechanischer Energie in Wärme erfolgt.



Stahlkugel gezeigt werden, die auf eine Stahl- oder Glasplatte fallen gelassen wird und von dieser zurückspringt. Im Bild 133/1 sind verschiedene Phasen dieser Bewegung aufgezeichnet, die beigegefügte Tabelle (Bild 133/1) kennzeichnet die dabei auftretenden Formen der mechanischen Energie.

Erreicht die Kugel die Ausgangshöhe wieder?

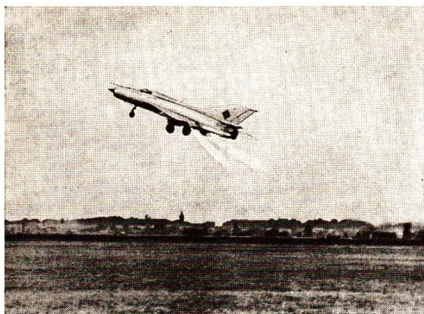
Begründen Sie Ihre Antwort!

Welche Energieumwandlungen treten auf?

Beschreiben Sie die Umwandlung der Energie beim Aufstieg und bei der Rückführung eines Weltraumflughörpers bis zur Landung auf der Erde!

133/1 Energieumwandlung bei einer springenden elastischen Kugel

Phase	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Bewegungsablauf (schematisch)									
Bewegungszustand	Ruhe	Fallen	Fallen	Fallen	Ruhe	Steigen	Steigen	Steigen	Ruhe
Potentielle Energie	Maximum (Lage)	abnehmend	0	zunehmend (Form)	Maximum (Form)	abnehmend	0	zunehmend (Lage)	Maximum (Lage)
Kinetische Energie	0	zunehmend	Maximum	abnehmend	0	zunehmend	Maximum	abnehmend	0



Der Impuls

Bei vielen Vorgängen in Natur und Technik reicht zur physikalischen Erklärung das Energiegesetz als Erhaltungssatz nicht aus. Bei Stoß- und Rückstoßvorgängen, z. B. in der Molekular- und Kernphysik, beim Luftstrahltrieb oder in der Ballistik, kann auch die Gesetzmäßigkeit der Erhaltung einer anderen physikalischen Größe, des Impulses, zur Klärung der Zusammenhänge herangezogen werden.

Kraftstoß und Impuls

Wird ein beweglicher Körper angestoßen, so erhält er während der Stoßdauer eine *Beschleunigung*. Man kann das zum Beispiel beim Rangieren von Eisenbahnwagen beobachten:

Je größer die Kraft, die auf den Körper einwirkt, und je länger sie angreift, desto größer ist die Geschwindigkeit, die der Körper erreicht.

Man nimmt die Kraft F während der Stoßdauer Δt als konstant an. Nach dem Newtonschen Grundgesetz der Mechanik erteilt die Kraft F einem Körper der Masse m die Beschleunigung a nach der Gleichung $F = m \cdot a$.

Während der Zeit Δt führt der Körper nach dieser Annahme eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung aus; die Geschwindigkeitsänderung Δv , die er dabei erfährt, ist

$$\Delta v = a \cdot \Delta t,$$

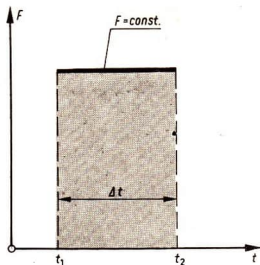
und es gilt

$$F \cdot \Delta t = m \cdot \Delta v. \quad (152)$$

- *Weshalb ist diese Geschwindigkeitsänderung Δv von der Geschwindigkeit, die der Körper vor dem Anstoßen hatte, nicht abhängig?*

Bei diesem Vorgang wird einmal die Krafteinwirkung, zum anderen die Bewegungsänderung des Körpers betrachtet. Für die *Krafteinwirkung* auf den Körper ist, wie die Gleichung zeigt, das Produkt aus der Kraft F und der Zeit Δt kennzeichnend.

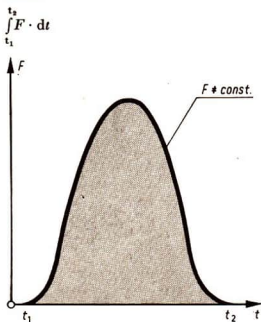
Dieses Produkt, bei dem die Kraft als konstant angenommen wird, hat die Bezeichnung *Kraftstoß*.



135/1 Kraftstoß bei konstanter Kraft

$$\int_{t_1}^{t_2} F \cdot dt = F(t_2 - t_1) = F \cdot \Delta t$$

135/2 Kraftstoß bei veränderlicher Kraft



$$\int_{t_1}^{t_2} F \cdot dt$$

Bei einer beliebigen, auch zeitlich nicht konstanten Kraft F zwischen dem Beginn (t_1) und dem Ende (t_2) des Vorganges ergibt sich der Kraftstoß als das bestimmte Integral

$$\int_{t_1}^{t_2} F \cdot dt. \quad (153)$$

Für die *Änderung des Bewegungszustandes* des Körpers ist das Produkt aus der Masse m und der Geschwindigkeitsänderung Δv maßgebend. Da die Masse des Körpers konstant ist, kann das Produkt $m \cdot \Delta v$ auch als Änderung der Größe $m \cdot v$, d. h. als $\Delta(m \cdot v)$ angesehen werden.

Das Produkt $m \cdot v$ ist eine physikalische Größe, die den Bewegungszustand eines Körpers charakterisiert. Man bezeichnet diesen Ausdruck als

Impuls $I = m \cdot v$ (154) ◀

Der Impuls ist das Produkt aus Masse und Geschwindigkeit.

Der Impuls ist eine vektorielle Größe, er stimmt in Richtung und Richtungssinn mit der Geschwindigkeit überein. Auch der Kraftstoß ist vektoriell, er kann mit dem Impuls, den der Körper vor dem Anstoßen besitzt, nicht übereinstimmen; er wird zum vorhandenen Impuls vektoriell addiert.

Wegen der Gleichheit des Kraftstoßes und des Impulses z. B. hinsichtlich ihres vektoriellen Charakters wird für den Kraftstoß ebenfalls die Bezeichnung Impuls gebraucht.

Wie die Geschwindigkeit ist auch der Impuls vom Bezugssystem abhängig.

Unter Verwendung des Impulsbegriffes kann der Zusammenhang zwischen Kraftstoß und Bewegung wie folgt ausgedrückt werden:

Die Impulsänderung eines Körpers ist gleich dem ihm zugeführten Kraftstoß. ◀

Ein Körper mit einer Masse von 100 g fällt 4 Sekunden. Berechnen Sie den Kraftstoß und die Änderung des Impulses! ■

Gegeben:

$$m = 100 \text{ g} = 0,1 \text{ kg}$$

$$t = 4 \text{ s}$$

Gesucht:

F

$m \cdot \Delta v$

Lösung:

$$\text{Kraftstoß: } F = m \cdot g$$

$$F \cdot t = m \cdot g \cdot t$$

$$F \cdot t = 0,1 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 4 \text{ s}$$

$$F \cdot t = 3,92 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Impulsänderung:

$$m \cdot \Delta v = m \cdot v \quad (\text{wegen } v_1 = 0)$$

$$\text{ist } v = v_2 = g \cdot t)$$

$$m \cdot \Delta v = m \cdot g \cdot t$$

$$m \cdot \Delta v = 0,1 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 4 \text{ s}$$

$$m \cdot \Delta v = 3,92 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Beachten Sie, daß die **Impulsänderung** auch dann den gleichen Wert hat, wenn die Anfangsgeschwindigkeit der Fallbewegung nicht Null ist!

Auf Grund des Zusammenhangs zwischen dem Kraftstoß und dem Impuls kann das Newtonsche Grundgesetz der Mechanik

$F = m \cdot a = m \cdot \frac{dv}{dt}$ (für $m = \text{konst.}$) auch als **Gesetz von der Impulsänderung** ausgesprochen werden:

$$\triangleright F = \frac{d(m \cdot v)}{dt} \quad \text{für } m = \text{konst.} \quad (155)$$

Die Kraft ist gleich dem Differentialquotienten des Impulses nach der Zeit.

In dieser Formulierung behält das Newtonsche Grundgesetz der Mechanik auch dann seine Gültigkeit, wenn die Masse nicht als konstant betrachtet werden kann, z. B. bei Teilchen, deren Geschwindigkeit sich der Größenordnung der Lichtgeschwindigkeit nähert.

Das Gesetz von der Erhaltung des Impulses

Aus Gleichung (155) folgt für den Fall, daß auf ein physikalisches System keine äußeren Kräfte wirken (man spricht dann von einem „abgeschlossenen System“)

$$\frac{d}{dt}(m \cdot v) = 0. \quad (156)$$

Integriert man diese Gleichung, so ergibt sich das

$$\triangleright \text{Gesetz von der Erhaltung } m \cdot v = \text{konst.} \\ \text{des Impulses} \quad \text{falls } F = 0 \quad (157)$$

Dieses Gesetz gilt natürlich auch für ein System, das aus mehreren Teilen besteht, selbst wenn diese sich gegeneinander bewegen. $m \cdot v$ bedeutet dann die Bewegungsgröße des Gesamtsystems, die sich als Summe der Bewegungsgrößen der Teile ergibt.

$$\triangleright \sum_{k=1}^n m_k \cdot v_k = \text{konst} \quad \text{falls } F = 0 \quad (158)$$

Der Impuls eines physikalischen Systems ist konstant, wenn auf das System keine äußere Kraft einwirkt.

Dem vektoriellen Charakter des Impulses entsprechend ist als Summe der Einzelimpulse deren vektorielle Summe zu verstehen.

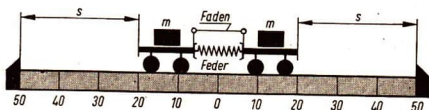
Aus dem Gesetz von der Erhaltung des Impulses ergibt sich als Spezialfall das Trägheitsgesetz: Ohne Krafteinwirkung bleibt in einem abgeschlossenen System der Gesamtimpuls und damit in einem System, dessen Teile ihre gegenseitige Lage nicht verändern, auch die Geschwindigkeit unverändert; es folgt aus

$$m \cdot v = \text{konst.}$$

auch

$$v = \text{konst. für } m = \text{konst.}$$

Das Gesetz von der Erhaltung des Impulses gehört wie das Gesetz von der Erhaltung der mechanischen Energie zu den Erhaltungssätzen der Mechanik, die aussagen, daß unter bestimmten Bedingungen gewisse physikalische Größen der zu untersuchenden Systeme *invariant*¹ sind. Die Erhaltungssätze sind ein Ausdruck der universellen Gesetzmäßigkeit von der Unerschaffbarkeit und Unzerstörbarkeit der Bewegung der Materie. Mit Hilfe der Erhaltungssätze ist es oftmals möglich, physikalische und technische Probleme ohne Kenntnis vieler spezieller Daten zu lösen.



137/1 Impulsversuch mit Wagen gleicher Masse

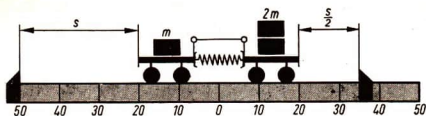
Zwei leicht bewegliche, kleine Wagen gleicher Masse werden auf eine waagerechte Glasplatte gesetzt, zwischen beide Wagen wird eine zusammengedrückte Schraubenfeder gebracht, deren Entspannen zunächst durch einen dünnen Faden verhindert wird (Bild 137/1). Brennt man den Faden durch, so rollen die Wagen in gleichen Zeiten gleich weit. Die Kraft der Feder wirkt nach beiden Seiten gleich stark.

Wie ist der Schluß, daß die Feder nach beiden Seiten gleich stark wirkt, begründet? ●

Der Versuch 33 zeigt unmittelbar, daß die Anfangsgeschwindigkeiten dem Betrage nach gleich, ihrer Richtung nach aber entgegengesetzt sind.

Wiederholt man diesen Versuch mit zwei Wagen verschiedener Masse (Bild 138/1), so bewegt sich nach dem Entspannen der Feder der Wagen größerer Masse mit geringerer Anfangsgeschwindigkeit. Aus den in gleichen Zeiten zu-

¹ unveränderlich



138/1 Impulsversuch mit Wagen ungleicher Masse

rückgelegten Wegen der beiden Wagen ersehen wir, daß die Beträge der Anfangsgeschwindigkeiten den Massen umgekehrt proportional sind.

$$v_1 : v_2 = m_2 : m_1 \quad (159)$$

Daraus folgt, daß die Impulse beider Wagen ihrem Betrage nach gleich sind. Sie haben jedoch entgegengesetzten Richtungssinn.

Im beschriebenen Versuch kommt zum Ausdruck, daß die Summe der Impulse beider Wagen nach dem Entspannen der Feder gleich Null ist. Da auch vor dem Durchbrennen des Fadens diese Summe, d. h. der Gesamtimpuls des aus zwei Wagen bestehenden Systems, gleich Null war, folgt daraus, daß sich der Gesamtimpuls während des Versuchs nicht geändert hat.

$$m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2 = 0 \quad (160)$$

Impuls und Rückstoß

Aus dem Gesetz von der Erhaltung des Impulses läßt sich noch eine weitere wichtige Folgerung ziehen. Man nimmt an, daß zwei Körper mit den Massen m_1 und m_2 ein abgeschlossenes System bilden. Durch eine innere Kraft geraten sie in Bewegung, etwa wie die Stücke eines gesprengten Felsblockes.

Man verfolgt die Wege, die von den Körpern nach dem Aufhören des Wirkens der inneren Kraft zurückgelegt werden. Nach der Voraussetzung bewegen sich die Körper nunmehr kräftefrei, also gleichförmig auf geradliniger Bahn.

Nach dem Impulserhaltungssatz ist, vom Vorzeichen abgesehen, für zwei in entgegengesetztem Richtungssinn auseinanderstrebende Körper

$$m_1 \cdot v_1 = m_2 \cdot v_2.$$

Mithin gilt für jede Zeit t , da die Wege vom Schwerpunkt des Systems aus gemessen werden,

$$m_1 \cdot v_1 \cdot t = m_2 \cdot v_2 \cdot t$$

oder, da

$$v_1 \cdot t = s_1$$

und

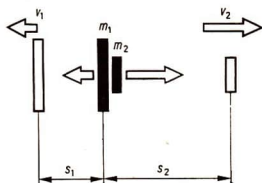
$$v_2 \cdot t = s_2$$

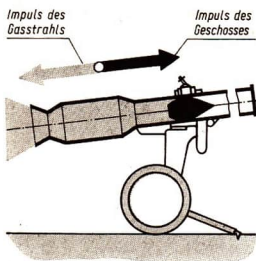
ist (Bild 138/2),

$$m_1 \cdot s_1 = m_2 \cdot s_2.$$

(161)

138/2 Massen und Wege in einem System zweier Körper





139/1 Rückstoßfreies Geschütz (schematisch)

Diese Gleichung bringt zum Ausdruck, daß der Massenmittelpunkt (Schwerpunkt) des Systems durch das Wirken innerer Kräfte nicht verändert wird.

Allgemein gilt der *Schwerpunktsatz der Mechanik*:

Der Schwerpunkt (Massenmittelpunkt) eines Systems wird nicht < beeinflusst, wenn auf das System nur innere Kräfte einwirken: er führt die gleiche Bewegung aus, die er ohne Einwirkung dieser inneren Kräfte ausführen würde.

Wird ein Geschöß abgefeuert, so erhält das Gewehr oder das Geschütz nach dem Gesetz von der Erhaltung des Impulses einen Rückstoß. Bei Maschinenwaffen wird ein Teil der Rückstoßenergie zum neuen Laden ausgenutzt, der Rest wird durch besondere Vorrichtungen kompensiert. In neuerer Zeit wurden rückstoßfreie Geschütze entwickelt, bei denen die Pulvergase zum Teil entgegengesetzt zur Schußrichtung entweichen können. Sie benötigen keine massereichen Vorrichtungen zum Abfangen des Rückstoßes und können dementsprechend leicht gebaut sein (Bild 139/1).

Nennen Sie weitere Beispiele für die Gültigkeit des Schwerpunktsatzes der Mechanik!

Der Rückstoß, der beim Fortschleudern eines Körpers (nach dem Gesetz von der Erhaltung des Impulses) entsteht, wird in der Technik zum Antrieb von Fahrzeugen verschiedener Art ausgenutzt, vor allem dann, wenn andere Antriebsmöglichkeiten nicht bestehen oder unzweckmäßig sind. Triebwerke jener Art erzeugen den Rückstoß in der Regel durch das Ausstoßen hochgespannter heißer Verbrennungsgase.

Luftstrahltriebwerke (↗ Wärmelehre S. 117). Beim Luftstrahltriebwerk wird die eingeströmte oder angesaugte Luft komprimiert und dabei erhitzt.

Der eingespritzte Brennstoff entzündet sich, und die Energie der hochgespannten heißen Gase wird weitgehend in Bewegungsenergie gerichtet fliegenden Gasteilchen umgewandelt.

Raketentriebwerk. Beim Flug in höheren Schichten der Atmosphäre und im kosmischen Raum sind Luftstrahltriebwerke nicht mehr verwendbar. Außer dem Brennstoff muß noch Sauerstoff – frei oder chemisch gebunden – mitgeführt werden; solche Triebwerke heißen Raketentriebwerke. Die im Verbrennungsraum entstehenden heißen Gase werden wie bei den Luftstrahltriebwerken auf eine hohe Ausströmungsgeschwindigkeit gebracht. Nach dem Aggregatzustand des Treibstoffes werden Flüssigkeits- und Feststoffraketen unterschieden.

