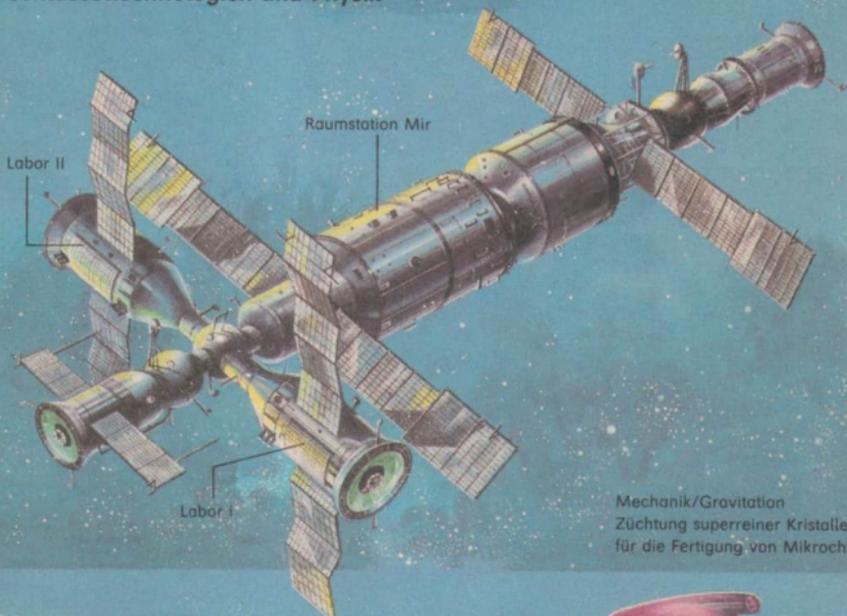


---

# PHYSIK 10

---

## Schlüsseltechnologien und Physik



Mechanik/Gravitation  
Züchtung superreiner Kristalle  
für die Fertigung von Mikrochips

Laserstrahl

Optik/Laser

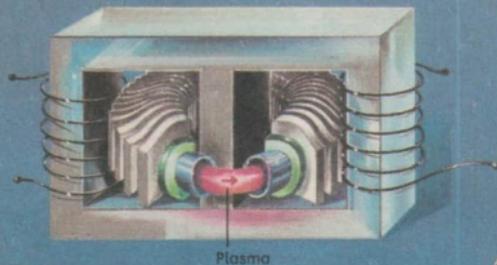
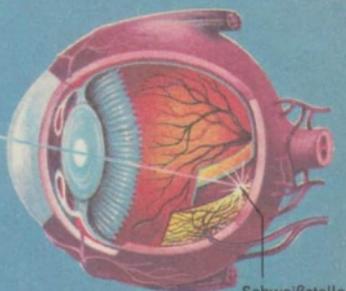
Schweißtechnische Anwendung  
in der Medizin durch punktförmige  
Eiweißgerinnung im menschlichen Gewebe

Kernphysik/Kernfusion

Umweltentlastete Bereitstellung von  
Energie in bisher nicht erreichtem Umfang

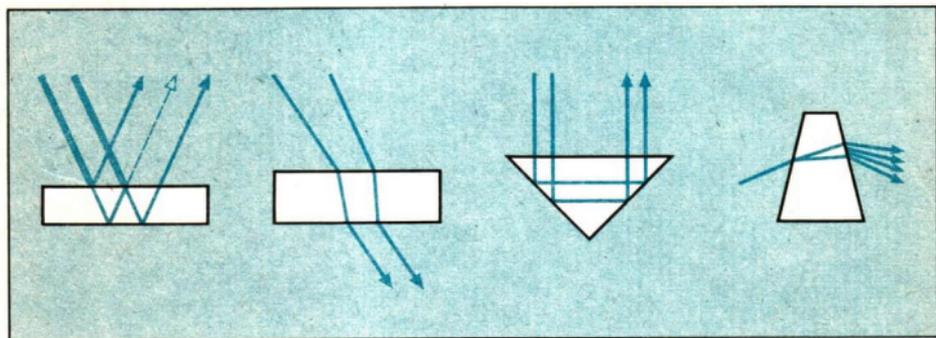
Elektrizitätslehre/Schaltkreise

Einsatz von Computern zur rechner-  
gestützten Konstruktion und Fertigung (CAD/CAM)



# PHYSIK

Lehrbuch für Klasse 10



Volk und Wissen  
Volkseigener Verlag Berlin  
1988

Leiter des Autorenkollektivs: Prof. Dr. sc. Hans-Joachim Wilke

Autoren:

Dr. Peter Freudenberger (Abschnitte 9, 10, 11)

Prof. Dr. habil. Werner Karsten, Dr. sc. Hans Erich Riedel (Abschnitte 6, 8)

Dr. sc. Klaus Liebers (Abschnitte 1, 4, 5, 8)

Dr. Josef Peter (Abschnitte 2, 3, 4)

Dr. Bernhard Raabe (Weitere Aufgaben zur Wiederholung und Übung)

Prof. Dr. sc. Hans-Joachim Wilke (Abschnitte 7, 8)

Dr. Rolf Winter (Abschnitte 12, 13)

Redaktion: Günter Meyer

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

ISBN 3-06-021010-1

1. Auflage

© Volk und Wissen Volkseigener Verlag, Berlin 1988

Lizenz-Nr. 203 · 1000/88 (E 021010-1)

Printed in the German Democratic Republic

Schrift: 9/10 Maxima, TVS

Gesamtherstellung: Grafischer Großbetrieb Völkerfreundschaft Dresden

Zeichnungen: Heinrich Linkwitz

Illustrationen: Ursula Pritzel

Einband: Manfred Behrend, Karl-Heinz Wieland

Typografische Gestaltung: Hansmartin Schmidt

Redaktionsschluß: 15. Juli 1987

Bestell-Nr. 731 348 5

LSV 0681

Schulpreis DDR: 2,70

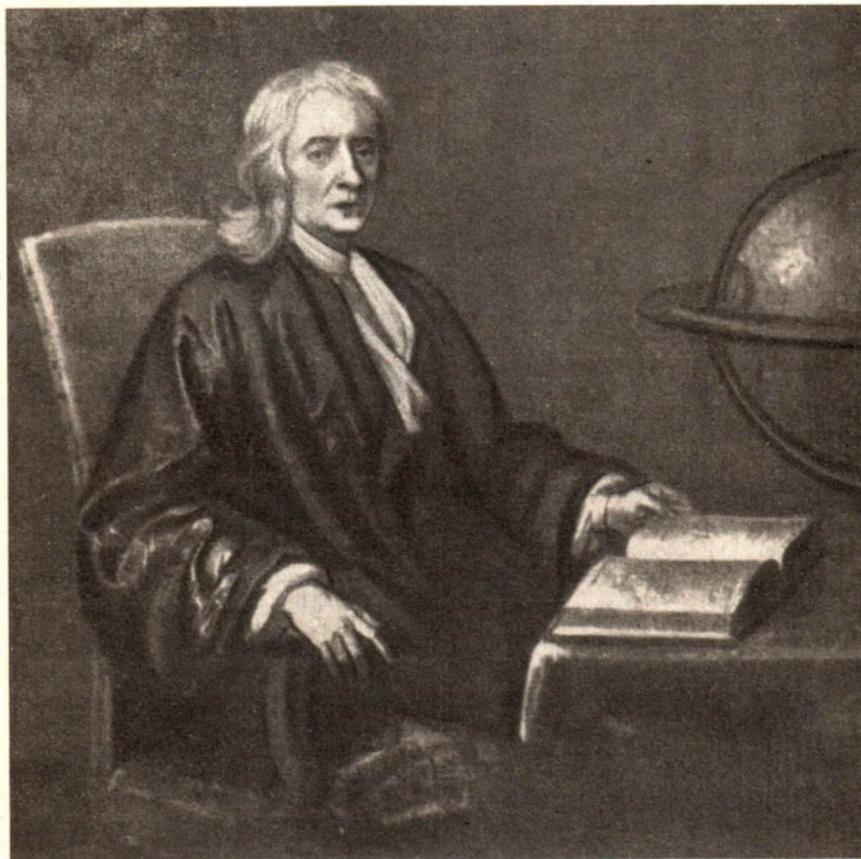
<b>MECHANIK</b>	5
<hr/>	
1 Gravitation	6
2 Mechanische Schwingungen	16
3 Mechanische Wellen	32
4 Wiederholung und Übung	44
<b>ELEKTRIZITÄTSLEHRE</b>	45
<hr/>	
5 Wechselstrom	46
6 Schwingkreis	66
7 Hertzsche Wellen	74
8 Wiederholung und Übung	87
<b>OPTIK</b>	90
<hr/>	
9 Strahlenoptik	92
10 Wellenoptik	104
11 Wiederholung und Übung	118
<b>KERNPHYSIK</b>	121
<hr/>	
12 Atomkerne und Kernstrahlung	122
13 Künstliche Kernumwandlungen	136
<b>WEITERE AUFGABEN ZUR WIEDERHOLUNG UND ÜBUNG</b>	146
<hr/>	
Lösungen	157
Register	159

## Im Lehrbuch verwendete Symbole

- ▼ Experiment
- ▼ Schülerexperiment
- ▶ Merksatz
- Beispiel
- ① Fragen und Aufträge
- ↗ siehe

Bei den Bildnummern bedeutet die erste Zahl die Seite,  
die zweite Zahl gibt an, das wievielte Bild von oben gemeint ist.

# MECHANIK

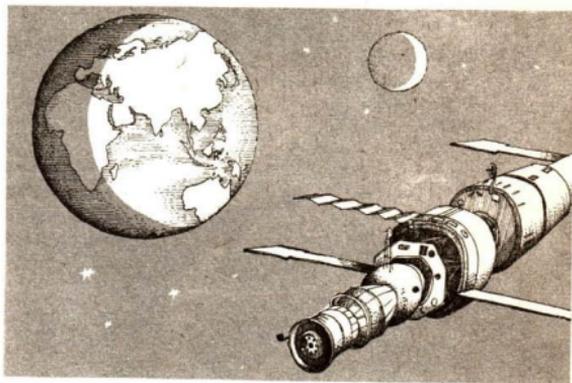


Im Mittelpunkt der Entwicklung der Physik stand vor einigen Jahrhunderten die Mechanik. An der Entdeckung der physikalischen Gesetze der Mechanik hatten viele Forscher Anteil. Die größten Leistungen vollbrachte dabei Isaac Newton (1643 bis 1727). Er faßte alle bis dahin bekannten Erkenntnisse und seine eigenen, neuen Erkenntnisse zu einigen Grundgesetzen der Mechanik zusammen.

Die Mechanik befaßt sich mit der Beschreibung des Ortes und der Geschwindigkeit von Körpern bei geradlinigen Bewegungen, bei Kreisbewegungen und bei Schwingungen, und sie untersucht die Ausbreitung von Wellen. Die Mechanik erklärt die Bewegungen der Körper mit den auf die Körper einwirkenden Kräften.

Ein Höhepunkt in der Entwicklung der Mechanik war die Entdeckung des Gravitationsgesetzes durch Newton. Damit konnte die Bewegung der Erde, des Mondes und anderer Himmelskörper erklärt werden.

In der Geschichte der Menschheit dauerte es sehr lange, bis im 16. Jahrhundert die richtigen Vorstellungen über die Bewegungen der Erde und der Planeten entwickelt werden konnten. Noch länger dauerte es, bis man eine Antwort auf die Frage fand: Wodurch werden die Erde und die Planeten gezwungen, ihre Bahnen einzuhalten?



### Die Entwicklung der Vorstellungen über unser Sonnensystem

**Das geozentrische Weltbild.** Die Astronomen des Altertums bemühten sich, die Bewegungen der Planeten zu beschreiben. Unter dem Einfluß des griechischen Wissenschaftlers Aristoteles wurde ein *geozentrisches Weltbild* entwickelt. In diesem Weltbild bewegten sich die Sonne, der Mond und die Planeten auf Kreisbahnen um die Erde. Die Erde selbst wurde als ruhendes Zentrum angenommen.

Zu diesem Schluß kamen die Astronomen des Altertums auf Grund der Beobachtung verschiedener einfacher Bewegungsvorgänge am Sternenhimmel. Komplizierte, nicht kreisförmige Planetenbewegungen, die beobachtet wurden, konnte man nicht erklären.

Das geozentrische Weltbild galt bis ins Mittelalter hinein als richtig. Auf dessen Grundlage waren Planetentafeln errechnet worden, aus denen die Seefahrer für längere Zeiträume die tägliche Stellung der Planeten am Himmel entnehmen konnten. Diese Angaben ermöglichten ihnen eine ausreichend genaue Bestimmung des Schiffsstandortes. Es waren auch Kalender mit den Terminen für kirchliche Feiertage und mit wichtigen landwirtschaftlichen Terminen für die Aussaat und für die Ernte aufgestellt worden.

**Das heliozentrische Weltbild.** Im Verlaufe von mehreren Jahrhunderten zeigten sich Abweichungen der Planetenstellungen am Himmel von den in den Planetentafeln angegebenen Stellungen. Diese Abweichungen wurden für die Schifffahrt und damit auch für den Aufschwung des Handels im Mittelalter immer störender. Entsprechende Abweichungen zeigten sich auch im Kalender; die Zeit für ein Jahr war zu ungenau bestimmt. Im Verlaufe von eineinhalb Jahrtausenden hatten sich diese Ungenauigkeiten schon zu rund zehn Tagen summiert.

Die Festlegung und Einhaltung kirchlicher Feiertage, weltlicher Ereignisse wie Märkte und Messen und landwirtschaftlicher Termine machten deshalb eine Kalenderreform immer dringender erforderlich.

Der polnische Astronom Copernicus wurde wie fast jeder berühmte Astronom des Mittelalters vom Papst zur Kalenderreform befragt. Copernicus wies darauf hin, daß einer Kalenderreform zunächst eine genauere Bestimmung des Jahres vorausgehen müsse.

Nach entsprechenden Vorarbeiten war er davon überzeugt, daß das geozentrische Weltbild hierfür zu kompliziert sei. Um zu einer einfacheren Erklärung für die Bahnen der Planeten zu kommen, machte er eine neue Annahme: Statt der Erde wählte er die Sonne zum Mittelpunkt der Welt. Weiterhin nahm er an: Die Planeten einschließlich der Erde kreisen um die Sonne. Dieses Weltbild wird *heliocentrisches Weltbild* genannt.

Aus einer sehr großen Anzahl von astronomischen Beobachtungsergebnissen erkannte schließlich der deutsche Astronom Kepler die nach ihm benannten *Keplerschen Gesetze der Planetenbewegungen*.



Bild 7/1 Johannes Kepler  
(1571 bis 1630)

Das erste Keplersche Gesetz besagt:

**Alle Planeten bewegen sich auf kreisähnlichen Bahnen (Ellipsen) um die Sonne.  
Die Sonne steht annähernd im Mittelpunkt der Bahnen.**

Das neue Weltbild stürzte die gesamten Vorstellungen über die Welt um: Die Erde erscheint nicht mehr als Mittelpunkt der Welt, sondern nur noch als einer von mehreren Planeten. Es gehörte seit dem Altertum zu den tiefsten Überzeugungen der Menschen, daß ihre Erde die Mitte aller Dinge, die Mitte der Welt sein müsse. Dies war einer der Gründe, daß sich das neue Weltbild nur langsam durchsetzen konnte, aber zugleich die Voraussetzung, um weitere Gesetze der Mechanik erkennen zu können.

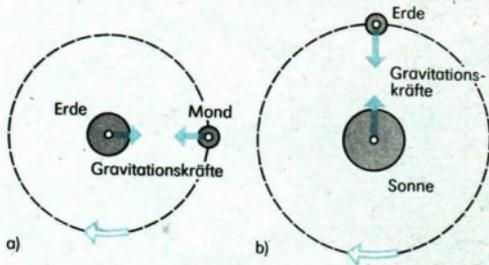
### Das Gravitationsgesetz

Alle in der Mechanik erkannten Gesetze wurden bis ins Mittelalter nur auf die Bewegung von Körpern auf der Erde angewandt. Bis zu jener Zeit unterschied man nämlich zwischen einer „irdischen“ Mechanik, die nach physikalischen Gesetzen abläuft, und einer „Himmelsmechanik“, die allein durch göttliche Vorstellungen bestimmt sei.

Unter dem Einfluß der Forschungen wuchs im 17. Jahrhundert bei den Wissenschaftlern jedoch die Überzeugung, daß es physikalische Gesetze geben müsse, nach denen sich alle Körper bewegen, das heißt, sowohl die Körper auf der Erde als auch die Himmelskörper. Zu jener Zeit war bereits bekannt, daß bei einer Kreisbewegung eines Körpers eine zum Kreismittelpunkt gerichtete Radialkraft wirken muß. Es entstand daher die Frage: Welche Art von Kraft übt die Sonne auf die Planeten aus, so daß diese gezwungen werden, sich auf kreisähnlichen Bahnen zu bewegen? Die Antwort hierauf fand Newton (→ Bild 5/1).

**Newtons physikalischer Ansatz.** Newton betrachtete die kreisähnlichen Bahnen der Planeten vereinfacht als Kreise. Dann führte er folgende Überlegungen durch: Wenn die Bewegung des Mondes um die Erde auf einer Kreisbahn verläuft, dann muß eine Radialkraft vorhanden sein, die auf die Erde gerichtet ist. Diese Kraft zwingt den Mond in eine Kreisbahn. Sollte das nicht vielleicht dieselbe Kraft sein, die auch einen fallenden Apfel in die Richtung zum Mittelpunkt der Erde zieht? Dies war der große Gedanke, der zum Erfolg führte. Newton entdeckte so die allgemeine Eigenschaft zweier Körper, sich gegenseitig anzuziehen.

Alle Körper ziehen sich auf Grund ihrer Masse gegenseitig an. Diese Anziehung nennt man Gravitation, die Anziehungskräfte heißen Gravitationskräfte.

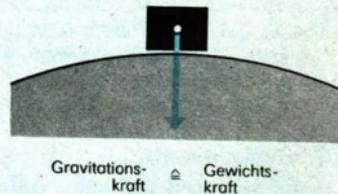


Die Gravitationskräfte zwischen den Himmelskörpern wirken als Radialkräfte.

Die Gravitationskraft der Erde auf den Mond bedingt die kreisähnliche Bewegung des Mondes, und die Gravitationskraft der Sonne auf die Planeten bedingt die kreisähnliche Bewegung der Planeten.

Gravitationskräfte wirken auch zwischen der Erde und den auf ihr befindlichen Körpern. Diese Kräfte sind uns als Gewichtskräfte bekannt.

Die Gewichtskraft eines Körpers ist die Gravitationskraft, mit der die Erde auf den Körper einwirkt.



Auch zwischen zwei beliebigen Körpern auf der Erde wirken Gravitationskräfte. Sie sind aber so klein, daß sie nur bei Präzisionsmessungen feststellbar sind.

**Entdeckung des Gravitationsgesetzes.** Newton wollte den Betrag der Gravitationskräfte zwischen Erde und Mond berechnen. Dazu betrachtete er von diesen zwei Kräften nur die Kraft, mit der die Erde auf den Mond einwirkt.

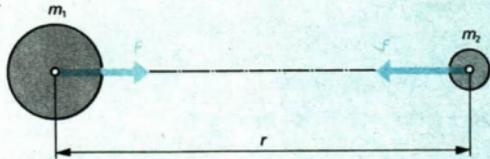
Die Kraft der Erde auf den Mond muß so groß sein, daß der Mond auf einer Kreisbahn gehalten wird. Wäre die Kraft größer, dann würde sich der Mond auf die Erde zubewegen.

gen. Wäre sie kleiner, dann würde sich der Mond von der Erde entfernen. Aus diesen Überlegungen folgerte Newton durch Anwendung der Mathematik das

**Gravitationsgesetz:**

Alle Körper ziehen sich gegenseitig an. Die Gravitationskräfte, mit denen sich zwei Körper gegenseitig anziehen, sind gleich groß und entgegengesetzt gerichtet. Für die Gravitationskräfte gilt die Gleichung:

$$F = \gamma \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$



Hierin bedeuten  $m_1$  und  $m_2$  die Massen und  $r$  den Abstand der Mittelpunkte der zwei Körper, die als Massepunkte betrachtet werden. Die Größe  $\gamma$  ist eine Konstante und heißt **Gravitationskonstante**. Diese ist nicht davon abhängig, welche Körper aufeinander einwirken und wo sich diese Körper befinden. Sie ist im gesamten Weltall gleich groß.

**Experimentelle Bestimmung der Gravitationskonstanten.** Newton konnte den genauen Wert der Gravitationskonstanten noch nicht. Die Bestimmung dieser Konstanten gelang erst viel später.

Bild 9/2 zeigt das Prinzip der Experimentieranordnung, mit der Richarz die Gravitationskonstante bestimmen konnte.

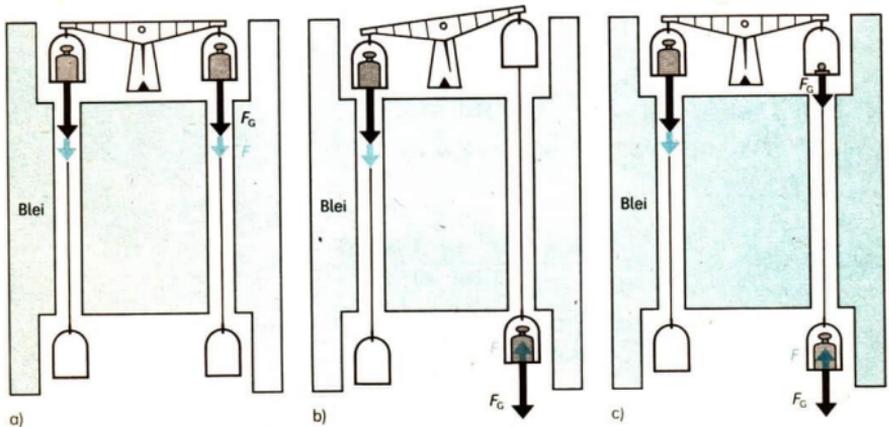
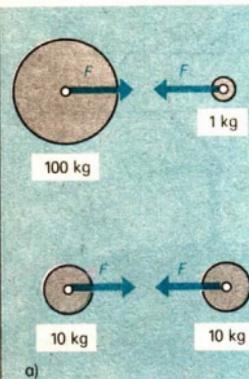
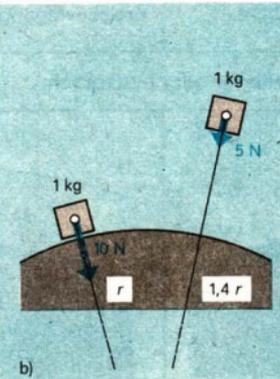
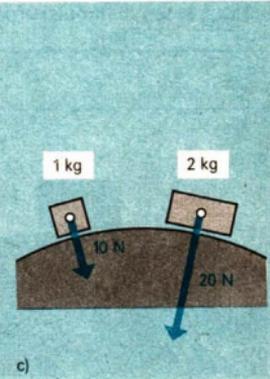


Bild 9/2 Vereinfachte Darstellung der Experimentieranordnung von Richarz

Befinden sich beide Wägestücke auf den oberen Waagschalen, so befindet sich die Hebelwaage im Gleichgewicht, weil auf beiden Seiten der Waage die Resultierenden der Gewichtskraft  $F_G$  und der Gravitationskraft  $F$  zwischen den Wägestücken und dem großen Bleiblock gleich sind (Bild 9/2a).



**Schlußfolgerungen aus dem Gravitationsgesetz.** Wir unterscheiden die folgenden Fälle:

<p>Für <math>r = \text{konstant}</math> gilt:</p> $F \sim m_1 \cdot m_2$  <p>a)</p> <p>■ Große Gravitationskräfte treten zwischen Himmelskörpern auf. Gravitationskräfte zwischen zwei Körpern auf der Erde sind meistens ohne praktische Bedeutung.</p>	<p>Für <math>m_1 = \text{konstant}</math> und für <math>m_2 = \text{konstant}</math> gilt:</p> $F \sim \frac{1}{r^2}$  <p>b)</p> <p>■ Die Gewichtskraft eines Körpers wird mit der Entfernung von der Erde kleiner.</p>	<p>Für <math>r = \text{konstant}</math> und für <math>m_1 = \text{konstant}</math> gilt:</p> $F \sim m_2$  <p>c)</p> <p>■ Die Gewichtskräfte von Körpern auf der Erde sind deren Massen proportional.</p>
---	--	--

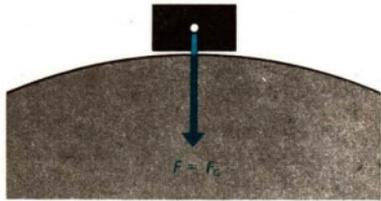
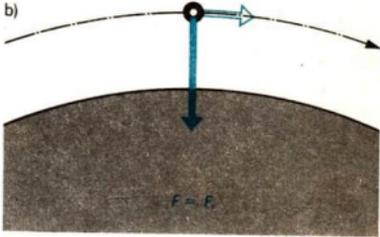
③ ④

### Anwendung des Gravitationsgesetzes

Mit dem Gravitationsgesetz können wir die Masse von Himmelskörpern bestimmen oder die Geschwindigkeiten berechnen, die Satelliten haben müssen. Dazu werden diese Körper vereinfacht als kugelförmig bzw. als Massepunkte und deren Bahnen vereinfacht als Kreise betrachtet.

- ① Beschreiben Sie die Experimentieranordnung im Bild 9/2! Wie kann damit die Gravitationskonstante bestimmt werden?
- ② Berechnen Sie die Gravitationskräfte zwischen zwei Personen (70 kg und 60 kg), die voneinander 1 m entfernt sind!
- ③ Interpretieren Sie das Gravitationsgesetz!
- ④ Erklären Sie mit Hilfe des Gravitationsgesetzes, warum die Gewichtskraft eines Körpers am Pol von der am Äquator verschieden ist!

Bei der Lösung solcher Aufgaben gehen wir stets von einem der folgenden zwei physikalischen Ansätze aus, wobei wir von den zwei Gravitationskräften immer nur eine Kraft betrachten:

Ansatz 1	Ansatz 2
Ein Körper ruht auf einem Himmelskörper (zum Beispiel auf der Erde) oder fällt auf einen Himmelskörper.	Ein Körper führt um einen Himmelskörper (zum Beispiel um die Erde) eine Kreisbewegung aus.
Hierfür gilt physikalisch:	
<p>a)</p>  <p>Die Gravitationskraft <math>F</math> des Himmelskörpers wirkt als Gewichtskraft <math>F_G</math>.</p>	<p>b)</p>  <p>Die Gravitationskraft <math>F</math> des Himmelskörpers wirkt als Radialkraft <math>F_r</math>.</p>
Als Gleichung geschrieben:	
$F = F_G$	$F = F_r$

**Die Masse der Erde.** Es interessierte die Menschen von altersher, wie groß die Masse der Erde ist. Zur Lösung dieser Aufgabe gehen wir vom *Ansatz 1* aus. Danach gilt:

$$F = F_G \quad \text{oder}$$

$$F_{\text{Erde/Körper}} = F_G \text{ Körper auf der Erde}$$

Durch Einsetzen der Terme aus den Gleichungen für die Gravitationskraft  $F$  und für die Gewichtskraft  $F_G$  ( $F_G = m \cdot g$ ) erhalten wir:

$$Y \cdot \frac{m_E \cdot m_K}{r^2} = m_K \cdot g$$

Die Umformung nach der Masse  $m_E$  der Erde ergibt:  $m_E = g \cdot \frac{r^2}{Y}$ .

①

**Die Geschwindigkeit von Satelliten.** Wenn aus einem Militärflugzeug im Horizontalflug ein Schuß abgegeben wird, dann trifft das Geschöß in einer bestimmten Entfernung auf die Erde (Bild 13/1). Bei einer Vergrößerung der Anfangsgeschwindigkeit des Geschosses wird diese Entfernung größer. Wie groß müßte die Anfangsgeschwindigkeit des Geschosses sein, damit es nicht mehr auf die Erde auftrifft, sondern sie auf einer Kreisbahn umfliegt? Die Antwort hierauf wäre auch eine Antwort auf die Frage: Wie groß muß in Erdnähe die **Kreisbahngeschwindigkeit**  $v_K$  eines künstlichen Erdsatelliten sein?



Bild 13/1 Wenn ein Geschöß eine genügend große Geschwindigkeit hätte, müßte es auf einer Kreisbahn um die Erde fliegen.

Die Lösung dieser Aufgabe finden wir mit dem **Ansatz 2**:

$$F = F_r \quad \text{oder}$$

$$F_{\text{Erde/Satellit}} = F_r \text{ Satellit}$$

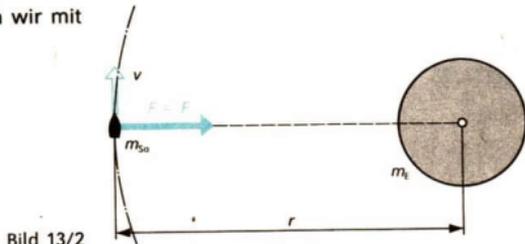


Bild 13/2

Durch Einsetzen der Terme aus den Gleichungen für die Gravitationskraft  $F$  und für die Radialkraft  $F_r$  (in der Form  $F_r = m \cdot \frac{v^2}{r}$ ) erhalten wir:

$$\gamma \cdot \frac{m_E \cdot m_{So}}{r^2} = m_{So} \cdot \frac{v^2}{r}$$

Die Auflösung dieser Gleichung nach der Bahngeschwindigkeit  $v$  ergibt:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma \cdot m_E}{r}}$$

Für eine theoretische Umlaufbahn unmittelbar über der Erdoberfläche erhält man somit eine **Kreisbahngeschwindigkeit**  $v_K$  von etwa

$$\underline{v_K = 7,9 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}}$$

Diese Geschwindigkeit wird mitunter auch als 1. kosmische Geschwindigkeit bezeichnet.

- ① Berechnen Sie die Masse der Erde!

In größeren Höhen über der Erdoberfläche ist für eine Kreisbahn eine kleinere Geschwindigkeit erforderlich (Bild 14/1). Bei einem geostationären Satelliten werden die Höhe über der Erdoberfläche und damit auch die Bahngeschwindigkeit so gewählt, daß sich dieser immer über demselben Punkt der Erdoberfläche befindet.

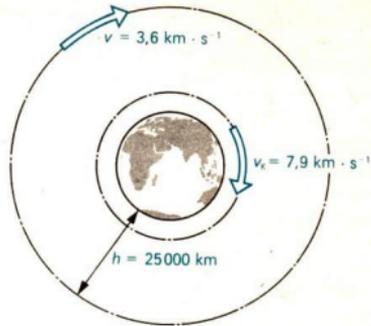


Bild 14/1 1. kosmische Geschwindigkeit und Bahngeschwindigkeit auf einer entfernten Bahn

Wenn die Geschwindigkeit eines Raumflugkörpers nach dem Einschwenken in die Umlaufbahn größer als die für eine Kreisbahn erforderliche Geschwindigkeit ist, dann wird eine Ellipsenbahn durchlaufen. Je größer der Betrag der Geschwindigkeit gegenüber der für die Kreisbahn ist, um so langgestreckter ist die Ellipse. Ein sich mit  $v \geq 11,2 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  bewegendes Satellit „entweicht“ aus dem Anziehungsbereich der Erde (Mars- und Venussonden). Diese **Parabelbahngeschwindigkeit**  $v_p = 11,2 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  wird mitunter auch als 2. kosmische Geschwindigkeit bezeichnet (Bild 14/2).

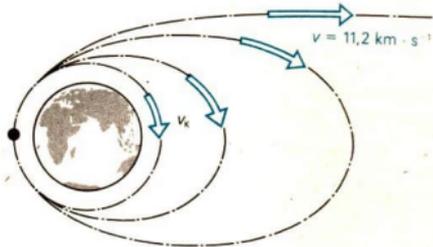


Bild 14/2 2. kosmische Geschwindigkeit

**Abhängigkeit der Fallbeschleunigung vom Abstand zur Erde.** Für die Untersuchung dieser Abhängigkeit gehen wir vom Ansatz 1 (S. 12) aus. Durch ähnliche Umformungen wie bei der Berechnung der Masse von Himmelskörpern erhalten wir die Gleichung:

$$g = \gamma \cdot \frac{m_E}{r^2} \quad \textcircled{1}$$

Aus dieser Gleichung können wir folgende Schlüsse ziehen:

- Da die Gravitationskonstante  $\gamma$  und die Masse  $m_E$  der Erde konstant sind, gilt:  $g \sim \frac{1}{r^2}$ . Das heißt: An einem Ort, der doppelt so weit von der Erdmitte entfernt ist wie die Erdoberfläche, ist die Fallbeschleunigung nur noch ein Viertel des Wertes, den sie an der Erdoberfläche hat.
- Da in der Gleichung die Masse des fallenden Körpers nicht mehr enthalten ist, ist die Fallbeschleunigung von der Masse des fallenden Körpers unabhängig.

**Die Bedeutung der Entdeckung des Gravitationsgesetzes.** Newton veröffentlichte das von ihm erkannte Gesetz erst nach etwa 18jähriger wissenschaftlicher Arbeit. In dieser Zeit hatte er sich überzeugt, daß er mit diesem Gesetz die Bahnen der Planeten, Monde und Kometen erklären konnte. Es war ihm auch möglich, die Keplerschen Gesetze abzuleiten und kleine Störungen der Planetenbahnen infolge der Gravitation zwischen den Planeten zu erklären (Bild 15/1).

②

Weiterhin konnte er das Entstehen von Ebbe und Flut durch das Einwirken der Gravitationskräfte des Mondes auf die Weltmeere erklären.

Somit wies Newton nach: Das Gravitationsgesetz gilt im gesamten Sonnensystem. Damit brach die aus dem Altertum überlieferte Unterscheidung zwischen einer „irdischen“ Mechanik und einer „Himmelsmechanik“ zusammen. Die Gültigkeit des Gravitationsgesetzes im Weltall ist ein Beweis für die Richtigkeit unseres wissenschaftlichen Weltbildes, daß alle physikalischen Vorgänge in der Welt nach einheitlichen Gesetzen ablaufen, die vom Menschen erkannt werden können.

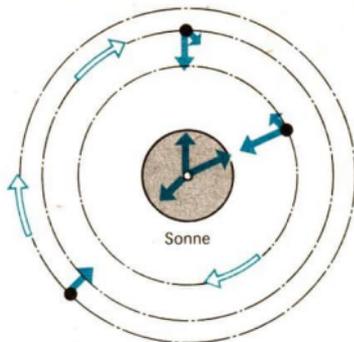


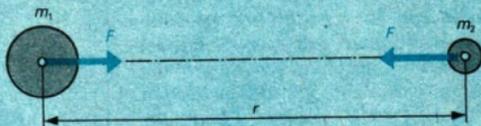
Bild 15/1 Die Gravitationskräfte zwischen den Planeten führen zu sehr kleinen, aber meßbaren Abweichungen in den Planetenbahnen.

### Zusammenfassung

Alle Körper ziehen sich auf Grund ihrer Masse gegenseitig an. Diese Anziehung nennt man Gravitation.

Für die Gravitationskräfte zwischen zwei Körpern gilt das Newtonsche Gravitationsgesetz:

$$F = \gamma \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$



Die Gravitationskräfte zwischen den Himmelskörpern wirken als Radialkräfte und bedingen die Bewegungen der Planeten und des Mondes auf kreisähnlichen Bahnen.

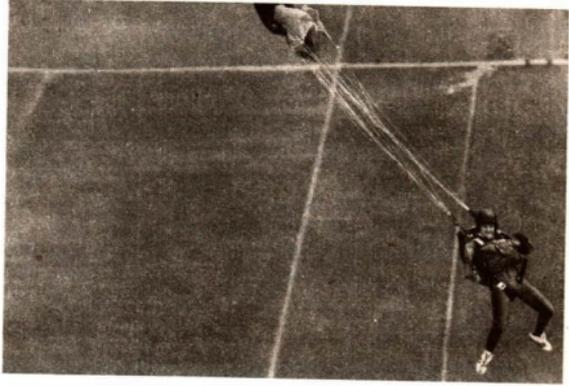
Die Gewichtskraft eines Körpers ist die Gravitationskraft der Erde auf den Körper.

- ① Leiten Sie die Gleichung  $g = \gamma \cdot \frac{m_E}{r^2}$  her!
- ② Lösen Sie folgende Aufgaben:
  - a) Wie groß ist die Fallbeschleunigung  $g_M$  auf dem Mond?
  - b) Wie groß muß die Bahnhöhe  $r$  eines geostationären Satelliten sein?
  - c) Wie groß ist die Masse  $m_S$  der Sonne?
  - d) Wie groß ist die Geschwindigkeit für einen künstlichen Satelliten auf einer theoretischen Umlaufbahn unmittelbar über der Mondoberfläche?
  - e) In welcher Entfernung von der Erdoberfläche ist die Fallbeschleunigung nur noch halb so groß wie auf der Erde?  
Hinweis: Suchen Sie jeweils den Ansatz zur Lösung der Aufgabe, leiten Sie daraus die allgemeine Lösung ab, führen Sie die Berechnung durch!

Fallschirmspringen ist ein Sport der Kühnen!

Wenn sich nach dem Absprung aus dem Flugzeug der Fallschirm entfaltet, dann pendelt der Springer an den Fangleinen unter dem Fallschirm zunächst noch mehrmals hin und her.

Er führt Schwingungen aus. Was aber ist in der Physik eine Schwingung?



**Mechanische Schwingungen in Natur und Technik**

Beispiele für Schwingungen sind vibrierende Teile von Fahrzeugen und Maschinen. Das Mädchen auf der Schaukel schwingt. Beim Sprechen schwingen die Stimmbänder im Kehlkopf und erzeugen Töne. Das Pendel einer Pendeluhr schwingt hin und her (Bild 16/2).

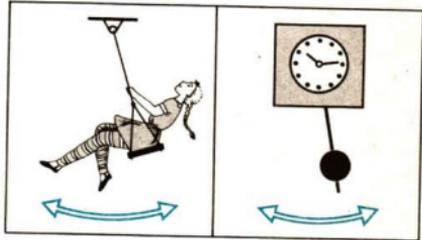


Bild 16/2

**Beschreibung mechanischer Schwingungen**

Beim Vergleich der verschiedenen schwingenden Körper (Bild 16/3) erkennen wir folgende Gemeinsamkeiten:

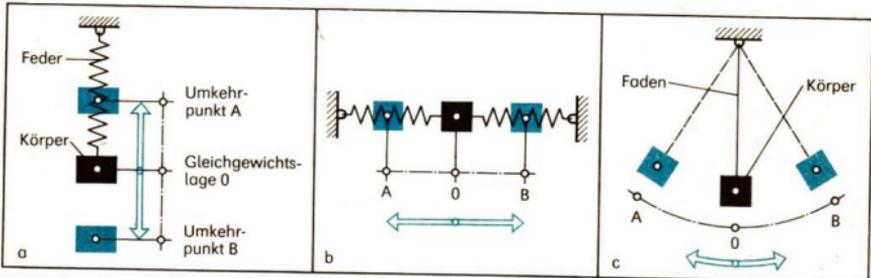


Bild 16/3 a) Vertikaler Federschwinger, b) Horizontaler Federschwinger, c) Fadenpendel

- Wird der schwingungsfähige Körper aus seiner **Gleichgewichtslage 0** ausgelenkt und danach losgelassen, dann beginnt er zu schwingen.
- Ein schwingender Körper führt zwischen 2 Umkehrpunkten (A und B) eine Hin- und Herbewegung um seine Gleichgewichtslage aus.
- Die Hin- und Herbewegung wiederholt sich ständig und in gleichen Zeitabständen. Sie erfolgt zeitlich **periodisch**. Eine vollständige Hin- und Herbewegung (z. B. von A über 0 nach B und wieder zurück über 0 nach A) wird als **Periode** bezeichnet.
- Die **Auslenkung  $y$**  ist der jeweilige Abstand des Körpers von der Gleichgewichtslage. Sie ändert sich periodisch, ebenso wie die **Geschwindigkeit  $v$**  und die **Beschleunigung  $a$**  des schwingenden Körpers (Bild 17/1).

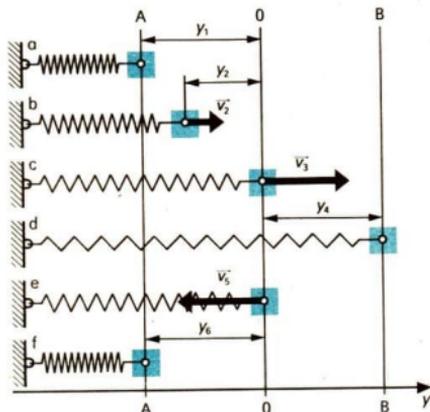


Bild 17/1

► Eine mechanische Schwingung ist eine zeitlich periodische Bewegung eines Körpers um seine Gleichgewichtslage. Bei einer Schwingung ändern sich die Auslenkung  $y$ , die Geschwindigkeit  $v$  sowie die Beschleunigung  $a$  des schwingenden Körpers zeitlich periodisch.

Die Einheit der Auslenkung ist ein Meter (1 m).

**Amplitude.** Schwingende Körper können sich, je nachdem wie stark sie angestoßen wurden, mehr oder weniger weit von der Gleichgewichtslage entfernen. Die physikalische Größe **Amplitude  $y_{\max}$**  gibt an, wie weit sich der schwingende Körper maximal von der Gleichgewichtslage entfernt (Bild 17/2).

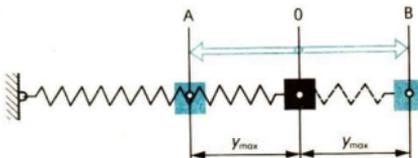


Bild 17/2

► Die Amplitude  $y_{\max}$  gibt den größten Abstand des schwingenden Körpers von der Gleichgewichtslage an.

Die Einheit der Amplitude ist ein Meter (1 m).

- ① Geben Sie an, wie sich die Geschwindigkeit und die Beschleunigung des schwingenden Körpers im Bild 17/2 im Laufe einer Periode ändern!

**Periodendauer.** Verschiedene schwingende Körper benötigen für eine Periode unterschiedlich lange Zeit. Dieser Sachverhalt wird beschrieben durch die physikalische Größe

**Periodendauer  $T$ .**

Die **Periodendauer  $T$**  gibt an, welche Zeit ein schwingender Körper für eine Periode benötigt.

Die Einheit der Periodendauer ist **eine Sekunde (1 s)**.

Man kann die Genauigkeit der Messung der Periodendauer erhöhen, wenn man die Zeit  $t$  für eine größere Anzahl  $n$  von Perioden mißt und die **Periodendauer  $T$**  mit der

Gleichung  $T = \frac{t}{n}$  berechnet.

**Frequenz.** Die Häufigkeit von Schwingungen wird angegeben durch die physikalische Größe

**Frequenz  $f$ .**

Die **Frequenz  $f$**  gibt an, wieviel Perioden ein schwingender Körper in einer Sekunde durchläuft.

Zu Ehren des deutschen Physikers Heinrich Hertz wurde als Einheit der Frequenz ein **Hertz (1 Hz)** festgelegt. Es gilt:

$$1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1} = \frac{1}{\text{s}}$$

Vielfache der Frequenzeinheit sind: 1 kHz =  $10^3$  Hz, 1 MHz =  $10^6$  Hz, 1 GHz =  $10^9$  Hz.

Die Bestimmung der Frequenz  $f$  erfolgt aus der Periodenanzahl  $n$  und der zugehörigen Zeit  $t$  mit der Gleichung  $f = \frac{n}{t}$ .

Durch Vergleich der Gleichungen für die Periodendauer  $T$  und für die Frequenz  $f$  findet man:

Die **Frequenz ist der reziproke Wert der Periodendauer.**

$$f = \frac{1}{T}$$

*Einige in Natur und Technik vorkommende Frequenzen*

①

Beispiel	Frequenz $f$
Kinderschaukel	etwa 0,5 Hz
Unruh einer Armbanduhr	" 2 Hz
Meißel im Drucklufthammer	" 5 Hz
Flügel einer Hummel	" 200 Hz
Schallschwingungen (Hörbereich)	16 Hz bis etwa 20 kHz
Ultraschall	20 kHz " " 1 GHz

## Aufzeichnung mechanischer Schwingungen

Schwingungen müssen sehr oft aufgezeichnet werden, um bestimmte Prozesse auch nachträglich noch mit Hilfe der Aufzeichnungen auswerten zu können.

- 1 An einem Federschwinger befestigen wir einen Faserstift und bewegen unter dem Stift mit konstanter Geschwindigkeit senkrecht zur Schwingungsrichtung ein Blatt Papier. Der Stift zeichnet die Schwingung auf (Bild 19/1).

Die Aufzeichnung wird als  $y$ - $t$ -Diagramm (Bild 19/2) bezeichnet, weil man ablesen kann, wie groß die Auslenkung  $y$  des schwingenden Körpers zu einer bestimmten Zeit  $t$  ist.

$$t_1 = 0,2 \text{ s}, y_1 = +3 \text{ cm};$$

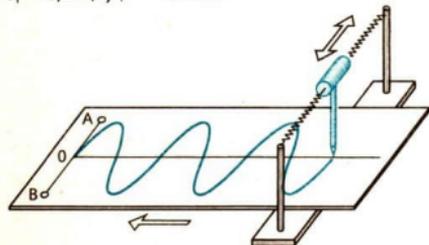


Bild 19/1 Aufzeichnung einer mechanischen Schwingung

$$t_4 = 1,8 \text{ s}, y_4 = -6 \text{ cm}. \quad \textcircled{2}$$

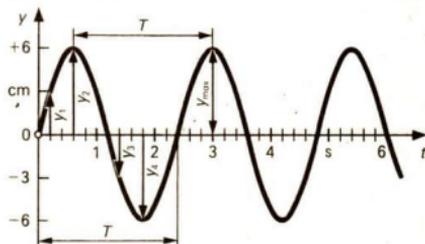


Bild 19/2  $y$ - $t$ -Diagramm einer mechanischen Schwingung

Im  $y$ - $t$ -Diagramm ist eine Sinusfunktion dargestellt, d. h., der Federschwinger führt eine **sinusförmige Schwingung** aus. Das trifft auch auf andere schwingende Körper, wie Blattfedern, Stimmgabeln und Pendel, zu.

Wie kann man die schnelle Schwingung einer Stimmgabel aufzeichnen?

- 2 Wir bewegen eine schwingende Stimmgabel mit ihrer Schreibspitze geradlinig gleichförmig über eine beruhte Glasplatte (Bild 19/3). Die Stimmgabel führt eine sinusförmige Schwingung aus. ③

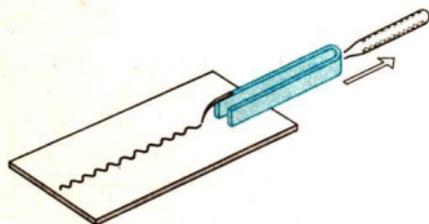
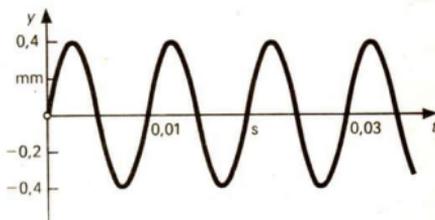


Bild 19/3  $y$ - $t$ -Diagramm einer Stimmgabelschwingung



- Die Unruh einer Armbanduhr führt in 5 Sekunden 12 Perioden mit einer Amplitude von 6 mm aus. Berechnen Sie die Frequenz und die Periodendauer der Unruh!
- Bestimmen Sie aus dem  $y$ - $t$ -Diagramm des Federschwingers (→ Bild 19/2) die Auslenkung zur Zeit  $t_2 = 0,6 \text{ s}$  und  $t_3 = 1,4 \text{ s}$ !
  - Zum Zeitpunkt  $t_1 = 0,2 \text{ s}$  bewegt sich der Körper beschleunigt zum ersten Umkehrpunkt. Wann erreicht der Körper wieder den gleichen Schwingungszustand (gleiche Auslenkung, gleiche Bewegungsrichtung, gleicher Betrag der Geschwindigkeit)?
- Ermitteln Sie mit Hilfe der  $y$ - $t$ -Diagramme
- des Federschwingers (→ Bild 19/2)
  - der Stimmgabel (→ Bild 19/3) Amplitude, Periodendauer und Frequenz der schwingenden Körper!

**Federschwinger, Pendel, Stimmgabeln, Blattfedern und viele andere schwingende Körper führen sinusförmige Schwingungen aus.**

Welchen physikalischen Inhalt besitzt diese geschwungene Kurve?

Jede einzelne Periode läuft gleichmäßig ab. Die Perioden wiederholen sich ständig. Deshalb sind schwingende Körper, wie Unruh, Pendel und Schwingquarz, für die Zeitmessung geeignet.

In Natur und Technik treten vielfach auch *nichtsinusförmige Schwingungen* auf. Ein Behälter, der wie im Bild 20/1 gelagert ist, füllt sich langsam mit Wasser, kippt bei einem bestimmten Füllstand um und entleert sich plötzlich. Er führt Kippschwingungen aus.

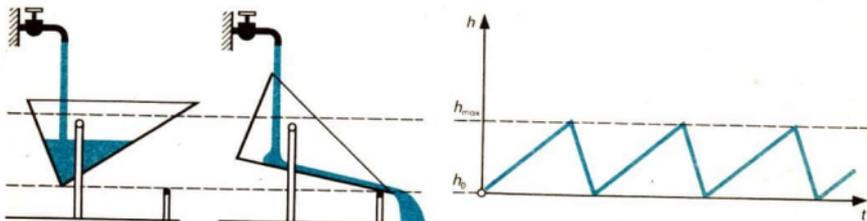


Bild 20/1 Kippschwingung

**Aufzeichnung von Schallschwingungen.** Mechanische Schwingungen, die vom menschlichen Ohr wahrgenommen werden, bezeichnet man als **Schallschwingungen**. Wie kann man das  $y$ - $t$ -Diagramm von Schallschwingungen aufzeichnen?

- 3 Ein Mikrofon wandelt mechanische Schwingungen der Luft in elektrische Schwingungen um, so daß der angeschlossene Elektronenstrahloszillograf ein  $y$ - $t$ -Diagramm aufzeichnen kann. Wir erzeugen mit einer Gitarre Töne verschiedener Höhe und Lautstärke. Dazu zupfen wir eine Saite der Gitarre unterschiedlich stark an. Danach verkürzen wir die Saitenlänge durch Fingergriff und wiederholen die Tonerzeugung (Bild 20/2).

tiefer Ton (c)		$f = 131 \text{ Hz}$ $T \approx 0,008 \text{ s}$	
hoher Ton (c')		$f = 523 \text{ Hz}$ $T \approx 0,002 \text{ s}$	
Lautstärke	leise		laut

Bild 20/2

Wir erkennen:

**Je größer die Frequenz der Schallschwingungen, desto höher ist der Ton. Je größer die Amplitude der Schallschwingungen, desto lauter ist der Ton.**

①

## Größen zur Beschreibung von mechanischen Schwingungen

Physikalische Größe	Formelzeichen	Einheit	Physikalische Bedeutung	Beziehungen
<b>Auslenkung</b>	$y$	1 m	Abstand von der Gleichgewichtslage	
<b>Amplitude</b>	$y_{\max}$	1 m	maximale Auslenkung	$(y_{\max} \geq 0)$
<b>Periodendauer</b>	$T$	1 s	Zeit für eine Periode	$T = \frac{t}{n}; T = \frac{1}{f}$
<b>Frequenz</b>	$f$	1 Hz	Anzahl der Perioden in einer Sekunde	$f = \frac{n}{t}; f = \frac{1}{T}$

### Erklärung des Entstehens von mechanischen Schwingungen

Wenn wir den Federschwinger (Bild 21/1) aus seiner Gleichgewichtslage z. B. nach links auslenken, dann tritt eine zur Gleichgewichtslage rücktreibende Kraft auf. Je größer die Auslenkung  $y$  ist, um so größer ist auch der Betrag der zur Gleichgewichtslage rücktreibenden Kraft  $F$ .

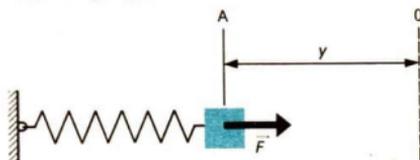


Bild 21/1

Nur wenn eine zur Gleichgewichtslage rücktreibende Kraft auftritt, ist ein Körper in der Lage zu schwingen. Diese Kraft kann z. B. eine Federkraft (Federschwinger, Blattfeder) oder eine Komponente der Gewichtskraft (Pendel) sein. Mit der wirkenden Kraft können wir den Ablauf einer Periode eines Federschwingers erklären (Bild 21/2).

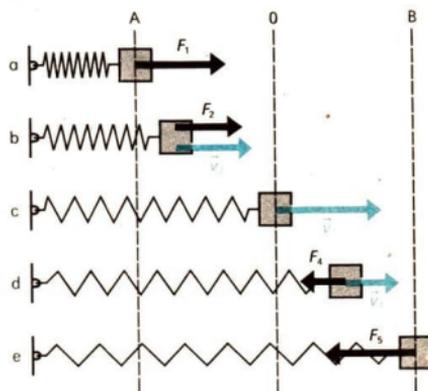


Bild 21/2

- ① Eine Fledermaus stößt zur Orientierung einen Ton mit einer Frequenz von 40 kHz aus.
- Berechnen Sie die Periodendauer dieses Tones!
  - Kann ein Mensch diesen Ton hören?

Bei der Bewegung von einem Umkehrpunkt A zur Gleichgewichtslage 0 wird der Körper durch die rücktreibende Kraft  $F$  beschleunigt. Beim Durchgang durch die Gleichgewichtslage 0 ist diese Kraft Null. Der Körper bewegt sich infolge seiner Trägheit weiter, wird aber bei seiner Bewegung zum anderen Umkehrpunkt B durch die rücktreibende Kraft abgebremst, da diese nun entgegengesetzt zur Bewegung gerichtet ist. Im Umkehrpunkt B hat die zur Gleichgewichtslage 0 rücktreibende Kraft ihren größten Betrag. Hier kehrt der Körper seine Bewegungsrichtung um und schwingt infolge der rücktreibenden Kraft wieder zurück.

**Mechanische Schwingungen werden durch eine zur Gleichgewichtslage rücktreibende Kraft und die Trägheit des schwingenden Körpers verursacht.**

①

### Periodendauer eines Federschwingers

**Abhängigkeit der Periodendauer von der Masse.** Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Masse und der Periodendauer eines schwingenden Körpers?

#### Aufgabe

Untersuchen Sie die Abhängigkeit der Periodendauer eines vertikalen Federschwingers von der Masse!

#### Durchführung

- Messen Sie die Periodendauer  $T$  für die schwingenden Körper mit den Massen  $m_1 = 50 \text{ g}$ ,  $m_2 = 100 \text{ g}$  und  $m_3 = 150 \text{ g}$ !
- Stellen Sie die Abhängigkeit der Periodendauer  $T$  von der Masse  $m$  in einem Diagramm grafisch dar!

#### Auswertung

Formulieren Sie das Untersuchungsergebnis!

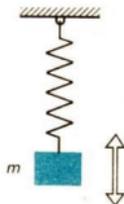


Bild 22/1

Wir stellen fest: Je größer die Masse des schwingenden Körpers ist, um so größer ist die Periodendauer.

Es gilt  $T \sim \sqrt{m}$ ; denn mit der Masse eines Körpers wächst seine Trägheit, und er bewegt sich deshalb langsamer.

**Federkonstante.** Neben der Masse bestimmt die einwirkende Kraft die Bewegung eines Körpers. Wir wollen untersuchen, welche Kraft  $F$  erforderlich ist, um verschiedenartige Schraubenfedern um die gleiche Strecke zu dehnen!

Wir messen die Kraft, die erforderlich ist, um unterschiedliche Federn um 1 cm auseinanderzuziehen.

Das Experiment ergibt, daß sich einige Federn relativ schwer, andere hingegen leicht auseinanderziehen lassen. Man sagt, es sind *harte* bzw. *weiche* Federn. Zur Kennzeichnung der Federhärte führen wir die **Federkonstante  $k$**  ein (Bild 22/2).

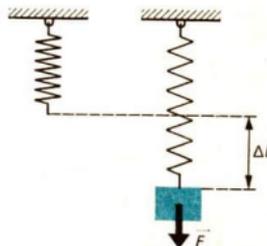


Bild 22/2 Durch die Gewichtskraft  $F$  wird die Feder um die Auslenkung  $\Delta l$  gedehnt.

Die Federkonstante  $k$  gibt die Härte einer Feder an.

$$k = \frac{F}{\Delta l}$$

Die Einheit der Federkonstanten ist ein **Newton je Meter** ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ ).

- **Aufgabe:** Eine Schraubenfeder wird durch eine Kraft von  $F = 0,6 \text{ N}$  um die Strecke  $\Delta l = 2 \text{ cm}$  gedehnt. Wie groß ist ihre Federkonstante?

Analyse:

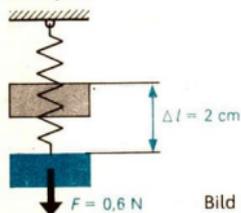


Bild 23/1

Gesucht:  $k$  in  $\frac{\text{N}}{\text{m}}$

Gegeben:  $F = 0,6 \text{ N}$   
 $\Delta l = 2 \text{ cm}$

Lösung:  $k = \frac{F}{\Delta l}$   
 $k = \frac{0,6 \text{ N}}{2 \text{ cm}}$   
 $k = 30 \frac{\text{N}}{\text{m}}$

**Ergebnis:** Die Federkonstante beträgt  $30 \frac{\text{N}}{\text{m}}$ .

**Abhängigkeit der Periodendauer von der Federkonstanten.** Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Periodendauer und der Federkonstanten eines Federschwingers?

- 6  
▼ Wir messen die Periodendauer eines schwingenden Körpers nacheinander an Federn mit unterschiedlicher Federkonstante.

Wir stellen fest: Je größer die Federkonstante, je kräftiger also der Körper bei gleicher Ausdehnung der Feder in die Gleichgewichtslage zurückgezogen wird, um so kleiner ist die Periodendauer.

**Gleichung für die Periodendauer eines Federschwingers.** Experimentelle und theoretische Untersuchungen ergeben für die

**Periodendauer eines Federschwingers**

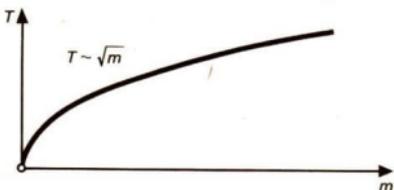
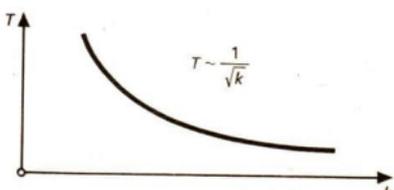
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

$m$ : Masse des schwingenden Körpers  
 $k$ : Federkonstante

- ① Wie muß von einem Kran ein Betonteil angehoben werden, damit es keine Schwingungen ausführt? Überprüfen Sie Ihre Aussage experimentell (Pendel, Spielzeugkran)!

Gültigkeitsbedingung: Die Masse der Feder muß gegenüber der Masse des schwingenden Körpers vernachlässigbar klein sein. Die Bewegung muß reibungsfrei und mit kleinen Amplituden erfolgen. ① ②

**Schlußfolgerungen aus der Gleichung für die Periodendauer eines Federschwingers:**  
Wir untersuchen die folgenden zwei Fälle:

Für $k = \text{konstant}$ gilt: $T \sim \sqrt{m}$	Für $m = \text{konstant}$ gilt: $T \sim \frac{1}{\sqrt{k}}$
 <p>■ Große Periodendauern treten auf, wenn die Massen der schwingenden Körper groß sind.</p>	 <p>■ Die Periodendauer eines schwingenden Körpers ist klein, wenn die Federkonstante groß ist.</p>

Zur Bestätigung dieses Zusammenhangs führen wir ein Schülerexperiment durch.

**Aufgabe:** Bestimmen Sie die Federkonstanten von zwei Federn, und bestätigen Sie die berechneten Periodendauern!

**Durchführung:**

- Ermitteln Sie die Federkonstanten von zwei Federn!
- Berechnen Sie mit dem Schultaschenrechner für jede Feder die Periodendauern  $T_1$ ;  $T_2$ ;  $T_3$  für schwingende Körper der Massen  $m_1 = 50 \text{ g}$ ;  $m_2 = 100 \text{ g}$ ;  $m_3 = 150 \text{ g}$ !
- Ermitteln Sie experimentell für beide Federn die Periodendauern  $T_1$ ;  $T_2$ ;  $T_3$ ! (Wählen Sie für die Messung nur kleine Amplituden!)

**Auswertung**

- Vergleichen Sie die experimentell und rechnerisch ermittelten Werte miteinander!
- Formulieren Sie das Untersuchungsergebnis!

### Periodendauer eines Fadenpendels

Wir messen die Periodendauer eines Fadenpendels und verändern zunächst die Pendellänge  $l$  (bei  $m = \text{konstant}$ ) und danach die Masse des Pendelkörpers  $m$  (bei  $l = \text{konstant}$ , Bild 24/1).

Die Periodendauer eines Fadenpendels hängt nur von der Pendellänge ab. Sie ist um so größer, je größer die Pendellänge ist.

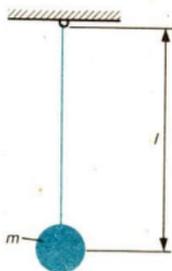


Bild 24/1

Genauere Untersuchungen ergeben für die

### Periodendauer eines Fadenpendels

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

$l$ : Pendellänge (Abstand vom Aufhängepunkt bis zum Massenmittelpunkt)  
 $g$ : Fallbeschleunigung

Gültigkeitsbedingung: Die Schwingung muß reibungsfrei und mit kleinen Amplituden erfolgen. ③ ④

### Gedämpfte und ungedämpfte Schwingungen

Bei einem Kraftfahrzeug sind langanhaltende Schwingungen des Fahrzeugs unerwünscht. Schwingungsdämpfer („Stoßdämpfer“) sorgen für eine schnelle Verringerung der Schwingungsamplituden zwischen den Rädern und dem übrigen Fahrzeug.

**Eine Schwingung, deren Amplitude sich ständig verringert, heißt gedämpfte Schwingung. Eine Schwingung, deren Amplitude konstant bleibt, heißt ungedämpfte Schwingung.**

**$y$ - $t$ -Diagramm einer gedämpften Schwingung.** Den Verlauf einer gedämpften Schwingung wollen wir in einem Experiment untersuchen.

<sup>9</sup>  
An dem Schwingungsschreiber (→ Bild 19/1) wird ein Stück Pappe angebracht und damit die Luftreibung vergrößert (Bild 26/1).

Das Diagramm läßt erkennen: Der Körper bewegt sich periodisch um seine Gleichgewichtslage, die Amplituden nehmen ständig ab. Das gilt auch für den in Bild 16/1 gezeigten Fallschirmspringer.

- Die Amplitude eines Federschwingers wird vergrößert. Wie ändern sich a) der in einer Periode zurückgelegte Weg und b) die Periodendauer? Begründen Sie Ihre Antworten!
- Eine Drehmaschine, die eine Masse von  $m = 3000 \text{ kg}$  hat, biegt das auf zwei Trägern ruhende Fundament um  $\Delta l = 1 \text{ mm}$  durch (Bild 25/1). Berechnen Sie die Periodendauer und die Frequenz für die Eigenschwingung der Drehmaschine!  
Lösungshinweis: Verwenden Sie die Gleichung für die Periodendauer eines Federschwingers! Denken Sie sich die Drehmaschine statt auf dem Fundament auf einer Schraubenfeder, die um  $\Delta l = 1 \text{ mm}$  zusammengedrückt wird, stehend!  
Berechnen Sie für diesen Fall die Federkonstante  $k$ ! Die Masse des Fundaments wird nicht berücksichtigt!

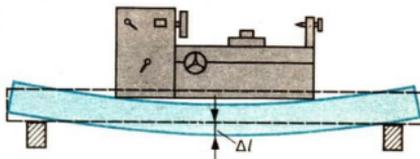


Bild 25/1

- Interpretieren Sie die Gleichung für die Periodendauer a) eines Federschwingers b) eines Fadenpendels!
- Berechnen Sie die Periodendauer und die Frequenz von Fadenpendeln folgender Längen:  $l_1 = 50 \text{ cm}$ ,  $l_2 = 100 \text{ cm}$ ,  $l_3 = 150 \text{ cm}$ !  
Überprüfen Sie die Ergebnisse mit einem Experiment!

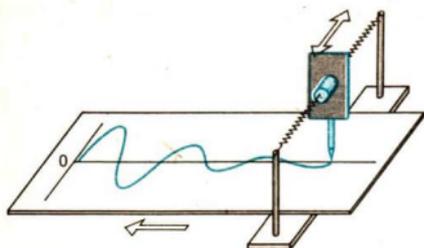


Bild 26/1

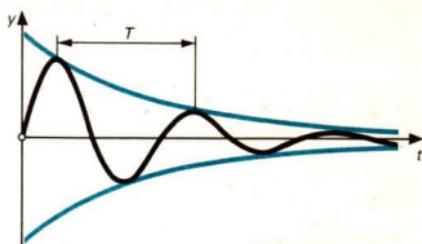


Bild 26/2 Aufzeichnung des  $y$ - $t$ -Diagramms einer gedämpften Schwingung

**Energieumwandlungen bei ungedämpften mechanischen Schwingungen.** Wir denken uns einen Federschwinger, der sich völlig reibungsfrei bewegt. Der Körper wird aus seiner Gleichgewichtslage gebracht (Bild 26/3a) und losgelassen (Bilder 26/3b und c). Er führt ungedämpfte Schwingungen aus. Wir betrachten die Energie des Federschwingers in den Punkten A, O und B:

Lage des Körpers	A	O	B
$E_{\text{kin}}$	0	max.	0
$E_{\text{pot}}$ der Feder	max.	0	max.

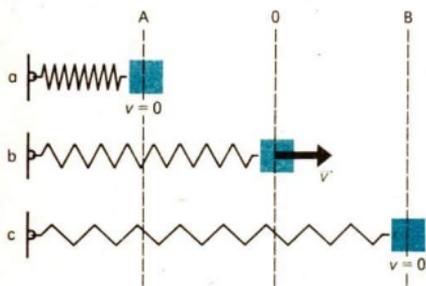


Bild 26/3 a) Zum Spannen der Feder ist Arbeit zu verrichten. In der Lage A ist diese Arbeit als potentielle Energie  $E_{\text{pot}}$  in der Feder gespeichert.

Bild 26/3 b) Beim Passieren der Gleichgewichtslage O ist die potentielle Energie der Feder Null, die kinetische Energie des schwingenden Körpers erreicht ihren Höchstwert.

Bild 26/3 c) Im Umkehrpunkt B erreicht die potentielle Energie ihren Höchstwert, die kinetische Energie ist Null.

Während der Schwingung eines Federschwingers wandeln sich ständig potentielle und kinetische Energie ineinander um. Diese Aussage gilt nicht nur für Federschwinger. Deshalb können wir allgemein sagen:

► **Bei mechanischen Schwingungen wird abwechselnd potentielle in kinetische und kinetische in potentielle Energie umgewandelt.**

Nach dem Gesetz von der Erhaltung der Energie muß die Gesamtenergie, bestehend aus potentieller und kinetischer Energie, stets konstant sein. Es gilt daher:

► **Bei einer ungedämpften mechanischen Schwingung bleibt die Summe aus potentieller und kinetischer Energie konstant.**

$$E_{\text{pot}} + E_{\text{kin}} = \text{konst.}$$

**Energieumwandlungen bei gedämpften mechanischen Schwingungen.** Bei allen mechanischen Bewegungen tritt Reibung auf. Ein Teil der mechanischen Energie wird dadurch ständig in thermische Energie umgewandelt. Ein einmalig angestoßener horizontaler Federschwinger ( $\rightarrow$  Bild 26/1) schwingt mit immer kleinerer Amplitude, bis er zur Ruhe kommt. Die gesamte mechanische Energie ist dann in thermische Energie umgewandelt worden.

Ursachen der Dämpfung sind die bei der Bewegung eines schwingenden Körpers auftretenden *Reibungskräfte* in der Lagerung, in der Luft oder in Flüssigkeiten. In der Technik nutzt man diesen Vorgang in *Schwingungsdämpfern*. Wie in den Bildern 27/1 und 27/2 ersichtlich, strömt bei der Bewegung eines Kolbens in einem Zylinder Luft bzw. Flüssigkeit durch enge Kanäle des Kolbens. Die dabei auftretenden Reibungskräfte dämpfen die Schwingung.