Erklären Sie das physikalische Wirkungsprinzip eines Schiffs-schraubentriebwerks!

Die Geschwindigkeit einer Rakete zu berechnen, ist im allgemeinen sehr kompliziert. Deshalb werden einige vereinfachende Annahmen gemacht.

Die Rakete besitze beim Abflug die Masse m_0 , der Massenausstoß je Zeiteinheit sei konstant, und zwar vom Betrag q . Daraus ergibt sich für die Masse m der Rakete zum Zeitpunkt t

$$m = m_0 - q \cdot t \quad (162)$$

Hat der mitgeführte Treibstoff (Brennstoff und Oxydationsmittel) die Masse m_b ($m_b < m_0$), so beträgt die Brenndauer t_B (die Zeit, nach der der Treibstoff verbraucht ist)

$$t_B = \frac{m_b}{q} \quad (163)$$

Es sei weiterhin angenommen, daß die Schwerkraft die Geschwindigkeit der Rakete bei ihrem Aufstieg nicht verringert. Die Auströmungsgeschwindigkeit der Gase sei ebenso wie der zeitliche Massenausstoß konstant, sie habe den Betrag v_a . Aus der Beziehung, daß die Änderung des Impulses eines bewegten Körpers gleich dem diesem zugeführten Kraftstoß ist, läßt sich bei bekannter Impulsänderung die Kraft berechnen. Nehmen wir die Schubkraft F der Rakete während der Zeitspanne Δt als konstant an, so ist

$$F \cdot \Delta t = \Delta(m \cdot v_a) \quad (164)$$

Da die Größe v_a als konstant angenommen wird, läßt sich diese Gleichung auch in der Form

$$F \cdot \Delta t = v_a \cdot \Delta m \quad (165)$$

schreiben. Die Division durch Δt ergibt

$$F = v_a \cdot \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (166)$$

Der Differenzenquotient $\frac{\Delta m}{\Delta t}$ bezeichnet die (durchschnittliche)

Änderungsgeschwindigkeit der Masse; entsprechend der Annahme hat er den konstanten Wert q . Somit ergibt sich für die Schubkraft F des Raketentriebwerkes

$$F = v_a \cdot q \quad (167)$$

Die Beschleunigung der Rakete beträgt deshalb

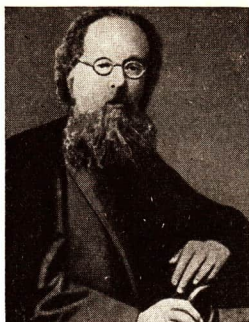
$$a = \frac{F}{m} = \frac{v_a \cdot q}{m} = \frac{v_a \cdot q}{m_0 - q \cdot t} \quad (168)$$

• Wann ist unter dieser Annahme die Beschleunigung der Rakete größer: kurz nach dem Start oder kurz vor dem Brennschluß?

Aus der Beschleunigung a erhalten wir durch Integration die Geschwindigkeit v (die Rechnung kann mit den in der 11. Klasse verfügbaren mathematischen Mitteln nicht ausgeführt werden). Es ist

$$v = \int \frac{v_a \cdot q}{m_0 - q \cdot t} \cdot dt, \quad v = v_a \cdot \ln \frac{m_0}{m_0 - q \cdot t} + k \quad (169)$$

Für $t = 0$ ergibt sich $v = v_0 = k$, die Integrationskonstante gibt also die Anfangsgeschwindigkeit der Rakete an.



140/1 KONSTANTIN EDUARDOWITSCH ZIOLKOWSKI (1858 bis 1935)

Bildleiste Seite 141

Sowjetische Raketen und Flugzeuge – der Antrieb erfolgt nach dem Gesetz von der Erhaltung des Impulses – demonstrieren durch ihre technischen Daten die wissenschaftlich-technische Überlegenheit und auch die militärische Stärke des sozialistischen Lagers.

oben: Sowjetische Anti-Raketen bei einer Parade

Solche Raketen zur Abwehr von Raketen gibt es zur Zeit nur im sozialistischen Lager

darunter:

E-266 Überschall-Jagdflugzeug (1960)

Geschwindigkeit $> 3000 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$

Flughöhe $> 34700 \text{ m}$

An-22 Transportflugzeug (1965)

Nutzlast 80000 kg

Passagiere 720

Mi-6 Großhubschrauber (1962)

Nutzlast 12000 kg

Passagiere 68



Wird für t die Brenndauer eingesetzt, so gibt das Produkt $q \cdot t$ die Gesamtmasse des Treibstoffs und die Differenz $m_0 - q \cdot t$ die Leermasse (einschließlich der Nutzlast) m_1 an. Dann folgt für die Brennschlußgeschwindigkeit v_B einer mit der Geschwindigkeit $v_0 = 0$ gestarteten Rakete

$$v_B = v_a \cdot \ln \frac{m_0}{m_1} \quad (170)$$

Der Quotient $\frac{m_0}{m_1}$ heißt Massenverhältnis oder, nach dem sowjetischen Gelehrten KONSTANTIN EDUARDOWITSCH ZIOLKOWSKI (1858 bis 1935), dem Begründer der wissenschaftlichen Theorie des Raketenfluges und der Astronautik, *Ziolkowski-Zahl*. Die Arbeiten Ziolkowskis blieben unter der Zarenherrschaft unbeachtet oder wurden totgeschwiegen; erst die Sowjetmacht erkannte ihre Bedeutung, sie unterstützte den Gelehrten großzügig und schuf mit seiner Hilfe bereits damals erste Grundlagen für das Raumfahrtprogramm, das mit dem Start von Sputnik I am 4. Oktober 1957 Wirklichkeit wurde.

Aus der Gleichung (170) ist ersichtlich, daß die Brennschlußgeschwindigkeit einer Rakete bei gegebenem Massenverhältnis der Ausströmungsgeschwindigkeit der Gase direkt proportional ist. Bei gegebener Ausströmungsgeschwindigkeit der Gase ist sie um so größer, je größer das Massenverhältnis, d. h., je kleiner bei einer festen Treibstoffmenge die Leermasse, einschließlich der Masse der Nutzlast, ist. Aus physikalischen und technischen Gründen lassen sich Ausströmungsgeschwindigkeit der Gase und Massenverhältnis nicht unbegrenzt steigern.

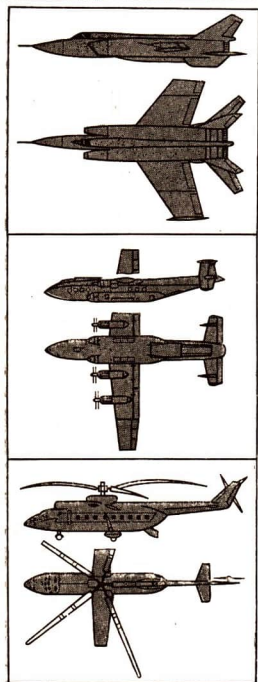
Nimmt man die günstigsten Werte $v_a = 3000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ und $\frac{m_0}{m_1} = 5$ an, so ergibt sich für die Brennschlußgeschwindigkeit

$$v_B = 3000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 1,609, \quad v_B = 4800 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Diese Geschwindigkeit reicht aber nicht aus, um einen Satelliten auf eine Umlaufbahn um die Erde zu bringen.

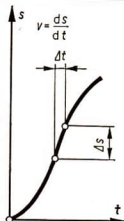
Gegenwärtig sind höhere Geschwindigkeiten, wie bereits ZIOLKOWSKI gefolgert hat, nur mittels Mehrstufenraketen zu erreichen. Nach dem Gesetz von der Zusammensetzung der Bewegungen addieren sich die Geschwindigkeiten der Raketenstufen.

Der Nutzen der Rakete beschränkt sich nicht auf die Luft- oder Raumfahrt. Raketen haben gegenwärtig eine außerordentlich hohe militärische Bedeutung. Die Streitkräfte der Staaten des Warschauer Vertrages sind mit Raketen verschiedener Aufgabenbereiche und Größen zum Schutz der sozialistischen Länder ausgerüstet. Die Streitkräfte der sozialistischen Staaten verfügen z. B. zur Zeit als einzige auf der Welt über einsatzbereite Antiraketen zur Abwehr von Raketen. Die leistungsfähigsten sowjetischen Raketen, die etwa mit den Raketen für kosmische Flüge vergleichbar sind, können entweder direkt oder von einer Umlaufbahn um die Erde aus jeden Punkt der Erde mit großer Genauigkeit treffen.



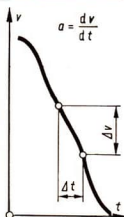
Geschwindigkeit. Die Geschwindigkeit eines startenden Flugzeuges nimmt abhängig vom Abstand zum Aufstellungspunkt auf der Startbahn bis zum Erreichen der Reiseflughöhe ungleichmäßig zu. Der Fahrtmesser zeigt dabei die auf der Kurve liegenden Werte an.

Mathematisch läßt sich die Augenblicksgeschwindigkeit als Differentialquotient des Weges nach der Zeit ermitteln.



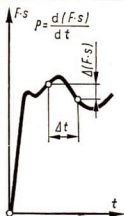
Beschleunigung. Die Verzögerung eines anhaltenden Kraftfahrzeuges als negative Beschleunigung hängt ab von der Reibfläche der Bremsbeläge, der Bremskraft des Fahrers, dem Zustand der Bremsanlage, der Reifen und der Fahrbahnbeschaffenheit. Demzufolge ist solch eine Verzögerung nicht konstant.

Mathematisch läßt sich die Augenblicksbeschleunigung als Differentialquotient der Geschwindigkeit nach der Zeit ermitteln.



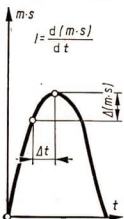
Leistung. Die Antriebsleistung eines Tragflächenbootes ist eine veränderliche Größe, deren Betrag von der Geschwindigkeit, von der Eintauchtiefe des Bootes, vom Wellengang und anderen Bedingungen abhängt, die zusammengefaßt die erforderliche Antriebsarbeit in Abhängigkeit von der Zeit beeinflussen.

Mathematisch läßt sich die Augenblicksleistung als Differentialquotient der Arbeit nach der Zeit ermitteln.

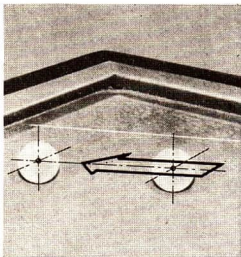
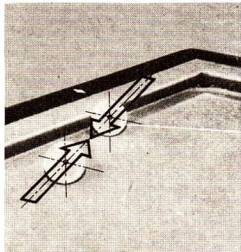
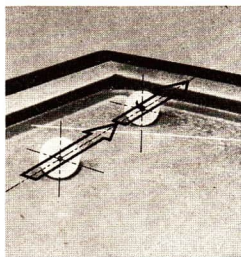


Impuls. Beim Abschluß einer Rakete von einem Flugzeug aus wird der Rakete ein Impuls erteilt, der auf die Rakete als Vortrieb wirkt. Der erteilte Impuls addiert sich zum bereits vorhandenen Impuls.

Mathematisch läßt sich die Antriebskraft der Rakete als Differentialquotient des Impulses nach der Zeit ermitteln.



Der zentrale Stoß zweier Körper



143/1 Zentraler Stoß zweier Kugeln

a) Kugeln in gleichem Richtungssinn bewegt

b) Kugeln im entgegengesetzten Richtungssinn bewegt

c) eine Kugel ruhend, die andere Kugel bewegt

In der Natur und der Technik gibt es viele Vorgänge, bei denen zwei bewegte Körper aufeinandertreffen und nach dem Stoß ihre Bewegungen im allgemeinen mit veränderter Richtung und Geschwindigkeit fortsetzen. Solche Stoßvorgänge findet man in der Thermodynamik bei der Bewegung der Gasmoleküle, in der Atomphysik beim Zusammenprall von Teilchen, z. B. von Kernbestandteilen, bei der spanlosen Formung beim Schmieden von Werkstoffen, auch bei verschiedenen Sportarten.

Diese Vorgänge sind meist recht kompliziert; zum Verständnis des Grundsätzlichen genügt es, die einfachsten Fälle zu untersuchen.

Zu diesem Zwecke betrachtet man zwei Körper mit den Massen m_1 und m_2 , die sich mit den Geschwindigkeiten v_1 und v_2 auf der Verbindungsgeraden ihrer Mittelpunkte, d. h. auf ihrer *Zentralen* bewegen, ähnlich wie die Kugeln beim Billardspiel, wobei von ihrer Rotation abgesehen werden soll (Bild 143/1).

Beim Zusammenstoß ändern sich ihre Geschwindigkeiten und damit auch ihre Impulse. Man kann die beiden stoßenden Körper als abgeschlossenes System betrachten; somit gilt für das System der Körper neben dem allgemeinen Gesetz von der Erhaltung der Energie das *Gesetz von der Erhaltung des Impulses*.

Bezeichnet man ihre Geschwindigkeit nach dem Stoß mit u_1 und u_2 , so gilt

$$m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2 = m_1 \cdot u_1 + m_2 \cdot u_2. \quad (171)$$

Diese Gleichung reicht zur Bestimmung von u_1 und u_2 nicht aus, doch lassen sich noch weitere Aussagen über den Vorgang machen.

Nimmt man an, daß sich beim Stoß *keine mechanische Energie in eine andere Energieform*, z. B. in Wärme, *umwandelt*, und *keine bleibende Verformung der Körper* eintritt, so gilt das *Gesetz von der Erhaltung der mechanischen Energie*.

Die kinetische Energie, welche die Körper vor dem Stoß hatten, ist auch nach dem Stoß vorhanden. Es gilt deshalb auch

$$\frac{1}{2} (m_1 \cdot v_1^2 + m_2 \cdot v_2^2) = \frac{1}{2} (m_1 \cdot u_1^2 + m_2 \cdot u_2^2). \quad (172)$$

Ein Stoß dieser Art wird *elastischer Stoß* genannt; denn die Körper erleiden beim Stoßvorgang nur elastische Verformungen, es wird die potentielle Energie der verformten Körper wieder vollständig in kinetische Energie umgesetzt.

Der Stoß zwischen zwei Elfenbeinkugeln oder Stahlkugeln ist annähernd elastisch.

Aus den Gleichungen (171) und (172) können die Geschwindigkeiten u_1 und u_2 berechnet werden. Durch das Auflösen nach diesen Variablen ergibt sich

$$u_1 = \frac{v_1(m_1 - m_2) + 2m_2 \cdot v_2}{m_1 + m_2} \quad (173)$$

$$u_2 = \frac{v_2(m_2 - m_1) + 2m_1 \cdot v_1}{m_1 + m_2}.$$

■ Für den elastischen Stoß zweier Kugeln gelten folgende Daten:

1. Kugel: $m_1 = 200 \text{ g}$; $v_1 = 1,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;
2. Kugel: $m_2 = 150 \text{ g}$; $v_2 = -0,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Gesucht sind die Geschwindigkeiten der Kugeln nach dem Stoß. Der negative Wert für v_2 bedeutet (bei einem positiven Wert für v_1), daß die Bewegung der zweiten Kugel der Bewegung der ersten entgegengesetzt ist, d. h., die Kugeln rollen aufeinander zu.

Lösung:

$$u_1 = \frac{v_1(m_1 - m_2) + 2m_2 \cdot v_2}{m_1 + m_2}$$

$$u_1 = \frac{1,2 \cdot 200 - 2 \cdot 150 \cdot 0,8}{200 + 150} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$u_1 \approx 0,514 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$u_2 = \frac{v_2(m_2 - m_1) + 2m_1 \cdot v_1}{m_1 + m_2}$$

$$u_2 = \frac{-0,8 \cdot (-50) + 2 \cdot 200 \cdot 1,2}{200 + 150} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$u_2 \approx 1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Die Kugeln setzen ihre Bewegung jeweils in entgegengesetzter Richtung mit veränderter Geschwindigkeit fort.

● *Welches Ergebnis erhält man aus den Gleichungen für u_1 und u_2 für die Geschwindigkeiten der Kugeln nach dem Stoß, wenn die Massen der Kugeln gleich sind?*

Den senkrechten Stoß eines Körpers gegen eine feste Wand kann man als Grenzfall des zentralen Stoßes eines Körpers gegen einen zweiten auffassen, der eine sehr große Masse hat und in relativer Ruhe ist. Bezeichnet man die Daten der festen Wand mit dem Index 1 und die des Körpers mit dem Index 2, so ist

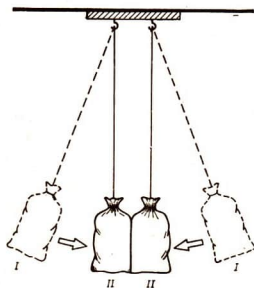
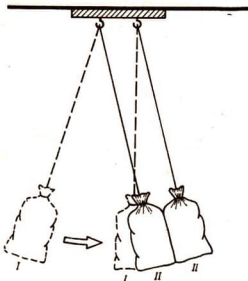
$$v_1 = 0 \text{ und } m_2 \ll m_1,$$

so daß m_2 gegenüber m_1 vernachlässigt werden kann. Man erhält für den elastischen Stoß aus den Gleichungen für u_1 und u_2

$$u_1 = 0 \text{ und } u_2 = -v_2.$$

Der Körper bewegt sich also in umgekehrter Richtung, der Betrag seiner Geschwindigkeit bleibt erhalten.

Die kinetische Gastheorie geht von der Annahme aus, daß sich die Gasmoleküle wie elastische Teilchen verhalten, die in ständiger Bewegung sind und gegeneinander stoßen.



145/1 Versuch zum unelastischen Stoß mit sandgefüllten Beuteln

Wird eine Gasmenge in ein Gefäß eingeschlossen, so stoßen die Moleküle auch an die Moleküle der Gefäßwände. Nach den Gesetzen des elastischen Stoßes werden dabei viele Teilimpulse übertragen; auf diese Weise entsteht die an der Wand des Gefäßes angreifende Druckkraft.

Setzt man jedoch voraus, daß die stoßenden Körper voneinander *nicht abprallen*, sondern gemeinsam mit gleichen Geschwindigkeiten ihren Weg fortsetzen, so ergibt sich aus dem *Gesetz von der Erhaltung des Impulses* für die gemeinsame Geschwindigkeit $u_1 = u_2 = u$ die Gleichung

$$u = \frac{m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2}{m_1 + m_2} \quad (174)$$

Ein Stoß dieser Art heißt *unelastischer Stoß*; der Stoß zwischen Bleikugeln ist annähernd unelastisch.

Eine Bleikugel stößt gegen eine zweite, gleich große ruhende Bleikugel; beide Kugeln rollen mit annähernd halber Geschwindigkeit der stoßenden Kugel in Stoßrichtung weiter. Läßt man die Kugeln mit gleicher Geschwindigkeit aufeinander zurollen, so kommen sie im Punkte des Zusammentreffens zur Ruhe. Ähnliche Versuche lassen sich mit zwei sandgefüllten, hängend befestigten Beuteln ausführen (Bild 145/1).

Beim unelastischen Stoß wird mechanische Energie in Wärmeenergie und Verformungsarbeit umgewandelt; ihre Größe ΔW erweist sich als die Differenz der kinetischen Energien der Körper vor dem Stoß und nach dem Stoß:

$$\Delta W = \frac{1}{2} (m_1 \cdot v_1^2 + m_2 \cdot v_2^2) - \frac{1}{2} (m_1 \cdot u^2 + m_2 \cdot u^2) \quad (175)$$

Dieser Ausdruck ist, wie durch Einsetzen des Wertes für u und durch Umformung festgestellt werden kann, niemals negativ.

Welcher Sachverhalt ist beim senkrechten unelastischen Stoß eines Körpers gegen eine feste Wand zu erwarten?

Ein Beispiel für die technische Nutzung des unelastischen Stoßes ist das Schmieden; der Schmiedehammer schlägt auf das Werkstück auf und seine kinetische Energie bewirkt die Formung des (als ruhend angenommenen) Werkstückes. Auch Schutzvorrichtungen gegen die Wirkungen eines Zusammenstoßes zweier Fahrzeuge beruhen auf dem Prinzip des unelastischen Stoßes; hier kommt es vor allem darauf an, die Bewegungen so langsam zu verzögern, daß Schäden an Menschen und Material möglichst vermieden werden.

Welche Energieumwandlungen spielen sich in einem Stoßdämpfer ab?

Der elastische und der unelastische Stoß sind, wie man aus den einzelnen Versuchen erkennen kann, abstrakte, idealisierte Grenzfälle. Sie sind Widerspiegelungen wesentlicher Seiten realer Stoßvorgänge zwischen Körpern. Ein Stoß ist

dann als elastisch anzusehen, wenn der in Wärme verwandelte Betrag an kinetischer Energie vernachlässigt werden kann; ebenso läßt sich ein Stoß, bei dem das Auseinanderprallen der Körper unerheblich gering ist, als unelastisch betrachten.

- Wie groß ist die Schlagarbeit bei einem einfachen Schmiedehammer, dessen Bär mit einer Masse von 1200 kg und einer Aufschlaggeschwindigkeit von $6,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ auf den elastisch gelagerten Amboß und Unterbau mit der Masse 20000 kg auftrifft (Bild 146/1)?

Gegeben:

$$m_1 = 1200 \text{ kg}$$

$$v_1 = 6,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$m_2 = 20000 \text{ kg}$$

$$v_2 = 0$$

Gesucht:

u

ΔW

Lösung:

$$u = \frac{m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2}{m_1 + m_2}$$

$$u = \frac{7200 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}}{21200 \text{ kg}}$$

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

$$\Delta W = \frac{1}{2} (m_1 \cdot v_1^2 + m_2 \cdot v_2^2)$$

$$- \frac{1}{2} (m_1 \cdot u^2 + m_2 \cdot u^2)$$

$$\Delta W = 21600 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} - 1590 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$$

$$\Delta W = 20010 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$$

$$\Delta W = \underline{\underline{20010 \text{ Nm}}}$$

- Wie groß ist bei einem Gegenschlaghammer die Schlagarbeit, wenn die beiden Hammerbären eine Masse von jeweils 600 kg besitzen und mit einer Geschwindigkeit von jeweils $6,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ sich bewegen (Bild 146/2)?

Gegeben:

$$m_1 = 600 \text{ kg}$$

$$m_2 = 600 \text{ kg}$$

$$v_1 = 6,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$v_2 = 6,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Gesucht:

u

ΔW

Lösung:

$$u = \frac{m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2}{m_1 + m_2}$$

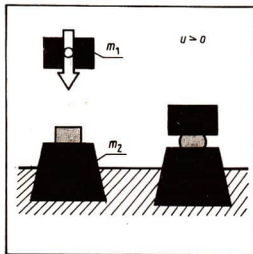
$$u = 0$$

$$\Delta W = \frac{1}{2} (m_1 \cdot v_1^2 + m_2 \cdot v_2^2)$$

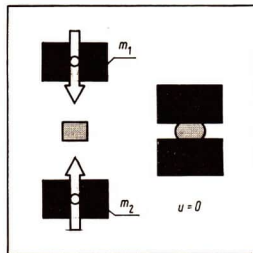
$$- \frac{1}{2} (m_1 \cdot u^2 + m_2 \cdot u^2)$$

$$\Delta W = \underline{\underline{21600 \text{ Nm}}}$$

Bei gleicher bewegter Masse ist der Wirkungsgrad des Gegenschlaghammers größer als der des einfachen Schmiedehammers.



146/1



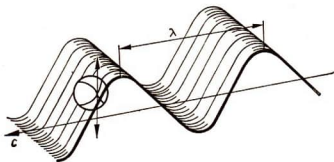
146/2

Aufgaben

Fragen, Aufgaben und Versuche

Welleneigenschaften des Lichtes

1. Erzeugen Sie in einem stehenden Gewässer (Teich, Bassin o. ä.) eine Oberflächenwelle und bestimmen Sie deren Ausbreitungsgeschwindigkeit aus der Laufzeit durch eine vorher abgesteckte Meßstrecke! Mit welcher Frequenz müßte man die Welle erregen, wenn sie eine Wellenlänge von 20 cm haben soll? Prüfen Sie das Ergebnis Ihrer Rechnung im Experiment!
2. Wie groß ist die Wellenlänge einer Schallwelle von 880 Hz (Kammerton a) in der Luft und in Wasser?
($c_{\text{Luft}} = 340 \text{ ms}^{-1}$, $c_{\text{Wasser}} = 1480 \text{ ms}^{-1}$)
3. Beobachten Sie ein Motorboot und versuchen Sie, aus dem Winkel, den die Bugwelle einschließt, seine Fahrtgeschwindigkeit abzuschätzen! Betrachten Sie dazu den Bug des Bootes als bewegtes Erregerzentrum und konstruieren Sie zunächst die entstehende Welle unter der Annahme, daß die Fahrtgeschwindigkeit größer ist als die Ausbreitungsgeschwindigkeit. Übertragen Sie Ihre Erkenntnisse auf die Druckwelle beim Flug mit Überschallgeschwindigkeit!
4. Wiederholen Sie anhand von Bild 147/1 die Herleitung des Gesetzes der Wellenausbreitung!



147/1

5. Zum Messen der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Wellen bedient man sich häufig der stehenden Wellen. An einer mit 200 Hz angeregten stehenden Welle wird der Abstand benachbarter Knoten zu 85 cm ausgemessen. Wie groß ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit?

6. Eine Seilwelle wird einerseits am festen, andererseits am losen Ende reflektiert. Die Seillänge beträgt l , die Ausbreitungsgeschwindigkeit c . Für welche Frequenzen kann sich eine stehende Welle herausbilden?
7. In ein System aus zwei einander überlagerten Kreiswellen wird ein rechtwinkliges Koordinatensystem eingezeichnet. Die Wellen werden im Gleichtakt in den Punkten $(-2; 0)$ und $(2; 0)$ erregt, die Wellenlänge beträgt 2 Einheiten. Welcher Wellenzustand herrscht im Punkt $(7; 12)$?
8. Welche Parallelen und welche Unterschiede bestehen zwischen der Beugung von Wasserwellen und von Lichtwellen am Doppelspalt?
9. Was verstehen Sie unter der Kohärenz zweier Wellenzüge?
10. Warum sind die Beugungstreifen bei Verwendung monochromatischen Lichtes hinter einem Gitter schmal und scharf, beim Doppelspalt dagegen breit und unscharf?
11. Ein optisches Gitter hat eine Gitterkonstante von 0,015 mm. Bei einem Beugungsversuch sind auf dem 2,5 m entfernten Auffangschirm die beiden Beugungstreifen 1. Ordnung 20 cm voneinander entfernt. Wie groß ist die Wellenlänge des verwendeten Lichts?
12. Bei einem Beugungsversuch mit einem optischen Gitter wurden die folgenden Werte festgestellt: Das verwendete Natriumlicht hat eine Wellenlänge von 590 nm. Der Auffangschirm ist 2 m vom Gitter entfernt. Der Abstand der beiden Beugungstreifen 1. Ordnung voneinander beträgt 18 cm. Wie groß ist die Gitterkonstante?
13. Stechen Sie mit einer glühenden Nadelspitze ein Loch in ein Stück schwarzes Papier! Halten Sie das Papier vor eine Glühlampe. Betrachten Sie das Loch durch eine Vogelfeder, durch feines Gewebe (Gaze), durch ein feines Küchensieb! Was beobachten Sie, und wie sind die Erscheinungen zu erklären?

14. Halten Sie einen schmalen Spalt vor eine Glühlampe und vor eine Leuchtstoffröhre und betrachten Sie ihn durch ein optisches Gitter! Was beobachten Sie?
15. Von einer feinen Lochblende ausgehendes weißes Licht wird mit einem Glasprisma und rechtwinklig dazu außerdem mit einem Gitter zerlegt. Welches Bild ist zu erwarten?
16. Biegen Sie aus Draht einen ebenen Rahmen und tauchen Sie ihn in eine Seifenlösung! Betrachten Sie die entstehende Seifenhaut im auffallenden Licht. Erklären Sie die Erscheinung!
17. Wie können die Farberscheinungen an einer kugelförmigen Seifenblase erklärt werden?
18. Wie dick muß die optisch wirksame Schicht eines Interferenzfilters ($n = 1,4$) für 720 nm sein? Welche Wellenlängen werden von diesem Filter außerdem hindurchgelassen? Wie wirkt sich die Wahl der Ordnung für die ausgewählte Wellenlänge aus?
19. Beim Prüfen einer Linse mit Hilfe Newtonscher Ringe unter gelbem Licht ($\lambda = 580 \text{ nm}$) werden außer dem schwarzen Fleck in der Mitte noch vier dunkle Ringe wahrgenommen. Um wieviel weicht der Prüfling vom Sollmaß ab?
20. Ist es sinnvoll, die Oberflächenvergütung auch an der Rückseite einer Linse anzuwenden? Begründen Sie Ihre Ansicht!
21. Was verstehen Sie unter der Polarisation von Wellen? Suchen Sie Beispiele für Wellen, die polarisiert werden können!
22. Bringt man zwischen zwei gekreuzte Polarisationsfilter ein drittes, dessen Polarisationsrichtung zu den ersten unter 45° gedreht ist, so wird das Blickfeld aufgehellt. Erklären Sie diese Erscheinung mit der Analogie zur Seilwelle!
23. Stellen Sie eine Glasscheibe so vor einen dunklen Hintergrund, daß sich markante Wolkenbildungen schräg in ihr spiegeln! Suchen Sie eine zweite Glasplatte so anzuordnen, daß das von der ersten Scheibe reflektierte Licht nicht noch einmal gespiegelt wird, sondern voll hindurchtritt. Bestimmen Sie aus den auftretenden Reflexionswinkeln die Brechzahl des verwendeten Glases!
24. Wie könnte in einem Polarimeter entschieden werden, ob die untersuchte Zuckerlösung die Polarisations ebene im Uhrzeigersinn oder gegen diesen dreht?
- länge und der Beschleunigungsspannung U für geladene Teilchenströme her, die eine Elementarladung tragen!
26. Entwerfen Sie ein Funktionsbild für λ über U , in dem Sie λ in Einheiten von 10^{-8} cm und U im Bereich zwischen 1 bis 50 kV abtragen ($m \approx m_0 = \text{Elektronenmasse}$)!
27. Vergleichen Sie die Größenordnung der Wellenlängen dieser Elektronenstrahlen mit Röntgenwellenlängen!
28. Welche Abweichungen für λ ergeben sich bei einer 10-kV- und 100-kV-Strahlung, wenn a) $m \approx m_0$ gesetzt wird und b) Gleichung (17) für Elektronen und Protonen verwendet wird!
29. Wodurch unterscheiden sich die Ergebnisse beim Doppelspaltexperiment mit (makroskopischen) Teilchen und Wellen?
30. Wie lautet die Energiebilanz für freie Elektronen in einem homogenen elektrischen Feld? Wovon hängt die Elektronengeschwindigkeit ab?
31. Nennen Sie Beispiele, bei denen die Elektronen in guter Übereinstimmung mit der Erfahrung im Teilchenbild beschrieben werden können!
32. Skizzieren Sie das Davisson-Experiment und versuchen Sie, das experimentelle Ergebnis im Teilchen- und Wellenbild zu erfassen!
33. Welche physikalischen Größen werden in der de-Broglie-Beziehung miteinander verknüpft?
34. In welchen Modellen sind die Begriffe aus Aufgabe 33 erklärt?
35. Weshalb wurden die de-Broglie-Wellenlängen nicht bei bewegten makroskopischen Körpern nachgewiesen?
Vergleichen Sie die de-Broglie-Wellenlängen von Elektronen-, Neutronen- und Heliumatomstrahlen gleicher Geschwindigkeit!
36. Vergleichen Sie das Elektronenmikroskop mit dem Lichtmikroskop!
37. Erläutern Sie die elektronenoptische Abbildung im linsenlosen Feldelektronenmikroskop!

Quanteneigenschaften des Lichtes

38. Licht der Wellenlänge $\lambda = 5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ fällt auf ein Metall, dessen Austrittsarbeit $W_A = 1,9 \text{ eV}$ beträgt. Bestimmen Sie:
- die Energie des Photons in eV,
 - die kinetische Energie der herausgelösten Elektronen in eV,
 - die Grenzfrequenz f_G , die für die Auslösung des Photoeffekts erforderlich ist!

Welleneigenschaften von Teilchen

25. Leiten Sie eine Beziehung zwischen der Wellen-

39. Wieviel Photonen werden in 1 s von einer 100-W-Lampe ausgesandt, wenn 5% der elektrischen Energie in Lichtenergie umgesetzt werden? Die Wellenlänge des Lichtes beträgt $\lambda = 560$ nm.
40. Bei der Bestrahlung einer Photokatode mit Licht verschiedener Wellenlänge wurden für die Spannung U_0 , bei der die kinetische Energie der aus dem Metall herausgelösten Elektronen durch das Gegenfeld kompensiert wird, folgende Werte ermittelt:

λ in nm	366	405	436	492	546
U_0 in V	1,48	1,15	0,93	0,62	0,36

- a) Stellen Sie U_0 in Abhängigkeit von der Frequenz des Lichtes grafisch dar!
- b) Ermitteln Sie hieraus das Verhältnis $h : e$ und berechnen Sie die Plancksche Konstante h ! ($e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ As)
- c) Bestimmen Sie die Grenzfrequenz f_G !
- d) Berechnen Sie für die Photokatode die Austrittsarbeit!
41. Beschreiben Sie Aufgabe und Durchführung des Franck-Hertz-Versuchs!
42. Welche Schlußfolgerungen ergeben sich aus dem Resultat des Franck-Hertz-Versuchs für den Atomaufbau?
43. Erklären Sie die Begriffe Grundzustand, angeregter Zustand, Ionisierungsenergie des Atoms!
44. Welcher Unterschied besteht zwischen spontaner und induzierter Emission und Absorption?
45. Welche wichtigen Teile gehören zu einer Laser-Strahlungsquelle?
46. Vergleichen Sie das Bohrsche und das wellenmechanische Atommodell und erläutern Sie deren Vorteile und Nachteile!
47. Welche Geschwindigkeit müssen die Elektronen mindestens besitzen, wenn beim Franck-Hertz-Versuch die Resonanzlinie emittiert werden soll? ($\lambda = 253,7$ nm)
48. Beschreiben Sie das Entstehen der Spektrallinien!

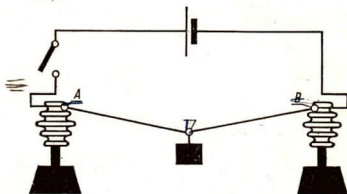
Kinetische Gas- und Wärmetheorie

49. Ein Stahlträger hat bei 0°C die Länge $l_0 = 20$ m. Entwerfen Sie ein Diagramm, aus dem die Länge des Trägers für Temperaturen zwischen -20°C und $+40^\circ\text{C}$ entnommen werden kann.
50. Ein Stahlmeßband ist für eine Meßtemperatur

18°C geeicht. Bei der Temperatur -20°C mißt man die Länge eines Bauplatzes $l = 62,35$ m. Welcher Fehler ist durch die Längenänderung des Meßbandes entstanden? (Linearer Ausdehnungskoeffizient $\alpha = 11,5 \cdot 10^{-6}$ grd^{-1})

51. Zwischen den Punkten A und B (Entfernung $AB = 1$ m) wird ein Konstantendraht gespannt. Bei 18°C liegt C 100 mm unter der Verbindungsgeraden AB (Bild 149/1). Um welche Strecke senkt sich der Draht im Punkt C, wenn die Temperatur des Drahtes durch die zugeführte elektrische Energie um 400 grd gesteigert wird?