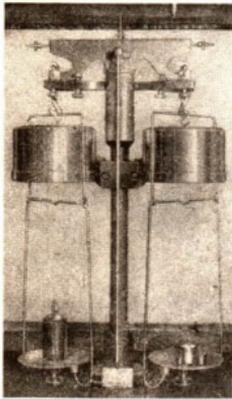


Bild 27/1 Schwingungsdämpfer bei Analysenwaagen

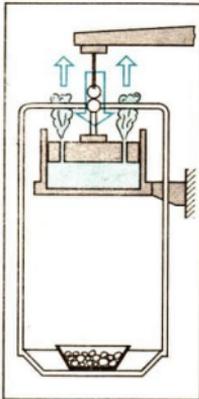
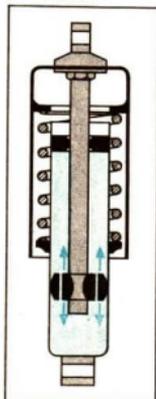


Bild 27/2 Schwingungsdämpfer bei Kraftfahrzeugen



Es gilt daher:

**Bei einer gedämpften mechanischen Schwingung nimmt die Summe aus potentieller und kinetischer Energie ständig ab. Die mechanische Energie wird in thermische Energie umgewandelt.**

$$E_{\text{pot}} + E_{\text{kin}} \longrightarrow E_{\text{th}}$$

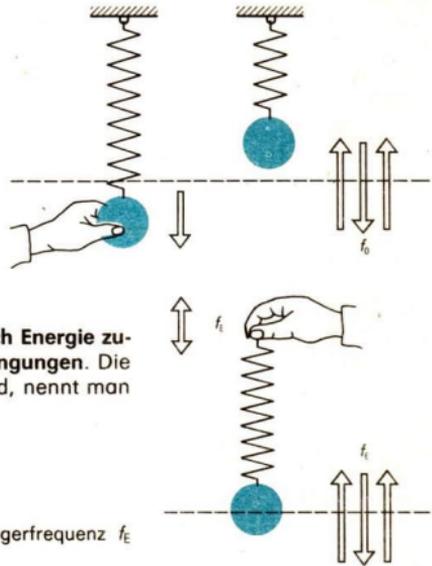
① ② ③

- ① Beschreiben Sie die Energieumwandlungen, die beim Schwingen
  - a) eines horizontalen Federschwingers,
  - b) eines Fadenpendels auftreten!
- ② Warum führen alle schwingenden Körper, denen nur einmal Energie zugeführt wurde, gedämpfte Schwingungen aus?
- ③ Erläutern Sie Beispiele für gedämpfte mechanische Schwingungen in Natur, Technik und Produktion!

## Erzwungene Schwingungen

**Eigenschwingungen und erzwungene Schwingungen.** Bisher haben wir nur Schwingungen betrachtet, die durch **einmalige Energiezufuhr** entstehen. Diese Schwingungen heißen **Eigenschwingungen**. Sie erfolgen stets mit der **Eigenfrequenz  $f_0$** , die nur von den Eigenschaften des schwingenden Körpers abhängt (Bild 28/1).

Bild 28/1 Eigenschwingung mit der Eigenfrequenz  $f_0$  durch einmalige Energiezufuhr an einen schwingungsfähigen Körper



Wird einem schwingenden Körper **periodisch Energie zugeführt**, dann entstehen **erzwungene Schwingungen**. Die Frequenz, mit der die Energie zugeführt wird, nennt man **Erregerfrequenz  $f_E$**  (Bild 28/2).

Bild 28/2 Erzwungene Schwingung mit der Erregerfrequenz  $f_E$  durch periodische Energiezufuhr

**Resonanz.** Bei erzwungenen Schwingungen wird bei bestimmten Werten der Erregerfrequenz die Amplitude des schwingenden Körpers besonders groß. Zur Untersuchung dieses Sachverhalts führen wir ein Experiment durch.

10 Ein Federschwinger ist über einen Faden mit dem Exzenter eines Motors verbunden (gekoppelt). Der Motor (Erreger) kann infolge der *Kopplung* dem Körper periodisch Energie zuführen (Bild 28/3).

Wir stellen verschiedene Erregerfrequenzen  $f_E$  ein und messen jeweils nach einer gewissen Zeit, nach der sich die Amplitude nicht mehr ändert, die Amplitude  $y_{\max}$  (Bild 28/4).

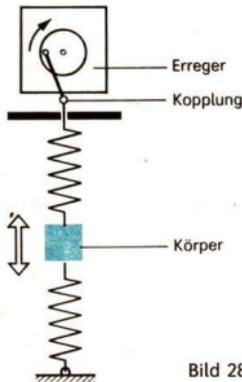


Bild 28/3

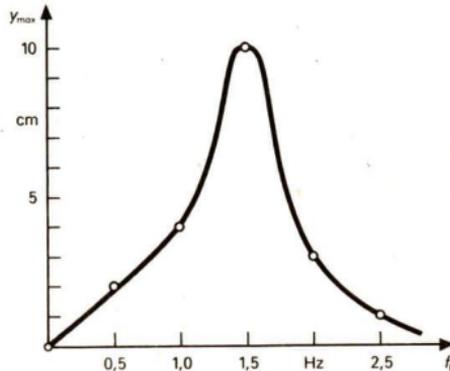


Bild 28/4

Die Amplitude der erzwungenen Schwingung hängt von der Erregerfrequenz ab. Je näher die Erregerfrequenz der Eigenfrequenz des schwingenden Körpers kommt, desto

größer ist die Amplitude. Stimmen Erreger- und Eigenfrequenz überein, dann ist die Amplitude am größten. Erreger und schwingender Körper befinden sich in

**Resonanz.**

**Resonanz ist das besonders heftige Mitschwingen eines schwingenden Körpers bei Übereinstimmung von Eigen- und Erregerfrequenz.**

**Resonanzbedingung:  $f_0 = f_E$ .**

**Kennzeichen: Die Amplitude erreicht ihren Höchstwert.**

Wird einem schwingenden Körper im Resonanzfall periodisch Energie zugeführt, dann nimmt die Amplitude solange zu, bis die Energiezufuhr je Periode genauso groß ist wie die durch Reibung je Periode abgegebene Energie. Es entstehen ungedämpfte mechanische Schwingungen (Bild 29/1).

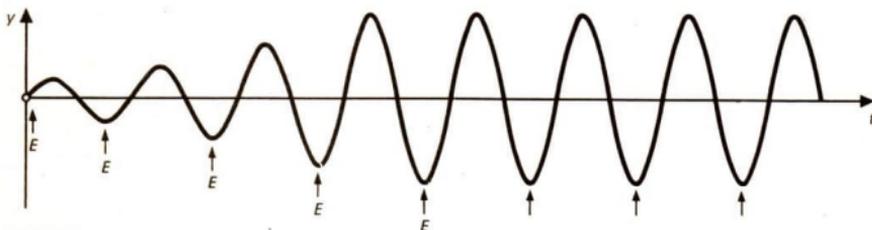


Bild 29/1

### Erwünschte und unerwünschte Resonanz in Natur und Technik

In vielen Fällen nutzt man die Resonanz aus. Man führt einem schwingungsfähigen Körper periodisch kleine Energiebeträge zu, um eine große Wirkung zu erzielen:

- Anschieben eines Fahrzeugs aus einer Mulde,
- Aufschaukeln bei einer Schaukel,
- Läuten einer schweren Glocke mit einem Seil durch Menschenkraft.

**Zungenfrequenzmesser.** Befestigt man den Zungenfrequenzmesser (Bild 29/2) an einer schwingenden Maschine, dann schwingt diejenige Blattfeder, deren Eigenfrequenz mit der Erregerfrequenz der Maschine übereinstimmt, mit der größten Amplitude.

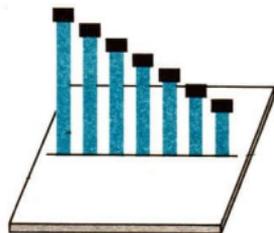


Bild 29/2 Zungenfrequenzmesser

- 1 Wie verändert sich die Eigenfrequenz einer Maschine, wenn diese in einem Betonfundament verankert wird?
- 2 Welche Funktion erfüllt bei erzwungenen Schwingungen die Kopplung?

Oft ist Resonanz unerwünscht und man ist bestrebt, sie zu verhindern, so bei Bauwerken (Brücken, Türmen, Häusern), Maschinen, Fundamenten, Fahrzeug- oder Flugzeugteilen.

- Über Brücken dürfen Marschkolonnen zur Vermeidung einer Beschädigung oder gar eines Einsturzes der Brücke durch Resonanz nicht im Gleichschritt marschieren.
- In Werkzeugmaschinen befinden sich Zahnradgetriebe. Diese und die sich drehenden, nicht völlig auswuchtbaren Teile an der spanabhebenden Bearbeitungsstelle sowie schlecht ausgewuchtete, schnellrotierende Wellen und Räder erzeugen Schwingungen bestimmter Frequenzen.

Von einer kritischen Frequenz spricht man, wenn diese Frequenz mit der Eigenfrequenz von Teilen der Maschine übereinstimmt. In diesem Fall können durch Resonanz Schäden entstehen. Um das zu verhindern, muß man die Maschine möglichst weit außerhalb dieser Frequenz betreiben. ① ②

### Verallgemeinerung des Schwingungsbegriffs

Wir haben ganz verschiedenartige mechanische Schwingungen untersucht. Allen ist gemeinsam, daß sich bei mechanischen Schwingungen mehrere physikalische Größen zeitlich periodisch ändern:  $y$ ,  $v$ ,  $a$ ,  $F$ ,  $E_{kin}$ ,  $E_{pot}$ .

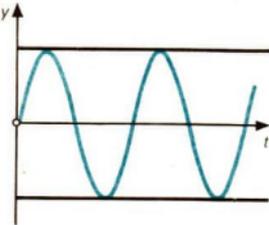
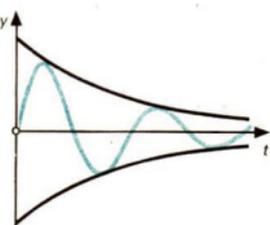
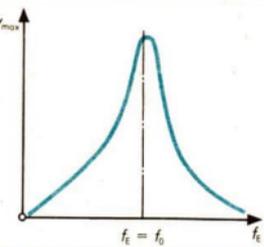
Es zeigt sich, daß es in Natur und Technik weitere Vorgänge, z. B. elektromagnetische, gibt, bei denen sich eine oder mehrere physikalische Größen zeitlich periodisch ändern.

In der Physik wurde deshalb festgelegt:

► **Eine Schwingung ist ein Vorgang, bei dem sich physikalische Größen zeitlich periodisch ändern.**

### Zusammenfassung

<b>Definition</b>	Eine mechanische Schwingung ist eine periodische Bewegung eines Körpers um seine Gleichgewichtslage. Bei einer mechanischen Schwingung ändern sich physikalische Größen (Auslenkung, Geschwindigkeit, Beschleunigung, rücktreibende Kraft, potentielle bzw. kinetische Energie) zeitlich periodisch.
<b>Größen</b> zur Beschreibung von Schwingungen	Auslenkung $y$ Amplitude $y_{max}$ Periodendauer $T$ Frequenz $f$ $f = \frac{1}{T}; \quad T = \frac{t}{n}$

<p><b>Voraussetzungen</b> für das Entstehen von Eigen- schwingungen</p>	<p>Eigenschwingungen werden (nach vorheriger Auslenkung bzw. Zufuhr von Energie) durch die zur Gleichgewichtslage gerichtete Kraft und die Trägheit des Körpers hervorgerufen.</p>	
<p>Gleichung für die <b>Periodendauer</b></p>	<p>Federschwinger: <math>T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}</math> Fadenpendel: <math>T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}</math></p>	
<p>Einmalige Energiezufuhr ↓ <b>Eigenschwingung</b></p> <p>mit <b>Eigenfrequenz <math>f_0</math></b> (hängt von den Eigenschaften des schwingen- den Körpers ab)</p>	<p><math>F_R = 0</math> (Idealisierung)  <math>E_{\text{pot}} + E_{\text{kin}} = \text{konst.}</math></p>	<p><math>F_R \neq 0</math>  <math>E_{\text{pot}} + E_{\text{kin}} \rightarrow E_{\text{th}}</math></p>
	 <p><b>ungedämpfte Schwingung</b></p>	 <p><b>gedämpfte Schwingung</b></p>
<p>Periodische Energiezufuhr ↓ <b>Erzwungene Schwingung</b></p> <p>mit <b>Erregerfrequenz <math>f_E</math></b> (hängt nur vom Erreger ab)</p>	<p><math>F_R \neq 0</math></p> 	<p><b>Resonanz</b>, wenn Eigenfrequenz = Erregerfrequenz. Amplitude erreicht ihren Höchstwert.</p>

1. Begründen Sie die Maßnahmen, welche getroffen werden müssen, um Resonanz bei Maschinen zu verhindern! Benutzen Sie dazu das  $y_{\text{max}}-f_E$ -Diagramm in der Zusammenfassung!
2. Was würde geschehen, wenn der „Resonanzboden“ einer Geige beim Spielen wirklich in Resonanz geriete? Welche Aufgabe hat er und wie müsste er daher genannt werden?

## Mechanische Wellen

In Wellenbädern werden Wasserwellen künstlich erzeugt. Dabei laufen diese Becken hindurch, während sich der Wasserspiegel an jedem beliebigen Ort nur hebt und senkt. Was also ist eine Welle?



### Mechanische Wellen als Ausbreitung von Schwingungen

Bei Vulkanausbrüchen im Meer wird das Meerwasser stoßartig so in Bewegung versetzt, daß eine hohe Welle entsteht, die im Küstenbereich große Verwüstungen anrichten kann.

Beim Schlag mit dem Hammer auf einen Amboß tritt in der Luft eine Druckwelle auf. Gelangt diese an das Ohr, so wird sie über das Trommelfell wahrgenommen.

Der Ursprung der Wellen im Wasser und auch in der Luft ist eine mechanische **Erregung**.

Diese Erregung breitet sich als Welle im jeweiligen Stoff (Wasser, Luft) aus.

- 11** Ein Stab wird einmal in eine Wasseroberfläche eingetaucht und wieder herausgenommen. Anschließend wird der Stab periodisch in die Wasseroberfläche eingetaucht und wieder herausgenommen.

Im ersten Fall breitet sich von der Eintauchstelle eine Welle mit nur einem Wellenberg aus (Bild 32/2). Im zweiten Fall geht eine Welle mit vielen Wellenbergen von der Erregungsstelle aus, solange der Stab bewegt wird (Bild 32/3).

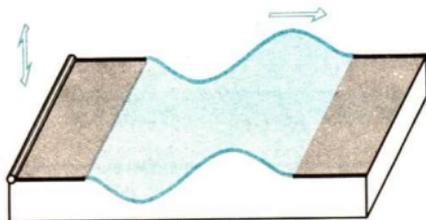


Bild 32/2 Erzeugung einer Wasserwelle durch einmalige Erregung

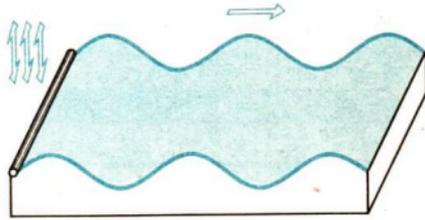


Bild 32/3 Erzeugung einer Wasserwelle durch periodische Erregung

Die Wasserteilchen an der Eintauchstelle führen Schwingungen (auf und ab) aus. Diese Schwingungen werden auf die benachbarten Teilchen übertragen, denn sie sind durch Kohäsionskräfte miteinander verbunden (gekoppelt). Dem Experiment entnehmen wir:

**Voraussetzung für eine mechanische Welle sind schwingungsfähige Teilchen und Kopplungskräfte zwischen ihnen.**

An einem Modell von miteinander **gekoppelten Pendeln** kann man die Ausbreitung der Erregung beobachten und erklären.

12

Wir spannen zunächst nur zwischen zwei gleiche Fadenpendel ( $f_1 = f_2$ ) einen dünnen Gummifaden und führen einem der beiden Pendel durch Anstoßen Energie zu, so daß es Schwingungen ausführt (Bild 33/1).

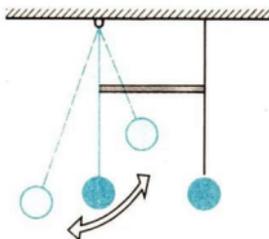


Bild 33/1 Gekoppelte Pendel

Infolge der Kopplung versetzt das erste Pendel das zweite allmählich in Schwingungen. Seine Amplitude wächst in dem Maße, wie sich die Amplitude des ersten Pendels verringert. Wenn die Amplitude des ersten Pendels Null beträgt, dann hat das zweite Pendel die gleiche Amplitude erreicht, die das erste Pendel am Anfang hatte. Die Energie des ersten Pendels wurde vollständig auf das zweite übertragen.

Nun können wir damit die Ausbreitung einer Welle in einer Kette aus mehr als zwei gekoppelten Pendeln (Bild 33/2) erklären.

Wird das erste Pendel angestoßen, so führt es Schwingungen aus, und durch die Kopplungskräfte breitet sich die Schwingung von einem Pendel zum jeweils nächsten aus. Bild 33/2 ist zu entnehmen, daß die Pendel nacheinander mit der Schwingung beginnen und deshalb auch nacheinander ihre Amplitude erreichen.

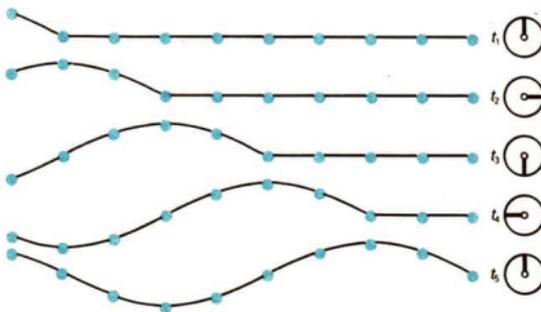


Bild 33/2 Entstehung einer Welle infolge der Kopplungskräfte zwischen den Pendeln

- ① Beschreiben Sie die Vorgänge der Schwingungs- und Energieübertragung a) bei zwei gekoppelten Pendeln, b) bei einer Pendelkette!
- ② a) Kann sich eine Schallwelle im Vakuum ausbreiten?  
b) Wie könnte man Ihre Aussage experimentell überprüfen!

**Energieübertragung durch Wellen.** Fließendes Wasser besitzt kinetische Energie. Der Stoff (Wasser) transportiert die Energie.

Trifft das auch für Wellen im Wasser zu?

13

▼ Auf eine Wasseroberfläche wird ein kleines Boot gebracht und das Experiment nach Bild 32/3 wiederholt.

Das Boot bewegt sich nicht in Ausbreitungsrichtung der Welle vorwärts. Eine Welle transportiert keinen Stoff. Das Boot gerät jedoch in Auf- und Abbewegung, wenn es von der Welle erfaßt wird. Am Boot wird Hubarbeit verrichtet (Bild 34/1). Wie man daraus erkennt, überträgt eine Welle Energie.

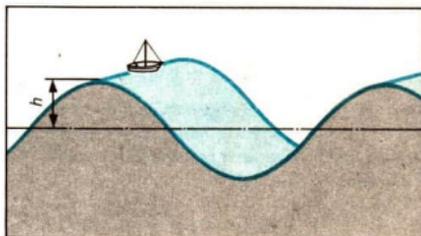


Bild 34/1 Eine Welle transportiert Energie; sie hebt ein Boot und verrichtet dabei Hubarbeit.

► **Eine mechanische Welle ist die Ausbreitung einer mechanischen Schwingung im Raum, bei der Energie übertragen, jedoch kein Stoff transportiert wird.**

- Die Energieübertragung durch Wellen ist in der Praxis von großer Bedeutung: Anregung des Trommelfells zu erzwungenen Schwingungen beim Hören; Zerstörung von Uferbefestigungen durch Meereswellen; Ausnutzung der Energie der Meereswellen zur Elektrizitätserzeugung in Wellenkraftwerken, Verdichten von Beton im Bauwesen.

### Beschreibung mechanischer Wellen

Bei Wind ist die Oberfläche des Meeres nicht glatt, sondern wellig. Die Erhebungen nennt man Wellenberge, die Vertiefungen Wellentäler. Fotografiert man die Welle zu einem bestimmten Zeitpunkt, so erhält man ein **Augenblicksbild** (Bild 34/2).



Bild 34/2 Augenblicksbild einer Welle

**Wellenberge und Wellentäler sind räumlich periodisch angeordnet.** Das  $y$ - $s$ -Diagramm (Auslenkung-Weg-Diagramm) läßt die periodische Anordnung deutlich erkennen.  $y$  ist dabei die Auslenkung der Welle an der jeweiligen Stelle,  $s$  ist der Weg, längs dessen die Welle auftritt (Bild 35/1).

Den Abstand  $\lambda$  zwischen zwei benachbarten Wellenbergen nennt man **Wellenlänge  $\lambda$**  (lies: lambda). Sie ist eine wichtige physikalische Größe zur Beschreibung einer Welle.

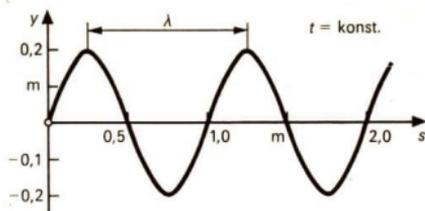


Bild 35/1 y-s-Diagramm einer Welle zu einem bestimmten Zeitpunkt t

Die Wellenlänge  $\lambda$  ist der Abstand zweier benachbarter Wellenberge.

②

Die Wellenlänge hat die Einheit **ein Meter (1 m)**.

*Einige in Natur und Technik vorkommende Wellenlängen*

Wellenart	Wellenlänge
Schallwellen in Luft ( $f = 1 \text{ kHz}$ )	0,3 m
" " Stahl ( $f = 1 \text{ kHz}$ )	5 m
" " Wasser ( $f = 1 \text{ kHz}$ )	1,5 m
Oberflächenwellen bei tiefem Wasser	größer als 10 m
" " flachem Wasser	einige cm
" " elastischen Festkörpern (Sensoren; $f = 10 \text{ MHz} \dots 10^3 \text{ MHz}$ )	1 $\mu\text{m} \dots 100 \mu\text{m}$

Fotografiert man die Welle am gleichen Ort in kurzen Zeitabständen, so entstehen Bilder, die der Darstellung in Bild 36/1 entsprechen. Die Wellenberge und -täler bleiben nicht am gleichen Ort, sie bewegen sich. Die Richtung der Bewegung nennt man **Ausbreitungsrichtung** der Welle.

Eine weitere wichtige Größe zur Beschreibung einer Welle ist ihre

**Ausbreitungsgeschwindigkeit  $v$ .**

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $v$  einer Welle ist die Geschwindigkeit, mit der sich ein Wellenberg in Ausbreitungsrichtung bewegt.

Die Einheit der Ausbreitungsgeschwindigkeit ist **ein Meter je Sekunde ( $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )**.

- Erzeugen Sie auf einer ruhigen Wasseroberfläche (Teich, Badewanne ...) eine Welle! Beobachten und beschreiben Sie die Ausbreitung dieser Welle!
- Von einer Schallwelle sind das y-s-Diagramm (Bild 35/2) und ihre Frequenz  $f = 200 \text{ Hz}$  bekannt. Bestimmen Sie die Amplitude, die Wellenlänge und die Periodendauer!

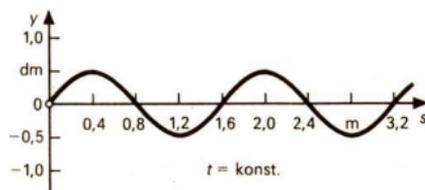


Bild 35/2

Vergleicht man die Auslenkungen an einer beliebigen Stelle zu verschiedenen Zeiten miteinander (Bild 36/1, gestrichelte Linie), so erkennt man, daß jedes Teilchen eine Schwingung um seine Gleichgewichtslage ausführt, wenn es von der Welle erreicht wird.

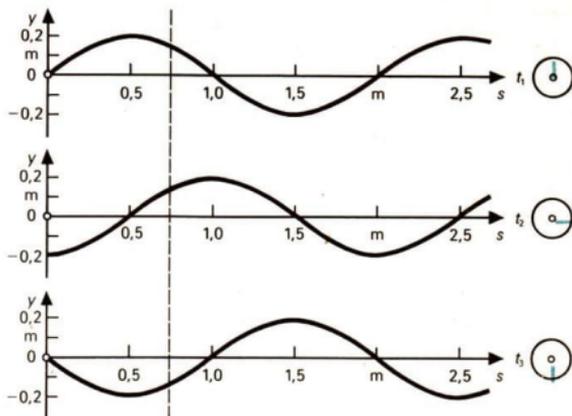


Bild 36/1  $y$ - $s$ -Diagramm einer Welle nach jeweils gleichen Zeitabständen

**Schallgeschwindigkeit.** Wir lösen experimentell die Aufgabe: Wie groß ist die Geschwindigkeit einer Schallwelle?

- 14 Durch Zusammenschlagen von zwei Brettchen wird ein optisches und akustisches Signal gegeben (Bild 36/2). Die Zeiten  $t_1$  bzw.  $t_2$ , die der Schall für die Strecken  $s_1$  bzw.  $s_2$  benötigt, werden gemessen.

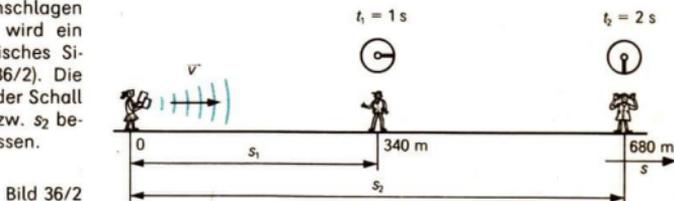


Bild 36/2

Die Berechnung der Schallgeschwindigkeit  $v$  in Luft mit der Gleichung

$$v = \frac{s}{t} \text{ ergibt in beiden Fällen } v_1 = \frac{s_1}{t_1}; v_2 = \frac{s_2}{t_2}; v_{1,2} = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Würden wir mit einer geeigneten Meßanordnung ein entsprechendes Experiment unter Wasser durchführen, erhielten wir eine wesentlich höhere Schallgeschwindigkeit.

Die Geschwindigkeit einer mechanischen Welle hängt vom Stoff ab, in dem sich die Welle ausbreitet. Eine Ursache dafür ist die unterschiedlich starke Kopplung der Teilchen, aus denen der Stoff besteht.

Je stärker die Kopplung zwischen den Teilchen ist, desto größer ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle (vgl. Tafelwerk 7–10, S. 39).

### Gleichung für die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Welle

Zur Herleitung der Gleichung für die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Welle führen wir folgende Überlegung durch (Bild 36/3): Wenn ein Seilteilchen im Punkt A während der Periodendauer  $T$  eine Periode durchläuft, bewegt sich die Welle vom Punkt A zum Punkt B. Der Abstand der Punkte A und B entspricht der Wellenlänge  $\lambda$ .

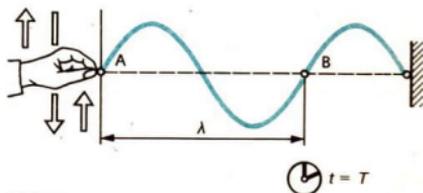


Bild 36/3

Setzen wir in die Gleichung  $v = s/t$  für den Weg  $s$  die Wellenlänge  $\lambda$  und für die Zeit  $t$  die Periodendauer  $T$  ein, so erhalten wir  $v = \lambda/T$ .

Führen wir mit  $f = 1/T$  die Frequenz ein, mit der z. B. das Teilchen A im Seil um seine Gleichgewichtslage schwingt, so erhalten wir die Gleichung für die

### Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Welle

$$v = \lambda \cdot f$$

② ③ ④

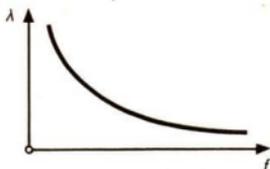
**Schlußfolgerungen aus der Gleichung für die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Welle.** Um Schlußfolgerungen aus der Gleichung zu ziehen, ist es zweckmäßig, sie nach  $\lambda$  umzustellen:

$$\lambda = v/f.$$

Wir unterscheiden die folgenden zwei Fälle:

Für  $v = \text{konstant}$  gilt:

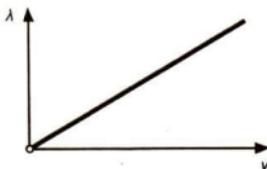
$$\lambda \sim \frac{1}{f}$$



■ Je größer die Schallfrequenz (je höher ein Ton), um so kürzer ist die Wellenlänge des Schalls.

Für  $f = \text{konstant}$  gilt:

$$\lambda \sim v$$



■ In Stahl ist die Wellenlänge des Schalls wesentlich größer als in Luft, da die Ausbreitungsgeschwindigkeit entsprechend größer ist.

- Durch einen Blitz wird eine Schallwelle ausgelöst. Zwischen dem Wahrnehmen des Blitzes und dem Donner vergehen 15 Sekunden. Berechnen Sie die Entfernung des Blitzes! ( $t = 20^\circ\text{C}$ )
- Stellen Sie in einer Übersicht die physikalischen Größen zur Beschreibung einer mechanischen Schwingung und zur Beschreibung einer mechanischen Welle zusammen und vergleichen Sie diese!
- Bei der Ausbreitung einer Schallwelle mit einer Frequenz von 1 kHz wird
  - in Wasserstoff ( $t = 0^\circ\text{C}$ ) eine Wellenlänge von 1,26 m und
  - in gesättigtem Wasserdampf ( $t = 110^\circ\text{C}$ ) eine Wellenlänge von 0,41 m gemessen. Berechnen Sie die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schallwelle! Vergleichen Sie die berechneten Werte mit der Schallgeschwindigkeit in Luft!
- Bestimmen Sie die Amplitude, Frequenz, Wellenlänge und Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Wasserwelle (Bild 37/3)!

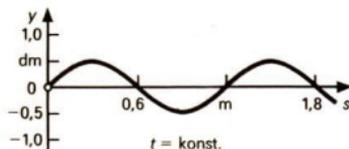
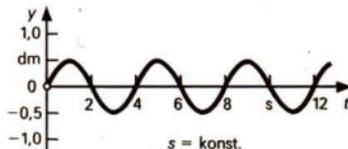


Bild 37/1



## Ausbreitung mechanischer Wellen

Die nachts fliegende Fledermaus stößt Ultraschall-„Rufe“ aus. Diese Schallwellen werden von ihr wieder aufgenommen, wenn sie wie ein Echo z. B. von dem Körper eines Beutetieres reflektiert werden (Bild 38/1).

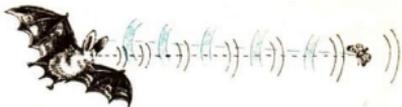


Bild 38/1

**Geradlinige Ausbreitung mechanischer Wellen.** Von Meereswellen wissen wir, daß die Wellenberge (oder -täler) in geradlinigen Fronten gleichen Abstandes vorrücken. Die Welle breitet sich in senkrechter Richtung zu den **Wellenfronten** aus. Dieser Vorgang ist in einer flachen Wanne mit Wasser gut zu beobachten (Bild 38/2).

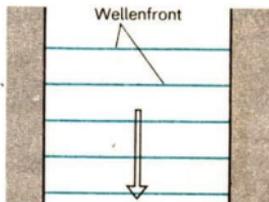


Bild 38/2

**In ein und demselben Stoff breiten sich mechanische Wellen geradlinig aus.**

**Reflexion mechanischer Wellen.** Fährt ein Schiff durch einen schmalen Kanal, so bewegt sich seine Bugwelle auf die Uferböschungen zu. Wenn sie dort auftrifft, wird sie zurückgeworfen, so daß sie sich wieder zur Mitte des Kanals hinbewegt (Bild 38/3). Die Welle wird an einem Hindernis **reflektiert**. Einfallswinkel und Reflexionswinkel sind gleich groß (Bild 38/4).

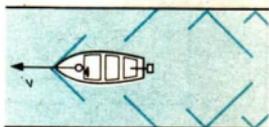


Bild 38/3

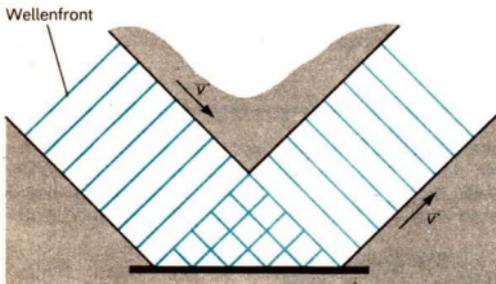
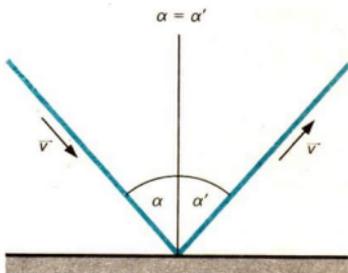


Bild 38/4 Reflexion einer Welle



► **Trifft eine mechanische Welle auf ein Hindernis, so wird sie reflektiert. Es gilt das Reflexionsgesetz.**

①

**Brechung mechanischer Wellen.** Was geschieht, wenn eine Welle aus einem Bereich großer Ausbreitungsgeschwindigkeit (tiefes Wasser) in einen Bereich gelangt, in dem die Ausbreitungsgeschwindigkeit geringer ist (flaches Wasser)?

- 15 ▼ In einer flachen Wanne wird eine Welle mit geradlinigen Wellenfronten schräg auf eine Grenzschicht zwischen tiefem und flachem Wasser geleitet (Bild 39/1).

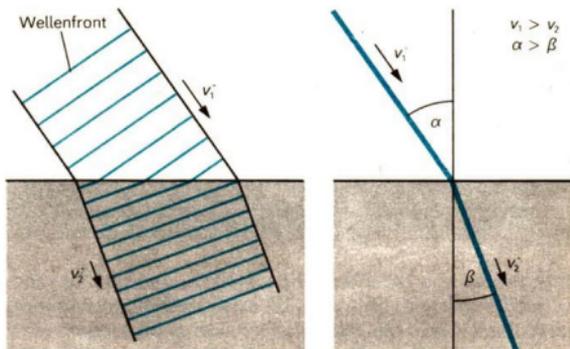


Bild 39/1 Brechung einer Wasserwelle an der Grenzschicht zwischen tiefem und flachem Wasser

An der Grenzschicht ändert sich die Ausbreitungsrichtung der Welle. Sie knickt ab. Diesen Vorgang nennt man **Brechung**. Art und Betrag der Richtungsänderung hängen von den Ausbreitungsgeschwindigkeiten ab. Nimmt die Ausbreitungsgeschwindigkeit ab ( $v_1 > v_2$ ), so erfolgt die Brechung **zum Einfallslot hin** ( $\alpha > \beta$ ), nimmt sie zu ( $v_1 < v_2$ ), so erfolgt die Brechung **vom Einfallslot weg** ( $\alpha < \beta$ ).