149/1



52. Erläutern Sie die Wirkungsweise des Glimmzünders für Leuchtstofflampen!
53. In den Winderhitzer eines Hochofens tritt Luft der Temperatur 10°C ein und wird während des Durchströmens bei gleichbleibendem Druck auf 800°C erhitzt.
- a) Um welchen Betrag wächst hierbei das Volumen der Luft?
- b) Die Ausströmöffnung hat den dreifachen Querschnitt der Einstromöffnung. In welchem Verhältnis stehen die Geschwindigkeiten beim Ein- und Ausströmen?
54. Die Schwingungsdauer eines Fadenpendels betrage bei 0°C genau 1,000 Sekunden. Der Pendelfaden sei ein dünner Stahldraht. Die Temperatur steige auf 30°C . Berechnen Sie die Änderung der Schwingungsdauer!
55. Die Luft in einem Zimmer wird bei gleichbleibendem Druck von 12°C auf 22°C erwärmt. Welche Luftmenge muß nach außen entweichen? (Abmessungen des Zimmers: $l = 5$ m; $b = 4$ m, $h = 3$ m.)
56. Im Schlauch eines Autoreifens herrscht bei 18°C ein Druck von 3 at. Wie groß wird der Druck, wenn durch Sonneneinstrahlung die Temperatur auf 40°C steigt?

57. Die folgenden Werte sind der Aufschrift einer Stahlflasche entnommen:

Füllung:	Propan
Prüfdruck:	25 at
Betriebsdruck:	ca. 10 at
Leermasse:	5,1 kg
Füllmasse:	3,0 kg
Flascheninhalt:	8 l

Es ist zu untersuchen, ob Propan (C_3H_8) bei dem in der Flasche herrschenden Zustand genähert als ideales Gas betrachtet werden darf. Hierbei ist anzunehmen, daß der Betriebsdruck bei einer Temperatur von $20^\circ C$ gilt.

58. Eine kugelförmige Gasblase steigt vom Grunde eines Gewässers auf. Nahe der Oberfläche beträgt ihr Durchmesser 1 cm. Wie groß war der Durchmesser in 30 m Wassertiefe? (Temperaturunterschiede werden vernachlässigt.)

59. Ein Kompressor liefert Druckluft von 7,5 at und $150^\circ C$. Wie groß wird der Druck, wenn sich die komprimierte Luft in einem Vorratskessel auf $20^\circ C$ abkühlt?

60. Entwickeln Sie eine Gleichung, durch die der Querschnitt eines Rohres (linearer Ausdehnungskoeffizient α) als Funktion der Temperatur dargestellt wird!

(Beachten Sie, daß ähnlich wie beim Berechnen der Volumenänderung eine Vernachlässigung sinnvoll ist!)

61. Eine Aluminiumkanne wird bei $0^\circ C$ vollständig mit Benzol gefüllt. Welcher Bruchteil des Flüssigkeitsvolumens tritt aus, wenn die Temperatur auf $30^\circ C$ steigt?

62. Eine Druckluftflasche hat das Volumen 40 Liter. Sie wurde bei der Temperatur $18^\circ C$ bis zum Druck 50 at gefüllt. Bei der Temperatur $-5^\circ C$ werden der Flasche 500 Liter Luft vom Druck 1,5 at entnommen. Unter welchem Druck steht die Luft in der Flasche nach der Entnahme?

63. Bei welcher Temperatur nimmt ein Gas unter konstantem Druck das doppelte Volumen wie bei $15^\circ C$ ein?

64. Eine Stahlflasche für Sauerstoff mit einem Volumen von 40 Liter wird bei $5^\circ C$ bis zu einem Druck von 150 at gefüllt. Wieviel Liter Gas können unter einem Druck von 1,5 at bei $20,5^\circ C$ entnommen werden?

65. Eine 8-Liter-Flasche mit Kohlendioxid, wie sie in Gaststätten zum Ausschanken von Bier und Brause benutzt wird, hat bei $20^\circ C$ einen Druck

von 12 at. Wie groß ist das Volumen der eingeschlossenen Gasmasse im Normzustand?

(Man betrachte Kohlendioxid hierbei als ideales Gas.)

66. Eine abgeschlossene Menge des idealen Gases hat zunächst das Volumen V_1 , die Temperatur T_1 und den Druck p_1 . Das Gas erfährt zwei aufeinanderfolgende Zustandsänderungen:

a) Bei konstantem Druck p_1 wird die Temperatur auf T_2 erhöht.

b) Bei konstanter Temperatur T_2 wird danach der Druck auf p_2 erhöht.

Berechnen Sie mit Hilfe des Temperatur-Druck-Gesetzes und des Druck-Volumen-Gesetzes, welches Volumen das Gas nach diesen beiden Zustandsänderungen einnimmt!

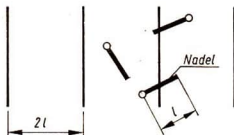
Vergleichen Sie das Ergebnis mit der Zustandsgleichung des idealen Gases!

67. Erläutern Sie die Rolle der Diffusion bei der Kiemen- und Lungenatmung!

68. Geben Sie Beispiele für Diffusionsvorgänge aus der Pflanzenwelt!

69. Bestimmen Sie beim Werfen von zwei Würfeln die relative Häufigkeit der Gesamt-Augenzahl 7 in Abhängigkeit von der Anzahl der ausgeführten Würfe! Welchem Wert nähert sich die relative Häufigkeit? Versuchen Sie eine theoretische Erklärung zu geben, indem Sie feststellen, auf welche verschiedenen Arten alle vorkommenden Summen von Augenzahlen realisierbar sind!

70. Eine Nadel (Länge l) wird mindestens 100mal auf eine horizontale Ebene geworfen. Auf der Ebene ist eine Schar paralleler Geraden im Abstand $2l$ eingezeichnet (Bild 150/1). Man stelle fest, wie oft eine solche Gerade von der Nadel geschnitten oder berührt wird und bilde den Quotienten aus der Gesamtzahl der Würfe und dieser Trefferzahl. Aus theoretischen Überlegungen (z. B. Perelman, Unterhaltsame Geometrie) folgt, daß dieser Quotient für eine sehr große Anzahl von Würfeln dem Werte $\pi = 3,14 \dots$ zustrebt (Buffonsches Nadelproblem). Prüfen Sie diese Aussage durch ein Experiment!



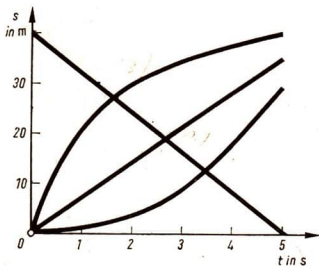
71. Ein würfelförmiges Gefäß sei mit Stickstoff unter Normalbedingungen gefüllt.
- Wie groß ist die mittlere Geschwindigkeit der Moleküle?
 - Wieviel Stöße erfährt im Mittel eine Fläche von $1 \mu\text{m}^2$ der Gefäßwand in der Zeitspanne $1 \mu\text{s}$? (Arbeiten Sie mit den vereinfachenden Voraussetzungen, die bei der Herleitung der Grundgleichung gemacht wurden.)
72. Entwerfen Sie Diagramme
- für die Abhängigkeit der mittleren Geschwindigkeit von Wasserstoff-Molekülen von der Temperatur (Temperaturbereich $100^\circ\text{K} \leq T \leq 1000^\circ\text{K}$),
 - für die Abhängigkeit der mittleren Geschwindigkeit der Moleküle von der molaren Masse bei $T = 273^\circ\text{K}$!
73. Man stelle sich vor, daß die in 1 g Wasser enthaltenen Moleküle gleichmäßig über die gesamte Erdoberfläche verteilt werden. Wieviel Moleküle würden auf 1mm^2 der Oberfläche entfallen? (Die Erde werde als ideal kugelförmig betrachtet, Erdradius 6370 km).
74. Berechnen Sie das Volumen, das einem Gasmolekül bei Normalbedingungen zur Verfügung steht (Eigenvolumen wird vernachlässigt)!
75. Welches Volumen steht einem Molekül in flüssigem Sauerstoff (O_2) der Dichte $1,14 \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ zur Verfügung?
76. Berechnen Sie die innere Energie für 1 kg Sauerstoff unter Normalbedingungen!
77. Einem Kupferstab (Länge 2 m, Querschnitt 1cm^2) wird die Wärmemenge 100 kcal zugeführt. Um welche Strecke verlängert sich der Stab hierdurch?
78. In einem Kalorimeter (Wasserwert 8,7 g) befinden sich 114,8 g Wasser der Temperatur 14°C . Beim Einleiten von Wasserdampf der Temperatur 100°C steigt die Temperatur im Kalorimeter auf $26,7^\circ\text{C}$, die Wassermasse nimmt um 2,6 g zu.
Welche spezifische Verdampfungswärme des Wassers folgt aus diesen Meßergebnissen?
79. In einem Gefäß befindet sich 1dm^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 dar!
80. Erläutern Sie, auf welche Weise die spezifische Wärme einer Flüssigkeit (z. B. Alkohol) gemessen werden kann!
81. Weshalb haben große Gewässer einen Einfluß auf das Klima?
82. In eine Destillationsanlage tritt Kühlwasser der Temperatur 8°C ein. Beim Verlassen des Kühlers hat sich die Temperatur auf 30°C erhöht. Welche Wärmemenge wird vom Kühlwasser in zwei Stunden abgeführt, wenn die Durchflußmenge des Wassers 6 Liter je Minute beträgt?
83. Eine Stahlkugel ($m = 25 \text{g}$, $c = 0,11 \text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{grad}^{-1}$) wird einige Zeit in der Flamme eines Bunsenbrenners erwärmt und danach in ein Wasserbad der Wärmekapazität $0,145 \text{kcal} \cdot \text{grad}^{-1}$ gebracht. Die Temperatur des Wassers steigt hierbei von $24,2^\circ\text{C}$ auf $41,3^\circ\text{C}$. Welche Temperatur hat die Kugel in der Flamme angenommen?
84. In einem Gefäß befinden sich 0,5 kg Wasser der Temperatur 90°C . Es wird eine gleich große Wassermenge der Temperatur 10°C nachgefüllt. Die Mischungstemperatur beträgt $53,2^\circ\text{C}$. Berechnen Sie Wärmekapazität und Wasserwert des Gefäßes!
85. Welche Massen haben Körper aus Aluminium, Kupfer, Blei oder Stahl mit der gleichen Wärmekapazität wie 1 kg Wasser? Berechnen Sie auch das Volumen dieser Körper!
86. Entwerfen Sie ein Diagramm, aus dem hervorgeht, wie die Temperaturänderung von Körpern der Masse 1 kg aus Aluminium, Kupfer, Blei oder Stahl von der zugeführten Wärmemenge abhängt!
87. Ein Eisenbahnzug hat die Masse 2500 t. Er wird von der Geschwindigkeit $72 \text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ bis zum Stillstand abgebremst.
Welche Wärmemenge wird bei diesem Vorgang frei?
88. Ein Regentropfen prallt mit der Geschwindigkeit $10 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ auf die Erde. Welche Temperaturerhöhung des Wassers kann hierbei höchstens auftreten?
89. Die Verbrennung eines Streichholzes liefert 300 cal. Wie hoch muß man einen Körper mit der Masse 50 kg heben, um eine gleichwertige Arbeit zu verrichten?
90. Ein Werkstück aus Stahl wird auf einer Drehmaschine bearbeitet. Die Schnittgeschwindigkeit beträgt $24 \text{m} \cdot \text{min}^{-1}$. Der Drehmeißel erfährt tangential zur Oberfläche des Werkstücks eine Kraft von 280 kp.

- a) Welche Leistung muß für das Zerspanen aufgebracht werden?
- b) Wie groß ist die in einer Minute verrichtete Arbeit?
- c) Die Hälfte der aufgewendeten Arbeit werde dem Drehspan in Form von Wärme zugeführt. Welche Temperaturerhöhung erfährt der Span? (Spanquerschnitt 1 mm²)
91. Eine abgeschlossene Luftmasse dehnt sich isotherm vom Volumen 2 dm³ auf das Volumen 12 dm³ aus. Der Anfangsdruck beträgt 10 at.
- a) Bestimmen Sie die bei der Expansion abgegebene Arbeit mit Hilfe eines p - V -Diagramms!
- b) Überprüfen Sie, ob aus der Gleichung $W = p_1 \cdot V_1 \cdot 2,3 \cdot \lg(V_2/V_1)$ das gleiche Ergebnis folgt!
- c) Welche Wärmemenge muß der Luft bei diesem Vorgang zugeführt werden?
92. Im Zylinder eines Dieselmotors wird die angesaugte Luft ($t_1 = 50^\circ\text{C}$, $p_1 = 1$ at) auf 40 at komprimiert. Man berechne unter der Voraussetzung, daß eine adiabatische Verdichtung stattfindet
- a) das Verdichtungsverhältnis $V_1 : V_2$
- b) die Endtemperatur!
93. Im Zylinder eines Verbrennungsmotors herrscht vor dem Verdichten ein Druck von 1,1 at und eine Temperatur von 70°C . Beim Verdichten wird das Volumen auf 20% des Anfangswertes verkleinert. Hierbei steigt der Druck auf 7 at.
- a) Stellen Sie Anfangs- und Endzustand in einem p - V -Diagramm dar!
- b) Berechnen Sie die Temperatur nach der Verdichtung!
- c) Überprüfen Sie, ob eine adiabatische Verdichtung stattfindet! (Man betrachte das im Zylinder enthaltene Gas als ideal, $\kappa = 1,4$)
94. Diskutieren Sie, ob einem Gas Wärme zugeführt werden kann, ohne daß eine Temperaturerhöhung stattfindet! Ist das auch bei Wasser möglich?
95. In einem Luftvolumen $V_0 = 1$ m³ herrscht bei $T_0 = 273^\circ\text{K}$ der Druck 1 atm. Die Luft werde als ideales Gas betrachtet (Dichte 1,29 kg m⁻³).
- a) Berechnen Sie die Masse der Luft!
- b) Welche Wärmemenge ist erforderlich, die Luft isochor um 1 grd zu erwärmen? ($c_v = 0,169$ kcal \cdot kg⁻¹ \cdot grd⁻¹).
- c) Welche Wärmemenge muß zugeführt werden, um die Luft vom gleichen Ausgangszustand (p_0, V_0, T_0) isobar um 1 grd zu erwärmen? ($c_p = 0,238$ kcal \cdot kg⁻¹ \cdot grd⁻¹)
- d) Wie groß ist der Volumenzuwachs bei der isobaren Erwärmung?
- e) Welche Arbeit gibt die Luft beim isobaren Erwärmen ab?
- f) Stellen Sie eine Energiebilanz für die isobare Erwärmung auf!
96. Ein Luftvolumen 0,5 m³ hat die Temperatur 20°C und den Druck 1 at. Welche Arbeit wird abgegeben, wenn bei gleichbleibendem Druck die Temperatur auf 150°C erhöht wird? Zeichnen Sie ein p - V -Diagramm dieses Vorganges!
97. Erläutern Sie Vorteile und Besonderheiten bei der Einrichtung von Atomkraftwerken!
98. Welche Bedeutung hat die Zusammenarbeit mit den anderen sozialistischen Ländern, insbesondere mit der Sowjetunion bei der Deckung unseres Energiebedarfs?
99. Welche volkseigenen Betriebe unserer Republik produzieren Wärmekraftmaschinen?
100. Erarbeiten Sie eine Übersicht zum Einsatz von Wärmekraftmaschinen in der Energiewirtschaft, in der Industrie, in der Landwirtschaft und im Verkehrswesen!
101. Sammeln Sie Material über die technischen Daten von Kraftfahrzeugen unserer Produktion!

Mechanik

102. Zeichnen Sie die Weg-Zeit-Diagramme und die Geschwindigkeit-Zeit-Diagramme für den freien Fall ($a = -g$, $v_0 = 0$) und für den lotrechten Wurf aufwärts und abwärts mit Anfangsgeschwindigkeiten vom Betrage 10 ms⁻¹ und 50 ms⁻¹!
103. Erläutern Sie die Definition von Geschwindigkeit und Beschleunigung!
104. Stellen Sie die Geschwindigkeit v des Körpers
- a) beim freien Fall,
- b) beim lotrechten Wurf abwärts mit der Anfangsgeschwindigkeit v_0 als Funktion des Fallweges s dar!
105. Ein Eisenbahnzug hat eine Geschwindigkeit von 82 km \cdot h⁻¹, die am Zughaken gemessene Kraft beträgt 4400 kp. Welche Nutzleistung wird für das Ziehen der Wagen aufgewendet?

106. Stellen Sie für den lotrechten Wurf aufwärts die Gipfelhöhe h_G als Funktion der Anfangsgeschwindigkeit v_0 dar!
107. Stellen Sie für den lotrechten Wurf aufwärts die Zeit t , die der Körper benötigt, um
- den Gipfelpunkt der Bahn,
 - den Ausgangspunkt der Bewegung (beim Fall abwärts) zu erreichen, als Funktion der Anfangsgeschwindigkeit v_0 dar, und erklären Sie das Ergebnis!
108. Beschreiben Sie die in Bild 153/1 durch die Weg-Zeit-Diagramme gekennzeichneten Bewegungen und skizzieren Sie die zugehörigen Geschwindigkeit-Zeit-Diagramme!



153/1

109. Ein sowjetisches Passagierflugzeug vom Typ Il 18 hat bei einem Rekordflug mit einer Nutzlast von 15 Mp auf einer 1000 km langen Strecke eine Durchschnittsgeschwindigkeit von $719,8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ erreicht. Wie groß war die durchschnittliche Schubkraft der Triebwerke des Flugzeugs, wenn diese 70% der vollen Leistung (16000 PS) abgegeben haben?
110. Ein Flugzeug vom Typ Tu 134 hat eine Masse von 42 t, der Startschub seiner zwei Strahltriebwerke beträgt insgesamt 11600 kp. Welche Geschwindigkeit erreicht es beim Abheben von der Startbahn nach einer Rollstrecke von 980 m? (Von der Verzögerung durch Luftwiderstand und Reibung sei abgesehen.)
111. Eine Kugel mit einer Masse von 20 g wird auf eine lotrecht angeordnete Schraubenfeder gelegt und niedergedrückt. Beim Loslassen schnellte die Kugel 2 m hoch. Berechnen Sie
- die Anfangsgeschwindigkeit der Kugel beim Abheben von der Feder.

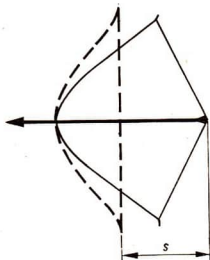
b) die in der Feder gespeichert gewesene potentielle Energie.

112. Ein Körper bewege sich reibungsfrei eine geneigte Ebene hinab. Dabei wirkt auf ihn die Beschleunigung $a = g \cdot \sin \alpha$.
- Begründen Sie diese Gleichung mit einer Konstruktion!
 - Zeichnen Sie für die Anfangsgeschwindigkeit $v_0 = 0$ und den Neigungswinkel $\alpha = 5^\circ$ das Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm und das Weg-Zeit-Diagramm!
113. Im Weg-Zeit-Gesetz (140) sei $v_0 > 0$ und $a = -g$.
- Führen Sie eine Kurvendiskussion zu dieser Funktion für $t > 0$ aus!
 - Welche physikalischen Aussagen sind aus den Extremwerten und aus den Nullstellen abzulesen?
 - Bestimmen Sie in den Nullstellen den Anstieg! Welche physikalische Aussage ergibt sich daraus?
 - Begründen Sie aus dem physikalischen Sachverhalt, daß die Funktion keine Wendepunkte hat!
 - Was ändert sich an den Ergebnissen der Aufgaben a) bis d) für $v_0 = 0$ und für $v_0 < 0$?
114. Aus einem 150 m tiefen Schacht fährt ein Förderkorb der Masse 2000 kg nach oben. Er wird innerhalb von 8 s auf eine Geschwindigkeit von $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ beschleunigt, hält diese Geschwindigkeit eine gewisse Zeit konstant und bremst schließlich in 5 s zum Stillstand ab.
- Berechnen Sie für die Teilabschnitte des Bewegungsablaufs Weg, Zeit und Beschleunigung sowie die Zugkraft im Förderseil, wenn während der gesamten Bewegung eine Reibungskraft von 120 kp angenommen wird!
 - Zeichnen Sie die Diagramme dieser Bewegung (Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung als Funktionen der Zeit)!
115. Erläutern Sie die Begriffe Kraftstoß und Impuls!
116. Tauchen Sie einen an einem Federkraftmesser hängenden Körper in ein mit Wasser gefülltes Becherglas, das auf einer Tafelwaage steht. Beobachten Sie das Verhalten der beiden Waagschalen und erklären Sie es!
117. Erklären Sie, weshalb das Newtonsche Grund-

gesetz der Mechanik auch als Gesetz von der Impulsänderung formuliert werden kann!

118. Für einen Sportbogen gilt näherungsweise ein Kraftgesetz der Form $F = D \cdot s^2$ (Bild 154/1). Einen solchen Bogen um 5 cm zu spannen, erfordere eine Kraft von 1 kp.

- Bestimmen Sie D !
- Berechnen Sie Kraft und potentielle Energie, wenn der Bogen um 25 cm gespannt wird!
- Zeichnen Sie ein Kraft-Spannweg-Diagramm für Spannwege von 0 bis 30 cm!
- Lösen Sie zur Kontrolle die Aufgabe b) durch grafische Auswertung dieses Diagramms!



154/1

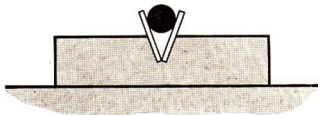
119. Weisen Sie nach, daß das Trägheitsgesetz ein Sonderfall des Gesetzes von der Erhaltung des Impulses ist!

120. Zum Studium des elastischen Stoßes kann man mit Elfenbein-, Glas- oder Stahlkugeln gleichen Durchmessers und gleicher Masse einen Versuch ausführen. Hängen mehrere Kugeln nebeneinander und läßt man die erste Kugel auf die übrigen stoßen, so steigt nur die letzte Kugel bis zur Fallhöhe empor, alle anderen sind nach dem Stoßen in Ruhe. Stoßen gleichzeitig zwei Kugeln auf die übrigen Kugeln, so beobachten wir, daß die beiden letzten Kugeln gemeinsam abgestoßen werden. Wie ist die zuletzt beschriebene Erscheinung zu erklären? Mit dem Gesetz von der Erhaltung der mechanischen Energie wäre es doch zu vereinbaren, daß nur die letzte Kugel, aber mit einer Geschwindigkeit, die das $\sqrt{2}$ -fache der Auftreffgeschwindigkeit der beiden Kugeln beträgt, fortgeschleudert wird.

121. Führen Sie einen ähnlichen Versuch wie in

Aufgabe 120 zum unelastischen Stoß durch, und zwar mit Beuteln, die zu einem Teil (nicht prall) mit Sand gefüllt sind! Deuten Sie das Ergebnis!

122. Wiederholen Sie die Versuche zum elastischen Stoß mit einer Stoßrinne (Bild 154/2) oder, behelfsmäßig, mit einer Reihe nebeneinanderliegender gleicher Münzen!



154/2

123. Eine Elfenbeinkugel von 32 mm Durchmesser stößt mit einer Geschwindigkeit von $1,35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ zentral gegen eine ruhende Kugel aus gleichem Material mit einem Durchmesser von 64 mm. Welche Geschwindigkeiten haben beide Kugeln nach dem Stoß, elastisches Verhalten vorausgesetzt?

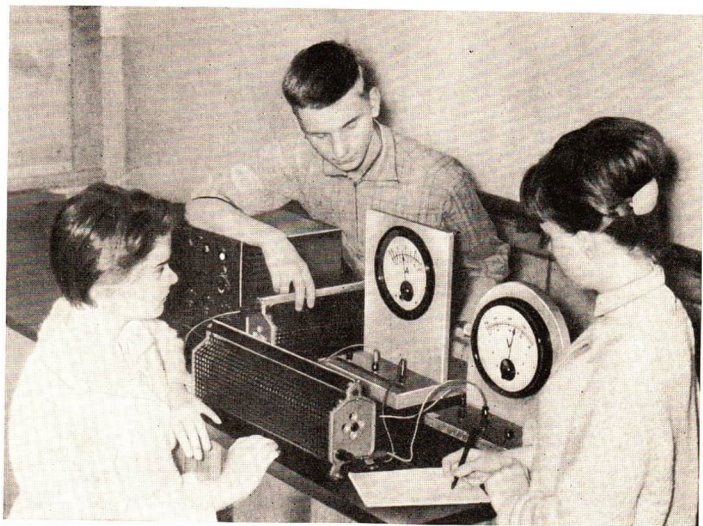
124. Erweitern Sie das auf Seite 144 angegebene Beispiel, indem Sie für die Geschwindigkeiten der Kugeln nicht die Ausgangswerte v_1 und v_2 , sondern die erhaltenen Werte u_1 und u_2 annehmen! Erklären Sie das Ergebnis!

125. Eine Bleikugel von 350 p stößt mit einer Geschwindigkeit von $1,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ gegen eine ruhende Kugel aus gleichem Material, aber von dreifachem Gewicht.

- Welche Geschwindigkeit haben beide Kugeln nach dem Stoß?
- Welcher Bruchteil der kinetischen Energie der stoßenden Kugel wird dabei in Wärme umgewandelt?

126. Das Raketentriebwerk einer meteorologischen Forschungssonde stößt einen Gasstrahl mit einer Masse von $2,6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ und einer Geschwindigkeit von $1900 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ aus. Welche Schubkraft entwickelt es?

127. Es wird auf Grund anderer Daten angenommen, daß die Trägerrakete der schwereren Raumflugkörper der sowjetischen Kosmos-Serie eine Schubkraft von mindestens 1,2 Millionen Kilopond entwickelt. Wie groß wäre unter dieser Annahme der Masseausstoß je Sekunde bei dieser Rakete, wenn eine Ausströmungsgeschwindigkeit der Gase von $3000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ vorausgesetzt wird?



Schülerexperimente

Die physikalische Theorie mit ihren mathematischen Hilfsmitteln und modernen Modellvorstellungen und das physikalische Experiment sind bestimmend für den Physikunterricht.

Bei den Schülerexperimenten werden Methoden kennengelernt und Fertigkeiten erworben, mit denen Gesetzmäßigkeiten in der Natur aufgefunden oder bestätigt werden können. Dabei wird im Verlaufe des Physik-Kurses eine gewisse Selbständigkeit erworben, die jeden Schüler befähigt, während seiner weiteren Ausbildung und beruflichen Entwicklung Aufgaben experimentell zu lösen oder theoretisch gefundene Lösungen experimentell zu überprüfen. Besonders zu beachten sind die Hinweise mit der Bezeichnung **ACHTUNG!** Hier wird auf Gefahren und Unfallquellen aufmerksam gemacht. Bei Nichtbeachtung können Menschen gefährdet werden oder sie können eventuell sogar körperliche Schäden davontragen. Wenn die Anweisungen nicht ordnungsgemäß oder nachlässig ausgeführt werden, können Geräte oder Hilfsmittel beschädigt werden. Diese Hinweise zum Arbeits- und Unfallschutz sind ein wichtiger Teil der Anleitung.

Meßfehler

Beim Messen physikalischer Größen treten Meßfehler auf. Diese werden untergliedert in

systematischer Fehler	Durch Eigenschaften der Meßgeräte (ungenau oder fehlerhafte Eichung, schlechte Justierung) bestimmt.
zufällige Fehler	Durch ungenaues Ablesen, unterschiedliche Geschicklichkeit der Beobachter, Unzuverlässigkeit der Sinnesorgane hervorgerufen oder durch Einflüsse (Temperaturschwankungen, Erschütterungen).

Die zufälligen Fehler werden durch ein statistisches Verfahren berücksichtigt. Zu diesem Zweck wird eine Meßreihe mit n Messungen durchgeführt. Aus den Meßwerten X_i ermittelt man den

Mittelwert

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i .$$

Mit Hilfe des Mittelwertes \bar{X} einer Meßreihe ermittelt man den **durchschnittlichen oder absoluten Fehler**

$$\Delta\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X_i - \bar{X}| .$$

Der durchschnittliche Fehler $\Delta\bar{X}$ ist der Mittelwert der absoluten Einzelabweichungen $|X_i - \bar{X}|$ vom Mittelwert \bar{X} der Meßwerte X_i .

Wenn man den Mittelwert \bar{X} um den durchschnittlichen Fehler $\Delta\bar{X}$ vergrößert oder verringert, dann erhält man als Meßergebnis der gemessenen Größe die

$$\text{Meßgröße } X = \bar{X} \pm \Delta\bar{X} .$$

Will man eine Messung in ihrer Genauigkeit mit anderen Messungen vergleichen, so berechnet man den

$$\text{relativen Fehler } \delta = \frac{\Delta\bar{X}}{\bar{X}} .$$

Bei der Angabe des relativen Fehlers in Prozent ergibt sich der

$$\text{prozentuale Fehler } \delta\% = \frac{\Delta\bar{X} \cdot 100\%}{\bar{X}} .$$

Es ist zweckmäßig, alle Angaben einer Messung in einer Tabelle zu erfassen. Können nur wenige Messungen ausgeführt werden, die außerdem noch große Abweichungen aufweisen, dann ist es zweckmäßig, die größte Abweichung $|\bar{X}_i - \bar{X}|$ als Fehler $\Delta\bar{X}$ zu betrachten.

1	2	3 ¹
n	s_i in mm	$ s_i - \bar{s} $ in mm
1	35,81	0,02
2	35,86	0,03
3	35,82	0,01
4	35,84	0,01
5	35,83	0,00
Σ	179,16	0,07
	$\bar{s} \approx 35,83$	$\Delta\bar{s} = 0,014$

Eine Meßreihe enthält 5 Einzelmessungen mit folgenden Meßwerten: 35,81 mm; 35,86 mm; 35,82 mm; 35,84 mm; 35,83 mm.

Gesucht:

$$\bar{s}, \Delta\bar{s}, s, \delta, \delta_{\%},$$

Lösung:

$$s = \bar{s} \pm \Delta\bar{s}$$

$$s = \underline{\underline{(35,83 \pm 0,01) \text{ mm}}}$$

$$\delta = \frac{\Delta\bar{s}}{\bar{s}}$$

$$\delta = \frac{0,01 \text{ mm}}{35,83 \text{ mm}}$$

$$\delta = 0,00028$$

$$\underline{\underline{\delta_{\%} = 0,028\%}}$$

Fehlerrechnung

Oft müssen aus zwei Meßgrößen eine Summe, eine Differenz, ein Produkt oder ein Quotient gebildet werden. In solchen Fällen werden die Gleichungen der Fehlerrechnung angewendet.

Fehler einer Summe oder einer Differenz

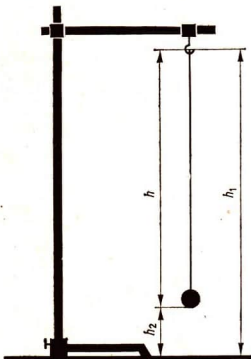
Es gelten die allgemeinen Gleichungen:

$$\text{Betrag} \quad \bar{y} = \bar{u} \pm \bar{v}$$

$$\text{durchschnittlicher Fehler} \quad \Delta\bar{y} = |\Delta\bar{u}| + |\Delta\bar{v}|$$

$$\text{relativer Fehler} \quad \delta = \frac{\Delta\bar{y}}{\bar{y}} = \frac{|\Delta\bar{u}| + |\Delta\bar{v}|}{\bar{u} \pm \bar{v}}$$

157/1



An einem Pendelschwinger soll die Länge h festgestellt werden (Bild 157/1). Es werden gemessen die Strecken h_1 und h_2 .

Gegeben:

$$h_1 = (500 \pm 2,6) \text{ mm}$$

$$h_2 = (80 \pm 1,0) \text{ mm}$$

Gesucht:

$$\bar{h}; \Delta\bar{h}$$

$$h;$$

$$\delta; \delta_{\%};$$

Lösung:

$$\bar{h} = \bar{h}_1 - \bar{h}_2$$

$$h = 500 \text{ mm} - 80 \text{ mm}$$

$$\bar{h} = \underline{\underline{420 \text{ mm}}}$$

$$\Delta\bar{h} = \Delta\bar{h}_1 + \Delta\bar{h}_2$$

$$\Delta\bar{h} = 2,6 \text{ mm} + 1,0 \text{ mm}$$

$$\Delta\bar{h} = \underline{\underline{3,6 \text{ mm}}}$$

$$h = \bar{h} \pm \Delta\bar{h}$$

$$h = \underline{\underline{(420 \pm 3,6) \text{ mm}}}$$

$$\delta = \frac{\Delta\bar{h}_1 + \Delta\bar{h}_2}{\bar{h}_1 - \bar{h}_2}$$

$$\delta = \frac{3,6 \text{ mm}}{420 \text{ mm}}$$

$$\delta = \underline{\underline{0,0086}}$$

$$\underline{\underline{\delta_{\%} = 0,9\%}}$$

¹ für $|s_i - \bar{s}|$, im allgemeinen also $|X_i - \bar{X}|$, wird bei Einzelmessungen ΔX , die Großabweichung, eingesetzt.

Fehler eines Produkts

Es gelten die allgemeinen Gleichungen:

Betrag $\bar{y} = \bar{u} \cdot \bar{v}$

durchschnittlicher Fehler $\Delta\bar{y} = |\bar{v}| \cdot \Delta\bar{u} + |\bar{u}| \cdot \Delta\bar{v}$

relativer Fehler $\frac{\Delta\bar{y}}{\bar{y}} = \frac{\Delta\bar{u}}{|\bar{u}|} + \frac{\Delta\bar{v}}{|\bar{v}|}$

- Aus einem Arbeitsdiagramm (Bild 158/1) soll die Arbeit bestimmt werden.