▶ **Trifft eine mechanische Welle auf eine Grenzschicht, an der sich ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit ändert, so verändert sich ihre Ausbreitungsrichtung. Es gilt das Brechungsgesetz.**

**Beugung mechanischer Wellen.** Ein Ruf ist um die Ecke eines Hauses zu hören (Bild 39/2). ② ③

Wie ist das möglich? Können sich Wellen „um die Ecke herum“ ausbreiten?

- 16 ▼ In einer flachen Wanne wird eine Wasserwelle mit geradlinigen Wellenfronten erzeugt. In den Weg der Wellenfronten stellt man einen engen Spalt (Bild 39/3).

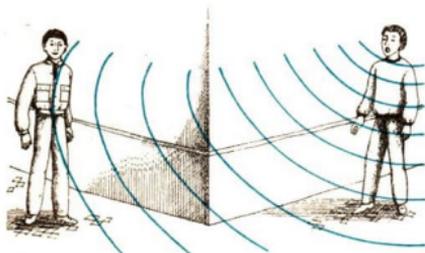


Bild 39/2

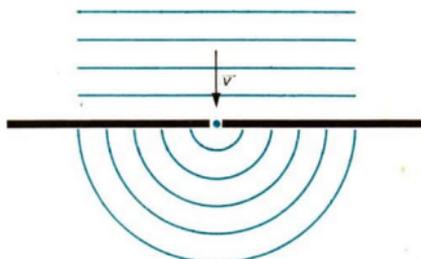


Bild 39/3 Beugung einer Welle am Spalt

- ① Ein Schallimpuls, der von einem Schiff zur Tiefenlotung unterhalb der Meeresoberfläche ausgesendet wurde, erreicht nach einer Laufzeit von  $t = 0,63$  s den Empfänger (Bild 42/3). Berechnen Sie daraus die Meerestiefe an dieser Stelle!
- ② In welche Richtung werden Schallwellen beim Übergang von Wasser in Luft gebrochen? Begründen Sie Ihre Aussage!
- ③ Begründen Sie, weshalb im Bild 39/1 die Wellenlänge vor und nach der Brechung unterschiedlich ist!

Wir beobachten, daß sich die Welle nicht nur in der ursprünglichen Richtung ausbreitet. Die Wellenfronten dringen auch in den Schattenraum hinter dem Spalt ein. Die Welle wird gewissermaßen um die Kanten des Spalts „herumgebogen“ (gebeugt). Diese Erscheinung nennt man **Beugung**. Sie ist bei Schallwellen besonders gut wahrzunehmen (Bild 39/2).

Trifft eine Welle auf einen Spalt, so dringt sie hinter dem Spalt teilweise in den Schattenraum ein. Diesen Vorgang nennt man **Beugung**.

**Interferenz von mechanischen Wellen.** Beobachtet man bei Regen eine Wasserpfütze, so stellt man fest, daß von jedem auftreffenden Regentropfen eine Welle ausgeht. Was geschieht, wenn die einzelnen Wellen aufeinandertreffen?

Zwei Kanäle vereinigen sich unter einem spitzen Winkel zu einem gemeinsamen Kanal. Zunächst werden mittels zweier gleichzeitig eintauchender Wellenerreger Wellen mit geradlinigen Wellenfronten in den beiden Kanälen erzeugt (Bild 40/1). In einem zweiten Teilexperiment bewegen sich die Wellenerreger zueinander entgegengerichtet (Bild 40/2).

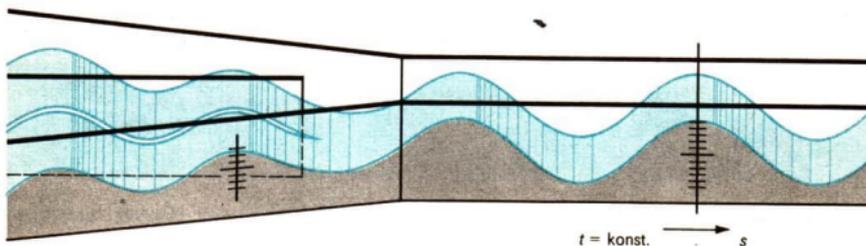


Bild 40/1 Verstärkung bei Interferenz zweier Wellen. Es treffen jeweils Wellenberg mit Wellenberg und Wellental mit Wellental zusammen.

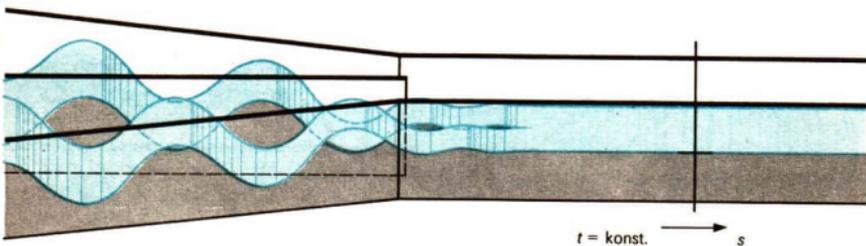


Bild 40/2 Abschwächung bei Interferenz zweier Wellen. Es trifft ein Wellenberg mit einem Wellental zusammen.

In beiden Kanälen treten Wellen gleicher Wellenlänge auf. Im ersten Teilexperiment rufen die beiden Wellen beim Zusammentreffen eine verstärkte Wellenbewegung hervor, im zweiten Fall ist im gemeinsamen Kanal gar keine Welle zu beobachten. Wie ist das zu erklären? Im gemeinsamen Kanal, in dem beide Wellen zusammentreffen, bewegen sich die Wasserteilchen unter dem gleichzeitigen Einfluß beider Wellen. Beide Wellen **überlagern** sich.

Ist nur eine der beiden Wellen wirksam, so bewegen sich die Wasserteilchen im ersten Teilexperiment so, wie es die blaue Kurve in Bild 41/1 angibt.

Ist nur die zweite Welle wirksam, so bewegen sich die Wasserteilchen an der gleichen Stelle gemäß der schwarzen Kurve. Beide Wellen wirken also gleichsinnig auf die Wasserteilchen ein. Bild 41/2 gibt die Bewegung der Wasserteilchen an, die beim gleichzeitigen Auftreten beider Wellen vorliegt. Es tritt eine **Verstärkung** der Wellenbewegung auf.

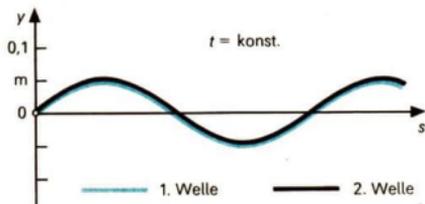


Bild 41/1  $y$ - $s$ -Diagramm für das erste Teilexperiment

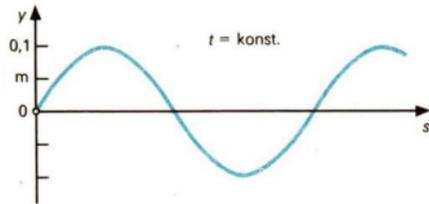


Bild 41/2  $y$ - $s$ -Diagramm beim gleichzeitigen Auftreten beider Wellen

In Bild 41/3 geben die blaue und die schwarze Kurve in gleicher Weise die Bewegung der Wasserteilchen für das zweite Teilexperiment an, wenn jeweils nur eine Welle vorhanden ist. Die Einwirkungen der Wellen auf die Wasserteilchen sind einander entgegengerichtet. Treffen beide Wellen aufeinander, dann fallen Wellenberge und Wellentäler zusammen und es tritt **Abschwächung** oder sogar Auslöschung auf (Bild 41/4). Die Überlagerung von Wellen, die in bestimmten Bereichen zur Verstärkung und Abschwächung der Wellen führt, nennt man **Interferenz**. ②

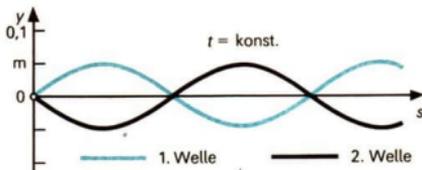


Bild 41/3  $y$ - $s$ -Diagramm für das zweite Teilexperiment

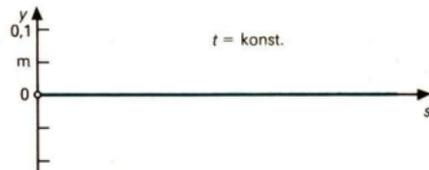


Bild 41/4  $y$ - $s$ -Diagramm beim gleichzeitigen Auftreten beider Wellen

Nachdem wir das Prinzip der Interferenz erkannt haben, wollen wir die Überlagerung von zwei Wellen mit kreisförmigen Wellenfronten, wie sie von Regentropfen auf einer Wasserpfütze hervorgerufen werden, untersuchen. Was für ein **Interferenzbild** entsteht bei der Überlagerung von zwei Kreiswellen?

18

▼ In einer Wellenwanne werden mit zwei punktförmigen Wellenerregern, die im gleichen Takt ins Wasser tauchen, zwei gleichartige Wellen erzeugt, die sich überlagern.

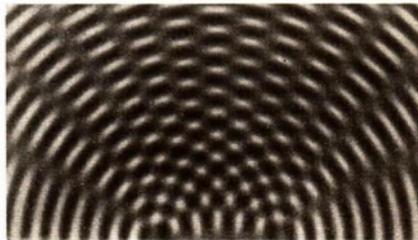


Bild 41/5

- ① Nennen und erläutern Sie Beispiele für die Reflexion und für die Beugung von Schall (Ultraschall)!
- ② Zeichnen und beschreiben Sie die Überlagerung zweier mechanischer Wellen gleicher Wellenlänge im  $y$ - $s$ -Diagramm bei  $t = \text{konstant}$  für den Fall a) der Verstärkung und b) der Abschwächung der Wellenbewegung!

Auf der Wasseroberfläche treten Bereiche der Verstärkung und Bereiche der Abschwächung auf (Bild 41/5).

**Treffen zwei Wellen aufeinander, so tritt in bestimmten Bereichen eine Verstärkung der Wellen, in anderen dagegen eine Abschwächung auf. Diesen Vorgang nennt man Interferenz.**

**Interferenzbild beim Doppelspalt.** Trifft eine Welle auf einen Doppelspalt, so breitet sich infolge der Beugung hinter jedem Spalt eine Welle mit halbkreisförmigen Wellenfronten aus. Das bei der Überlagerung der beiden Wellen entstehende Interferenzbild (Bild 42/1) gleicht dem im Experiment nach Bild 41/5.

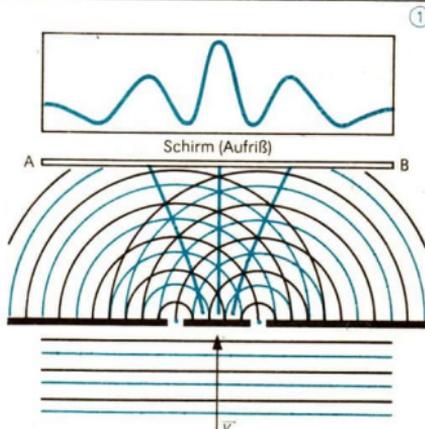
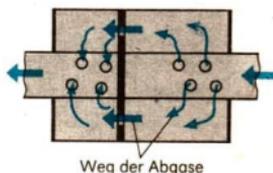


Bild 42/1 Interferenzbild an einem Doppelspalt  
 (— Wellenberge;  
 — Wellentäler)

### Anwendungen mechanischer Wellen

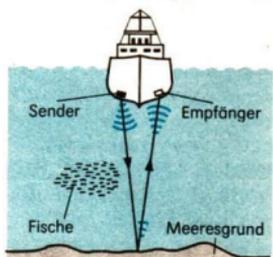
**Schalldämpfung.** Der Schalldämpfer von Kraftfahrzeugen besteht aus mehreren Kammern (Bild 42/2). Die beim Auspufftakt (4. Takt) entstehende knallartige Schallwelle wird in jeder Kammer mehrfach reflektiert. Bei jeder Reflexion wird ein Teil der mechanischen Energie des Schalls in thermische Energie der Kammerwände umgewandelt, d. h., die Schallwelle wird gedämpft.

Bild 42/2 Schalldämpfer eines Kraftfahrzeugs



**Echolot.** Die vom Sender im Bild 42/3 ausgesendeten Ultraschallimpulse werden vom Meeresboden oder einer anderen Grenzschicht reflektiert und gelangen zum Empfänger. Aus der gemessenen Laufzeit dieses Echos und der Schallgeschwindigkeit ermittelt man den Weg des Ultraschallimpulses und daraus die Meerestiefe.

Bild 42/3



**Ultraschalldiagnose.** Richtet man Ultraschallwellen auf einen menschlichen Körper, so werden diese an Grenzschichten, z. B. Muskel – Knochen, reflektiert. Aus der Echolaufzeit ermittelt man die Lage der Grenzschicht und zeichnet diese auf einem Bildschirm auf. Das gleiche Prinzip wendet man bei der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung mit Ultraschall an.

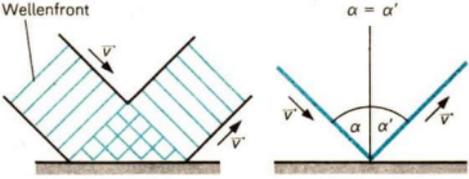
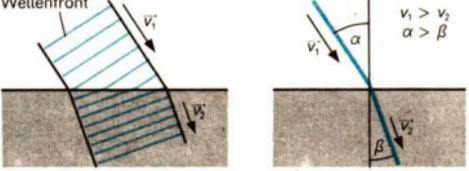
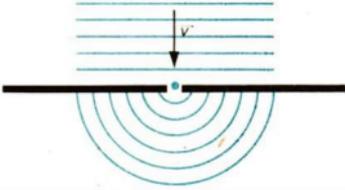
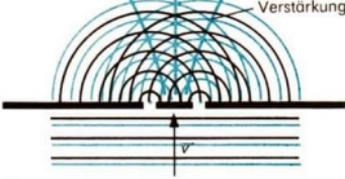
**Brechung von Ultraschall.** Durch Linsen, z. B. aus Polystyrol, können Ultraschallwellen auf engstem Raum gebündelt werden. Damit kann man z. B. sehr harte Werkstoffe bohren und schneiden.

## Zusammenfassung

Eine mechanische Welle ist die Ausbreitung einer mechanischen Schwingung im Raum, bei der Energie übertragen, jedoch kein Stoff transportiert wird. Für die Ausbreitungsgeschwindigkeit gilt die Gleichung

$$v = \lambda \cdot f.$$

Bei der Ausbreitung von Wellen treten Reflexion, Brechung, Beugung und Interferenz auf. Beugung und Interferenz sind typische Welleneigenschaften.

<p><b>Reflexion</b> Zurückwerfen einer Welle an einem Hindernis.</p>	
<p><b>Brechung</b> Änderung der Ausbreitungsrichtung einer Welle an der Grenzschicht zwischen Stoffen mit unterschiedlicher Ausbreitungsgeschwindigkeit</p>	
<p><b>Beugung</b> Abweichung einer Welle von der geradlinigen Ausbreitungsrichtung hinter einem Spalt</p>	
<p><b>Interferenz</b> Überlagerung zweier Wellen, die in bestimmten Bereichen zur Verstärkung, in anderen zur Abschwächung der Wellen führt.</p>	

- ① Zeichnen und erläutern Sie das Interferenzbild für zwei Kreiswellen!  
Anleitung: Um zwei Punkte  $P_1$  und  $P_2$  werden Kreiswellen gezeichnet, und zwar sowohl Wellenberge als auch Wellentäler. Auslöschung der Wellen tritt dort auf, wo ein Wellenberg auf ein Wellental trifft, Verstärkung der Wellen, wo zwei Wellenberge oder zwei Wellentäler zusammentreffen.

### Gravitation

1. Warum ist die Gewichtskraft ein und desselben Körpers auf der Erde, auf dem Mond und auf dem Mars unterschiedlich groß? Wo ist sie am größten?
2. Die Lufthülle der Erde besteht aus verschiedenen Gasmolekülen, deren durchschnittliche Geschwindigkeit etwa  $600 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  beträgt. Warum „verschwinden“ diese Moleküle trotz ihrer ungeordneten Bewegung nicht in den Weltraum?

### Mechanische Schwingungen

1. a) Beschreiben Sie die Schwingung eines horizontalen Federschwingers und eines Fadenpendels!  
b) Erklären Sie das Entstehen der Schwingung eines horizontalen Federschwingers und eines Fadenpendels!
2. Zeichnen Sie das  $y$ - $t$ -Diagramm einer sinusförmigen Schwingung, deren Amplitude 8 cm und deren Frequenz 2 Hz beträgt!
3. Mit Hilfe eines Elektronenstrahloszillographen wurden Schallschwingungen aufgezeichnet.

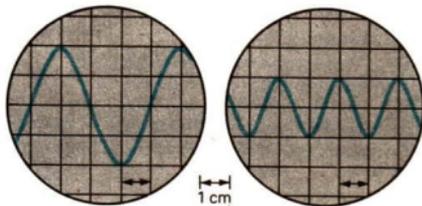


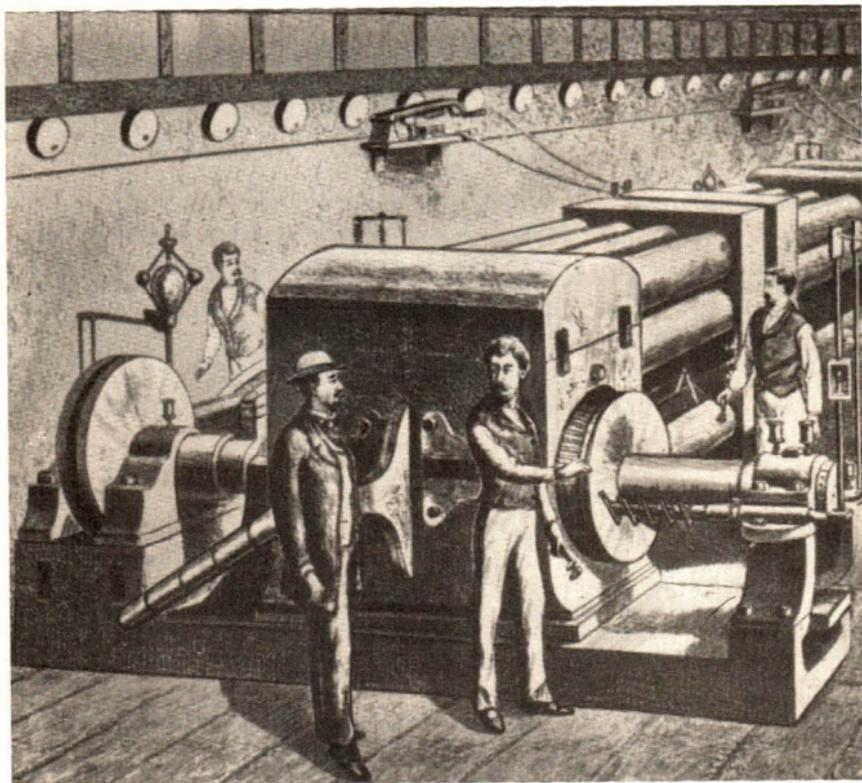
Bild 44/1

- a) Geben Sie für die von den Oszillographen A und B aufgezeichneten Töne (Bild 44/1) die Periodendauer und die Frequenz an! Für die Zeitachse gilt der Maßstab  $1 \text{ cm} \hat{=} 500 \mu\text{s}$ .
  - b) Welcher Ton ist höher?
  - c) Welcher Ton ist lauter?
4. a) Was versteht man unter Resonanz?  
b) Wie kann man verhindern, daß eine Maschine in Resonanz gerät?  
c) Nennen Sie Beispiele für das Auftreten von Resonanz aus dem täglichen Leben!
  5. Das Stahlseil eines Kranes wird durch Anhängen eines Körpers etwas gedehnt. Es wirkt also wie eine Feder mit sehr großer Federkonstante. Mit welcher Periodendauer führt der Körper ( $m = 1000 \text{ kg}$ ) vertikale Schwingungen aus, wenn die Federkonstante des Stahlseils  $300000 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$  beträgt? Wie groß ist die Eigenfrequenz dieses „Federschwingers“?

### Mechanische Wellen

1. Beschreiben Sie ein Experiment, mit dem man nachweisen kann, daß eine mechanische Welle Energie, aber keinen Stoff transportiert!
2. a) Zeichnen Sie ein  $y$ - $s$ -Diagramm einer Welle!  
b) Erläutern Sie anhand des Diagramms die physikalischen Größen Amplitude und Wellenlänge!
3. Zeichnen Sie mit Hilfe der Wellenfronten und der Ausbreitungsrichtung a) die Reflexion, b) die Brechung und c) die Beugung von Wasserwellen!
4. Erklären Sie, warum Schall auch hörbar ist, wenn Sie sich hinter einem Pfeiler befinden und die Schallquelle nicht sehen können!

# ELEKTRIZITÄTSLEHRE



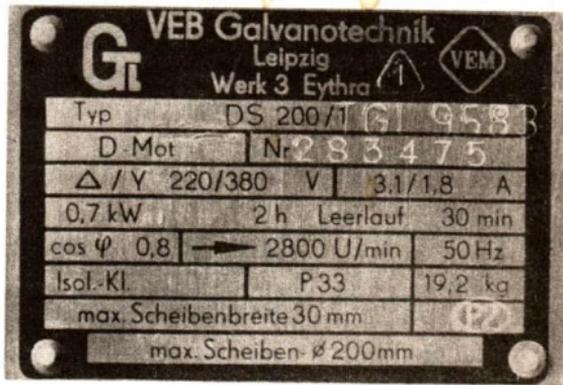
Bei den ersten Beispielen zur technischen Anwendung der elektrischen Energie am Ende des 19. Jahrhunderts handelte es sich vorwiegend um die Erzeugung und Nutzung von Gleichstrom (↗ Bild des ersten öffentlichen Elektrizitätswerkes in New York um 1882). Allmählich wurden bei der Erzeugung und Übertragung von elektrischer Energie über große Entfernungen die technischen Vorteile des Wechselstroms immer deutlicher. In der DDR erhalten heute die Städte und Dörfer elektrische Energie aus dem zentralen Verbundnetz der DDR mit Hilfe von Wechselstrom mit einer Frequenz von 50 Hz. Für viele technische Anwendungen elektrischer Energie wird der Wechselstrom in Gleichstrom umgeformt oder in Wechselströme mit niederen oder höheren Spannungen bzw. mit niederen oder höheren Frequenzen umgewandelt.

Eine ganz neue Entwicklung der Nutzung elektrischer Energie begann, als es Anfang unseres Jahrhunderts in Deutschland erstmals großtechnisch möglich wurde, mit Hilfe eines Rundfunksenders bei Nauen Nachrichten und Musik drahtlos mit Hilfe elektromagnetischer Wellen über große Entfernungen zu übertragen. Viele unermüdliche Forscher und Erfinder, Physiker und Ingenieure haben dazu beigetragen, daß wir heute Sprache und Bild nicht nur aus allen Erdteilen, sondern auch aus dem Weltall in alle Wohnungen übertragen können.

Werkzeugmaschinen werden vorwiegend durch Wechselstrommotoren angetrieben.

Auf dem Leistungsschild solcher Motoren findet man Angaben verschiedener elektrischer Größen, die bei Gleichstrommotoren nicht vorkommen.

Es entsteht also die Frage: Welche Gemeinsamkeiten und welche Unterschiede gibt es bei Vorgängen im Gleichstromkreis und im Wechselstromkreis?



### Einige Begriffe des Wechselstroms

Der Wechselstrom ist ein elektrischer Strom, bei dem sich die Polarität und der Betrag der Spannung an der Spannungsquelle periodisch ändern. Infolgedessen ändern sich auch die Richtung des Stromes und der Betrag der Stromstärke im Stromkreis periodisch. Im Modell der Elektronenleitung können wir uns das so vorstellen: An jeder Stelle des Stromkreises schwingen die Elektronen periodisch in die zwei Längsrichtungen des Leiters. Im Unterschied zum Gleichstrom bewegen sie sich dabei nicht durch den Stromkreis hindurch.

**Sinusförmiger Wechselstrom.** In der Leistungselektrik werden vorzugsweise Wechselströme verwendet, die im Spannung-Zeit-Diagramm (Bild 46/2a) und im Stromstärke-Zeit-Diagramm (Bild 46/2b) die Form einer Sinusfunktion annehmen. Solche Ströme werden als sinusförmige Wechselströme bezeichnet.

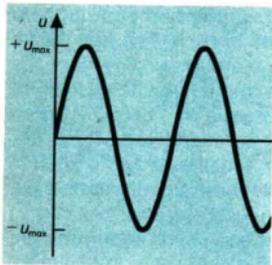
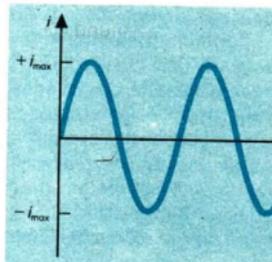
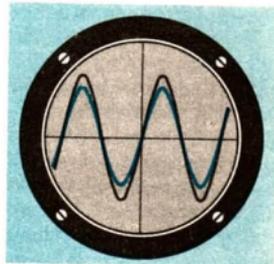


Bild 46/2 a) Spannung-Zeit-Diagramm eines sinusförmigen Wechselstromes



b) Stromstärke-Zeit-Diagramm eines sinusförmigen Wechselstromes



c) Oszillographenbild mit gleichzeitiger Anzeige einer sinusförmigen Wechselspannung und einer sinusförmigen Wechselstromstärke

Mit einem Oszillographen können die zeitlichen Änderungen von Spannung und Stromstärke einzeln oder gleichzeitig sichtbar gemacht werden (Bild 46/2c). Das Verhältnis der zwei Amplitudenwerte  $u_{\max}$  und  $i_{\max}$  wird dabei willkürlich eingestellt. In der Informationselektrik werden neben sinusförmigen Wechselströmen oft nichtsinusförmige Wechselströme genutzt (Bild 47/1). ②

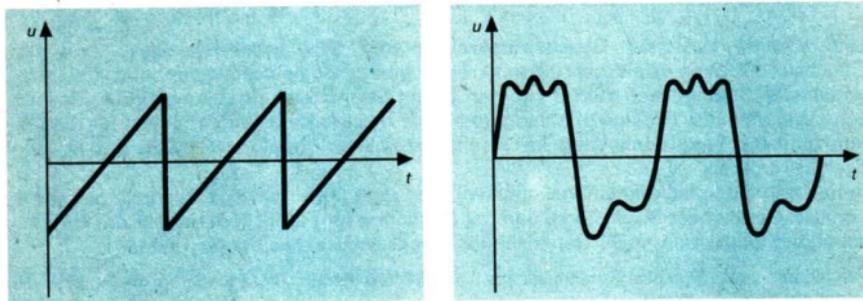


Bild 47/1 Spannung-Zeit-Diagramm von nichtsinusförmigen Wechselströmen

**Frequenz des Wechselstroms.** Wir können den Wechselstrom als elektrische Schwingung betrachten. Sowohl die Spannung als auch die Stromstärke verändern sich periodisch zwischen den zwei Maximalwerten  $+u_{\max}$  und  $-u_{\max}$  beziehungsweise  $+i_{\max}$  und  $-i_{\max}$  (Bild 46/2a und b).

► **Die Frequenz  $f$  des Wechselstroms gibt an, wieviel Schwingungen die Spannung und damit auch die Stromstärke in einer Sekunde ausführen.**

In der Leistungselektrik liegen die Wechselstromfrequenzen im allgemeinen zwischen 40 Hz und 60 Hz (in Europa 50 Hz, in den USA 60 Hz). Für die Wahl dieser Frequenzen war u. a. folgendes maßgeblich: Bei sehr kleinen Frequenzen wären die zeitlichen Schwankungen des Wechselstromes bei Lampen als Flimmern erkennbar und störend. Damit kein solches Flimmern auftritt, muß die Frequenz des Wechselstromes größer als 30 Hz sein.

Bei einigen Anwendungen des elektrischen Stromes, wie dem Antrieb von Elektrolokomotiven, ist dieser Gesichtspunkt ohne Bedeutung. Dort wird aus Gründen einer möglichst verlustarmen Nutzung der Elektroenergie teilweise mit Wechselströmen gearbeitet, die eine kleinere Frequenz haben. So hat der bei der Deutschen Reichsbahn benutzte Wechselstrom eine Frequenz von  $16\frac{2}{3}$  Hz.

Die Frequenzen der in der *Informationselektrik* benutzten Wechselströme reichen von 20 Hz bis zu Größenordnungen von Mega- oder auch Gigahertz.

**Erzeugung von Wechselstrom.** Wechselstrom mit einer Frequenz von 50 Hz wird in Kraftwerken mit Hilfe von *Generatoren* erzeugt. Wechselströme für die Deutsche Reichsbahn werden in gesonderten Generatoren oder mit Hilfe von *Frequenzwandlern* entlang der Streckenabschnitte bereitgestellt.

- ① Nennen Sie Unterschiede zwischen Gleichstrom und Wechselstrom!
- ② Welchen physikalischen Sinn haben das positive und das negative Vorzeichen bei solchen Angaben wie  $+i_{\max}$  und  $-i_{\max}$  im Bild 46/2a, b?

Wechselströme mit sehr hohen Frequenzen werden in *Hochfrequenzgeneratoren* erzeugt. Das sind häufig sehr kleine Geräte, in denen mit Hilfe spezieller elektronischer Schaltungen aus Wechselstrom mit 50 Hz oder aus Gleichstrom hochfrequente Wechselströme erzeugt werden.

Dem im Unterricht benutzten Universalgenerator können Wechselströme mit einer Frequenz von 10 Hz bis 100 kHz entnommen werden.

**Unterschiede zwischen Gleichstromkreisen und Wechselstromkreisen.** Zwischen Gleichstromkreisen und Wechselstromkreisen gibt es Gemeinsamkeiten, aber auch Unterschiede. Solange sich zum Beispiel in einem Stromkreis nur Leitungsdrähte, technische Widerstände, Glühlampen und elektrische Heizgeräte befinden, gelten für die Reihen- und die Parallelschaltung im Wechselstromkreis dieselben Gesetze wie für den Gleichstromkreis.

In den folgenden Experimenten wollen wir die Frage untersuchen: Gelten die bisher bekannten Gesetze der Stromstärke und der Spannung für die Reihen- und für die Parallelschaltung auch dann noch, wenn sich im Wechselstromkreis Spulen befinden?

19

Wir messen in den Wechselstromkreisen nach den Bildern 48/1 und 48/2 die Stromstärken bzw. die Spannungen.

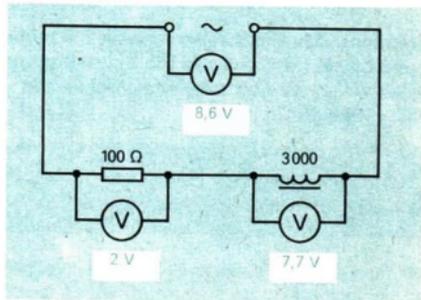
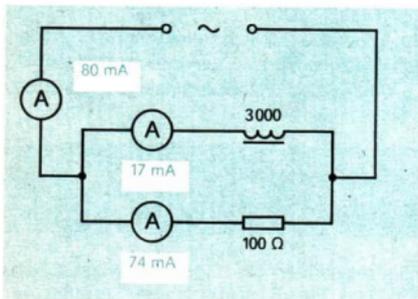


Bild 48/1 In einem Wechselstromkreis kann bei einer Parallelschaltung die Summe der Stromstärken in den Zweigen größer sein als die Stromstärke in der Zuleitung von der Spannungsquelle

Bild 48/2 In einem Wechselstromkreis kann bei einer Reihenschaltung die Summe der Teilspannungen an den Bauelementen größer sein als die Klemmenspannung an der Spannungsquelle

Aus den Messungen erkennen wir:

**Sobald sich in einem Stromkreis Spulen befinden, können die vom Gleichstrom bekannten Gesetze für die Stromstärke und für die Spannung bei Reihen- und bei Parallelschaltung nicht mehr auf Wechselstromkreise angewandt werden.**

Für Wechselstromkreise gelten in diesen Fällen andere physikalische Gesetze, die bei der Anwendung des Wechselstromes in der Technik genutzt werden.

### Ohmsche Bauelemente im Wechselstromkreis

Alle elektrischen Bauelemente aus geraden oder aus wenig gewickelten Drähten (wie Leitungsdrähte und technische Widerstände) werden als *ohmsche Bauelemente* bezeichnet, weil deren elektrisches Verhalten sowohl im Gleichstromkreis als auch im Wechselstromkreis durch das Ohmsche Gesetz erklärt werden kann.

In der Elektrotechnik spielen auch Spulen und Kondensatoren eine große Rolle. Spulen und Kondensatoren sind keine ohmschen Bauelemente, weil deren elektrisches Verhalten im Wechselstromkreis nicht durch das Ohmsche Gesetz erklärt werden kann. Der elektrische Widerstand von ohmschen Bauelementen wird als **ohmscher Widerstand  $R$**  bezeichnet. Die physikalischen Ursachen des ohmschen Widerstandes und die Gleichung zur Berechnung des ohmschen Widerstandes aus den Eigenschaften des Drahtes kennen wir bereits:

Der ohmsche Widerstand  $R$  eines Drahtes entsteht durch die Wechselwirkung zwischen den wanderungsfähigen Elektronen und den Ionen im Metallkristall.

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$

In dem folgenden Experiment untersuchen wir die Frage: Ist der elektrische Widerstand eines ohmschen Bauelements im Gleichstromkreis und im Wechselstromkreis gleich groß?

Zur Unterscheidung des elektrischen Widerstandes eines Bauelementes im Gleichstromkreis und im Wechselstromkreis benutzen wir die Formelzeichen  $R_{=}$  und  $R_{\sim}$ . Um den elektrischen Widerstand eines Bauelementes im Gleichstromkreis und im Wechselstromkreis vergleichen zu können, wurde festgelegt, daß auch im Wechselstromkreis der Quotient  $U/I$  das Maß für den elektrischen Widerstand eines Bauelementes ist.

Wir bestimmen die elektrischen Widerstände  $R_{=}$  und  $R_{\sim}$  eines ohmschen Bauelementes (Bild 49/1).

Die Berechnungen ergeben:  $R_{=} = 99 \Omega$  und  $R_{\sim} = 100 \Omega$ .