Gegeben:

$a = (70 \text{ mm} \pm 0,8) \text{ mm}$

$b = (30 \text{ mm} \pm 0,5) \text{ mm}$

Lösung:

$\bar{A} = \bar{a} \cdot \bar{b}$

$\bar{A} = 70 \text{ mm} \cdot 30 \text{ mm}$

$\bar{A} = 2100 \text{ mm}^2$

Gesucht:

$\bar{A}; \Delta\bar{A}$

$\Delta\bar{A} = |\bar{b}| \cdot \Delta\bar{a} + |\bar{a}| \cdot \Delta\bar{b}$

$A;$

$\Delta\bar{A} = 30 \text{ mm} \cdot 0,8 \text{ mm} + 70 \text{ mm} \cdot 0,5 \text{ mm}$

$\delta; \delta\%$

$\Delta\bar{A} = 24 \text{ mm}^2 + 35 \text{ mm}^2$

$\Delta\bar{A} = 59 \text{ mm}^2$

(Das Produkt $\Delta\bar{a} \cdot \Delta\bar{b}$ ist so gering, daß es praktisch das Endergebnis nicht beeinflusst $\Delta\bar{a} \cdot \Delta\bar{b} = 0,8 \text{ mm} \cdot 0,5 \text{ mm} = \underline{\underline{0,4 \text{ mm}^2}}$)

$A = \bar{A} \pm \Delta\bar{A}$

$A = (2100 \pm 59) \text{ mm}^2$

$\delta = \frac{\Delta\bar{a}}{|\bar{a}|} + \frac{\Delta\bar{b}}{|\bar{b}|}$

$\delta = \frac{0,8 \text{ mm}}{70 \text{ mm}} + \frac{0,5 \text{ mm}}{30 \text{ mm}} \quad \text{oder} \quad \frac{59 \text{ mm}^2}{2100 \text{ mm}^2}$

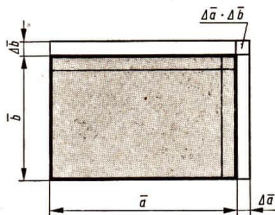
$\delta = 0,011 + 0,017$

$\delta = 0,028$

$0,028$

$\delta\% = 2,8\%$

158/1



Fehler eines Quotienten

Es gelten hierfür die allgemeinen Gleichungen:

Betrag $\bar{y} = \frac{\bar{u}}{\bar{v}}$

durchschnittlicher Fehler $\Delta\bar{y} = \frac{|\bar{v}| \cdot \Delta\bar{u} + |\bar{u}| \cdot \Delta\bar{v}}{\bar{v}^2}$

relativer Fehler $\frac{\Delta\bar{y}}{\bar{y}} = \frac{\Delta\bar{u}}{|\bar{u}|} + \frac{\Delta\bar{v}}{|\bar{v}|}$

Aus einem gemessenen Widerstand R und einer Spannung U ist die Stromstärke zu errechnen!

Gegeben:

$$U = (219,0 \pm 0,8) \text{ V}$$

$$R = (52,6 \pm 0,4) \Omega$$

Gesucht:

$$\bar{I}; \Delta \bar{I}$$

$$I;$$

$$\delta; \delta_{\%};$$

Lösung:

$$I = \frac{\bar{U}}{R}$$

$$\bar{I} = \frac{219,0 \text{ V}}{52,6 \Omega}$$

$$\bar{I} \approx 4,16 \text{ A}$$

$$I = \bar{I} \pm \Delta \bar{I}$$

$$I = (4,16 \pm 0,05) \text{ A}$$

$$\delta = \frac{0,05 \text{ A}}{4,16 \text{ A}}$$

$$\delta = 0,012$$

$$\delta_{\%} = 1,2\%$$

$$\Delta \bar{I} = \frac{|\bar{R}| \cdot \Delta \bar{U} + |\bar{U}| \cdot \Delta \bar{R}}{R^2}$$

$$\Delta \bar{I} = \frac{52,6 \cdot 0,8 + 219,0 \cdot 0,4}{52,6^2} \text{ A}$$

$$\Delta \bar{I} \approx 0,05 \text{ A}$$

Fehler einer Wurzelfunktion

Es gelten folgende allgemeine Gleichungen:

$$\text{Betrag } \bar{y} = \sqrt{\bar{u} \cdot \bar{v}}$$

$$\text{relativer Fehler } \delta = \frac{\Delta \bar{y}}{\bar{y}} = \frac{\Delta \bar{u}}{2\bar{u}} + \frac{\Delta \bar{v}}{2\bar{v}}$$

durchschnittlicher Fehler $\Delta \bar{y} = \delta \cdot \bar{y}$

Beim freien Fall aus einer Fallhöhe h ist die Auftreffgeschwindigkeit zu errechnen!

Gegeben:

$$g = (9,80 \pm 0,02) \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$h = (12,50 \pm 0,02) \text{ m}$$

Lösung:

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

$$\bar{v} = \sqrt{2 \cdot 9,80 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 12,50 \text{ m}}$$

$$\bar{v} = 15,64 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Gesucht:

$$\bar{v}$$

$$\Delta \bar{v}$$

$$\delta, \delta_{\%}$$

$$\delta = \frac{\Delta \bar{g}}{2\bar{g}} + \frac{\Delta \bar{v}}{2\bar{v}}$$

$$\delta = \frac{0,02 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}}{19,60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}} + \frac{0,02 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{25,00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}$$

$$\delta = 0,002$$

$$\delta_{\%} = 0,2\%$$

$$\Delta \bar{v} = \delta \cdot \bar{v}$$

$$\Delta \bar{v} = 0,002 \cdot 15,64 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\Delta \bar{v} = 0,03 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Fehler einer Winkelfunktion

Es gelten folgende allgemeine Gleichungen:

$$\text{Betrag} \quad y = \frac{\sin \bar{u}}{\sin \bar{v}}$$

$$\text{relativer Fehler} \quad \delta = \frac{\Delta \bar{y}}{\bar{y}} = \frac{\Delta \bar{u} \cdot \cos \bar{u}}{\sin \bar{u}} + \frac{\Delta \bar{v} \cdot \cos \bar{v}}{\sin \bar{v}}$$

$$\delta = \Delta \bar{u} \cdot \cot \bar{u} + \Delta \bar{v} \cdot \cot \bar{v}$$

$$\text{durchschnittlicher Fehler} \quad \Delta \bar{y} = \delta \cdot \bar{y}$$

■ Es ist die Brechzahl eines lichtdurchlässigen Stoffes durch Messen des Einfallswinkels α und des Brechungswinkels β zu errechnen!

Gegeben:

$$\alpha = (46,4 \pm 0,5)^\circ$$

$$\beta = (32,9 \pm 0,5)^\circ$$

Lösung:

$$\bar{n} = \frac{\sin \bar{\alpha}}{\sin \bar{\beta}}$$

$$\bar{n} = \frac{\sin 46,4^\circ}{\sin 32,9^\circ}$$

$$\bar{n} = 1,338$$

Gesucht:

$$\bar{n} \quad \delta = \frac{\Delta \bar{n}}{\bar{n}} = \Delta \bar{\alpha} \cdot \cot \bar{\alpha} + \Delta \bar{\beta} \cdot \cot \bar{\beta}$$

$$\Delta \bar{n} \quad \delta = 0,0087 \cdot 0,9523 + 0,0087 \cdot 1,546$$

$$\delta; \delta_{\%} \quad \delta = 0,022$$

$$\delta_{\%} = 2,2\%$$

$$\Delta \bar{n} = 0,022 \cdot 1,338$$

$$\Delta \bar{n} = 0,029$$

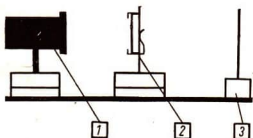
Aufgabe

Beobachten Sie die Besonderheiten, die auftreten, wenn eine dünne Seifenhaut monochromatisches bzw. weißes Licht reflektiert!

Vorbetrachtungen

1. Wenn Sie den Drahtrahmen mit eingespannter Seifenhaut senkrecht halten, nimmt die Seifenhaut eine keilförmige Gestalt an. Warum?
2. Welcher Unterschied besteht zwischen der Reflexion einer Welle am festen Ende bzw. losen Ende?
3. Zwei sich überlagernde Wellen können sich verstärken oder abschwächen (Sonderfall: Auslöschung). Welche Bedingungen müssen dabei erfüllt werden?
4. Wie ändert sich die Wellenlänge des Lichtes mit der Art des Mediums, in dem die Lichtausbreitung erfolgt?

Versuchsaufbau



Geräte und Hilfsmittel

- 1 Experimentierleuchte ohne Kondensator
- 2 Blendrahmen mit Schiebeschacht und Klemmvorrichtung
- 3 Drahtrahmen mit Korkfuß (etwa 40 mm × 40 mm)
- 4 Transparenzschirm
- 5 Farbfilter (Rotfilter, Blaufilter)
- 6 Petrischale mit Waschmittellösung (Seife, Fewa, Milwa o. ä.)
- 7 Zwei T-Füße
- 8 Stromversorgungsgerät

Versuchsunterweisung

1. Stellen Sie die Leuchte so auf, daß das Licht von Ihnen weg gerichtet ist!
2. Spannen Sie durch Eintauchen des Drahtrahmens in die Schale mit Waschmittellösung eine Seifenhaut ein!
3. Stellen Sie die Seifenhaut so in den Lichtverlauf, daß sie wie ein Spiegel das Filterlicht zu Ihnen reflektiert!
4. Beobachten Sie, ob die Seifenhaut über die gesamte Fläche gleichmäßig beleuchtet erscheint (eventuell mit einem anderen Farbfilter)! Halten Sie Ihre Beobachtungen schriftlich und in einer Skizze fest! (Protokoll)

Hinweis!

Richten Sie Ihre Beobachtungen besonders auf den oberen Teil der Seifenhaut!

5. Beobachten Sie, wie die Reflexion des weißen Lichtes erfolgt! Achten Sie recht genau auf die Reihenfolge auftretender Farben!

Halten Sie Ihre Beobachtung schriftlich und in einer Skizze fest! (Protokoll)

6. Untersuchen Sie, ob sich Ihre Beobachtungen sowohl im Filterlicht wie auch im weißen Licht über die gesamte Fläche der Seifenhaut erstrecken! (Protokoll)

Antworten zu den Vorbetrachtungen

Ergebnis

Zu 4. Beobachtung im Filterlicht

Zu 5. Beobachtung im weißen Licht

Zu 6.

Erzeugen von Newtonschen Ringen	E 2
---------------------------------	-----

Aufgabe

Beobachten Sie die Interferenzerscheinungen, die dadurch entstehen, daß Licht auf eine Luftschrift fällt, die sich zwischen einer Glasplatte und einer daraufliegenden Linse befindet!

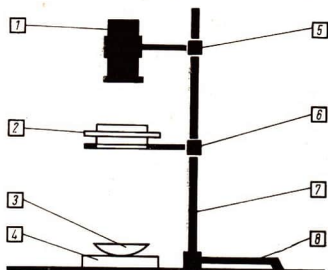
Vorbetrachtungen

1. Warum treten Interferenzerscheinungen nur in kohärentem Licht auf?
2. Die keilförmige Luftschrift zwischen Linse und Glasplatte muß sehr dünn sein, wenn man Interferenzerscheinungen beobachten will. Begründung!
3. Benutzen Sie für Ihren Versuch eine Konvexlinse, deren Brennweite $f \geq 500$ mm ist!

Geräte und Hilfsmittel

- 1 Experimentierleuchte ohne Kondensator
- 2 Zwei Farbfilter (Rotfilter, Blaufilter)
- 3 Konvexlinse mit $f \geq 500$ mm
- 4 Planparallele Glasplatte (möglichst Schwarzglas oder dunkles Farbfilter)
- 5 Zwei Kreuzmuffen
- 6 Kochring mit Stiel
- 7 Stativstab 500 mm
- 8 V-Fuß
- 9 Stromversorgungsgerät
- 10 Transparenzschirm (etwa 100 mm \times 100 mm)
- 11 Stechzirkel
- 12 Lineal mit Millimetereinteilung
- 13 Meßschieber (an Stelle von Stechzirkel und Lineal)
- 14 Beobachtungslupe

Versuchsaufbau



Versuchsunterweisung

1. Aufbau der Versuchsanordnung nach Skizze! Legen Sie zunächst das Rotfilter auf den Transparentschild!
2. Schalten Sie die Lampe ein und beobachten Sie die Oberfläche der Linse! (Benutzen Sie eventuell eine Lupe!)
3. Tauschen Sie das Rotfilter mit dem Blaufilter aus! Vergleichen Sie mit der vorherigen Beobachtung!
4. Messen Sie den Durchmesser des 1. Auslöschungsrings bei blauem und rotem Licht!
Halten Sie Ihre Beobachtungen schriftlich und in einer maßstäblich vergrößerten Skizze fest!
5. Entfernen Sie das Farbfilter und beobachten Sie die Reflexion des weißen Lichtes! Achten Sie recht genau auf die Reihenfolge auftretender Farben!
Halten Sie Ihre Beobachtung schriftlich und in einer Skizze fest!
6. Drücken Sie leicht mit einem Finger auf die Linse und verfolgen Sie die Veränderung im bisherigen Interferenzbild! Begründen Sie Ihre Beobachtung! (Protokoll)

Antworten zu den Vorbetrachtungen

- 1.
- 2.

Ergebnis

- Zu 3: Beobachtung mit rotem Licht
Zu 4: Beobachtung mit blauem Licht
Zu 5: Beobachtung mit weißem Licht
Zu 6:

Aufgabe

Erzeugen Sie mit Hilfe eines optischen Gitters ein Beugungsspektrum und bestimmen Sie den Bereich der Wellenlängen des sichtbaren Lichtes!

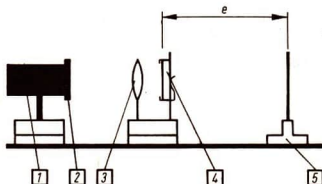
Vorbetrachtungen

1. Wiederholen Sie die theoretischen Grundlagen über die Beugung und Interferenz des Lichtes hinter einem Doppelspalt bzw. Gitter!
2. Wie lautet die Beziehung, mit der sich die Wellenlänge berechnen läßt?
3. Lassen Sie sich vom Lehrer die Gitterkonstante sagen!

Geräte und Hilfsmittel

- 1 Experimentierleuchte
- 2 Leuchtspalt 0,2 mm
- 3 Abbildungslinse $f = 100$ mm
- 4 Gitter 2, $k = 0,05$ mm
- 5 Bildschirm, transparent
- 6 Drei T-Füße
- 7 Blendrahmen mit Klemmvorrichtung und Schiebeschacht
- 8 Meßstab
- 9 Stechzirkel
- 10 Orientierungslämpchen
- 11 Stromversorgungsgerät

Versuchsaufbau



Versuchsunterweisung

1. Stellen Sie die Geräte zunächst ohne Gitter zusammen und bilden Sie den Leuchtspalt mit der Sammellinse auf dem Auffangschirm scharf ab! (Entfernung etwa 50 cm)
2. Setzen Sie das Gitter ein! Im verdunkelten Zimmer können Sie jetzt links und rechts von der bisher beleuchteten Stelle auf dem Auffangschirm Spektren beobachten.
3. Messen Sie mit dem Meßstab die Entfernung e (Abstand zwischen Gitter und Auffangschirm) und mit dem Stechzirkel die Entfernung $2s_1$ (Abstand der gleichen Farben in den beiden Spektren 1. Ordnung, Protokoll)!
4. Wiederholen Sie die Messungen ohne Veränderung in der Versuchsanordnung mehrere Male für das rote Licht und für das violette Licht! (Protokoll)

Antwort zu den Vorbetrachtungen

Meßprotokoll

1. Gitterkonstante $k =$

2. Entfernung e

Lfd. Nr.	e_i in m	$ e_i - \bar{e} $ in m
1		
2		
3		
4		
5		
	$\bar{e} =$	$\Delta\bar{e} =$

3. Rotes (violett)es Licht

Lfd. Nr.	s_{1i} in mm	$ s_{1i} - \bar{s}_1 $ in mm
1		
2		
3		
4		
5		
	$\bar{s}_1 =$	$\Delta\bar{s}_1 =$

Auswertung

1. Berechnen Sie die Wellenlänge des roten Lichtes!

Hinweis!

Überprüfen Sie, ob Sie an Stelle von e_i die gemessene Entfernung e in der Rechnung verwenden können!

2. Berechnen Sie den relativen Größtfehler von λ_R ! Er errechnet sich nach folgender Beziehung:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta s_1}{s_1} + \frac{\Delta e_1}{e_1} + \frac{\Delta k}{k} \quad \frac{\Delta e_1}{e_1} \approx \frac{\Delta e}{e}$$

Geben Sie den relativen Fehler in Prozenten an!

3. Verfahren Sie ebenso bei der Berechnung der Wellenlänge des violetten Lichtes!

Ergebnis

Aufgabe

Bestimmen Sie experimentell die Brechungsahl, den Grenzwinkel der Totalreflexion und den Polarisationswinkel bei Glas!

Vorbetrachtungen

1. Wie lautet das Brechungsgesetz?
2. Unter welchen Voraussetzungen erfolgt Totalreflexion?
3. Welche Aussage macht das Brewstersche Gesetz?

Geräte und Hilfsmittel

- 1 Experimentierleuchte
- 2 Spaltblende
- 3 Tischchen mit Stiel
- 4 Winkelmesser von 0° bis 360°
- 5 Flachglaskörper (plankonvexe Linse oder Prisma oder planparallele Platte)
- 6 Polarisationsfilter
- 7 Drei T-FüÙe
- 8 Stromversorgungsgerät
- 9 Handapparat für Polarisationsfilter

Versuchsunterweisung

Bestimmen der Brechungsahl n

1. Bauen Sie die Geräte nach Bild 166/1 auf!

Hinweis!

Achten Sie besonders darauf, daß die Linse gut symmetrisch liegt und das Licht so auftrifft, daß es beim Verlassen der Linse nicht noch einmal gebrochen wird.

2. Messen Sie zu jedem Einfallswinkel α den zugehörigen Brechungswinkel β ! (Protokoll)
Vergrößern Sie den Einfallswinkel um jeweils 5° !

Bestimmen des Grenzwinkels der Totalreflexion α_T

1. Verändern Sie im Versuchsaufbau die Lage der Linse! (Bild 166/2)
2. Drehen Sie den Tisch mit der Linse langsam so, daß der Brechungswinkel 90° erreicht wird. Der zugehörige Einfallswinkel ist der gesuchte Grenzwinkel der Totalreflexion. (Protokoll)

Hinweis!