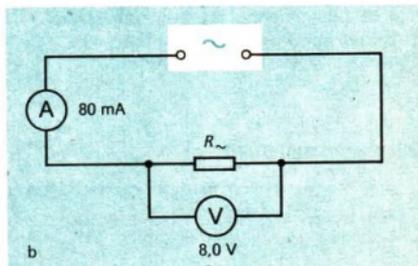
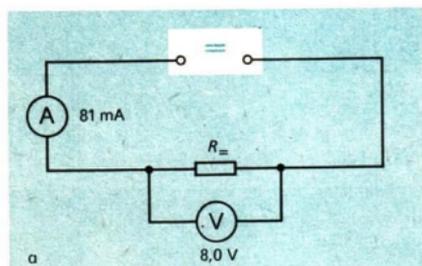


Bild 49/1 Experimentieranordnungen zur Bestimmung von  $R_{=}$  und  $R_{\sim}$  eines ohmschen Widerstandes

- ① Interpretieren Sie die Gleichung  $R = \rho \cdot \frac{l}{A}$ !
- ② Ein Kupferdraht hat einen Querschnitt von  $0,75 \text{ mm}^2$ . Wie lang darf der Draht höchstens sein, damit ein ohmscher Widerstand von  $0,8 \Omega$  nicht überschritten wird?
- ③ Wie groß ist der ohmsche Widerstand eines ohmschen Bauelementes, wenn bei

einer Spannung von  
ein Strom von  
fließt?

$\alpha$	b	c	d	e
5,8 V	7,4 V	11,3 V	0,56 V	1,4 V
22 mA	364 mA	5 mA	17 mA	0,4 mA

Auch Messungen mit anderen ohmschen Bauelementen führen unter Beachtung der Meßfehler immer wieder zu folgendem Ergebnis:

Der ohmsche Widerstand eines Bauelementes ist im Wechselstromkreis genauso groß wie im Gleichstromkreis.

$$R_{\sim} = R_{\text{DC}}$$

### Zeitlicher Gleichlauf von Spannung und Stromstärke in ohmschen Bauelementen

Untersuchen wir mit Hilfe eines Oszillographen für ein ohmsches Bauelement den zeitlichen Verlauf von Spannung und Stromstärke, dann erhalten wir Kurven, wie sie im Bild 50/1 dargestellt sind.

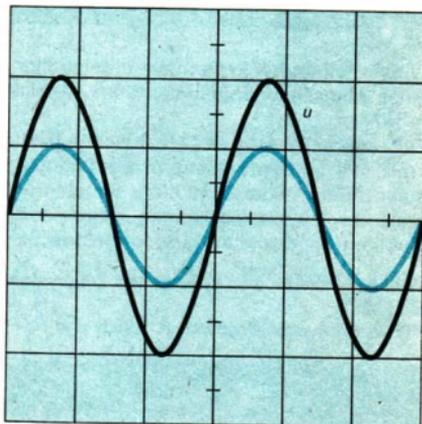


Bild 50/1 Bei einem ohmschen Bauelement erreichen Spannung und Stromstärke zu denselben Zeiten ihre Höchstwerte.

Daraus erkennen wir:

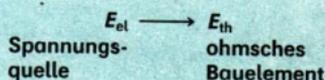
Bei einem ohmschen Bauelement verlaufen Spannung und Stromstärke zeitlich gleich.

①

### Energieumwandlung in ohmschen Bauelementen

Im Ergebnis der Wechselwirkung zwischen den Elektronen und den Ionen des Metallkristalls wird in ohmschen Bauelementen elektrische Energie aus der Spannungsquelle in thermische Energie umgewandelt, die schließlich durch Wärme an die Umgebung übertragen wird. Das heißt: Der Spannungsquelle wird Energie entnommen.

Von einem ohmschen Bauelement wird ständig elektrische Energie aus der Spannungsquelle entnommen und in thermische Energie umgewandelt.



## Die Induktivität von Spulen

Spulen sind in Transformatoren, Elektromagneten, Motoren und Generatoren enthalten. Hierbei nutzt man die Spulen zur Erzeugung von Magnetfeldern. Spulen werden aber auch als selbständige Bauelemente benutzt. Diese Anwendung von Spulen beruht auf der Selbstinduktion in Spulen.

In jeder Spule wird bei Änderung der Stromstärke infolge der Selbstinduktion eine elektrische Spannung induziert, wodurch das Anwachsen oder Absinken der Stromstärke behindert wird.

Diese Eigenschaft einer jeden Spule heißt

### Induktivität $L$ .

Die Induktivität  $L$  einer Spule gibt an, wie stark sie eine Änderung der Stromstärke behindert.

Die Induktivität einer Spule ist vor allem durch deren Bau bestimmt. Zum Beispiel ist die Induktivität von Spulen um so größer, je größer die Anzahl der Windungen ist. Bei gleichen Spulen ist sie sehr viel größer, wenn sich im Spuleninnern ein Eisenkern befindet.

Wie groß die induzierte Spannung ist, hängt nicht nur von der Induktivität der Spule ab. Das hängt auch davon ab, wie schnell sich die Stromstärke ändert.

Die Einheit der Induktivität ist ein **Henry (1 H)**. Mit dieser Einheit werden die wissenschaftlichen Leistungen des amerikanischen Physikers Joseph Henry (1797 bis 1878) geehrt.

- Eine Spule hat eine Induktivität von 1 H, wenn bei einer Änderung der Stromstärke von 1 A in einer Zeit von 1 s durch Selbstinduktion eine Spannung von 1 V induziert wird. Es gilt:

$$1 \text{ H} = \frac{1 \text{ V}}{1 \frac{\text{A}}{\text{s}}} = 1 \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A}}$$

In der Technik vorkommende Induktivitäten

<b>Spulen (mit Eisenkernen)</b> in Geräten und Maschinen, die bei <b>Netzfrequenz</b> arbeiten:  bis hundert Henry	<b>Spulen (ohne Eisenkerne)</b> in <b>Hochfrequenz</b> geräten  einige Mikrohenry bis Millihenry
--	---

## Induktiver Widerstand von Spulen

**Physikalische Ursachen des induktiven Widerstandes.** In dem folgenden Experiment untersuchen wir die Frage: Ist der elektrische Widerstand einer Spule im Gleichstromkreis und im Wechselstromkreis gleich groß?

- 
- ① Erläutern Sie, warum in einem ohmschen Bauelement Stromstärke und Spannung zur selben Zeit ihre Höchstwerte erreichen!

Wir bestimmen die elektrischen Widerstände  $R_{\text{e}}$  und  $R_{\text{i}}$  einer Spule mit Eisenkern (Bild 52/1). Die Berechnungen ergeben:  $R_{\text{e}} = 150 \Omega$  und  $R_{\text{i}} = 1900 \Omega$ .

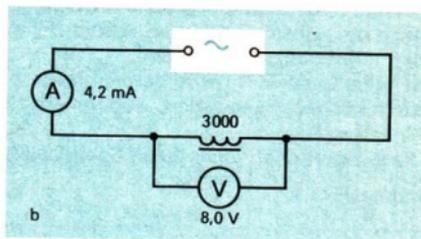
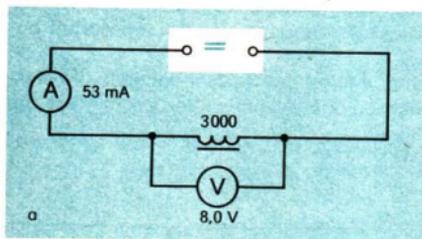


Bild 52/1 Experimentieranordnung zur Bestimmung von  $R_{\text{e}}$  und  $R_{\text{i}}$  einer Spule

Auch Messungen mit anderen Spulen führen immer wieder zu folgendem Ergebnis:

**Der elektrische Widerstand einer Spule ist im Wechselstromkreis viel größer als im Gleichstromkreis.**

$$R_{\text{e}} > R_{\text{i}}$$

Die Ursache hierfür besteht in folgendem: Außer dem ohmschen Widerstand des Spulendrahtes tritt beim Wechselstrom noch ein weiterer elektrischer Widerstand auf. Diesen nennt man *induktiven Widerstand*.

Der induktive Widerstand entsteht durch die Selbstinduktion. Der durch eine Spule fließende Wechselstrom baut um die Spule ein sich periodisch änderndes Magnetfeld auf (Bild 52/2).

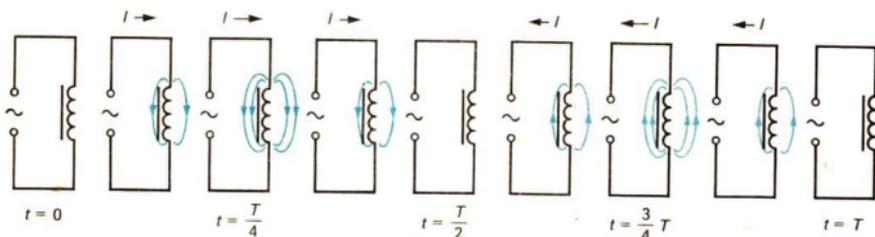


Bild 52/2 Durch die periodische Änderung der Stromstärke und der Richtung des Wechselstromes kommt es zu einer ständigen Änderung des Magnetfeldes der Spule und demzufolge zu einer ständigen Selbstinduktion.

Infolge der ständigen Änderung des Magnetfeldes wird in der Spule durch Selbstinduktion eine Spannung induziert, die der anliegenden Spannung entgegenwirkt. Durch diese Induktionsspannung wird in der Spule ein schnelles Anwachsen und Absinken der Stromstärke behindert. Die durch die Selbstinduktion hervorgerufene Behinderung des Stromflusses heißt

**induktiver Widerstand  $X_L$ .**

**Der induktive Widerstand  $X_L$  einer Spule entsteht durch die Selbstinduktion in der Spule.**

Durch den Buchstaben  $X$  soll ausgedrückt werden, daß der induktive Widerstand physikalisch andere Ursachen hat als der ohmsche Widerstand  $R$ . ①

**Experimentelle Bestimmung des induktiven Widerstandes  $X_L$ .** Der gesamte elektrische Widerstand  $R_{\Sigma}$  einer Spule besteht aus dem ohmschen Widerstand  $R$  des Drahtes, der nach der Gleichung  $R = \rho \cdot \frac{l}{A}$  berechnet werden kann, und aus dem induktiven Widerstand  $X_L$  der Spule. Das Zusammenwirken dieser zwei Widerstände kann jedoch nicht durch einfache Addition erfaßt werden. Im folgenden betrachten wir deshalb Spulen, deren ohmscher Widerstand gegenüber dem induktiven Widerstand so klein ist, daß der ohmsche Widerstand vernachlässigt werden kann. Für solche Spulen gilt  $R_{\Sigma} = X_L$ .

<p>► Für die experimentelle Bestimmung des induktiven Widerstandes <math>X_L</math> einer Spule (mit vernachlässigbar kleinem ohmschen Widerstand) gilt:</p>	$X_L = \frac{U}{I}$
--	---------------------

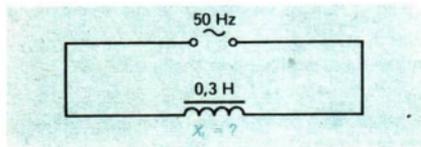
**Gleichung zur Berechnung des induktiven Widerstandes  $X_L$ .** Der induktive Widerstand einer Spule ist nicht nur von der Induktivität der Spule, sondern auch von der Frequenz des Wechselstroms abhängig. Physikalische Untersuchungen haben ergeben:

<p>► Der induktive Widerstand <math>X_L</math> einer Spule wird nach folgender Gleichung berechnet: <math>X_L = 2\pi \cdot f \cdot L</math></p> <p>Darin bedeuten:</p> <p><math>f</math>: Frequenz des Wechselstromes in Hz (<math>s^{-1}</math>).</p> <p><math>L</math>: Induktivität der Spule in H (<math>\frac{V \cdot s}{A}</math>).</p>
---

Da der induktive Widerstand nur durch die vom Bau der Spule bedingte Induktivität und von der Frequenz des Wechselstroms abhängt, hat ein und dieselbe Spule für zwei Wechselströme mit verschiedenen Frequenzen jeweils unterschiedlich große induktive Widerstände.

- Eine Spule mit einer Induktivität von 0,3 H wird zuerst in einen Wechselstromkreis mit einer Frequenz von 50 Hz und anschließend in einen Stromkreis mit einer Frequenz von 500 Hz eingeschaltet. Wie groß ist jeweils der induktive Widerstand der Spule?

*Analyse* (für den Stromkreis mit der Frequenz von 50 Hz):



Gesucht:  $X_L$

Gegeben:  $L = 0,3 \text{ H} = 0,3 \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A}}$

$f = 50 \text{ Hz}$

Bild 53/1

① Erläutern Sie das Zustandekommen des induktiven Widerstandes einer Spule!

Lösung:  $X_L = 2\pi \cdot f \cdot L$

$$X_L = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \text{ s}^{-1} \cdot 0,3 \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A}}$$

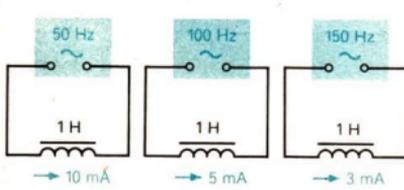
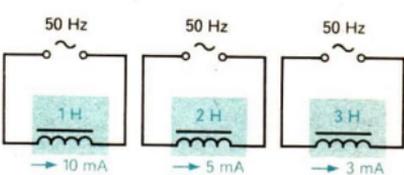
$$X_L = 90 \frac{\text{V}}{\text{A}}$$

$$\underline{\underline{X_L = 90 \Omega}}$$

Für den Stromkreis mit der Frequenz  $f = 500 \text{ Hz}$  ergibt sich nach der gleichen Berechnung  $X_L = 900 \Omega$ . ① ②

**Ergebnis:** Die Spule hat bei diesen Frequenzen der Wechselströme einen induktiven Widerstand von  $90 \Omega$  bzw. von  $900 \Omega$ .

**Schlußfolgerungen aus der Gleichung für den induktiven Widerstand.** Wir untersuchen die folgenden zwei Fälle:

<p><b>Wir ändern die Frequenz <math>f</math></b> (<math>L</math> bleibt konstant)</p>  <p style="text-align: center;"> <span style="margin-right: 40px;">→ 10 mA</span> <span style="margin-right: 40px;">→ 5 mA</span> <span>→ 3 mA</span> </p> <p>Es gilt:  <math>X_L \sim f</math> (für <math>L = \text{konstant}</math>)</p> <p>■ Bei Erhöhung der Frequenz <math>f</math> des Wechselstromes wird der induktive Widerstand <math>X_L</math> einer Spule größer.</p>	<p><b>Wir ändern die Induktivität <math>L</math></b> (<math>f</math> bleibt konstant)</p>  <p style="text-align: center;"> <span style="margin-right: 40px;">→ 10 mA</span> <span style="margin-right: 40px;">→ 5 mA</span> <span>→ 3 mA</span> </p> <p>Es gilt:  <math>X_L \sim L</math> (für <math>f = \text{konstant}</math>)</p> <p>■ Bei Vergrößerung der Induktivität <math>L</math> durch Einführen eines Eisenkerns oder durch Austausch einer Spule gegen eine andere mit größerer Windungszahl wird der induktive Widerstand <math>X_L</math> größer.</p>
--	--

22

### Aufgabe

Bestimmen Sie die Induktivität  $L$  einer Spule!

③ ④ ⑤ ⑥

### Vorbereitung

- Leiten Sie aus den Gleichungen  $X_L = \frac{U}{I}$  und  $X_L = 2\pi \cdot f \cdot L$  eine Gleichung für die Bestimmung der Induktivität  $L$  der Spule her!
- Zeichnen Sie den Schaltplan des Stromkreises mit den entsprechenden Meßgeräten!

### Durchführung und Auswertung

- Bauen Sie den Stromkreis auf, und führen Sie die Messungen bei der vom Lehrer vorgegebenen Spannung aus! (Hinweis: Bei Wechselstrom ist an der roten Skale abzulesen!)
- Berechnen Sie die Induktivität  $L$  der Spule!
- Bestimmen Sie den ohmschen Widerstand  $R$ , und entscheiden Sie, ob dieser gegenüber dem induktiven Widerstand  $X_L$  vernachlässigbar klein ist!
- Erläutern Sie die physikalische Bedeutung der von Ihnen für die Spule ermittelten Induktivität  $L$ !

### Zeitlicher Nachlauf der Stromstärke hinter der Spannung in Spulen

Bild 55/1 zeigt den zeitlichen Nachlauf der Stromstärke-Zeit-Kurve hinter der Spannung-Zeit-Kurve für Spulen.

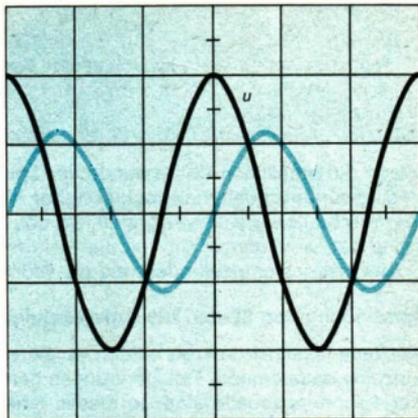


Bild 55/1 Bei Spulen erreicht die Stromstärke ihren Höchstwert später als die Spannung.

Daraus erkennen wir:

► **Bei einer Spule bleibt die Stromstärke hinter der Spannung zurück.**

Bei einer Spule mit vernachlässigbar kleinem ohmschem Widerstand beträgt die zeitliche Verschiebung zwischen Spannung und Stromstärke ein Viertel der Periodendauer.

Die Stromstärke kann in der Spule auf Grund der Selbstinduktion immer erst dann ihren Höchstwert erreichen, wenn die Induktionsspannung bereits wieder auf Null abgeklungen ist.

### Energieumwandlung in Spulen

Aus dem Bild 52/2 wird die Energieumwandlung in einem Stromkreis mit einer Spule deutlich. Beim Aufbau des Magnetfeldes nimmt die Spule elektrische Energie aus der Spannungsquelle auf. Diese Energie wird als magnetische Energie gespeichert. Beim Abbau des Magnetfeldes gibt die Spule die magnetische Energie infolge der Selbstinduktion wieder als elektrische Energie an die Spannungsquelle zurück.

- 1 Berechnen Sie den induktiven Widerstand  $X_L$  einer Spule mit einer Induktivität von 200 mH bei einer Frequenz des Wechselstromes von a) 50 Hz und b) 10 MHz!
- 2 Eine Spule ( $L = 4$  H) mit vernachlässigbar kleinem ohmschen Widerstand wird an die Netzspannung angeschlossen. Wie groß ist die Stromstärke?
- 3 Warum kann auf Spulen nur deren Induktivität, nicht aber deren induktiver Widerstand angegeben werden?
- 4 Erklären Sie mit Hilfe des Induktionsgesetzes die Proportionalität  $X_L \sim f$ !
- 5 Planen Sie Experimente, mit denen die Proportionalitäten  $X_L \sim f$  und  $X_L \sim L$  bestätigt werden können!
- 6 Interpretieren Sie die Gleichung  $X_L = 2\pi \cdot f \cdot L$ !

▶ In einem Stromkreis mit einer Spule schwingt die Energie zwischen der Spannungsquelle und dem Magnetfeld der Spule hin und her.

$E_{el}$  ↔  $E_{magn. \text{ Feld}}$   
 Spannungsquelle ↔ Spule

Wenn die ohmschen Widerstände der Spule und der Verbindungsleiter zwischen Spule und Spannungsquelle vernachlässigbar klein sind, dann wird nahezu keine Energie in thermische Energie umgewandelt. Da aber jede Spule einen gewissen ohmschen Widerstand hat, wird immer ein Teil der elektrischen Energie auch in thermische Energie des Spulendrahtes umgewandelt und als Wärme abgegeben. ①

### Anwendung von Spulen als Drosselspulen

Aus dem Gleichstromkreis wissen wir bereits: In vielen elektrischen Anlagen werden für einzelne Bauelemente Teilspannungen benötigt, die niedriger als die Klemmenspannung der Spannungsquelle sind. In diesen Fällen wird dem Bauelement ein Vorwiderstand vorgeschaltet (Bild 56/1a). Im Wechselstromkreis kann als Vorwiderstand eine Spule vorgeschaltet werden (Bild 56/1b).

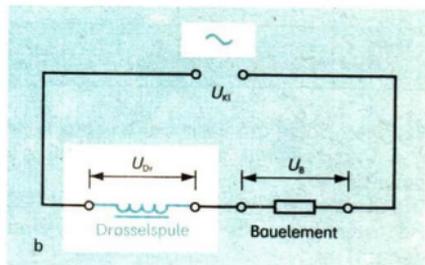
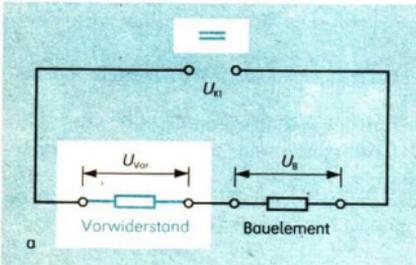


Bild 56/1 Im Gleichstromkreis (a) werden Spannung und Stromstärke durch den ohmschen Widerstand eines Vorwiderstandes, im Wechselstromkreis (b) durch den induktiven Widerstand einer Drosselspule reguliert.

Durch die Reihenschaltung des Bauelementes mit der Spule liegt an dem Bauelement nicht mehr die gesamte Klemmenspannung  $U_{Kl}$ , sondern nur noch die kleinere Teilspannung  $U_B$  an. Dadurch wird der durch das Bauelement fließende Strom verkleinert („gedrosselt“). Spulen mit dieser Aufgabe heißen *Drosselspulen*. Drosselspulen haben gegenüber Vorwiderständen den Vorteil, daß nahezu keine elektrische Energie nutzlos in thermische Energie umgewandelt wird. ② ③ ④

### Die Kapazität von Kondensatoren

Kondensatoren sind in sehr vielen Wechselstromkreisen enthalten (Bilder 57/1, 2). ⑤ Kondensatoren sind in der Elektrotechnik deshalb so wichtig, weil in den Platten eines Kondensators elektrische Ladungen gespeichert werden können. Diese Eigenschaft eines jeden Kondensators heißt

**Kapazität C.**

▶ Die Kapazität  $C$  eines Kondensators gibt dessen Speichermöglichkeit für elektrische Ladungen an.

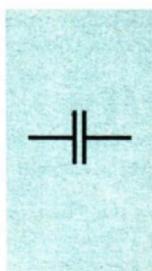
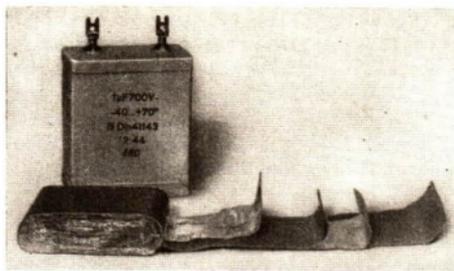
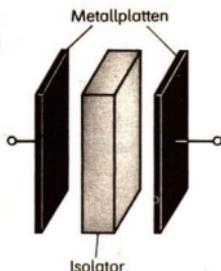


Bild 57/1 Kondensatoren bestehen meistens aus zwei Platten, die durch einen dazwischen befindlichen isolierenden Stoff voneinander getrennt sind. Ein Wickelkondensator besteht aus zwei Aluminiumfolien, die durch dünnes Ölpapier isoliert sind. Die Streifen werden aufgewickelt und in einem Metallgehäuse untergebracht.

Bild 57/2 Schaltzeichen für Kondensatoren

Die Kapazität eines Kondensators ist allein durch dessen Bau bestimmt. Zum Beispiel ist sie um so größer, je größer die Plattenfläche ist. Außerdem wird die Kapazität durch die Eigenschaften des Isolators und durch den Plattenabstand bestimmt.

Wieviel elektrische Ladung in einem Kondensator gespeichert werden kann, hängt nicht nur von der Kapazität des Kondensators, sondern auch von der Spannung ab, bei der der Kondensator geladen wird.

Je größer die Spannung ist, desto mehr elektrische Ladung kann gespeichert werden. Bei Überschreiten einer höchstzulässigen Spannung wird der Isolator zwischen den Platten und damit der Kondensator zerstört.

Die Einheit der Kapazität ist

**ein Farad (1 F).**

Mit dieser Einheit werden die wissenschaftlichen Leistungen des englischen Physikers Faraday geehrt.

- ① Erläutern Sie, warum von einer Spule mit vernachlässigbar kleinem ohmschen Widerstand im zeitlichen Mittel keine Energie aus der Spannungsquelle entnommen wird!
- ② Eine Lampe (6 V, 25 W) soll an eine Gleichspannung von 220 V angeschlossen werden. Berechnen Sie den dazu erforderlichen Vorwiderstand!
- ③ Berechnen Sie die elektrische Energie, die bei einer einstündigen Benutzung der Lampe in Aufgabe 2
  - a) zur Erzeugung des Lichtes in der Lampe und
  - b) zur nutzlosen Erwärmung des Vorwiderstandes erforderlich ist!
- ④ Im Bild 57/3 ist die vereinfachte Schaltung eines Rasierapparates dargestellt, der sowohl an 110 V als auch an 220 V angeschlossen werden kann. Welche der zwei Schalterstellungen 1 oder 2 entspricht dem Anschluß an 220 V? Warum?

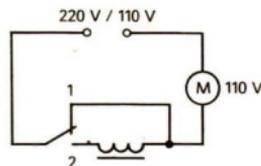


Bild 57/3

- ⑤ Im Bild 57/1b sind zwei Ölbandstreifen zu erkennen. Warum ist ein zweiter Ölbandstreifen erforderlich?

- Ein Kondensator hat eine Kapazität von 1 F, wenn bei einer Spannung von 1 V eine elektrische Ladung von 1 C ( $1 \text{ A} \cdot \text{s}$ ) gespeichert werden kann. Es gilt:

$$1 \text{ F} = \frac{1 \text{ C}}{1 \text{ V}} = 1 \frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{V}}$$

Ein Farad ist eine sehr große Einheit, deshalb benutzt man Teile der Einheit: ein Mikrofarad ( $1 \mu\text{F}$ ), ein Nanofarad ( $1 \text{ nF}$ ) und ein Picofarad ( $1 \text{ pF}$ ).

In der Technik vorkommende Kapazitäten

Elektrolytkondensatoren	0,5 $\mu\text{F}$ bis 10000 $\mu\text{F}$
Wickelkondensatoren	0,1 $\mu\text{F}$ bis 32 $\mu\text{F}$
Keramikkondensatoren	0,2 pF bis 50 nF
Drehkondensatoren	einige pF bis 500 pF

### Kapazitiver Widerstand eines Kondensators

**Physikalische Ursachen des kapazitiven Widerstandes.** In dem folgenden Experiment untersuchen wir die Frage: Wie verhält sich ein Kondensator in einem Gleichstromkreis und wie in einem Wechselstromkreis?

23

- Wir schließen den Stromkreis nach Bild 58/1 zunächst an eine Gleichspannung und anschließend an eine Wechselspannung an.

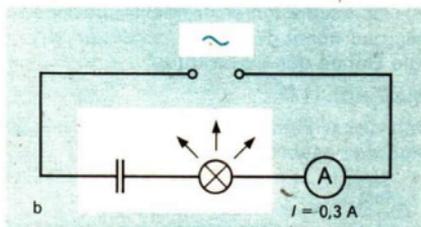
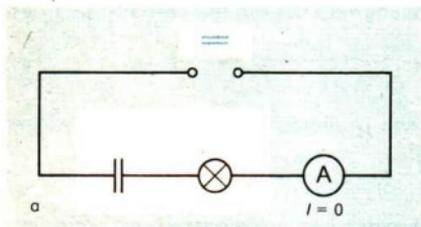


Bild 58/1 Experimentieranordnung

Aus den Beobachtungen erkennen wir:

- Im Gleichstromkreis wird der Stromfluß durch einen Kondensator unterbrochen. Im Wechselstromkreis wird der Stromfluß nicht unterbrochen.

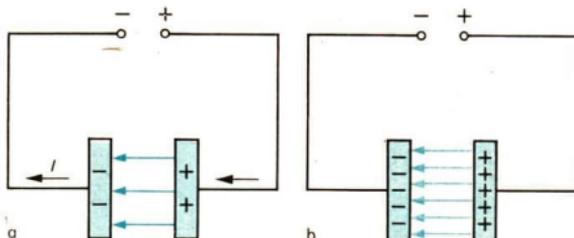
Für den elektrischen Widerstand eines Kondensators bedeutet das:

<b>Wechselstromkreis</b> Im Wechselstromkreis hat der elektrische Widerstand $R_{\omega}$ eines Kondensators einen endlichen Wert.	<b>Gleichstromkreis</b> Im Gleichstromkreis ist der elektrische Widerstand $R_{\infty}$ eines Kondensators nahezu unendlich groß.
Es gilt: $R_{\omega} \ll R_{\infty}$	

Die Erklärung hierfür besteht in folgendem: Beim Anlegen einer *Gleichspannung* an einen Kondensator fließt kurzzeitig ein Ladestrom (Bild 59/1a). Durch den Ladestrom entsteht auf der einen Platte ein Elektronenüberschuß und auf der anderen ein Elektronenmangel. Infolgedessen entsteht zwischen den Platten ein elektrisches Feld. Wenn die Platten aufgeladen sind, fließt kein weiterer Strom (Bild 59/1b).

Bild 59/1 a) Der Ladestrom fließt so lange, bis der Kondensator aufgeladen ist.

Bild 59/1 b) Wenn der Kondensator aufgeladen ist, fließt im Gleichstromkreis kein Strom mehr. Das elektrische Feld zwischen den Platten bleibt bestehen.



Das heißt:

**In einem Gleichstromkreis mit einem Kondensator fließt außer einem kurzzeitigen Ladestrom kein Strom.**

In einem *Wechselstromkreis* wird dagegen ein Kondensator im ständigen Wechsel aufgeladen, entladen, umgekehrt aufgeladen, entladen usw. (Bild 59/2).

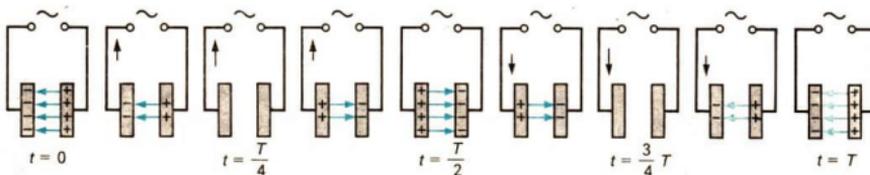


Bild 59/2 Wenn sich die Polarität der Spannungsquelle ändert, wird der Kondensator entladen und anschließend umgekehrt aufgeladen.

Die Ursache hierfür ist das ständige Wechseln der Polarität der Spannungsquelle. Obwohl der Wechselstrom nicht durch die Isolation zwischen den Platten hindurchfließen kann, führen die Elektronen an jeder Stelle des Stromkreises Schwingungen aus.

Das heißt:

**In einem Wechselstromkreis mit einem Kondensator fließt ständig ein Wechselstrom.**

Die Stromstärke des Wechselstroms wird durch die Kapazität des Kondensators begrenzt. Das heißt: Jeder Kondensator wirkt im Wechselstromkreis wie ein Widerstand. Diesen elektrischen Widerstand nennt man

**kapazitiven Widerstand  $X_C$ .**

► **Der kapazitive Widerstand  $X_C$  eines Kondensators entsteht durch die begrenzte Aufnahmefähigkeit des Kondensators für elektrische Ladungen.**

① Erläutern Sie das Zustandekommen des kapazitiven Widerstandes eines Kondensators!

Wenn die Kapazität des Kondensators groß ist, dann kann ein größerer Ladestrom und anschließend auch ein größerer Entladestrom fließen, als wenn die Kapazität des Kondensators kleiner ist.

**Gleichung zur Berechnung des kapazitiven Widerstandes  $X_C$ .** Der kapazitive Widerstand eines Kondensators ist nicht nur von der Kapazität des Kondensators, sondern auch von der Frequenz des Wechselstromes abhängig. Physikalische Untersuchungen haben ergeben:

Der kapazitive Widerstand  $X_C$  eines Kondensators wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}$$

Darin bedeuten:

$f$ : Frequenz des Wechselstroms in Hz ( $s^{-1}$ ).

$C$ : Kapazität des Kondensators in F ( $\frac{A \cdot s}{V}$ ).

Hieraus folgt: Ein und derselbe Kondensator hat für zwei Wechselströme mit verschiedenen Frequenzen jeweils unterschiedlich große kapazitive Widerstände.

- Ein Kondensator mit einer Kapazität von  $4 \mu\text{F}$  wird zuerst in einen Wechselstromkreis mit einer Frequenz von 50 Hz und anschließend in einen Stromkreis mit einer Frequenz von 500 Hz eingeschaltet. Wie groß ist der kapazitive Widerstand des Kondensators?

*Analyse* (für den Stromkreis mit der Frequenz von 50 Hz):

Gesucht:  $X_C$

Gegeben:  $C = 4 \mu\text{F} = 4 \cdot 10^{-6} \frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{V}}$

$f = 50 \text{ Hz}$

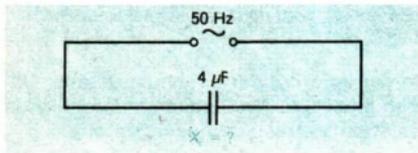


Bild 60/1

*Lösung:*

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}$$

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \text{ s}^{-1} \cdot 4 \cdot 10^{-6} \frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{V}}}$$

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 4} \cdot 10^6 \frac{\text{V}}{\text{A}}$$

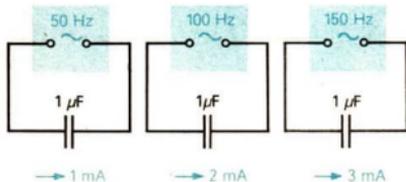
$$\underline{\underline{X_C = 800 \Omega}}$$

Für den Stromkreis mit der Frequenz  $f = 500 \text{ Hz}$  ergibt sich nach der gleichen Berechnung  $X_C = 80 \Omega$ .

*Ergebnis:* Der Kondensator hat bei diesen Frequenzen der Wechselströme einen kapazitiven Widerstand von  $800 \Omega$  bzw. von  $80 \Omega$ . ① ②

**Schlußfolgerungen aus der Gleichung für den kapazitiven Widerstand.** Wir untersuchen die folgenden zwei Fälle:

**Wir ändern die Frequenz  $f$**   
( $C$  bleibt konstant)

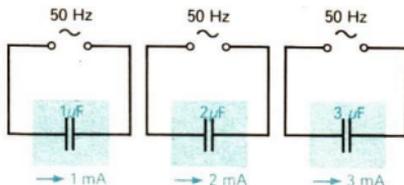


Es gilt:

$$X_C \sim \frac{1}{f} \quad (\text{für } C = \text{konstant})$$

■ Bei Erhöhung der Frequenz  $f$  des Wechselstromes wird der kapazitive Widerstand  $X_C$  eines Kondensators kleiner.

**Wir ändern die Kapazität  $C$**   
( $f$  bleibt konstant)



Es gilt:

$$X_C \sim \frac{1}{C} \quad (\text{für } f = \text{konstant})$$

■ Bei Vergrößerung der Kapazität  $C$  eines veränderbaren Kondensators oder durch Austausch eines Kondensators gegen einen anderen mit einer größeren Kapazität wird der kapazitive Widerstand  $X_C$  kleiner.

26

### Aufgabe

Bestimmen Sie die Kapazität  $C$  eines Kondensators!

3 4 5 6

### Vorbereitung

- Leiten Sie aus den Gleichungen  $X_C = \frac{U}{I}$  und  $X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}$  eine Gleichung für die Bestimmung der Kapazität  $C$  eines Kondensators her!
- Zeichnen Sie den Schaltplan des Stromkreises mit den entsprechenden Meßgeräten!

### Durchführung und Auswertung

- Bauen Sie den Stromkreis auf, und führen Sie die Messungen durch!
- Berechnen Sie die Kapazität  $C$  des Kondensators!
- Vergleichen Sie die von Ihnen bestimmte Kapazität mit der auf dem Kondensator angegebenen Kapazität! Wodurch kann der Unterschied bedingt sein?

- Berechnen Sie den kapazitiven Widerstand  $X_C$  eines Kondensators mit einer Kapazität von 500 pF bei einer Frequenz  $f$  des Wechselstromes von a) 50 Hz und b) 8 MHz!
- Ein Kondensator ( $C = 0,5 \mu\text{F}$ ) wird an die Netzspannung angeschlossen. Wie groß ist die Stromstärke?
- Warum kann auf Kondensatoren nur deren Kapazität, nicht aber deren kapazitiver Widerstand angegeben werden?
- Erläutern Sie die physikalischen Zusammenhänge, die zu den indirekten Proportionalitäten  $X_C \sim 1/f$  und  $X_C \sim 1/C$  führen!
- Planen Sie Experimente, mit denen die indirekten Proportionalitäten  $X_C \sim 1/f$  und  $X_C \sim 1/C$  bestätigt werden können!
- Interpretieren Sie die Gleichung  $X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}$ !

## Zeitlicher Verlauf der Stromstärke vor der Spannung in Kondensatoren

Bild 62/1 zeigt den zeitlichen Verlauf der Spannung-Zeit-Kurve vor der Stromstärke-Zeit-Kurve für Kondensatoren.

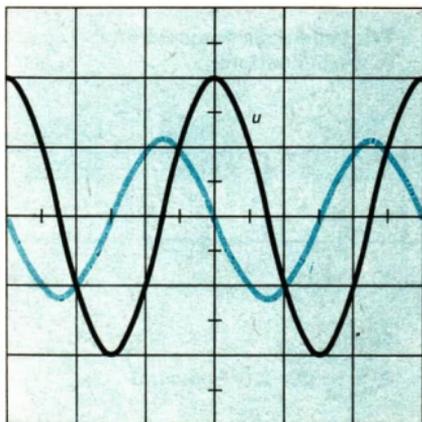


Bild 62/1 Bei Kondensatoren erreicht die Stromstärke ihren Höchstwert früher als die Spannung.

Daraus erkennen wir:

► Bei einem Kondensator eilt die Stromstärke der Spannung voraus.

Die Spannung am Kondensator erreicht erst dann ihren Höchstwert, wenn der Kondensator vollständig aufgeladen ist. Dann fließt aber kein Ladestrom mehr. Die zeitliche Verschiebung zwischen Stromstärke und Spannung beträgt bei einem Kondensator ohne ohmschen Widerstand ein Viertel der Periodendauer.

## Energieumwandlung in Kondensatoren

Auch beim Kondensator ist die zeitliche Verschiebung zwischen Spannung und Stromstärke von großer Bedeutung für die Energieumwandlung. Aus dem Bild 59/2 wird die Energieumwandlung in einem Stromkreis mit einem Kondensator deutlich: Beim Entladen des Kondensators gibt der Kondensator die zuvor von der Spannungsquelle erhaltene und in seinem elektrischen Feld gespeicherte Energie an die Spannungsquelle zurück. Beim erneuten Aufladen des Kondensators wird von diesem wieder elektrische Energie aus der Spannungsquelle entnommen und in dessen elektrisches Feld gespeichert. Das heißt:

► In einem Wechselstromkreis mit einem Kondensator schwingt die Energie zwischen der Spannungsquelle und dem elektrischen Feld des Kondensators hin und her.

$E_{\text{el}}$  Spannungsquelle  $\longleftrightarrow$   $E_{\text{el. Feld}}$  Kondensator

Da jeder Kondensator außer dem kapazitiven Widerstand auch einen ohmschen Widerstand hat, wird immer ein Teil der elektrischen Energie in thermische Energie des Kondensators umgewandelt und als Wärme an die Umgebung abgegeben. ①

## Anwendung von Kondensatoren

**Glättung von pulsierendem Gleichstrom.** Halbleiterdioden können als Gleichrichter verwendet werden (Bild 63/1a), dabei entsteht pulsierender Gleichstrom (Bild 63/1b). Durch Hinzuschalten eines Kondensators (Bild 63/1c) wird der pulsierende Gleichstrom geglättet (Bild 63/1d).

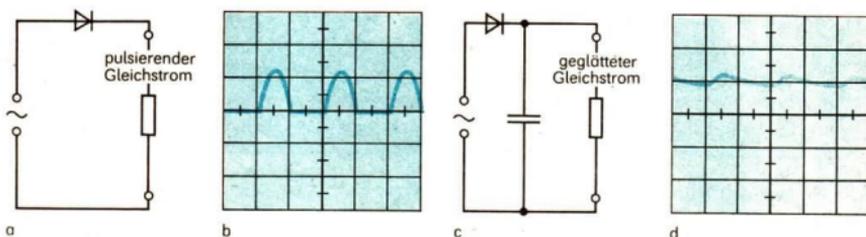


Bild 63/1 a) Schaltplan für Gleichrichtung von Wechselstrom zu pulsierendem Gleichstrom  
b) Oszillographenbild von pulsierendem Gleichstrom  
c) Schaltplan für Gleichrichtung von Wechselstrom zu geglättetem Gleichstrom  
d) Oszillographenbild von geglättetem Gleichstrom

Aus Bild 63/2 wird deutlich:

Ein Teil des Stromes, der während der ersten halben Periodendauer durch die Diode hindurchgelassen wird, fließt durch das Bauelement. Der andere Teil des Stromes lädt den Kondensator auf. Während der zweiten halben Periodendauer ist die Diode in Sperrrichtung geschaltet. In dieser Zeit beginnt sich der Kondensator zu entladen. Insgesamt fließt so durch das Bauelement ein nur noch wenig pulsierender, das heißt, ein geglätteter Strom.

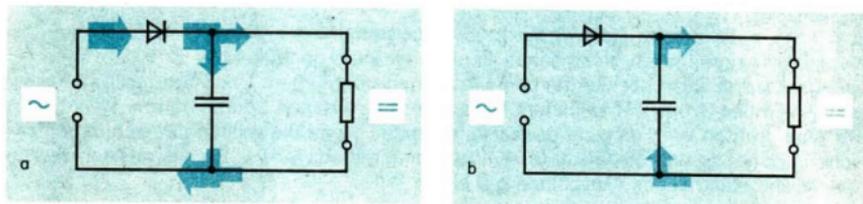


Bild 63/2 Stromfluß bei Gleichrichtern mit Diode und Kondensator a) für die erste und b) für die zweite halbe Periodendauer

**Trennung von Gleich- und Wechselstrom.** Will man nach der Glättung des pulsierenden Gleichstroms den noch verbleibenden Wechselstromanteil weiter verringern, dann schaltet man in den Stromkreis nach Bild 63/1c noch eine Spule vor den Widerstand. Infolge ihrer Induktivität glättet sie den Strom weiter.

Will man jedoch den Wechselstromanteil eines pulsierenden Gleichstroms nutzen, dann schaltet man einen Kondensator in den Stromkreis. Er sperrt den Gleichstrom. Das erfolgt zum Beispiel im Schaltplan des einfachen Rundfunkempfängers im Bild 86/1.

① Erläutern Sie, warum von einem Kondensator mit vernachlässigbar kleinem ohmschen Widerstand im zeitlichen Mittel keine Energie aus der Spannungsquelle entnommen wird!

## Leistung im Wechselstromkreis

Im Wechselstromkreis kann man für jeden Zeitpunkt die Augenblicksleistung aus der Spannung und der Stromstärke berechnen. Praktisch interessiert aber nur die im zeitlichen Mittel von einem Bauelement umgewandelte Energie. Hierfür nutzt man den Begriff

### Wirkleistung $P_W$ .

Die Wirkleistung  $P_W$  eines Bauelements gibt an, wieviel elektrische Energie von diesem Bauelement in einer Sekunde in andere Energieformen umgewandelt und an die Umgebung abgegeben wird.

Die Einheit der Wirkleistung ist ein Watt (1 W).

Bei Bauelementen im Wechselstromkreis kann man auch eine *Scheinleistung*  $P_S$  angeben. Diese Scheinleistung eines Bauelements gibt an, wieviel elektrische Energie von diesem Bauelement in einer Sekunde aus der Spannungsquelle entnommen wird, wobei Kondensatoren und Spulen allerdings einen Teil dieser Energie wieder an die Spannungsquelle zurückgeben. Dadurch kommt es in den Zuleitungen zu Motoren oder anderen Maschinen zu einer Erhöhung der Stromstärke.

Die Wirkleistung ist meist kleiner als die Scheinleistung ( $P_W < P_S$ ). Die Wirkleistung  $P_W$  hängt von der Spannung, von der Stromstärke und von der zeitlichen Verschiebung zwischen Spannung und Stromstärke ab.

Die Wirkleistung  $P_W$  wird nach der Gleichung berechnet:  
$$P_W = U \cdot I \cdot \cos \varphi.$$

Der Faktor  $\cos \varphi$  heißt *Leistungsfaktor*. Der Leistungsfaktor gibt an, welcher Anteil der dem Gerät zugeführten elektrischen Energie wirklich genutzt wird. Er ist auf dem Leistungsschild elektrischer Geräte und Maschinen angegeben. Der Leistungsfaktor  $\cos \varphi$  hängt von der Größe der zeitlichen Verschiebung zwischen Spannung und Stromstärke ab. Den größten Wert erreicht der Leistungsfaktor, wenn die zeitliche Verschiebung zwischen Spannung und Stromstärke Null ist. Dann gilt  $\cos \varphi = 1$ . Für die meisten Bauelemente und elektrischen Maschinen gilt  $\cos \varphi < 1$ .

## Rationelle Übertragung elektrischer Energie durch Wechselströme

Die rationelle Nutzung der von den Kraftwerken bereitgestellten elektrischen Energie erfordert nicht nur eine rationelle Nutzung der Energie in Industrie, Verkehr, Landwirtschaft und Haushalt, sondern auch eine möglichst verlustarme Übertragung der elektrischen Energie von den Kraftwerken zu den Energieabnehmern. Hierzu dienen bei Wechselströmen vor allem zwei Maßnahmen:

Die Übertragung elektrischer Energie erfolgt bei hohen Spannungen und damit bei kleinen Stromstärken. Dies wird mit Hilfe von Transformatoren erreicht.

Die Übertragung elektrischer Energie erfolgt bei einer möglichst kleinen zeitlichen Verschiebung zwischen Spannung und Stromstärke.

Die meisten elektrischen Maschinen und alle Motoren enthalten Spulen. Deshalb erreicht die Stromstärke  $i_{\max}$  später als die Spannung  $u_{\max}$  ihren Größtwert. Um das zu vermeiden, werden zu elektrischen Maschinen und Geräten, wie Motoren und Leuchtstofflampen mit Drosselspulen, häufig Kondensatoren parallel geschaltet.

## Zusammenfassung

Ohmsche Bauelemente	Spulen	Kondensatoren
<i>Elektrischer Widerstand im Gleich- und Wechselstromkreis</i>		
$R_{\sim} = R_{\sim}$	$R_{\sim} > R_{\sim}$	$R_{\sim} \ll R_{\sim}$
<i>Arten und Ursachen des elektrischen Widerstandes</i>		
Durch Wechselwirkung zwischen Elektronen und Metall-Ionen entsteht der ohmsche Widerstand $R$ .	Durch die Selbstinduktion in der Spule entsteht der induktive Widerstand $X_L$ .	Durch die begrenzte Aufnahmefähigkeit des Kondensators für elektrische Ladungen entsteht der kapazitive Widerstand $X_C$ .
<i>Experimentelle Bestimmung der Widerstände</i>		
$R = \frac{U}{I}$	$X_L = \frac{U}{I}$ (wenn $R \ll X_L$ )	$X_C = \frac{U}{I}$
<i>Berechnung der Widerstände</i>		
$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$	$X_L = 2\pi \cdot f \cdot L$	$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}$
<i>Zeitlicher Verlauf von Spannung und Stromstärke</i>		
Spannung und Stromstärke verlaufen zeitgleich	Stromstärke eilt der Spannung hinterher	Stromstärke eilt der Spannung voraus
<i>Energieumwandlungen</i>		
$E_{\text{el}} \longrightarrow E_{\text{th}}$ Spannungsquelle Bauelement Der Spannungsquelle wird Energie entnommen.	$E_{\text{el}} \longleftrightarrow E_{\text{magn. Feld}}$ Spannungsquelle Spule Der Spannungsquelle wird keine Energie entnommen.	$E_{\text{el}} \longleftrightarrow E_{\text{el. Feld}}$ Spannungsquelle Kondensator Der Spannungsquelle wird keine Energie entnommen.

- ① Entnehmen Sie dem Leistungsschild einiger elektrischer Maschinen in der produktiven Arbeit die Antworten auf folgende Fragen:
- Wird die Wirk- oder die Scheinleistung angegeben?
  - Wie groß ist der Leistungsfaktor?

In der Kommandokabine eines Raumfahrzeuges sind u. a. UKW-Sprechfunkgeräte und Geräte zur Bestimmung des Standortes und zur Steuerung der automatischen Ankopplung installiert. Ihre Wirkungsweise beruht auf der Verwendung elektrischer Schwingungen mit Frequenzen zwischen etwa 10 kHz und 100 MHz. Wie kann man elektrische Schwingungen mit derartig hohen Frequenzen erzeugen?



### Aufbau und Wirkungsweise eines Schwingkreises

Elektrische Schwingungen hoher Frequenzen werden in einem Stromkreis erzeugt, dessen wesentliche Bestandteile Kondensator und Spule sind. Man bezeichnet solch einen Stromkreis als geschlossenen Schwingkreis (Bild 66/2).

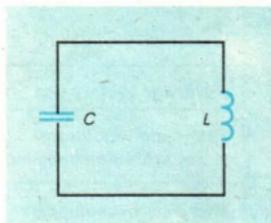


Bild 66/2 Schaltplan eines Schwingkreises

Ein geschlossener Schwingkreis besteht aus Kondensator und Spule.

Das folgende Experiment ermöglicht die Beobachtung elektrischer Schwingungen.

25  
 ▽ In der Schaltung gemäß Bild 66/3 wird bei Schalterstellung 1 der Kondensator aufgeladen, bei Schalterstellung 2 entladen.

Wir erwarten einen raschen Ladungsausgleich über die Spule. Statt dessen ist auf dem Bildschirm des Oszillographen eine Sinuskurve zu beobachten. Folglich fließt im Stromkreis mit Kondensator und Spule ein sinusförmiger Strom (Bild 67/1). Damit wird die Bezeichnung „Schwingkreis“ verständlich. ①

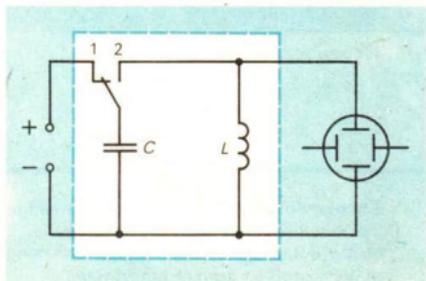


Bild 66/3 Schaltung zum Nachweis von elektrischen Schwingungen

Wie kann man die Wirkungsweise des Schwingkreises erklären?

Der geladene Kondensator entlädt sich über die Spule. Die Entladestromstärke nimmt wegen der Selbstinduktion der Spule (Lenz'sches Gesetz) mit Verzögerung zu; dabei wird in der Spule ein Magnetfeld aufgebaut.

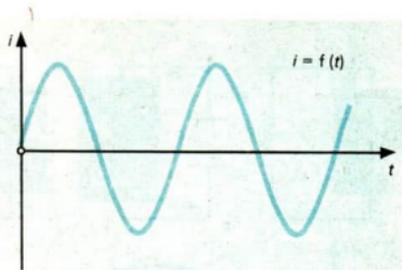


Bild 67/1 Sinusförmiger Strom im Schwingkreis

Ist der Kondensator entladen, so bewirkt die Selbstinduktion der Spule ein Weiterfließen des Stromes in gleicher Richtung. Man kann auch sagen, das sich abschwächende Magnetfeld induziert einen Strom, der in gleicher Richtung wie der Entladestrom fließt. Dadurch wird der Kondensator wieder geladen, wobei die Platten nun umgekehrt gepolt sind. Bei Abschluß dieses Vorganges ist das Magnetfeld der Spule abgebaut.

Diese Entlade-, Induktions- und Ladevorgänge verlaufen in entgegengesetzter Richtung und wiederholen sich dann periodisch. Da die Vorgänge im Schwingkreis durch das Zusammenwirken des elektrischen Feldes im Kondensator und des magnetischen Feldes der Spule zustande kommen, bezeichnet man diese Schwingungen als *elektromagnetische Schwingungen*. (2) (3)

► **In einem angeregten Schwingkreis treten ständig Umlade- und Induktionsvorgänge auf. Dabei ändern sich Spannung und Stromstärke periodisch. Man nennt diese Vorgänge elektromagnetische Schwingungen.**

### Energieumwandlungen in einem Schwingkreis

Wir wissen, daß das elektrische Feld eines Kondensators Träger von elektrischer Energie ist und das magnetische Feld einer Spule Träger von magnetischer Energie. Der periodische Auf- und Abbau dieser Felder ist mit ständigen Energieumwandlungen verbunden.

Wir wollen diese Energieumwandlungen im Schwingkreis über eine Periodendauer genau betrachten, also von  $t = 0$  bis  $t = T$  (Bild 68/1).

Zur Zeit  $t = 0$  ist dem Kondensator durch Aufladung Energie zugeführt worden. Die gesamte Energie im Schwingkreis ist Energie des elektrischen Feldes,  $E_{\text{ges}} = E_{\text{el}}$ . Die Spannung am Kondensator hat einen Maximalwert, die Stromstärke ist Null.

Zur Zeit  $t = T/4$  ist der Kondensator vollständig entladen, das elektrische Feld abgebaut. Die gesamte Energie im Schwingkreis ist Energie des magnetischen Feldes,  $E_{\text{ges}} = E_{\text{mog}}$ . Die Spannung am Kondensator ist Null, die Stromstärke hat ihren maximalen Wert erreicht.

- 
- ① Beschreiben Sie den zeitlichen Verlauf der Stromstärke bei einer elektrischen Schwingung entsprechend Bild 67/1!
  - ② Beschreiben Sie den Aufbau und erklären Sie die Wirkungsweise eines Schwingkreises! Wenden Sie dabei das Induktionsgesetz und das Lenzsche Gesetz an!
  - ③ Erläutern Sie den Begriff „elektromagnetische Schwingung“!

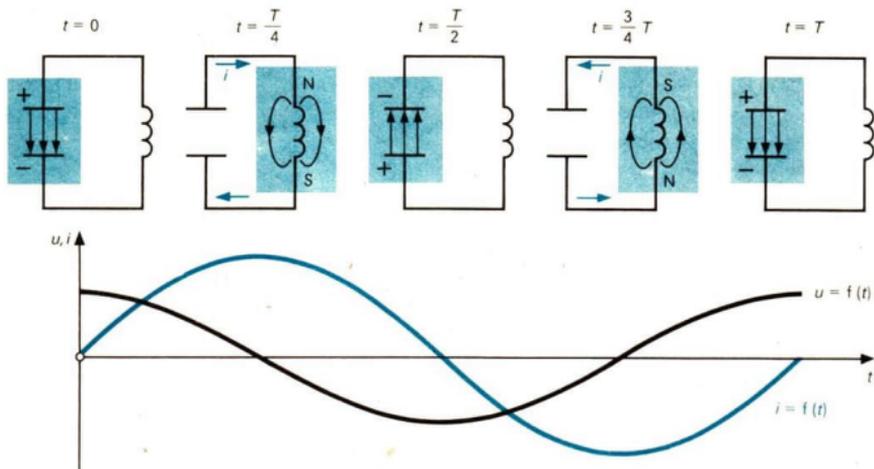


Bild 68/1 Periodische Änderungen von Feldenergien sowie Spannung und Stromstärke im Schwingkreis

Zur Zeit  $t = T/2$  ist der Kondensator entgegengesetzt aufgeladen. Die gesamte Energie im Schwingkreis ist Energie des elektrischen Feldes,  $E_{\text{ges}} = E_{\text{el}}$ . Die Spannung hat infolge der vollzogenen Umwandlung einen maximalen Wert mit entgegengesetztem Vorzeichen erreicht. Die Stromstärke ist Null.

Diese Vorgänge wiederholen sich danach in gleicher Weise, jedoch in entgegengesetzter Richtung. Damit ist der Ausgangszustand wieder erreicht, und der Ablauf beginnt von neuem.

Unter der Voraussetzung, daß sich im Schwingkreis nur elektrische und magnetische Feldenergie ineinander umwandeln, gilt im Schwingkreis der Satz von der Erhaltung der Energie in der Form:  $E_{\text{el}} + E_{\text{mag}} = E_{\text{ges}} = \text{konst.}$  ① ②

Im Schwingkreis wandeln sich elektrische und magnetische Feldenergie zeitlich periodisch ineinander um. Die Summe der elektrischen und magnetischen Energie ist konstant.

**Gedämpfte elektromagnetische Schwingungen.** Wir wiederholen das Experiment nach Bild 66/3 und vergleichen mehrere aufeinanderfolgende Amplituden. Sie nehmen mit der Zeit ab. Dieser zeitliche Verlauf der Spannung am Kondensator ist charakteristisch für eine gedämpfte Schwingung (Bild 68/2).

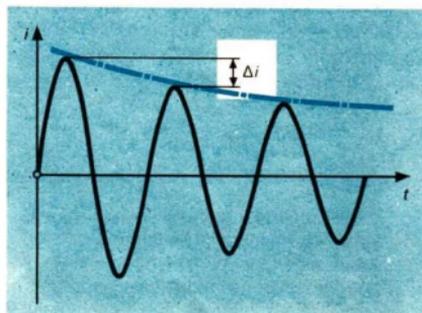


Bild 68/2 Gedämpfte Schwingungen

Wir erinnern uns: Bei mechanischen Schwingungen wird die Dämpfung durch die allmähliche Abnahme mechanischer Energie infolge der Umwandlung in thermische Energie verursacht. Auch im Schwingkreis erfolgt eine Abnahme der Summe aus elektrischer und magnetischer Energie durch Umwandlung in thermische Energie. Derartige Energieumwandlungen werden vor allem durch den stets vorhandenen ohmschen Widerstand verursacht. Weitere Energieumwandlungen treten im Eisenkern der Spule und im Isoliermaterial des Kondensators auf. ③

Die Darstellung des Stromstärke- und Spannungsverlaufs im Bild 68/1 berücksichtigt nur die Umwandlungen elektrischer und magnetischer Feldenergie ineinander. Es treten *ungedämpfte Schwingungen* auf. In Wirklichkeit sind einmalig ausgelöste elektromagnetische Schwingungen stets *gedämpft*.

► **Gedämpfte elektromagnetische Schwingungen sind dadurch gekennzeichnet, daß ihre Stromstärke- bzw. Spannungsamplituden ständig abnehmen. Ursache der Dämpfung ist die unvermeidliche Umwandlung von Feldenergie in thermische Energie.**

### Eigenfrequenz von Schwingkreisen

Für bestimmte technische Anlagen (z. B. Rundfunksender) benötigt man elektromagnetische Schwingungen bestimmter Frequenz.

Regt man einen Schwingkreis (vgl. Bild 66/3) wiederholt durch jeweils einmaliges Aufladen des Kondensators zu Schwingungen an, so führt er stets elektromagnetische Schwingungen mit der gleichen Frequenz aus. Man sagt, er schwingt jedesmal mit seiner *Eigenfrequenz*  $f_0$ . Die Eigenfrequenz wird durch die Induktivität  $L$  der Spule und die Kapazität  $C$  des Kondensators bestimmt.

Diese Schwingungen nennt man *Eigen-schwingungen* des Schwingkreises.

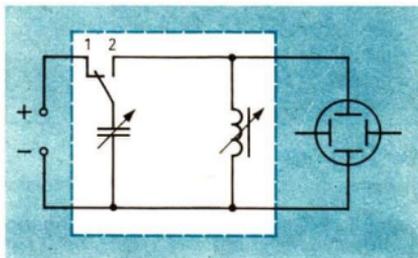


Bild 69/1 Schwingkreis mit veränderlicher Kapazität und Induktivität

Die Eigenfrequenz kann durch Ändern der Größen  $L$  und  $C$  verändert werden (Bild 69/1).

26 ▼ Im ersten Teilexperiment wird bei konstanter Induktivität die Kapazität des Kondensators verändert. Im zweiten Teilexperiment verändert man bei konstanter Kapazität die Induktivität der Spule durch Verschieben des Eisenkerns.

Ein Auszählen der einzelnen Perioden auf dem Bildschirm läßt erkennen, daß die Eigenfrequenz abnimmt, wenn Kapazität bzw. Induktivität vergrößert werden.

- ① Geben Sie die Gültigkeitsbedingung für die Beziehung  $E_{el} + E_{mag} = E_{ges} = \text{konst.}$  im Schwingkreis an!
- ② Geben Sie anhand des Bildes 68/1 den zeitlichen Zusammenhang zwischen den Zeitpunkten des stärksten elektrischen und des stärksten magnetischen Feldes an!
- ③ Was versteht man unter der Dämpfung von Schwingungen? Wovon hängt die Dämpfung elektromagnetischer Schwingungen ab? Vergleichen Sie diesen Vorgang mit der Dämpfung mechanischer Schwingungen!

**Berechnung der Periodendauer.** Jeder Eigenfrequenz  $f_0$  des Schwingkreises entspricht eine Periodendauer  $T$  ( $T = \frac{1}{f_0}$ ).

Zur Berechnung der Periodendauer der elektromagnetischen Schwingungen benutzt man die

▶ **Thomsonsche Schwingungsgleichung**  $T = 2\pi \sqrt{L \cdot C}$ .

Gültigkeitsbedingung: Der ohmsche Widerstand des Schwingkreises wird als vernachlässigbar klein gegenüber dem induktiven Widerstand angenommen.

**Interpretation der Thomsonschen Schwingungsgleichung:**

**Änderung der Induktivität  $L$**   
( $C$  bleibt konstant)

Es gilt:

$$T \sim \sqrt{L} \quad (C = \text{konst.})$$

Bei Vergrößerung der Induktivität der Spule wird die Periodendauer größer.

**Änderung der Kapazität  $C$**   
( $L$  bleibt konstant)

Es gilt:

$$T \sim \sqrt{C} \quad (L = \text{konst.})$$

Bei Vergrößerung der Kapazität des Kondensators wird die Periodendauer größer.

① ② ③

In der technischen Praxis gibt man meistens anstelle der Periodendauer  $T$  die Eigenfrequenz  $f_0$  elektromagnetischer Schwingungen an:  $f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$ .

▶ **Kapazität  $C$  und Induktivität  $L$  bestimmen die Eigenfrequenz  $f_0$  von Schwingkreisen. Es gilt die**

**Thomsonsche Schwingungsgleichung**  $T = 2\pi \sqrt{L \cdot C}$ .

④ ⑤

**Ungedämpfte elektromagnetische Schwingungen**

Für die technischen Anwendungen der elektromagnetischen Schwingungen (z. B. UKW-Sprechfunkanlagen) sind ungedämpfte Schwingungen erforderlich. Schaltungen gemäß Bild 66/3 mit einmaliger Energiezufuhr sind zur Erzeugung ungedämpfter elektromagnetischer Schwingungen nicht geeignet, weil außer der prinzipiell unvermeidbaren Dämpfung dem Schwingkreis für den jeweiligen technischen Zweck Energie entzogen werden muß.

Wie muß ein Schwingkreis erregt werden, damit er ungedämpfte Schwingungen ausführt?

Ein Schwingkreis wird mit Schwingungen unterschiedlicher Frequenzen erregt (Bild 71/1). Die Schwingungen eines Generators werden periodisch über ein sich änderndes Magnetfeld auf die Schwingkreisspule übertragen (Prinzip des Transformators).

Der Schwingkreis schwingt nicht mit seiner Eigenfrequenz, sondern mit der Frequenz des erregenden Generators! Er führt *erzwungene Schwingungen* aus. Diese Schwingungen sind ungedämpft, denn dem Kreis wird periodisch Energie durch den Generator zugeführt. Mit Veränderung der Erregerfrequenz ändert sich auch die Amplitude der erzwungenen Schwingungen.

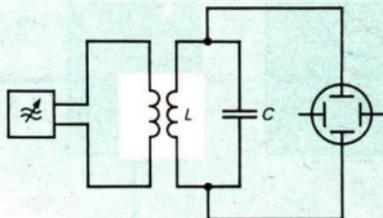


Bild 71/1 Erzeugung erzwungener Schwingungen

► Ein periodisch angeregter Schwingkreis führt erzwungene Schwingungen mit der Erregerfrequenz aus.

**Resonanz.** Die Amplituden der ungedämpften Schwingungen sind am größten, wenn die Erregerfrequenz  $f_E$  gleich der Eigenfrequenz  $f_0$  des Schwingkreises ist. Dieser Sachverhalt ist von den mechanischen Schwingungen her als Resonanz bekannt. Im Falle der Resonanz erreicht die Amplitude der Schwingungen ein Maximum. Nähert sich also die Erregerfrequenz des Generators der Eigenfrequenz des Schwingkreises, so steigt die Stromstärke im Schwingkreis und erreicht bei Übereinstimmung beider Frequenzen ein Maximum.

► Ist die Erregerfrequenz gleich der Eigenfrequenz des Schwingkreises, so liegt Resonanz vor. Die Stromstärke erreicht ein Maximum.

**Erzeugung ungedämpfter elektromagnetischer Schwingungen durch Rückkopplung.** In der Schaltung nach Bild 71/1 müssen bereits im Generator ungedämpfte Schwingungen erzeugt worden sein. Eine Schaltung, mit der ein Schwingkreis selbst die ihm zur Erzeu-

- ① Interpretieren Sie die Thomsonsche Schwingungsgleichung!
- ② Vergleichen Sie die Gleichungen für die Periodendauer von Schwingkreis, Federschwinger und Fadenpendel!
- ③ Erklären Sie, warum die Periodendauer eines Schwingkreises mit zunehmender Induktivität und Kapazität wächst!
- ④ Auf welche Weise kann man die Eigenfrequenz eines Schwingkreises halbieren?
- ⑤ Berechnen Sie die Eigenfrequenz eines Schwingkreises, dessen Spule eine Induktivität von 0,5 H und dessen Kondensator eine Kapazität von 0,1  $\mu\text{F}$  hat.
- ⑥ Nach welchem technisch-physikalischen Prinzip erfolgt die Anregung des Schwingkreises im Bild 71/1?
- ⑦ Wodurch wird die Frequenz erzwungener Schwingungen bestimmt?
- ⑧ Wie kann man bei fester Generatorfrequenz Resonanz im Schwingkreis erzielen?

gung ungedämpfter Schwingungen erforderliche Energiezufuhr im richtigen Takt steuert, heißt Rückkopplungsschaltung. Im Bild 72/1 sind die Vorgänge in einer Rückkopplungsschaltung schematisch dargestellt. ①

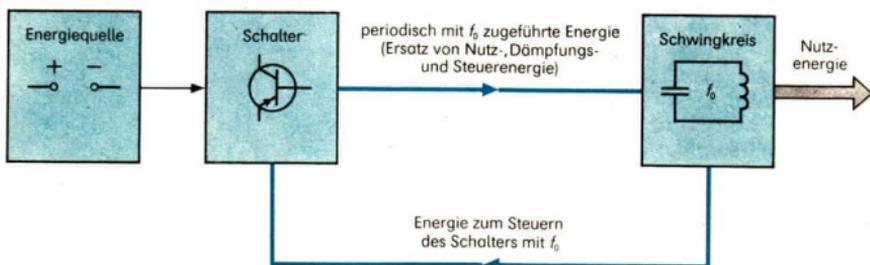


Bild 72/1 Schema einer Rückkopplungsschaltung zur Erzeugung ungedämpfter elektromagnetischer Schwingungen

### Anwendung elektromagnetischer Schwingungen

Neben den auf Seite 66 genannten Beispielen werden elektromagnetische Schwingungen vielfältig in Produktion, Technik und Medizin angewandt.

**Hochfrequenzermwärmung.** Hierbei werden z. B. Werkstücke durch elektromagnetische Schwingungen direkt erwärmt. Dabei unterscheidet man in der Technik folgende Verfahren:

- Temperaturerhöhung elektrisch leitender Werkstoffe im magnetischen Wechselfeld (induktive Erwärmung),
- Temperaturerhöhung von Isolatoren im elektrischen Wechselfeld (kapazitive Erwärmung).

Bei der induktiven Erwärmung wird das Werkstück in eine Spule gebracht, in der ein magnetisches Wechselfeld vorhanden ist. In jedem elektrischen Leiter entstehen dabei Wirbelströme, die zur Temperaturerhöhung führen. Bild 72/2 zeigt das Härten einer Welle. Nach dem Erwärmen wird die Welle durch schnelles Abkühlen abgeschreckt und dadurch gehärtet.

Bei der kapazitiven Erwärmung wird das zu erwärmende nichtleitende Material zwischen die Platten eines Kondensators mit elektrischem Wechselfeld gebracht (Bild 72/3).