Das Licht muß so auf die Linse auftreffen, daß beim Eintritt in den Glaskörper keine Brechung erfolgt!

3. Wiederholen Sie den Versuch fünfmal! (Protokoll)

Versuchsanordnung

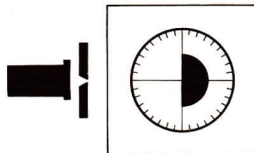


Bild 166/1

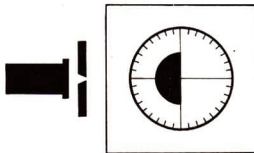


Bild 166/2

Bestimmen des Polarisationswinkels α_p

1. Legen Sie die Linse wieder wie in Bild 166/1!
2. Wählen Sie unter langsamem Drehen des Tischchens mit der Linse einen solchen Einfallswinkel, daß reflektierter und gebrochener Strahl einen rechten Winkel bilden! Dieser Einfallswinkel ist der gesuchte Polarisationswinkel α_p . (Protokoll)
3. Wiederholen Sie auch diesen Versuch fünfmal! (Protokoll)
4. Kontrollieren Sie, ob das reflektierte Licht linear polarisiert ist! (Protokoll)

Antworten zu den Vorbetrachtungen

Meßprotokoll

1. Brechungszahl n

Lfd. Nr.	α in grd	β in grd	$\sin \alpha$	$\sin \beta$	$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$
1					
2					

$$\bar{n} =$$

Lfd. Nr.	α_i in grd	$ \alpha_i - \bar{\alpha} $ in grd
1		
2		

2. Grenzwinkel der Totalreflexion α_T und Polarisationswinkel α_p

$$\bar{\alpha} = \quad \Delta\bar{\alpha} =$$

Auswertung

Brechungszahl n

1. Berechnen Sie die jeweilige Brechungszahl und bilden Sie damit den Mittelwert!
2. Stellen Sie $\sin \beta$ als Funktion von $\sin \alpha$ graphisch dar! Der reziproke Wert des Anstieges der Funktion ist die Brechungszahl.
3. Schätzen Sie den absoluten Fehler bei den Winkelmessungen!

$$\overline{\Delta\alpha} = \pm \quad \overline{\Delta\beta} = \pm$$

4. Damit errechnen Sie den relativen Fehler der Brechungszahl:

$$\frac{\overline{\Delta n}}{n} = \overline{\Delta\alpha} \cdot \cot \alpha + \overline{\Delta\beta} \cdot \cot \beta$$

Grenzwinkel der Totalreflexion α_T

1. Errechnen Sie den Mittelwert und den absoluten Fehler von α_p !

Polarisationswinkel α_p

1. Errechnen Sie den Mittelwert und den absoluten Fehler von α_p !

Ergebnis

Aufgabe

Bestimmen Sie experimentell die Wärmemenge, die einem Kalorimetergefäß zugeführt werden muß, damit seine Temperatur um 1 grd ansteigt! (Wasserwert oder Wärmekapazität des Gefäßes!)

Vorbetrachtungen

1. Wie errechnet man Wärmemengen?
2. Wie ist die spezifische Wärmemenge definiert?
3. Was besagt die Richmannsche Regel?
4. Erwarten Sie eine Abhängigkeit des Wasserwertes von der Einfüllmenge? (Begründung!)

Geräte und Hilfsmittel

- 1 Aluminiumtopf 250 ml
- 2 Asbesteinsatz für Kalorimeter
- 3 Becherglas 100 ml
- 4 Deckel für Kalorimeter
- 5 Rührer
- 6 Thermometer mit $1/1^\circ$ -Teilung
- 7 Meßzylinder 100 ml
- 8 Vorratsgefäß mit Wasser von Zimmertemperatur
- 9 Vorratsgefäß mit warmem Wasser (etwa 50°C)

Versuchsunterweisung

1. Setzen Sie das Kalorimeter aus den Aufbauteilen zusammen!
2. Füllen Sie das Kalorimetergefäß knapp zur Hälfte mit einer bestimmten Menge Wasser m_1 von Zimmertemperatur! (Protokoll)

Hinweis!

Die Masse des Wassers bestimmen Sie über eine Volumenmessung. Sie begehen dabei einen Fehler, der vernachlässigt werden kann.

3. Kontrollieren Sie unter Umrühren den Temperaturrückgang im Kalorimeter! Bleibt die Temperatur längere Zeit unverändert, so ist das die Anfangstemperatur t_1 . (Protokoll)
4. Geben Sie die gleiche Masse warmes Wasser m_2 der Temperatur t_2 zu und rühren Sie gut durch! (Protokoll)
5. Die Mischtemperatur t_m ist dann erreicht, wenn am Boden und an der Oberfläche die gleiche Temperatur gemessen wird. (Protokoll)
6. Ändern Sie die Versuchsbedingungen so ab, daß das Kalorimetergefäß nach dem Mischen jeweils $1/4$, $1/2$ oder $3/4$ gefüllt ist. (Protokoll)

Antworten zu den Vorbetrachtungen

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.

Meßprotokoll

Lfd. Nr.	Füllstand	t ₁ in grad	m ₁ in g	t ₂ in grad	m ₂ in g	t _m in grad	w in cal · grad ⁻¹
1	1/1						
2	3/4						
3	1/2						
4	1/4						

Auswertung

1. Berechnen Sie den Wasserwert des Kalorimetergefäßes für jeden Füllstand und stellen Sie den gefundenen Zusammenhang grafisch dar!
2. Vergleichen Sie mit der in den Vorbetrachtungen niedergelegten Vermutung! Suchen Sie nach einer Erklärung, wenn keine Übereinstimmung vorliegt!
3. Fehlerbetrachtung
- 3.1. Schätzen Sie die absoluten Fehler der einzelnen Größen!

$$\overline{\Delta m_1} = \pm$$

$$\overline{\Delta m_2} = \pm$$

$$\overline{\Delta t_1} = \overline{\Delta t_2} = \overline{\Delta t_m} = \pm$$

- 3.2. Errechnen Sie näherungsweise den relativen und absoluten Fehler des Wasserwertes für 1/1 Füllstand!
Den größten Beitrag zur Fehlerhaftigkeit des Meßergebnisses liefern die Temperaturmessungen. Näherungsweise gilt:

$$\frac{\overline{\Delta w}}{w} \approx \frac{\Delta(t_m - t_1) + \Delta(t_2 - t_m)}{t_1 - 2t_m + t_2} + \frac{\Delta(t_m - t_1)}{t_m - t_1}$$

Ergebnis

Aufgabe

Bestimmen Sie die spezifische Wärme eines festen Probekörpers!
Aus welchem Material besteht er?

Vorbetrachtungen

1. Wie errechnet man Wärmemengen?
2. Wie ist die spezifische Wärme definiert?
3. Was besagt die Richmannsche Regel?
4. Lassen Sie sich vom Lehrer den Wasserwert Ihres Kalorimetergefäßes geben! (Protokoll)

Geräte und Hilfsmittel

- 1 Waage (Genauigkeit $\frac{1}{10}$ Gramm)
- 2 Wägesatz
- 3 Probekörper mit Zwirnsfaden
- 4 Kalorimetergefäß mit Deckel
(Teile wie in Versuch „Wasserwert“)
- 5 Rührer
- 6 Thermometer
- 7 Meßzylinder 100 ml
- 8 Becherglas 250 ml
- 9 Elektrische Heizplatte
oder
- 10 Dreifuß
- 11 Bunsenbrenner
- 12 Drahtnetz mit Asbesteinlage
- 13 Filterpapier

Versuchsunterweisung

1. Bringen Sie im Becherglas Wasser zum Sieden!
2. Bestimmen Sie während dieser Zeit die Masse m_2 des Probekörpers auf $\frac{1}{10}$ Gramm genau! (Protokoll)
3. Füllen Sie das Kalorimetergefäß etwa bis zur Hälfte mit einer bestimmten Masse Wasser m_1 von Zimmertemperatur! (Protokoll)

Hinweis!

Es ist so viel Wasser zu nehmen, daß später der heiße Probekörper gerade eintaucht! (Ausprobieren!)

Das Bestimmen der Masse des Wassers ist genau genug, wenn von einer Volumenmessung ausgegangen wird!

4. Kontrollieren Sie unter Rühren den Temperaturverlauf im Kalorimetergefäß! Bleibt die Temperatur längere Zeit konstant, so ist das die Anfangstemperatur t_1 . (Protokoll)

5. Bringen Sie den Probekörper ungefähr 15 Minuten auf einen Rost in siedendes Wasser der Temperatur t_2 . Er hat dann die gleiche Temperatur, die Sie im siedenden Wasser messen. (Protokoll)
6. Bringen Sie rasch den Probekörper aus dem Gefäß mit dem siedenden Wasser in das Kalorimetergefäß! Verfolgen Sie unter dauerndem Rühren den Temperaturgang! Den Höchstwert des gut durchgerührten Wassers notieren Sie als Mischungstemperatur t_m ! (Protokoll)

Hinweis!

Bringen Sie mit dem Probekörper möglichst kein Wasser mit in das Kalorimeter! (Warum?) Trocknen Sie ihn rasch mit Filterpapier!

Antworten zu den Vorbetrachtungen

- 1.
- 2.
- 3.

Meßprotokoll

Wasserwert des Kalorimetergefäßes: $w =$

Masse des Wassers im Kalorimeter: $m_1 =$

Anfangstemperatur des Wassers: $t_1 =$

Masse des Probekörpers: $m_2 =$

Temperatur des heißen Probekörpers: $t_2 =$

Mischungstemperatur: $t_m =$

Auswertung

1. Errechnen Sie die spezifische Wärme des Probekörpers! Aus welchem Material könnte er bestehen? (Tabelle für spezifische Wärme fester Körper)

2. Fehlerbetrachtung

- 2.1. Schätzen Sie die absoluten Fehler der einzelnen Größen!

$$\overline{\Delta w} = \pm$$

$$\overline{\Delta m_1} = \pm$$

$$\overline{\Delta m_2} = \pm$$

$$\overline{\Delta t_1} = \overline{\Delta t_2} = \overline{\Delta t_m} = \pm$$

- 2.2. Errechnen Sie näherungsweise den relativen und absoluten Fehler der spezifischen Wärme des Probekörpers! Wenn man die sicherlich geringe Fehlerhaftigkeit der Massenbestimmung vernachlässigt, kann man in guter Näherung ansetzen:

$$\frac{\overline{\Delta c}}{c} \approx \frac{\overline{\Delta w}}{w} + \frac{\Delta(t_m - t_1)}{t_m - t_1} + \frac{\Delta(t_2 - t_m)}{t_2 - t_m}$$

Ergebnis

Lösungen

Welleneigenschaften des Lichtes

2. $\lambda_{\text{Luft}} = 0,386 \text{ m}$; $\lambda_{\text{Wasser}} = 1,68 \text{ m}$

5. $c = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

6. $f = (2k + 1) \cdot \frac{c}{4l}$ ($k \in \mathbb{N}$)

11. $\lambda = 600 \text{ nm}$

12. $b = 13,1 \text{ } \mu\text{m}$

18. $d_v = k \cdot 257 \text{ nm}$ ($k \in \mathbb{N}$)

$$\lambda_v = \frac{k}{k'} \cdot 720 \text{ nm} \quad (k, k' \in \mathbb{N})$$

19. $d = 1,16 \text{ } \mu\text{m}$

Quanteneigenschaften des Lichtes

38. a) $f = 0,6 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1}$

$$W_p = 3,98 \cdot 10^{-19} \text{ Ws}$$

$$W_p = 2,5 \text{ eV}$$

b) $W_{\text{kin}} = 0,6 \text{ eV}$

c) $f_G = 4,6 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$

39. $f = 0,54 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1}$

$$W_p = 3,6 \cdot 10^{-19} \text{ Ws}$$

$$W_L = 5 \text{ Ws}$$

$$Z_p = 1,4 \cdot 10^{19} \text{ s}^{-1}$$

40. b) $h : e = 4,2 \cdot 10^{-15} \text{ Vs}$ (Mittelwert)

$$h = 6,7 \cdot 10^{-34} \text{ Ws}^2$$

c) $f_G \approx 0,47 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1}$

d) $W_A = 2 \text{ eV}$

47. $W = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} = 4,9 \text{ eV}$, $U = 4,9 \text{ V}$

$$v = \sqrt{2 \frac{e}{m} U} = 1,31 \cdot 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Kinetische Gas- und Wärmethorie

50. $\Delta l = 27 \text{ mm}$

51. $l = 15 \text{ mm}$

53. a) $V_2 = 3,8 V_1$

b) $v_2 : v_1 = 1,27$

54. $\Delta T = 1,8 \cdot 10^{-2} \text{ s}$

55. $\Delta V = 2,1 \text{ m}^3$

56. $p = 3,23 \text{ at}$

58. $d_2 = 6,3 \text{ mm}$

59. $p_2 = 5,2 \text{ at}$

60. $A = A_0(1 + 2\alpha \cdot t)$

61. $\frac{\Delta V}{V} = 0,03$

62. $p_2 = 29,6 \text{ at}$

63. $t = 303 \text{ }^\circ\text{C}$

64. $V = 4,22 \text{ m}^3$

65. $V_0 = 89,4 \text{ l}$

71. a) $v = 494 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

b) $\Delta N = 2,2 \cdot 10^9 \text{ Stöße}$

73. $N/A = 65 \text{ mm}^{-2}$

74. $V = 3,72 \cdot 10^{-26} \text{ m}^3$

75. $V = 4,7 \cdot 10^{-29} \text{ m}^3$

76. $W_1 = 1,78 \cdot 10^5 \text{ Ws}$

77. $\Delta l = 20 \text{ mm}$

78. $q = 530 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1}$

82. $W = 1,58 \cdot 10^4 \text{ kcal}$

83. $t = 943 \text{ }^\circ\text{C}$

84. $K = 0,087 \text{ kcal} \cdot \text{grd}^{-1}$; $w = 0,087 \text{ kg}$

85. $m_{\text{Al}} = 4,55 \text{ kg}$; $m_{\text{Cu}} = 11,1 \text{ kg}$;

$$m_{\text{Pb}} = 33,3 \text{ kg}$$
; $m_{\text{Fe}} = 9 \text{ kg}$

$$V_{\text{Al}} = 1,69 \text{ dm}^3$$
; $V_{\text{Cu}} = 1,25 \text{ dm}^3$;

$$V_{\text{Pb}} = 2,94 \text{ dm}^3$$
; $V_{\text{Fe}} = 1,15 \text{ dm}^3$

87. $W = 1,2 \cdot 10^5 \text{ kcal}$

88. $\Delta t = 0,012 \text{ grad}$

89. $h = 2,56 \text{ m}$

90. a) $P = 1100 \text{ W}$

b) $W = 18,3 \text{ Wh}$

c) $\Delta t = 350 \text{ grad}$

91. b) $W = 358 \text{ kpm}$

c) $Q = W$

92. a) $V_1 : V_2 = 14 : 1$

b) $t_2 = 650 \text{ }^\circ\text{C}$

93. b) $T_2 = 437 \text{ }^\circ\text{K}$

c) bei adiabatischer Verdichtung ist

$$p_2 = 10,5 \text{ at}$$

95. a) $m = 1,29 \text{ kg}$
 b) $W_v = 0,218 \text{ kcal}$
 c) $W_p = 0,307 \text{ kcal}$
 d) $\Delta V = \frac{1}{273} \text{ m}^3$
 e) $W_{\text{mech}} = 37,8 \text{ kpm} = 371 \text{ Ws}$
 f) $W_{\text{mech}} = W_p - W_v$
 $371 \text{ Ws} = 0,089 \text{ kcal}$
 $4180 \text{ Ws} = 1 \text{ kcal}$
96. $W = 2,22 \cdot 10^3 \text{ kpm}$

Mechanik

104. a) $v = \sqrt{2gs}$ b) $v = v_0 + \sqrt{2gs}$
105. $P \approx 983 \text{ kW} \approx 1340 \text{ PS}$
106. $h_g = \frac{v_0^2}{2g}$
107. a) $t = \frac{v_0}{g}$ b) $t = \frac{2v_0}{g}$
109. $F \approx 41200 \text{ N} \approx 4200 \text{ kp}$
110. $v \approx 72,9 \text{ ms}^{-1} \approx 262 \text{ kmh}^{-1}$
111. a) $v_0 \approx 6,26 \text{ ms}^{-1}$ b) $W_{\text{pot}} = 0,04 \text{ kpm}$
 $\approx 0,392 \text{ Nm}$
114. a) Beschleunigungsphase: $a = 0,75 \text{ ms}^{-2}$;
 $s = 24 \text{ m}$; $F \approx 2273 \text{ kp}$
 Gleichförmige Bewegung: $t \approx 18,5 \text{ s}$;
 $s = 111 \text{ m}$; $F = 2120 \text{ kp}$
 Bremsphase: $a = -1,2 \text{ ms}^{-2}$; $s = 15 \text{ m}$;
 $F \approx 1875 \text{ kp}$
118. a) $D = 400 \text{ kpm}^{-2}$ b) $F = 25 \text{ kp}$;
 $W_{\text{pot}} \approx 2,08 \text{ kpm}$
123. $u_1 = -1,05 \text{ ms}^{-1}$; $u_2 = 0,3 \text{ ms}^{-1}$
124. Es ergeben sich die (ursprünglichen) Werte v_1 und v_2 .
125. a) $v = 0,3 \text{ ms}^{-1}$; b) $\frac{3}{4}$ des Wertes
126. $F = 4940 \text{ N} \approx 504 \text{ kp}$
127. $q \approx 4000 \text{ kgs}^{-1} = 4 \text{ ts}^{-1}$