Kapazitive Erwärmung wird z. B. in der Holzbearbeitungsindustrie bei der Leimtrocknung, für die Herstellung zahlreicher Gebrauchsgegenstände aus Plaste und zum Sterilisieren von Nahrungsmitteln genutzt. ②

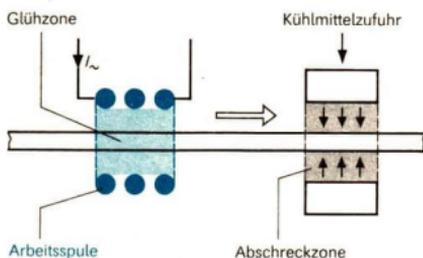


Bild 72/2 Härten einer Welle

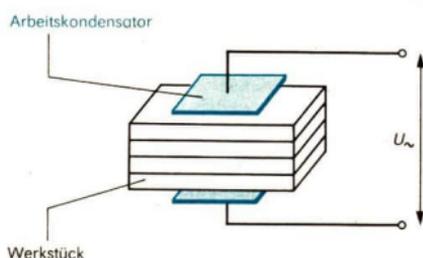


Bild 72/3 Erwärmen eines Isolators

**Medizinische Anwendungen.** Bringt man Teile des menschlichen Körpers zwischen Platten eines Schwingkreiskondensators, so erzeugt das hochfrequente elektrische Wechselfeld im Gewebe Wechselströme durch die Bewegung von Ionen. Auf diese Weise entsteht im Innern der behandelten Körperteile thermische Energie. Die Temperatur steigt, die Durchblutung wird verbessert, ohne daß die Haut von außen durch intensive Bestrahlung belastet wird. Auch diese medizinische Behandlung mit *Kurzwellen* beruht auf der kapazitiven Hochfrequenzerwärmung. ③

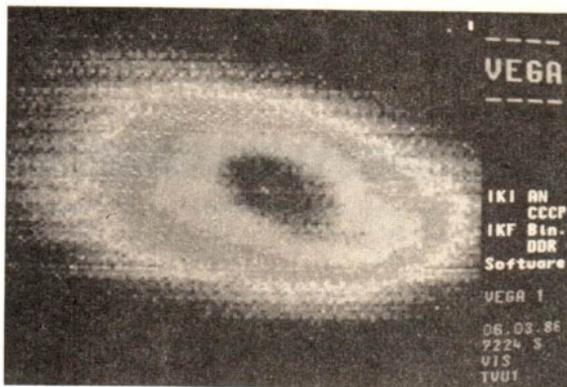
### Zusammenfassung

Zeitlich veränderliche physikalische Größen im Schwingkreis	Stromstärke und Spannung, Energie des elektrischen Feldes, Energie des magnetischen Feldes
Gesetz für Periodendauer und Frequenz elektromagnetischer Schwingungen  Gültigkeitsbedingung	$T = 2\pi \sqrt{L \cdot C}$ $f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$ Vernachlässigung des ohmschen Widerstandes
Gesetz von der Erhaltung der Energie nach einmaliger Energiezufuhr für ungedämpfte Schwingungen	$E_{\text{el}} + E_{\text{mag}} = E_{\text{ges}} = \text{konst.}$
Dämpfung	Umwandlung elektromagnetischer in thermische Energie
Frequenz erzwungener Schwingungen	Der Schwingkreis schwingt mit der Erregerfrequenz $f_E$
Resonanz von Schwingkreisen	Erregerfrequenz $f_E$ gleich Eigenfrequenz $f_0$

④ ⑤

- ① Wie kann man ungedämpfte elektromagnetische Schwingungen erzeugen?
- ② Erläutern Sie je ein Beispiel für kapazitive und induktive Hochfrequenzerwärmung!
- ③ Erläutern Sie eine Anwendung elektromagnetischer Schwingungen in der Medizin!
- ④ Planen Sie ein Experiment, das zeigt, wie sich die Eigenfrequenz eines Schwingkreises ändert, wenn die Induktivität  $L$  der Spule vergrößert wird!
- ⑤ Planen Sie ein Experiment, mit dem Sie den Nachweis erbringen, daß mit steigender Kapazität  $C$  auch die Periodendauer  $T$  zunimmt!

Alle 76 Jahre bewegt sich der Komet Halley auf seiner Bahn in großer Erdnähe um die Sonne. Im Jahre 1986 war es erstmals möglich, den Kometen Halley aus noch größerer Nähe zu fotografieren. Den sowjetischen Sonden Vega 1 und Vega 2 wurden über Funk, durch Hertzsche Wellen, die für den gezielten Vorbeiflug erforderlichen Steuerbefehle zu Bahnkorrekturen übermittelt. Die aufgenommenen Bilder wurden mit Hilfe Hertzscher Wellen zur Erde übertragen.



### Die Entdeckung der Hertzchen Wellen

Der italienische Mediziner Luigi Galvani (1737 bis 1798) bemerkte, als er 1790 Experimente mit einer Elektriziermaschine machte, daß die in der Nähe liegenden Schenkel eines seziierten Frosches zuckten, wenn Funkenentladungen stattfanden. Später stellte er fest, daß auch bei Gewitter, bei Blitzentladungen, diese Reaktion eintrat. Der Frage, wie die Energie über eine so große Entfernung vom Blitz zum Froschschenkel gelangt, ging Galvani nicht weiter nach. Erst etwa 100 Jahre später setzte man die Untersuchung dieser Erscheinung fort. Maxwell (1831 bis 1879) sagte 1852 voraus, daß sich elektrische und magnetische Felder in Form von elektromagnetischen Wellen mit Lichtgeschwindigkeit im Raum ausbreiten können. Für die experimentelle Bestätigung dieser Voraussage setzte die Berliner Akademie der Wissenschaften einen Preis aus.

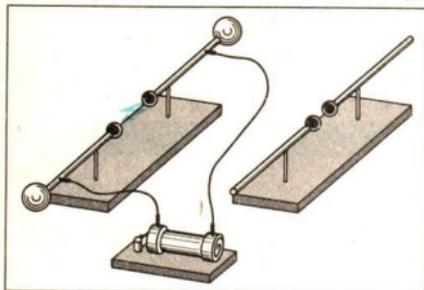


Bild 74/2 Experimentelle Anordnung von H. Hertz zur Erzeugung und zum Nachweis der nach ihm benannten elektromagnetischen Wellen mit einem Funkeninduktor und zwei Funkenstrecken



Bild 74/3 Der italienische Physiker Guglielmo Marconi in seiner Werkstatt

Diese Aufgabe wurde 1888 von dem deutschen Physiker Heinrich Hertz (1857 bis 1894) gelöst. Hertz benutzte dazu eine Anordnung, die der von Galvani noch sehr ähnlich war (Bild 74/2). Als Nachweis diente ihm jedoch kein Froschschenkel, sondern eine kleine Funkenstrecke. Immer dann, wenn er am Sender einen Funken überspringen ließ, trat auch am Empfänger ein winziger Funke auf, auch wenn Sender und Empfänger viele Meter voneinander entfernt waren. Die elektromagnetischen Wellen, die die Energie übertragen, nannte man nach ihrem Entdecker „Hertzsche“ Wellen.

Bereits 1895 gelang es dann dem russischen Physiker Alexander Popow (1859 bis 1905), mit Hertzschen Wellen Informationen über eine Entfernung von 4 km zu übertragen. Dem italienischen Physiker Guglielmo Marconi (1874 bis 1937) gelang als erstem die technisch-praktische Anwendung der Erfindung. Er schickte 1902 das erste Funktelegramm über den Atlantischen Ozean (Bild 74/3).

### Anwendung Hertzscher Wellen

Über Rundfunk und Fernsehen empfangen wir wichtige Informationen in Form von Sprache, Musik und Bildern, oft aus mehreren hundert oder tausend Kilometern Entfernung. Die Übertragung erfolgt durch Hertzsche Wellen. Von Schiffen werden drahtlos Verbindungen untereinander und mit Partnern an Land hergestellt. Flugzeuge werden unter Benutzung von Radargeräten, die mit Hertzschen Wellen hoher Frequenz arbeiten, sicher geführt, auch wenn sie nachts, in den Wolken oder im Nebel fliegen. Mit Radar überwacht unsere Volksarmee den Luftraum der DDR. Flugabwehrraketen können mittels Hertzscher Wellen selbständig ihre Ziele suchen und Angriffe aus der Luft erfolgreich abwehren.

Automatische Raumsonden werden mittels Hertzscher Wellen von der Erde aus gesteuert und übermitteln ihre Meßdaten mit diesen Wellen zur Erde. Mit den Kosmonauten in den Raumstationen besteht ständiger Funkkontakt.

Astronome empfangen Signale aus dem Weltall, die oft Millionen oder Milliarden Jahre unterwegs waren. Große Antennenanlagen mit riesigen Hohlspiegeln ermöglichen es, die aus sehr großer Entfernung kommenden und damit sehr schwachen Hertzschen Wellen zu empfangen.

An vielen Stellen wurde der große technische Fortschritt unmittelbar durch den Einsatz Hertzscher Wellen erreicht, z. B. in der Navigation und in der Meteorologie. Das Leben der Menschen wurde durch Rundfunk und Fernsehen in den letzten Jahrzehnten in starkem Maße verändert. Kurzfristige und allseitige Informationen ermöglichen das „Dabei-sein“ bei bedeutsamen politischen, kulturellen und sportlichen Ereignissen, das umfassende Kennenlernen von Höchstleistungen der Technik und das Miterleben bedeutsamer Naturereignisse. Die umfassende, wahrheitsgemäße Information trägt wesentlich zu Bildung der Menschen bei.

Hertzsche Wellen ermöglichen den schnellen Einsatz dringender medizinischer und anderer Hilfe

① ②

#### ► Hertzsche Wellen finden in Wissenschaft, Technik und Produktion vielfältige Anwendung.

- ① Beschreiben Sie Beispiele für die Anwendung Hertzscher Wellen in Industrie oder Landwirtschaft!
- ② Beschreiben Sie Beispiele für die Anwendung Hertzscher Wellen in Nachrichtentechnik, Flugsicherung und Landesverteidigung und deren Bedeutung!

## Ausbreitung Hertzscher Wellen

**Geradlinige Ausbreitung.** Vergleicht man die Lage verschiedener Fernseh- bzw. UKW-Empfangsantennen auf den Häusern miteinander, so fällt auf, daß gleichartige alle mit den Antennenstäben in eine bestimmte Richtung zeigen. Nach einem Sturm kann es geschehen, daß Fernsehbild und -ton gestört sind. Ursache kann eine verdrehte Antenne sein. Der beste Empfang tritt auf, wenn die Antennenstäbe genau quer zur Richtung zum Sender zeigen und wenn der Sender von der Antenne aus zu sehen ist. ①

**Hertzische Wellen breiten sich geradlinig aus.**

**Ausbreitungsgeschwindigkeit.** Die Geschwindigkeit, mit der sich Hertzische Wellen ausbreiten, ist viel größer als die Ausbreitungsgeschwindigkeit mechanischer Wellen. Im Vakuum beträgt sie etwa  $300000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ .

**Hertzische Wellen breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit  $c$  aus.**  
 $c \approx 300000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  (im Vakuum)

Deshalb kann man die Gleichung für die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Welle  $v = \lambda \cdot f$  in der Form schreiben

$$c = \lambda \cdot f.$$

Mit dieser Gleichung ist es möglich, für die Frequenzen der Sender die zugehörige Wellenlänge zu bestimmen. ②

- Der in einem Experiment benutzte Sender erzeugt Hertzische Wellen einer Frequenz von 10 GHz. Wie groß ist die Wellenlänge dieser Wellen in der Luft?

$$c_{\text{Luft}} = 300000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$$

*Gesucht:*  $\lambda$  (in m)

*Gegeben:*  $f = 10 \text{ GHz}$

*Lösung:*  $c = \lambda \cdot f$

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{10 \cdot 10^9 \text{ s}^{-1}}$$

$$\lambda = 0,03 \text{ m}$$

*Ergebnis:* Die Wellenlänge beträgt 0,03 m. ③ ④ ⑤

**Durchdringungsfähigkeit.** In geschlossenen Räumen kann man mit einem Rndfunkgerät mit eingebauter Antenne Sendungen empfangen. Auf der Baustelle kann sich der Brigadier auch dann mit dem Kranführer per Funk verständigen, wenn sich zwischen beiden eine Betonplatte befindet. Führt man dagegen mit einem Pkw unter einer Brücke hindurch, so ist oftmals der Rundfunkempfang gestört. Welche Stoffe können die Hertzischen Wellen durchdringen?

28

- ▼ Sender und Empfänger werden in einem Abstand von etwa einem Meter so aufgestellt, daß sie sich gegenüberstehen und die Antennen einander zugewandt sind (Bild 77/1). Nacheinander bringt man Platten aus verschiedenen Stoffen zwischen beide.

Befindet sich Glas, Holz oder Plast im Zwischenraum, dann schlägt der Zeiger des Meßinstruments aus. Befinden sich Eisen, Aluminium oder Kupfer zwischen Sender und Empfänger, dann gelangen keine Hertzischen Wellen zum Empfänger.

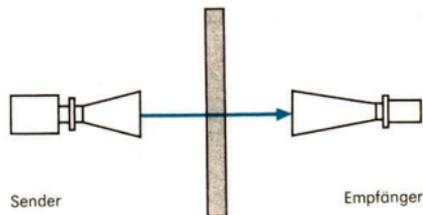


Bild 77/1 Untersuchung des Durchdringungsvermögens Hertzischer Wellen

### Hertzische Wellen durchdringen Isolatoren.

6

In Metallen werden die Hertzischen Wellen absorbiert.

### Welleneigenschaften Hertzischer Wellen

Bei der Ausbreitung mechanischer Wellen haben wir einige besondere Erscheinungen kennengelernt: Reflexion, Brechung, Beugung, Interferenz.

Treten diese Erscheinungen nur bei mechanischen Wellen auf oder verhalten sich andere Wellen ähnlich?

**Reflexion.** Zur Untersuchung der Reflexion benutzen wir eine experimentelle Anordnung, wie wir sie im Prinzip auch bei mechanischen Wellen und bei der Untersuchung der Reflexion von Licht und Wärmestrahlung in Klasse 6 verwendet haben.

29

Die Metallplatte zwischen Sender und Empfänger (Bild 77/2) schließt aus, daß die Hertzischen Wellen auf direktem Wege zum Empfänger gelangen. Die Platte, auf die der Sender gerichtet ist, wird hin- und hergedreht. Danach wird sie gegen alle die Platten, die im vorangegangenen Experiment Einsatz fanden, ausgetauscht.

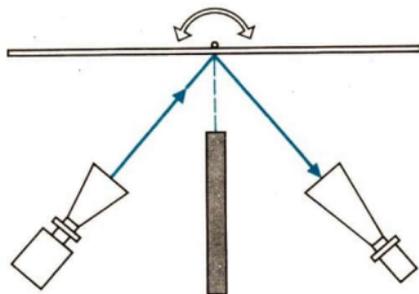


Bild 77/2 Untersuchung der Reflexion Hertzischer Wellen

- ① In welcher Himmelsrichtung befinden sich in Ihrer Umgebung Fernsehantennen? In welche Richtung zeigen die Empfangsantennen? Erklären Sie den Zusammenhang!
- ② Interpretieren Sie die Gleichung  $c = \lambda \cdot f$ !
- ③ Der Höhenmesser eines Flugzeuges arbeitet mit Radarwellen einer Frequenz von 4300 MHz. Wie groß ist die Wellenlänge?
- ④ In einer Gesteinsschicht besitzen Hertzische Wellen der Frequenz 8 GHz eine Wellenlänge von 0,025 m. Wie groß ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit?
- ⑤ Ein Fernsehsender strahlt Hertzische Wellen einer Wellenlänge von 50 cm aus. Mit welcher Frequenz arbeitet der Sender?
- ⑥ Warum ist der Rundfunkempfang mit einem Kofferradio in einem Pkw vom Typ „Wartburg“ stark behindert, während in einem „Trabant“ dieser Effekt nicht auftritt? Auf welche Weise wird beim „Wartburg“ der ungestörte Empfang mit einem Autoradio ermöglicht?

Im Falle der Metallplatten schlägt der Zeiger des Meßinstruments aus, wenn der Einfallswinkel gleich dem Reflexionswinkel ist.

**Hertzische Wellen werden an der Oberfläche von elektrischen Leitern reflektiert. Es gilt das Reflexionsgesetz.**

Die Reflexion Hertzscher Wellen findet vielseitige Anwendung. Der letzte Stab einer Fernseh- oder UKW-Funkantenne wirkt als „Reflektor“ (Bild 78/1). Oft wird auch ein Drahtnetz zur Reflexion der Wellen benutzt. Radioteleskope besitzen riesige Reflektorspiegel. Dadurch werden die Hertzschen Wellen im Bereich der Empfangsantenne verstärkt.

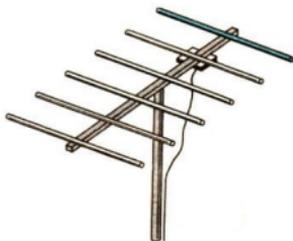


Bild 78/1 Fernsehempfangsantenne mit stabförmigem Reflektor

Zur Übertragung von Fernsehsendungen vom Aufnahmeort zum Sender oder von Telefongesprächen findet der Richtfunk Verwendung (Bild 78/2). Der Spiegel reflektiert von der Sendeantenne ausgestrahlte Hertzsche Wellen so, daß sie sich im wesentlichen längs einer Geraden ausbreiten. Der Spiegel des Empfängers sammelt sie im Bereich der Empfangsantenne. Dadurch kann die Übertragung über eine Entfernung von 50 bis 80 km mit einer Sendeleistung von nur 2 bis 5 W erfolgen.

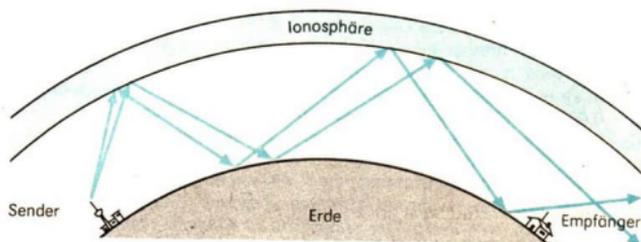
Kurzwellen, Mittel- und Langwellen (Wellenlänge 20 m bis 2 km) können von Schichten in der Ionosphäre der Erde, die eine bestimmte elektrische Leitfähigkeit besitzen, reflektiert werden. Sie gelangen dann wieder zur Erde zurück, wo abermals Reflexion erfolgt, usw. (Bild 78/3). Dadurch ist der Empfang auf große Entfernung möglich.

**Die Reflexion Hertzscher Wellen ist eine wesentliche physikalische Grundlage für das Senden und Empfangen.**

Bild 78/2 Antennen mit Parabolspiegeln für den Richtfunk (Fernsehturm)



Bild 78/3 Wiederholte Reflexion von Kurz-, Mittel- und Langwellen an ionisierten Atmosphärenschichten und an der Erdoberfläche



**Brechung.** Wir haben festgestellt, daß Hertz'sche Wellen Isolatoren durchdringen können.

Ändern sie beim Übergang von einem Stoff zum anderen ihre Richtung?

30 Sender und Empfänger sind aufeinander zu gerichtet. Zwischen beide wird gemäß Bild 79/1 ein Prisma aus Plast gebracht. Durch das Einbringen des Prismas wird der Empfang unterbrochen. Die Hertz'schen Wellen gelangen nicht mehr zum Empfänger. In Stellung 2 schlägt der Zeiger des Meßinstruments wieder aus.

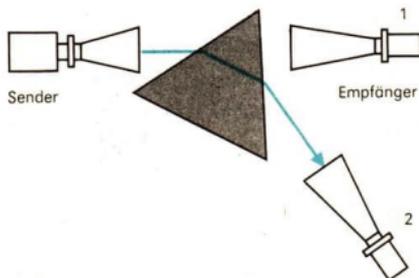


Bild 79/1 Untersuchung der Brechung Hertz'scher Wellen

► **Hertz'sche Wellen werden beim Übergang von einem Isolator in einen anderen gebrochen. Es gilt das Brechungsgesetz.**

**Beugung.** Fernsehensendungen und UKW-Funk können auch empfangen werden, wenn der Abstand zwischen der Sende- und der Empfangsantenne so groß ist, daß man von der Empfangsantenne die Sendeantenne infolge der Krümmung der Erdoberfläche nicht mehr sehen kann (Bild 79/2). Es liegt die Vermutung nahe, daß die Hertz'schen Wellen hinter einem Hindernis etwas von ihrer geradlinigen Ausbreitung abweichen. Zur Überprüfung dieser Vermutung führen wir folgendes Experiment durch.

Bild 79/2 Der Fernsehempfang ist auch noch außerhalb der optischen Sichtweite möglich



31 In etwa einem halben Meter Entfernung vom Sender wird entsprechend Bild 79/3 ein Metallblech angeordnet, in der gleichen Entfernung steht der Empfänger. Zunächst befindet er sich in Stellung 1, nachfolgend in Stellung 2 hinter dem Metallblech. Das Meßinstrument zeigt in beiden Stellungen den Empfang Hertz'scher Wellen an.

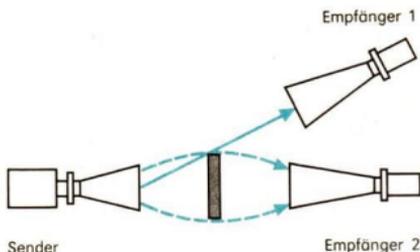


Bild 79/3 Untersuchung der Beugung Hertz'scher Wellen

► **Hertz'sche Wellen werden an einem Hindernis gebeugt.**

Solche Hindernisse können z. B. sein: Körper aus Metall (Stahlkonstruktion), feuchtes Erdreich (Berge). Wie das eingangs angeführte Beispiel zeigt, ist die Beugung Hertzscher Wellen von großer praktischer Bedeutung.

**Infolge der Beugung Hertzscher Wellen werden Rundfunkübertragungen im UKW-Bereich und Fernsehübertragungen über größere Entfernungen möglich.**

**Interferenz.** Wenn Hertzsche Wellen wie mechanische Wellen gebeugt werden, treten dann auch bei Hertzschen Wellen Interferenzbilder auf?

32 ▼ Der Empfänger wird in der experimentellen Anordnung nach Bild 80/1 an den äußeren Rand des Doppelspalts gebracht. Danach wird er langsam parallel zum Doppelspalt bewegt. Am Rande werden keine Hertzschen Wellen empfangen. Nachfolgend schlägt der Zeiger des Meßinstruments aus, geht dann wieder auf Null zurück, schlägt wieder aus, usw.

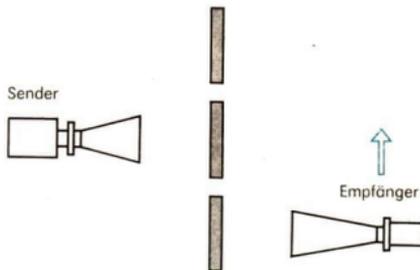


Bild 80/1 Untersuchung der Interferenz Hertzscher Wellen am Doppelspalt

Hinter dem Doppelspalt treten Maxima und Minima der empfangenen Hertzschen Wellen auf.

► Bei der Überlagerung Hertzscher Wellen können Interferenzbilder auftreten.

① ②

### Senden und Empfangen Hertzscher Wellen

Hertzsche Wellen zur Übertragung von Fernsehsendungen werden von großen Sendeantennen ausgestrahlt (Bild 78/2). Die einzelnen Teile dieser Sendeantennen sind meist Metallstäbe. Aus solchen Metallstäben bestehen auch die Empfangsantennen (Bild 78/1). Es fällt auf, daß die Stäbe der Sende- und Empfangsantennen alle etwa die gleiche Länge besitzen.

Welche Vorgänge vollziehen sich in diesen Antennen? Wie entstehen Hertzsche Wellen, und wie werden sie empfangen?

**Aufbau des Dipols.** In einem angeregten Schwingkreis mit kleiner Induktivität und Kapazität tritt eine hochfrequente elektromagnetische Schwingung auf. Elektrisches und magnetisches Feld ändern dabei ständig ihre Stärke. Kondensator und Spule sind jedoch für die Abstrahlung einer elektromagnetischen Welle nicht geeignet. Dazu muß eine Anordnung gewählt werden, in der keine enge Begrenzung des elektrischen und magnetischen Feldes wie in Kondensator und Spule auftritt. Diese Eigenschaft hat eine Antenne.

③ ④ ⑤

Eine einfache Form einer Antenne ist der Dipol. Ein Dipol ist ein gestreckter Leiter (Bild 81/1). Man kann sich vorstellen, daß ein Dipol durch „Öffnen“ eines Schwingkreises entstanden ist (Bild 81/2). Die Übertragung der Energie von einem Schwingkreis (a) auf den Dipol (b) kann durch elektromagnetische Induktion erfolgen. Dazu wird der mittlere Teil des Dipols vom Magnetfeld der Schwingkreisspule durchsetzt.

**Ein Dipol ist ein langgestreckter Leiter (Metallstab). Er kann als „geöffneter“ Schwingkreis betrachtet werden.**

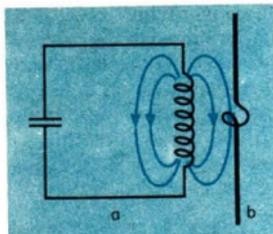


Bild 81/1 Übertragung der Energie von einem Schwingkreis (a) auf einen Dipol (b) durch elektromagnetische Induktion

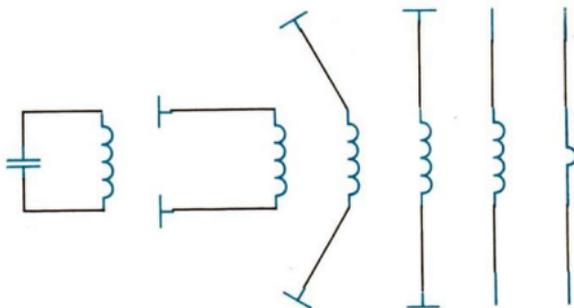


Bild 81/2 Ein Dipol entsteht, wenn ein Schwingkreis „geöffnet“ wird.

**Schwingungen des Dipols.** Im Dipol können wie im Schwingkreis elektromagnetische Schwingungen auftreten. Im Schwingkreis bewegen sich die Elektronen durch die Spule hindurch periodisch zwischen den Kondensatorplatten hin und her. Beim Dipol schwingen die Elektronen zwischen den Dipolenden. Dabei legt jedes einzelne Elektron allerdings nicht den gesamten Weg zurück, sondern führt eine hochfrequente Schwingung an seinem jeweiligen Platz aus.

Bei der Hin- und Herbewegung der Elektronen tritt eine zeitweilige Anhäufung an einem Dipolende auf. Es besteht ein starkes elektrisches Feld (Bild 81/3).

Beim Hin- und Herschwingen der Elektronen ist die Stromstärke im mittleren Teil des Dipols am größten. Bei größter Stromstärke besteht ein starkes magnetisches Feld (Bild 81/4). Wie beim geschlossenen Schwingkreis sind höchste Spannung und größte Stromstärke zeitlich gegeneinander verschoben.

⑥ ⑦

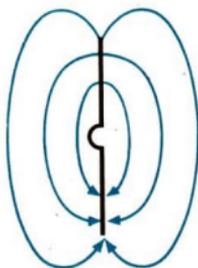


Bild 81/3 Elektrisches Feld in der Umgebung eines Dipols zum Zeitpunkt größter Spannung zwischen seinen Enden

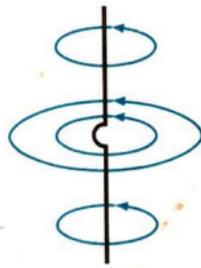


Bild 81/4 Magnetisches Feld in der Umgebung eines Dipols zum Zeitpunkt größter Stromstärke

► Im Dipol können elektromagnetische Schwingungen erzeugt werden.

- ① Begründen Sie, daß Hertzsche Wellen Wellencharakter haben!
- ② Nennen und erläutern Sie die Eigenschaften Hertzscher Wellen!
- ③ Zeichnen und beschreiben Sie den Aufbau eines geschlossenen Schwingkreises!
- ④ Beschreiben und erklären Sie die Entstehung von Schwingungen in einem Schwingkreis!
- ⑤ Beschreiben Sie den Feldlinienverlauf des elektrischen Feldes zwischen parallelen geladenen Kondensatorplatten! Zeichnen Sie das Feldlinienbild!
- ⑥ Beschreiben Sie den Feldlinienverlauf des Magnetfeldes um einen geraden stromdurchflossenen Leiter! Zeichnen Sie das Feldlinienbild!
- ⑦ Beschreiben Sie die Ladungsverteilung bei der Schwingung eines Dipols!

**Senden elektromagnetischer Wellen.** Treten im Dipol elektromagnetische Schwingungen mit hoher Frequenz auf, dann ändern sich elektrisches und magnetisches Feld außerordentlich schnell. Obwohl sich diese Felder mit großer Geschwindigkeit (Lichtgeschwindigkeit) ausbreiten, brauchen sie dafür doch eine gewisse Zeit. So ist z. B. das Magnetfeld am Dipol schon wieder verschwunden, wenn es in 2 m Entfernung gerade den höchsten Wert erreicht hat. Und wenn es in einer Entfernung von 4 m die größte Stärke erreicht hat, hat sich am Dipol bereits ein neues Magnetfeld ausgebildet. Entsprechendes gilt für das elektrische Feld.

**Eine Hertzsche Welle ist die Ausbreitung einer elektromagnetischen Schwingung im Raum.**

Betrachtet man die Umgebung des Dipols zu einem bestimmten Zeitpunkt (Bild 82/1), so erkennt man, daß sich elektrisches und magnetisches Feld räumlich periodisch ändern. Das entspricht dem von einer mechanischen Welle bekannten Bild. Schwingt der Dipol in seiner Eigenfrequenz, dann ist die Wellenlänge der abgestrahlten Welle halb so groß wie seine Länge. Man nennt ihn deshalb auch  $\lambda/2$ -Dipol.

① ②

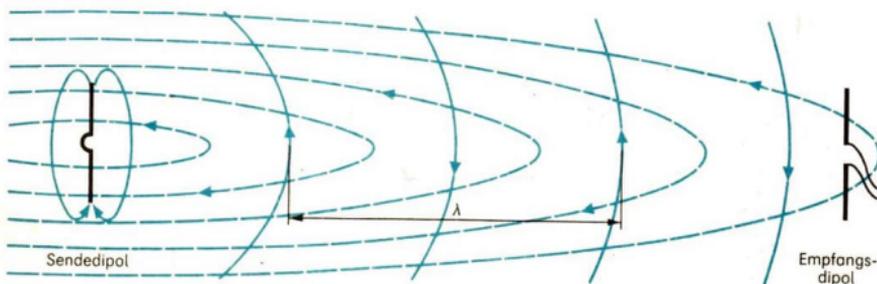


Bild 82/1 Ablösen einer Hertzschen Welle von einem Dipol

**Empfangen elektromagnetischer Wellen.** Befindet sich ein Dipol an einem bestimmten Ort, den die Welle erreicht (Bild 82/1), so ändern sich dort das elektrische und magnetische Feld zeitlich periodisch. Der Dipol wird von Hertzschen Wellen zu erzwungenen Schwingungen angeregt. Dabei spielen zwei Prozesse eine Rolle: Einerseits übt das sich ändernde elektrische Feld Kräfte auf die Elektronen im Dipol aus, andererseits wirkt das sich ändernde magnetische Feld durch die elektromagnetische Induktion auf die Elektronen ein.

Da Sende- und Empfangsdipole etwa die gleiche Länge besitzen, liegt die Frequenz der erzwungenen elektromagnetischen Schwingung in der Nähe der Eigenfrequenz des Empfangsdipols. Dadurch treten resonanzähnliche Bedingungen auf.

**Der Empfangsdipol wird durch Hertzsche Wellen zu erzwungenen elektromagnetischen Schwingungen angeregt.**

Infolge der Vielzahl von Sendern treffen aber stets Hertzsche Wellen verschiedener Frequenz auf den Dipol und regen ihn zu erzwungenen elektromagnetischen Schwingungen an. Wenn beispielsweise 5 Sender empfangen werden, so fließen im Dipol gleichzeitig 5 Wechselströme verschiedener Frequenz.

Wie läßt sich davon der gewünschte Sender auswählen?

**Wirkungsweise des Abstimmkreises.** Um eine bestimmte Frequenz auszuwählen, wird der Empfangsdipol mit einem Schwingkreis, dem Abstimmkreis, magnetisch gekoppelt (Bild 83/1). Dadurch entstehen infolge elektromagnetischer Induktion auch im Abstimmkreis erzwungene elektromagnetische Schwingungen. Durch Verändern der Kapazität wird die Eigenfrequenz des Abstimmkreises so eingestellt, daß sie mit der Frequenz des Senders übereinstimmt, der ausgewählt werden soll. Infolge der Resonanz hat die Schwingung im Abstimmkreis die größte Amplitude, die vom eingestellten Sender hervorgerufen wird.

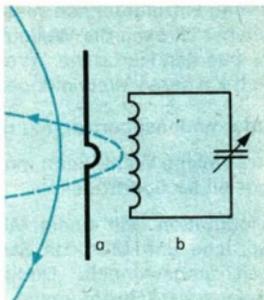


Bild 83/1 Empfangsdipol (a) mit Abstimmkreis (b)

**Wellenlängenbereiche.** Hertzische Wellen können eine sehr unterschiedliche Wellenlänge besitzen. Sie liegt zwischen 10 km und etwa 1 mm. Die einzelnen Bereiche der Wellen unterscheiden sich in ihren Eigenschaften und tragen unterschiedliche Namen.

#### Wellenlängen und Frequenzbereiche Hertzischer Wellen

Bereich	Wellenlänge	Frequenz	Besonderheiten
Langwellen (LW)	2 km bis 860 m	150 kHz bis 350 kHz	werden in der Ionosphäre und an der Erdoberfläche reflektiert
Mittelwellen (MW)	580 m bis 184 m	515 kHz bis 1630 kHz	
Kurzwellen (KW)	10 m bis 160 m	1,9 MHz bis 30 MHz	
Fernsehen VHF Band I	6,4 m bis 4,4 m	47 MHz bis 68 MHz	
Ultrakurzwellen (UKW)	3,42 m bis 2,88 m	88 MHz bis 104 MHz	
Fernsehen VHF Band II	1,72 m bis 1,3 m	172 MHz bis 230 MHz	
Fernsehen UHF	0,64 m bis 0,35 m	470 MHz bis 860 MHz	

Die Nutzung der Frequenzbereiche erfolgt ausgehend von den entsprechenden Eigenschaften der Hertzischen Wellen. Soll die Reichweite der Rundfunksender auf der Erde groß sein, so müssen sie im Lang-, Mittel- oder Kurzwellenbereich betrieben werden. Sollen die Hertzischen Wellen die Ionosphäre ungehindert durchdringen, dann müssen sie eine möglichst kleine Wellenlänge haben. Sollen die Hertzischen Wellen stark gebündelt ausgestrahlt werden, so müssen ebenfalls sehr kleine Wellenlängen benutzt werden.