- Ablösearbeit 44 f.
 Absorption 50f., 54, 56
 Absorptionsspektrum 17
 Adiabate 109
 Aggregatzustand 53
 aktiv, optisch 31
 Amplitude 6
 Analysator 28
 Anfangsgeschwindigkeit 127
 Anregungsenergie 52, 54f.
 -spannung 52
 Antireflexbelag 26
 ARAGO, DOMINIQUE, FRANCOIS 66
 Arbeit 128
 - bei adiabatischer Zustandsänderung 108
 - bei isothermer Zustandsänderung 107
 -, mechanische 103
 Atommodell
 -, Bohrsches 60f., 63
 -, wellenmechanisches 62f.
 Auffangelektrode 51
 Auflösungsvermögen 15
 Augenblicks-beschleunigung s. Beschleunigung
 -geschwindigkeit s. Geschwindigkeit
 -leistung s. Leistung
 Ausbreitungs-geschwindigkeit 6
 -richtung 7
 Ausdehnung beim Erwärmen 73
 Ausdehnungskoeffizient
 - idealer Gase 78
 -, linearer 75
 -, räumlicher 76
 Auslöschung 11, 22

 Bahn, strahlungsfreie 49f., 60f.
 Balmerpektrum 53

 Bandenspektrum 17
 Bauch 9
 Beschleunigung 124, 134
 Beschleunigungs-arbeit 132
 -spannung 51, 52
 Beschleunigungs-Zeit-Diagramm 124
 Beschleunigungs-Zeit-Gesetz 124
 Betrachtungsweise, makrophysikalische 86
 -, mikrophysikalische 86
 Betrag eines Vektors 123
 Beugung 12, 41, 46
 Beugungsspektrum 16f.
 Bewegung 122f.
 -, geradlinige 125
 -, gleichförmige 123, 125f.
 -, krummlinige 125
 -, ungleichförmige 123
 -, ungleichmäßig beschleunigte 124, 128
 -, verzögerte 125
 Bewegungs-energie 51
 -gleichungen 127
 Bezugs-potential 51
 -system 122, 132, 135
 Bindungsenergie 55
 BOHR, NIELS 61
 Boltzmann-Konstante 95
 Boylesches Gesetz 79
 Brechung 8
 Brenndauer einer Rakete 140f.
 Brennschlußgeschwindigkeit einer Rakete 141
 Brewstersches Gesetz 29
 BROGLIE DE, LOUIS 38
 Brownsche Bewegung 87

 COMPTON, ARTHUR HOLLY 38

 Dampf-maschine 115
 -turbine 115
 Davison-Experiment 36, 38
 Denkmodell 61
 Dialektik 46
 Diffusion 88
 diskontinuierlich 47
 Dispersionspektrum 16f.
 Doppel-brechung 31
 -spalt 12
 Doppelspaltexperiment 33, 47f., 61, 63
 - mit Elektronen 36
 - mit Teilchen 33, 34
 - mit Wellen 34
 Drehung der Polarisations-ebene 31
 Druckkraft 145
 Druck-Temperatur-Gesetz 81
 Druck-Volumen-Gesetz 79
 Dualismus, Korpuskel-Welle 46, 61
 Durchschnitts-beschleunigung 124
 -geschwindigkeit 123
 -leistung 129
 Dynamik 122

 EINSTEIN, ALBERT 70
 Einsteinsche Gleichung 44
 Elektroden 41
 Elektronen 41f.
 -beugung 37, 39
 -energie, kinetische 35
 -geschwindigkeit 35ff.
 -hülle 50
 -interferenz an Kristallen 34ff.
 -, Laue-Diagramm von 37

 -masse, Abhängigkeit von der Geschwindigkeit 35ff.
 -masse, Ruhmasse 35ff.
 Elektronenmikroskop 33, 39
 Elektronen-strahlen, monochromatische 35
 -volt 42
 -welle 33, 36, 38
 Elementarwelle 8
 Elongation 6
 Emission (auch induzierte) 50, 54, 56, 58
 Emissionsspektrum 17
 Ende, festes 9f.
 -, loses 9f.
 Energieausstrahlung 60f.
 Energie 130
 - der Gase 155
 - der Moleküle 95f.
 -diagramme von Wärmekraftmaschinen 115
 -erhaltungssatz (siehe Gesetz von der Erhaltung der mechanischen Energie) 102, 132, 143
 -, innere 96, 103f.
 -, kinetische 130f.
 -, mechanische 131
 -niveau 50, 56
 -, potentielle 132
 -quelle 57
 -schema 54f.
 -speicher 57
 -stufen 50
 -umwandlung 101
 -wirtschaft 115
 Erhaltungssätze der Mechanik 137

 Fall, freier 123f.
 Feld, elektrisches 51f.
 -elektronenmikroskop 40

- emission 40
- Feuerzeug, pneumatisches 108
- FIZEAU, ARMAND 67
- Fotoemission 41
- FOUCAULT, LEON 67f.
- FRESNEL, AUGUSTIN JEAN 66
- Frequenz 6, 41ff., 52ff.
- Galvanometer 42
- Gangunterschied 13
- Gas, ideales 77f., 91
- Gase, spezifische Wärme der 104
- Gaskonstante 79f.
- GASSENDI, PIERRE 64
- Gas-theorie, kinetische 89f., 145
- thermometer 85
- Gedankenexperiment 47
- Gegenfeld 42, 44, 51
- Gegenspannung 45
- Gesetz von Boyle 79
- von der Erhaltung der mechanischen Energie 132, 143
- von der Erhaltung des Impulses 136, 143, 145
- von der Impulsänderung 135, 136
- von Gay-Lussac 77
- Geschoß 139
- Geschütz, rückstoß-freies 139
- Geschwindigkeit 50, 61, 123f., 130
- der Moleküle 94
- Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm 123
- Geschwindigkeit-Zeit-Gesetz 123, 126f.
- Gitter 15
- konstante 15f.
- Glasplattensatz 30
- Glühkatode 50f.
- Grenzfrequenz 42ff.
- GRIMALDI, FRANCESCO 65
- Grundgesetz der Mechanik, Newtonsches 126f., 134, 136
- Grundgleichung der kinetischen Gas-theorie 91
- der Wellenausbreitung 7
- Grundzustand 52, 54ff.
- Häufigkeitsverteilung 47, 49
- Hauptsatz der Wärmelehre, 1. 103
- 2. 118
- HELMHOLTZ 102
- HERTZ, HEINRICH 69
- Hubarbeit s. Verschiebungsarbeit
- Hüllenelektronen 51f.
- HUYGENS, CHRISTIAN 65
- Huygenssches Prinzip 8
- Impuls 49, 61, 135ff.
- erhaltungssatz 136
- Indikatordiagramme 111, 130
- des Viertakt-Otto-Motors 111f.
- des Viertakt-Diesel-Motors 113
- inkohärent 11
- Intensität 42ff., 61
- Interferenz 8, 41, 46, 48f., 62
- an dünnen Schichten 20
- durch Beugung 11
- durch Reflexion 19
- mit Atomen 38f.
- mit Elektronen 38f.
- mit Molekülen 38f.
- von Wellen 34
- filter 25
- maximum 14
- streifen 12f.
- Interferometer 24, 59
- invariant 137
- Ionen 57
- Ionisierungsenergie 55f.
- Isotherme 83
- isotrop 31
- Joule 101
- Kalorie 98, 102, 143, 151
- Kalorimeter 100
- Kalorimetrie 98
- Kelvin-Temperaturskala 78
- Kern-modell 62
- strahlung 49
- Klangfiguren, Chladnische 63
- Knoten 9
- kohärent 11, 56
- Kohärenzlänge 59
- Korpuskel 41
- Korpuskulartheorie 41
- Kraft 128, 130, 134
- stoß 134
- Kreuzgitter 19
- Ladungsdichte 63
- Längenänderungen 74
- Laser 56f.
- Leistung 129
- Leitfähigkeit, elektrische 60
- Leuchtdichte 58
- Licht-äther 65
- blitz 48
- elektrischer Effekt, äußerer 41f., 44ff.
- geschwindigkeit 66f.
- modell 64f.
- quanten 43f., 56
- quelle 49
- Linienpektrum 17, 53
- Longitudinalwelle 7
- Luftstrahltriebwerk 139
- Makrophysik 46, 48ff., 60
- MALUS, ETIENNE 66
- Masse 122
- Massen-ausstoß 139
- mittelpunkt 122, 139
- verhältnis einer Rakete 141
- Materiewelle 37f.
- MAXWELL, JAMES CLARK 68
- MAYER, JULIUS ROBERT 102
- Mehrstufenrakete 141
- Mikrophysik 46, 48, 50, 60
- Molekularbewegung 87
- monochromatisch 57, 62
- Negation 46
- NEWTON, ISAAC 92
- Newtonsche Ringe 24
- Nicolisches Prisma 31
- Normalbedingungen 80
- Nullpunkt, absoluter 78
- Oberflächenvergütung 26
- Ort 49
- Periode 6
- Perpetuum mobile
- 1. Art 102f.
- 2. Art 119
- Phase 6
- Phasen-differenz 12, 21
- sprung 9f.
- Photoeffekt 38
- Photon 43f., 46, 49
- Photozelle 45
- PLANCK, MAX 69
- Plancksches Wirkungs-quantum 36
- Pohlscher Interferenz-versuch 20
- Polarimeter 31
- Polarisation 28f., 41, 46
- des Lichtes 66
- Polarisations-ebene 31

- filter 28
- winkel 29
- Polarisator 28
- polarisiert, linear 28
- Protonenstrahl 37
- Punktmasse 123

- Quanten-eigenschaften des Lichtes 41**
- hypothese 44
- theorie 64
- quasifrei 44

- Rakete 139
- Reflexion 8
- Reibungsarbeit 101
- Resonanzpotential 52
- Resonator 57
- Richtung eines Vektors 7
- Richtungssinn eines Vektors 7
- RÖMER, OLAF 67
- Röntgenbeugung 19
- Rückstoß 139
- Ruhe, relative 122

- Serie 54
- Seriengrenze 55
- SCHRÖDINGER, ERWIN 38
- Schwerpunkt 122
- satz der Mechanik 139
- Schwingungsrichtung 7
- Spannarbeit 130
- Spannungs-doppelbrechung 32
- koeffizient 82

- Spektral-farben 16
- linie 52ff., 61
- kerne 53
- Spektrum 16f., 60f.
- Strahl, außerordentlicher 31
- , ordentlicher 31
- Strahltriebwerk 139
- Strahlung 50, 56
- Stoß, elastischer 143, 146
- gegen eine feste Wand 144ff.
- , unelastischer 145f.
- , zentraler 143

- Teilchenmodell 38, 43, 47f., 63
- des Lichtes 64
- Temperaturskalen 77
- , thermodynamische 78
- Term-darstellung 53
- schema 54f.
- Thermodynamik 143
- THOMSON, PAGET 38
- Trägheits-gesetz 137
- verhalten, s. auch Masse 122
- Transversalität der Lichtwellen 66
- Transversalwelle 7
- Tscherenkowstrahlung 60

- Übergang, spontaner 56
- Übergangswahrscheinlichkeit 56
- Überlagerung 8

- Ultra-rot 16
- violett 16
- Unbestimmtheits-beziehungen 47, 49f., 61
- Verbrennungsmotoren 110
- Verschiebungsarbeit 130
- Verstärkung 11, 13, 21f.
- Verzögerung 124
- Viertakt-Diesel-Motor 113
- Viertakt-Otto-Motor 110f.
- Volumenänderungen der festen Körper 76
- der Flüssigkeiten 76
- der Gase 77
- Volumen-Temperatur-Gesetz 77f.
- Vorgänge, irreversible 118
- , reversible 118
- Vorhersagen 50

- Wahrscheinlichkeit 50
- Wärme-kapazität 99
- menge 98
- , spezifische 98
- strahlung 18
- theorie, kinetische 73, 86
- tod 120
- Wasserwert 100f.
- Wechselwirkung 44, 48f., 60
- Welle 7, 41, 49f., 62f.
- , elektromagnetische 68f.
- , stehende 9
- Welleneigenschaften 34f.
- des Lichtes 33
- von Teilchen 33, 38
- Wellenlänge 6, 41, 49, 52, 54
- bewegter Teilchen 38, 70
- Elektronen 36f.
- , Messen der 14ff.
- Protonen 37
- Wellen-mechanik 38
- modell 38, 41, 43, 46ff., 63f.
- des Lichtes 65
- Wellentheorie 41
- Weg 122, 128f.
- Weg-Zeit-Diagramm 123
- Weg-Zeit-Gesetz 123, 126f.
- Wirkungs-grad 113f.
- quantum 44f.
- Wurf, lotrecht 124

- YOUNG, THOMAS 66
- Ziolkowski-Zahl 141
- Zustandsänderungen 82
- , adiabatische 108
- , isobare 84
- , isochore 83f.
- , isotherme 83
- Zustands-gleichung des idealen Gases 79
- größen 79

Quellennachweis der Bilder

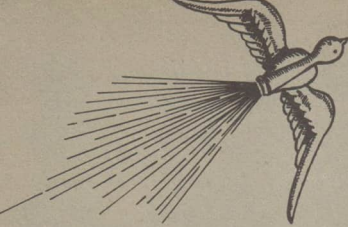
Dr. Anacker, F., Dresden: 20/2, 28/1 · ARN Ustinowa: 141/1 · Bunschuh, W., Berlin 85/7, 155/1 · Demme, D., Berlin: 117/1 · DSF: 5/1 · Held, L., Weimar: 32/5 · Kraemer, K.-H., Berlin 74/1 · Masojedek, K., Prag: 85/1 · Nowosti: 60/1 · Schröter, W., Leipzig: 85/3, 121/1 · VEB Carl Zeiss Jena: 25/1, 25/3, 31/2, 59/1, 99/1 · VEB Werk für Fernsehelektronik, Berlin: 40/1 · VWV-Archiv, Berlin: 8/2, 12/1, 12/2, 20/1, 20/3, 24/3, 26/1, 27/1, 27/2, 30/2, 32/2, 32/3, 36/2, 37/1, 71/1, 72/1, 86/1, 140/1, VWV-Seifert, Berlin: 6/1, 10/2, 18/5, 117/2, 117/3, 142/3, 143/1, 143/2, 143/3 · Willmann, L., Berlin: 117/5, 134/1, 142/1, 142/7 · Zentralbild Berlin: 18/1, 19/1, 61/1, 85/5, 98/1, 117/7, 122/1, 142/5 · Zimmer, Leipzig: 73/1.

Reproduktion aus:

Einführung in die Elektronenmikroskopie, VEB Verlag Technik, Berlin: 33/1, 39/2, 40/3 · Berühmte Erfinder, Physiker und Ingenieure, Aulis-Verlag Köln: 38/1, 66/1 · Zeitschrift Militärtechnik, Deutscher Militärverlag, Berlin: 18/3.

230

In China wird die Energie von Schwarzpulver zur Impulserzeugung für Raketen genutzt.



1300

Das Schwarzpulver wird in Europa erstmals für militärische Zwecke angewendet.



1685

Isaac Newton formuliert die Grundgesetze der Mechanik, nach denen das Gesetz von der Erhaltung des Impulses aufgestellt wird.

$$m_1 \cdot v_1 = m_2 \cdot v_2$$



1807

Der Kapitän Treugouse führt erstmals Versuche mit Seenot-Rettungsraketen durch.

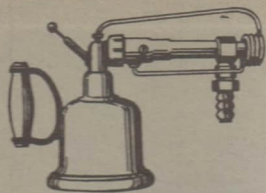


1903

Konstantin E. Ziolkowski entwickelt die Theorie der Rakete, die Grundgleichung für die Raketengeschwindigkeit, ein Flüssigkeits-Raketentriebwerk und die Mehrstufenrakete.

$$v = c \cdot \ln \frac{M_0}{M_1}$$



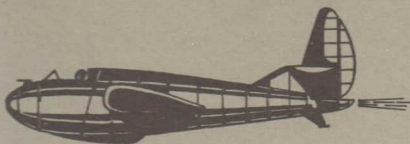


1930

Friedrich Arturowitsch Zander baut und erprobt in der Sowjetunion ein Flüssigkeits-Raketentriebwerk mit einer Schubkraft von 5 kp.

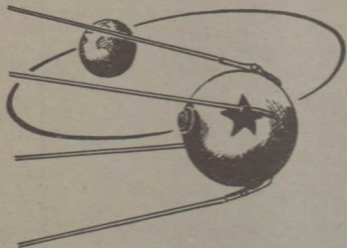
1940

In der Sowjetunion fliegt ein Flugzeug mit einem Flüssigkeits-Raketentriebwerk mit einer Schubkraft von 300 kp.



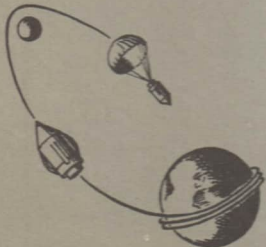
1957

Sowjetischen Wissenschaftlern gelingt es, den ersten künstlichen, 83,6 kg schweren Erdsatelliten - Sputnik I - auf eine Umlaufbahn zu bringen. Die Schubkraft der Raketentriebwerke beträgt etwa 220 000 kp.



1961

Juri Gagarin umkreist als erster Mensch in dem 1400 kg schweren Raumschiff Wostok I die Erde.



1968

Sowjetische Wissenschaftler bringen ein unbemanntes Raumschiff auf einen Flug von der Erde zum Mond und zurück zur Erde.