Entsprechend der Wellenlänge sind auch die Antennenanlagen unterschiedlich. Man kann schon am Äußeren der Sendeantenne erkennen, in welchem Bereich sie elektromagnetische Wellen aussendet.

- ① Die Frequenz eines UKW-Senders beträgt 102 MHz. Welche Länge besitzen die einzelnen Dipolantennen am Sendemast?
- ② Schätzen Sie ausgehend von der Länge des Dipols Ihrer Fernsehantennen die Wellenlängen der günstig zu empfangenden Hertzischen Wellen ab!
- ③ Begründen Sie die Notwendigkeit des Abstimmkreises!

Große Einzelantennen senden lange Wellen aus. Je kleiner die Einzelantenne ist, um so kleiner ist auch die Wellenlänge.

Neben den Hertzschen Wellen gibt es elektromagnetische Wellen mit z. T. noch erheblich kleineren Wellenlängen.

### Informationsübertragung durch Hertzsche Wellen

Auf welche Weise kann man nun mit diesen Hertzschen Wellen Sprache, Musik und sogar Bilder übertragen?

**Modulation.** Mit einem Mikrofon werden Sprache und Musik in Stromschwankungen umgewandelt. Dadurch entstehen elektrische Schwingungen. Deren höchste Frequenz liegt bei etwa 15000 Hz. Solche niederfrequenten Schwingungen lassen sich nicht direkt von einer Antenne als Hertzsche Wellen abstrahlen. Man muß eine hochfrequente elektromagnetische Schwingung als „Träger“ für die niederfrequenten nutzen. Um die niederfrequenten Sprachschwingungen (Bild 84/1) mit Hilfe der hochfrequenten „Trägerschwingung“ (Bild 84/2) übertragen zu können, muß die hochfrequente im Takte der niederfrequenten verändert werden. Man nennt diesen Vorgang *Modulation*. Beispielsweise ist es möglich, die Amplitude der hochfrequenten Schwingung im Rhythmus der niederfrequenten zu steuern (Bild 84/3). Das bezeichnet man als Amplitudenmodulation.

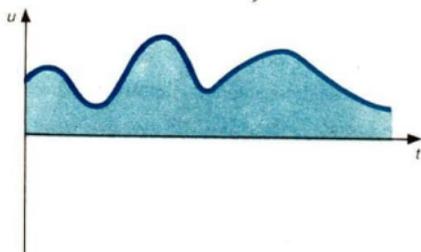


Bild 84/1 Niederfrequente Sprachschwingung

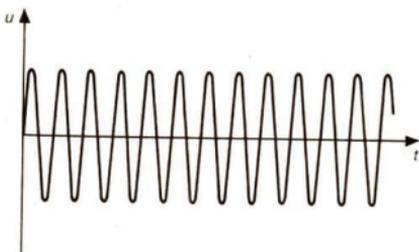


Bild 84/2 Hochfrequente Trägerschwingung

Auf diese Weise entsteht eine hochfrequente Schwingung, deren Amplitude sich im Rhythmus der niederfrequenten Schwingung ändert. Diese modulierte elektromagnetische Schwingung wird der Sendeantenne zugeführt und abgestrahlt. ①

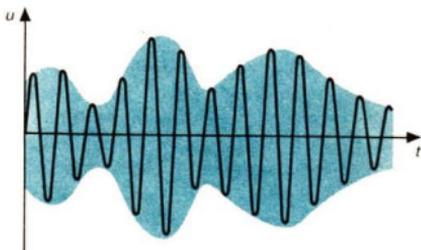


Bild 84/3 Modulierte hochfrequente Trägerschwingung

Bei der Amplitudenmodulation wird die Amplitude der hochfrequenten Schwingung im Rhythmus der niederfrequenten Schwingungen verändert.

In Bild 85/1 ist das Blockschaltbild eines Rundfunksenders dargestellt. In diesem Schema sind alle wichtigen Funktionen eines Senders gekennzeichnet.

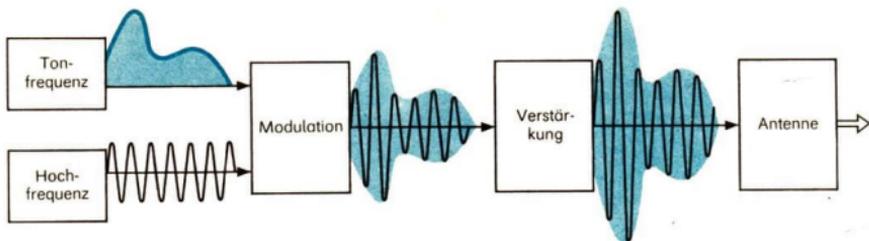
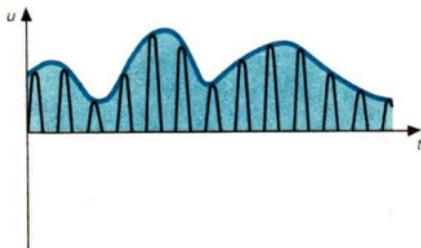


Bild 85/1 Blockschaltbild eines Senders

**Demodulation.** Treffen die Hertzschen Wellen auf den Empfangsdipol, so wird dieser zu erzwungenen elektromagnetischen Schwingungen angeregt. Der hochfrequente Wechselstrom kann jedoch nicht unmittelbar dem Lautsprecher zugeführt werden. Seine Membran ist zu träge, um den hochfrequenten Schwingungen zu folgen. Man muß sie „demodulieren“ (Bild 85/2), d. h., die niederfrequenten wieder von den hochfrequenten Schwingungen trennen. Das erfolgt durch Gleichrichten.

Bild 85/2 Gleichgerichtete hochfrequente Trägerschwingung



Die Membran bewegt sich im Takte der niederfrequenten Schwingungen. Sie gibt damit die Sprache und Musik in der ursprünglichen Form wieder (Bild 85/3).

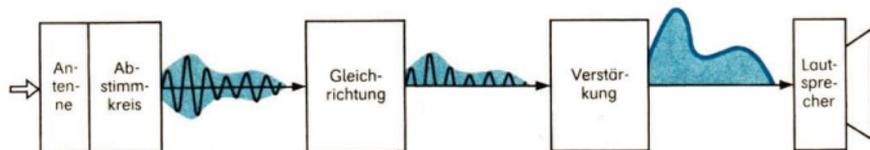


Bild 85/3 Blockschaltbild eines Empfängers

► **Durch Demodulation werden die niederfrequenten elektromagnetischen Schwingungen wieder von der hochfrequenten Trägerschwingung getrennt.**

② ③ ④

- ① Begründen Sie die Notwendigkeit der Modulation!
- ② Erläutern Sie Amplitudenmodulation und Demodulation!
- ③ Zeichnen und erläutern Sie das Blockscheema eines Senders und eines Empfängers!
- ④ Erläutern Sie das Blockschaltbild eines Radargerätes (Bild 87/1)!

## Aufgabe

Empfangen Sie Hertzische Wellen mit einem einfachen Rundfunkempfänger!

### Durchführung

Bauen Sie die Experimentieranordnung nach Bild 86/1 oder 86/2 auf! Verändern Sie die Kapazität des Kondensators im Abstimmkreis über den ganzen Bereich sehr langsam!

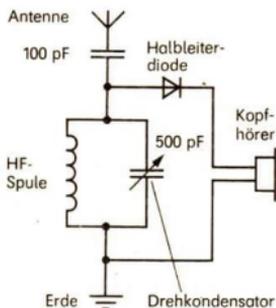


Bild 86/1 Schaltplan eines Diodenempfängers

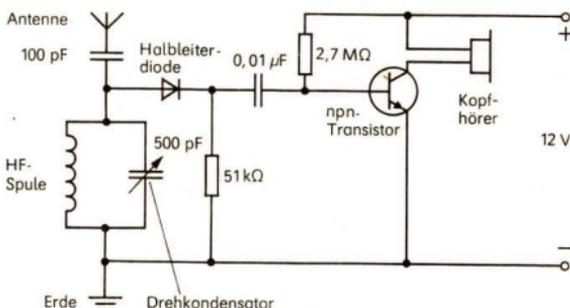


Bild 86/2 Schaltplan eines Diodenempfängers mit Transistorverstärker

### Auswertung

Vergleichen Sie den Empfang bei unterschiedlicher Kapazität des Kondensators im Abstimmkreis! Formulieren Sie das Ergebnis in Worten!

Nicht nur Hertzische Wellen können durch Modulation zur Informationsübertragung genutzt werden, sondern auch Licht. Eine besonders verlustarme Übertragung modulierter Lichtwellen ist in *Lichtleitkabeln* möglich.

### Radar

Hertzische Wellen werden von elektrisch leitenden Stoffen reflektiert. Will man die Richtung ermitteln, in der sich ein bestimmtes metallisches Objekt befindet, so braucht man nur Hertzische Wellen nacheinander in verschiedene Richtungen auszusenden und die von diesem Objekt reflektierten Wellen zu empfangen. Aus der Zeitdifferenz zwischen dem Aussenden und dem Empfangen kann man außerdem die Entfernung des Objektes bestimmen.

Nach diesem Prinzip arbeitet ein Radargerät. Radargeräte werden z. B. zur Leitung von Flugzeugen beim Start und bei der Landung, insbesondere unter schlechten Sichtbedingungen, und zur Luftraumüberwachung genutzt. Mittels drehbarer Parabolspiegel (Bild 86/3) werden die sehr kurzen Hertzischen Wellen ( $\lambda$  etwa 0,5 cm bis 1 m) in verschiedene Richtungen ausgesandt. Treffen sie auf ein Flugzeug, so werden sie z. T. reflektiert. Die reflektierten Wellen werden von der gleichen Antennenanlage wieder empfangen (Bild 87/1). Auf einem Bildschirm werden Lage und Entfernung des Flugzeugs erkennbar.

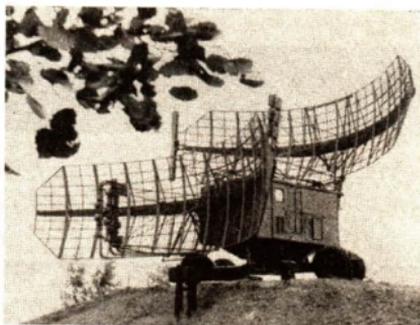


Bild 86/3 Rotierende Antenne mit Reflektor zur Funkortung (Radar)

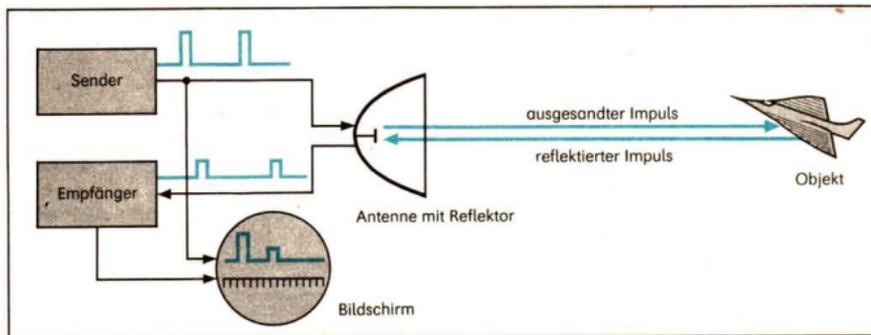


Bild 87/1 Blockschatbild eines Radargerätes

### Zusammenfassung

Hertzische Wellen breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit geradlinig aus. Sie durchdringen Isolatoren und werden an elektrischen Leitern reflektiert. Bei Hertzischen Wellen können wie bei mechanischen Wellen Brechung, Beugung und Interferenz auftreten.

Führt ein Sendedipol eine hochfrequente elektromagnetische Schwingung aus, so breitet sich diese als Hertzische Welle im Raum aus. Trifft diese auf einen (Empfangs-)Dipol, so wird in diesem eine erzwungene Schwingung erzeugt. Zur Übertragung von Sprache und Musik wird die hochfrequente Trägerschwingung moduliert und nach dem Empfang wieder demoduliert.

## Wiederholung und Übung

8

### Wechselstrom

- Vergleichen Sie die elektrischen Widerstände a) eines ohmschen Bauelementes, b) einer Spule und c) eines Kondensators im Gleichstromkreis und im Wechselstromkreis!
- Welche physikalischen Ursachen führen zum Zustandekommen a) des ohmschen Widerstandes, b) des induktiven Widerstandes und c) des kapazitiven Widerstandes?
- Was gibt die Induktivität einer Spule an?
- Was gibt die Kapazität eines Kondensators an?
- Was bedeuten auf einer Spule die Angaben 3000 Wdg., 25 W, 5 H?
- Was bedeuten auf einem Kondensator die Angaben: 4  $\mu\text{F}$ , 500 V?
- Planen Sie ein Experiment, mit dem man nachweisen kann, daß a) eine Spule und b) ein Kondensator im Wechselstrom einen elektrischen Widerstand darstellen!

8. Berechnen Sie die induktiven Widerstände einer Spule 1 (800 mH) und einer Spule 2 (200 mH) bei Frequenzen von a) 20 Hz, b) 20 kHz, c) 20 MHz!  
Welche physikalischen Zusammenhänge erkennen Sie aus dem Vergleich aller Ergebnisse?
9. Berechnen Sie die kapazitiven Widerstände eines Kondensators 1 (200 pF) und eines Kondensators 2 (800 pF) bei Frequenzen von a) 2 kHz, b) 2 MHz, c) 2 GHz!  
Welche physikalischen Zusammenhänge erkennen Sie aus dem Vergleich aller Ergebnisse?
10. Für die Spulen 1 bis 5 wurden bei den angegebenen Frequenzen jeweils die Spannung und die Stromstärke gemessen. Berechnen Sie die Induktivitäten der Spulen! (Der ohmsche Widerstand soll vernachlässigbar klein sein.)

Spule	1	2	3	4	5
Spannung	50 V	1,6 V	1,8 V	40 mV	100 mV
Stromstärke	400 mA	260 mA	160 mA	0,5 mA	1 $\mu$ A
Frequenz	50 Hz	200 Hz	400 Hz	16 kHz	3 MHz

11. Für die Kondensatoren 1 bis 5 wurden bei den angegebenen Frequenzen jeweils die Spannung und die Stromstärke gemessen. Berechnen Sie die Kapazitäten der Kondensatoren!

Kondensator	1	2	3	4	5
Spannung	220 V	50 V	80 V	5 V	10 mV
Stromstärke	300 mA	110 mA	230 $\mu$ A	0,5 A	1,3 mA
Frequenz	50 Hz	120 Hz	320 Hz	5 kHz	20 MHz

12. Was bedeuten auf einem Motor die Angaben: 220 V, 50 Hz, 400 W,  $\cos \varphi = 0,8$ ?

### Schwingkreis

1. Geben Sie den Energieerhaltungssatz für den Schwingkreis mit Gültigkeitsbedingung an! In welchen Formen tritt die Gesamtenergie zu den Zeiten

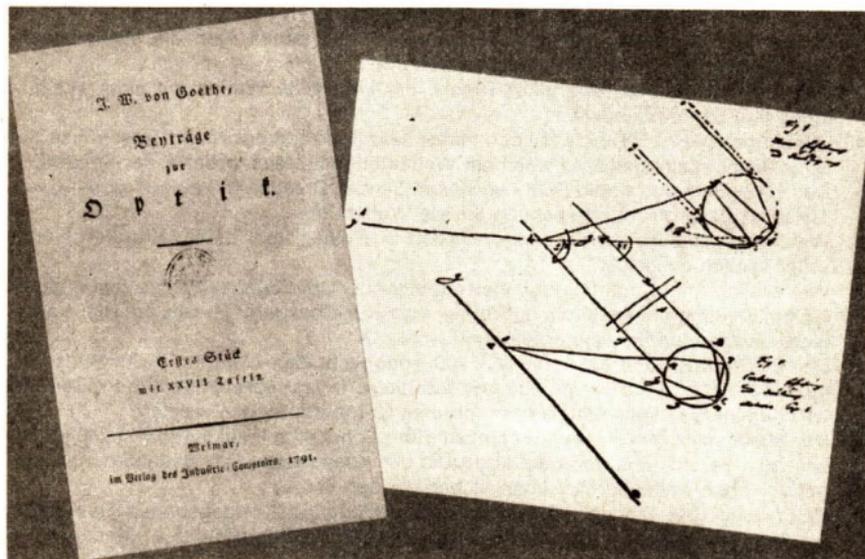
$t = 0$ ,  $t = \frac{1}{4} T$ ,  $t = \frac{1}{2} T$ ,  $t = \frac{3}{4} T$ ,  $t = T$  auf, wenn zur Zeit  $t = 0$  der Entladevorgang des Kondensators beginnt?

2. Wie kann nachgewiesen werden, daß die Dämpfung der elektromagnetischen Schwingungen durch den ohmschen Widerstand beeinflussbar ist? Entwerfen Sie einen Schaltplan für eine geeignete Experimentieranordnung!
3. Wie ändert sich die Schwingkreisfrequenz, wenn die Kapazität bei konstanter Induktivität auf ein Viertel des ursprünglichen Wertes herabgesetzt wird? Wie kann man experimentell überprüfen, ob die Annahme  $T \sim \sqrt{C}$  für den Schwingkreis zutrifft?

- ④ Welche Kapazität  $C$  hat der Kondensator eines Schwingkreises in einem Tonfrequenzgenerator, der eine Spule mit einer Induktivität von 0,4 H enthält und eine Schwingung mit einer Frequenz von 800 Hz erzeugt?  $0,1 \mu\text{F}$
- ⑤ Der Verstärker eines Rundfunkempfängers für die Frequenz von 470 kHz enthält einen Schwingkreis, dessen Kondensator die Kapazität von 1 nF hat. Wie groß ist die Induktivität  $L$  der Schwingkreisspule?  $0,17 \mu\text{H}$
6. Unter welchen Bedingungen entsteht Resonanz zwischen Schwingkreisen?

## Hertzsche Wellen

1. Zeichnen Sie einen geschlossenen und einen geöffneten Schwingkreis, und vergleichen Sie die elektrischen und die magnetischen Felder!
2. Beschreiben Sie experimentelle Anordnungen, mit denen man die Welleneigenschaften Hertzscher Wellen nachweisen kann!
3. Wie groß ist die Frequenz eines Dipols, der Hertzsche Wellen mit einer Wellenlänge von 5 m aussendet?
4. Die Länge eines  $\lambda/2$ -Dipols für den Fernsehempfang beträgt 75 cm. Bestimmen Sie seine Resonanzfrequenz! In welchem Wellenlängenbereich arbeitet der Sender?
5. Das Programm von Radio DDR I wird vom Sender Dresden mit einer Frequenz von 1043 kHz ausgestrahlt. Berechnen Sie die Wellenlänge!
6. Welche physikalischen Vorgänge werden in einem Dipol beim Auftreffen Hertzscher Wellen ausgelöst?
7. Wie erreicht man, daß von der Vielzahl einander überlagerter Hertzscher Wellen, die auf die Empfangsantenne auftreffen, vom Rundfunkgerät jeweils nur die Wellen eines bestimmten Senders empfangen werden?
8. Der Stereo-Kassetten-Rekorder SKR 700 ermöglicht den Empfang bestimmter Frequenzbereiche, die sich von 150 kHz bis 108 MHz erstrecken. Welche größte und welche kleinste Wellenlänge kann mit dem Gerät empfangen werden?
9. Der Abstimmkreis in einem Rundfunkempfänger hat eine Induktivität von 200  $\mu\text{H}$ . In welchem Bereich muß man die Kapazität des Kondensators verstellen können, damit der Mittelwellenbereich überstrichen werden kann?
10. Welche höchste Frequenz kann mit dem in Aufgabe 9 angegebenen Empfänger empfangen werden, wenn die kleinste einstellbare Kapazität des Kondensators 10 pF beträgt?
11. Beim Messen der Entfernung Erde–Mond kehrte das von der Mondoberfläche reflektierte Radarsignal nach 2,56 s zum Sender zurück. Wie groß war die Entfernung?
12. Charakterisieren Sie die Bedeutung der Entdeckung und Nutzung Hertzscher Wellen für den technischen, kulturellen und sozialen Fortschritt!
13. Stellen Sie die Gemeinsamkeiten und Unterschiede von mechanischen und Hertzschen Wellen zusammen!



Die optische Erscheinung des Regenbogens regte schon immer die Menschen zur Verwunderung, zur Freude und zum Nachdenken an, ohne daß sie zunächst für dieses Naturschauspiel eine Erklärung gehabt hätten. Johann Wolfgang von Goethe (1749 bis 1832) beschäftigte sich um 1790 naturwissenschaftlich damit (Bild 90/1). Die ältesten Vorstellungen vom Licht (um 500 v. u. Z.) besagen, daß vom Auge „Sehstrahlen“ ausgehen.

In der Folgezeit wurden viele optische Erscheinungen untersucht und Erklärungen dafür gefunden. Zündet man eine Kerze an, so sieht man im gleichen Augenblick, daß die Dinge in der Umgebung beleuchtet werden. Diese Erscheinung führte zu der falschen Annahme, daß das Licht zur Ausbreitung keine Zeit benötige. Im Jahre 1676 ermittelte jedoch der dänische Astronom Olaf Römer (1644 bis 1710) im Zusammenhang mit der Beobachtung der Bewegung der Jupitermonde, daß das Licht eine meßbare Geschwindigkeit besitzt.

Die Frage nach der Natur des Lichtes konnte im Verlaufe von Jahrhunderten von den Naturwissenschaftlern immer umfassender beantwortet werden. Damit war es überhaupt erst möglich, einige optische Beobachtungsergebnisse zu erklären bzw. vorauszusagen. 1675 entwickelte Isaac Newton eine Vorstellung, nach der Licht aus Teilchen besteht, die mit großer Geschwindigkeit aus der Lichtquelle herausgeschleudert werden (Bild 91/1). Um die gleiche Zeit nahm der niederländische Physiker Christiaan Huygens an, daß Licht eine Welle sei (Bild 91/2). Um zu entscheiden, welche dieser Vorstellungen der physikalischen Natur des Lichts am besten entspricht, versuchte man, alle bekannten optischen Erscheinungen mit Hilfe der einen oder anderen Vorstellung zu beschreiben und zu erklären. Dabei entstanden jedoch Widersprüche. So konnte Newton die geradlinige Ausbreitung des Lichtes nicht mit der Wellenauffassung vereinigen. Huygens wiederum schienen die Durchlässigkeit vieler Stoffe für Licht und die sehr große Lichtgeschwindigkeit gegen das Teilchenbild zu sprechen. Die Bemühungen um eine Lösung

der Widersprüche in den Vorstellungen vom Licht stellen eine wichtige Etappe im historischen Erkenntnisprozeß der Physik dar.

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts erkannte man dann, daß die Teilchen- und die Wellenvorstellung des Lichtes noch durch andere Vorstellungen ergänzt werden müssen, wenn man alle optischen Erscheinungen verstehen will.

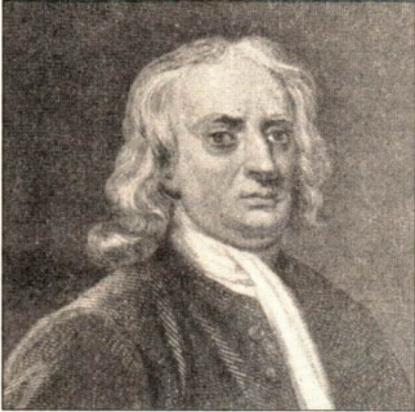
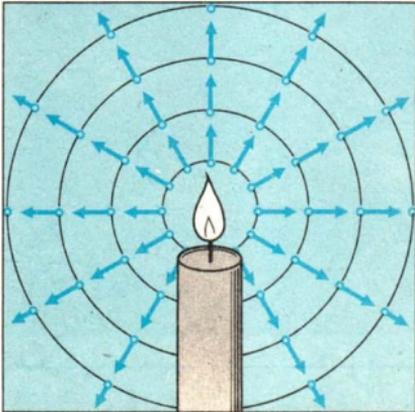
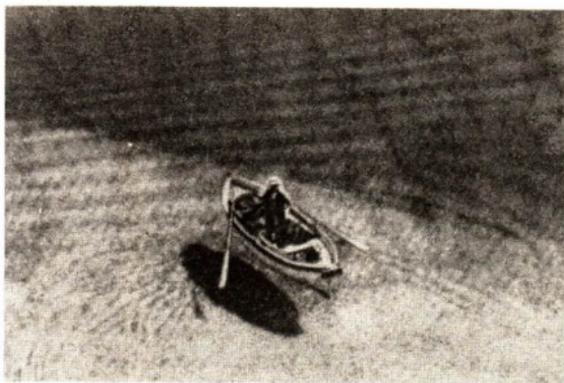


Bild 91/1 Isaac Newton  
(1643 bis 1727)

Bild 91/2 Christiaan Huygens  
(1629 bis 1695)

Beim Abschätzen der Wassertiefe eines klaren Gewässers täuscht man sich häufig. In Wirklichkeit liegt der Gewässergrund meist viel tiefer unter der Wasseroberfläche, als man zu sehen vermeint.

Wie sind diese Täuschung und andere -optische Erscheinungen (→ Bild 118/2) zu erklären?



### Das Modell Lichtstrahl

Im Physikunterricht der Klasse 6 haben wir wichtige Kenntnisse über die Reflexion und Brechung des Lichtes und deren Anwendung in optischen Geräten erworben. Bei Experimenten zum Nachweis des Reflexions- und Brechungsgesetzes für Licht ist die Benutzung von sehr schmalen Lichtbündeln für das Messen der in den Gesetzen betrachteten Winkel zweckmäßig. Für die zeichnerische Darstellung des Lichtweges benutzen wir *Lichtstrahlen*. Ein breites Lichtbündel kann man sich aus mehreren schmalen zusammengesetzt vorstellen. Deshalb lassen sich in vielen Fällen ausgewählte Einzelstrahlen benutzen, mit deren Hilfe die Ausbreitung des Bündels gezeichnet werden kann (Bilder 92/2a und b). Damit vereinfachen wir die Beschreibung der Wirklichkeit durch die Verwendung des *Modells* Lichtstrahl.

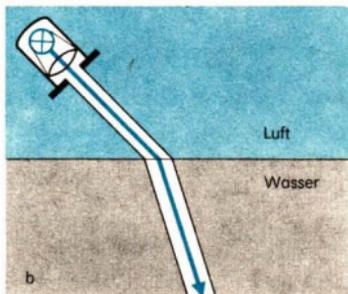
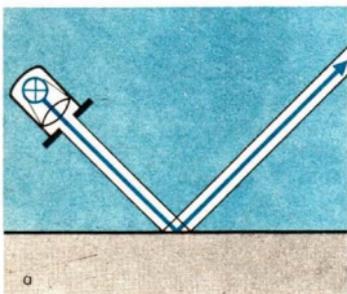


Bild 92/2

**Der Lichtstrahl ist ein Modell. Er kennzeichnet den Weg des Lichtes.**

## Die Lichtgeschwindigkeit

Es ist bekannt, daß die Geschwindigkeit des Lichtes annähernd 300000 km/s beträgt. Infolge dieser großen Geschwindigkeit benötigt Licht für die Ausbreitung über Entfernungen auf der Erde sehr kurze Zeit.

Auf der Erde konnte die Lichtgeschwindigkeit erst dann gemessen werden, als Gerätetechnik und Experimentierkunst bereits einen hohen Stand erreicht hatten.

Der Franzose Fizeau (Bild 93/1) hat 1849 zum ersten Male mit einer Experimentieranordnung auf der Erde die Lichtgeschwindigkeit bestimmt.

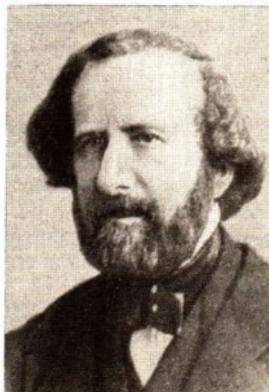


Bild 93/1 Armand Hippolyte Fizeau (1819 bis 1896)

**Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit nach der Methode von Fizeau.** Von der Lichtquelle geht Licht aus. Es gelangt durch einen Zwischenraum zwischen 2 Zähnen eines Zahnrades mit 720 Zähnen über eine Strecke  $s$  von 8,633 km auf einen Spiegel. Dort wird es reflektiert und gelangt wieder durch dieselbe Zahnradlücke in das Auge des Beobachters. Wird nun das Zahnrad in Bewegung versetzt und nach und nach immer schneller gedreht, so trifft das reflektierte Licht statt der Ausgangslücke bei einer bestimmten Umlaufzeit  $T$  den ihr folgenden Zahn. Das Zahnrad hat sich nämlich in der Zeit  $t$ , die das Licht braucht, um die Entfernung  $2s$  zu durchlaufen, um den Abstand Lücke–Zahn weitergedreht (Bild 93/2). Fizeau bestimmte  $T$  zu 0,079 s aus  $n = 12,6 \text{ s}^{-1}$ . ③

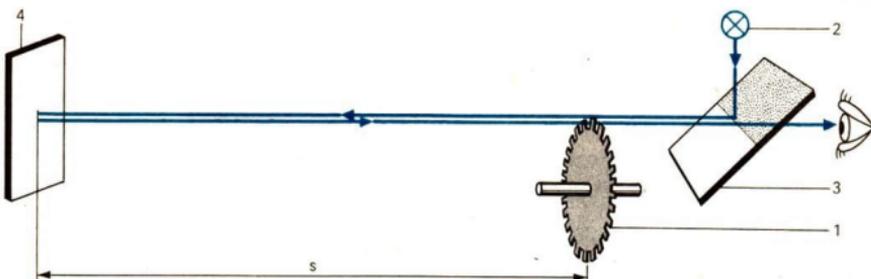


Bild 93/2 1 – Zahnrad, 2 – Lichtquelle, 3 – halbdurchlässiger Spiegel, 4 – Spiegel

- ① Nennen Sie Beispiele für Modelle aus dem bisherigen Physikunterricht! Welche Vorgänge bzw. Eigenschaften physikalischer Objekte werden mit dem jeweils betrachteten Modell gut beschrieben?
- ② Wodurch unterscheidet sich ein Lichtbündel von einem Lichtstrahl?
- ③ Berechnen Sie mit den Angaben zur Methode von Fizeau die Lichtgeschwindigkeit!

Mit modernen Meßanordnungen wurde die Genauigkeit bei der Messung der Lichtgeschwindigkeit weiter gesteigert:

**Die Lichtgeschwindigkeit beträgt annähernd 300 000 km/s (im Vakuum)** (genauer Wert  $c = 299\,792$  km/s).

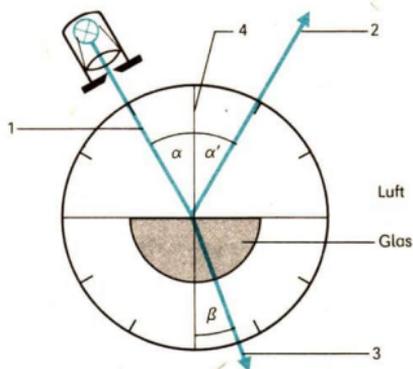
In allen Stoffen ist die Lichtgeschwindigkeit kleiner als im Vakuum. In Luft ist sie nur wenig geringer als im Vakuum. Für das Vakuum oder einen Stoff, in dem sich das Licht ausbreitet, verwenden wir die Bezeichnung *Medium*. (Lichtgeschwindigkeit in verschiedenen Medien → Tafelwerk 7–10, S. 39).

### Reflexion und Brechung des Lichtes

Vom Licht wissen wir bereits, daß es sich *in einem einheitlichen Stoff geradlinig ausbreitet*, der *Lichtweg von Licht auch in umgekehrter Richtung durchlaufen* werden kann und *Reflexion und Brechung gemeinsam auftreten* können.

Bei der zeichnerischen Darstellung der Reflexion und Brechung verwenden wir die im Bild 94/1 angegebenen Bezeichnungen.

Bild 94/1 1 – einfallender Strahl, 2 – reflektierter Strahl, 3 – gebrochener Strahl, 4 – Einfallslot,  $\alpha$  – Einfallswinkel,  $\alpha'$  – Reflexionswinkel,  $\beta$  – Brechungswinkel



**Reflexionsgesetz.** Die Reflexion des Lichtes erfolgt nach dem *Reflexionsgesetz* (Bild 94/2).

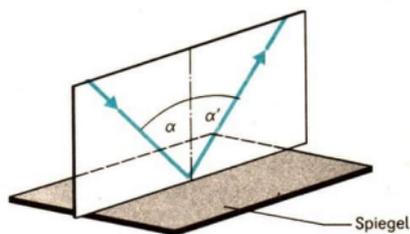


Bild 94/2

► **Trifft Licht auf einen Körper, so wird es reflektiert. Einfallswinkel  $\alpha$  und Reflexionswinkel  $\alpha'$  sind gleich groß. Einfallender Strahl, Einfallslot und reflektierter Strahl liegen in einer Ebene.**

**Brechungsgesetz.** Da die Brechung des Lichtes nicht nur für den Übergang von Luft in Glas und umgekehrt (Bilder 95/1 und 95/2), sondern auch beim Übergang in andere Stoffe erfolgt, wollen wir das Brechungsgesetz in einer allgemeineren Form als in Klasse 6 angeben. In dem in Bild 95/1 dargestellten Beispiel tritt das Licht von einem Medium, in dem sich das Licht mit größerer Geschwindigkeit ausbreitet, in ein Medium, in dem es sich mit geringerer Geschwindigkeit ausbreitet.

Man sagt für einen solchen Übergang, daß das Licht von einem (optisch) *dünnern Medium* in ein (optisch) *dichteres Medium* übergeht.

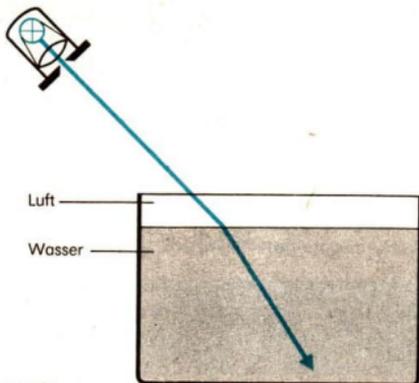


Bild 95/1

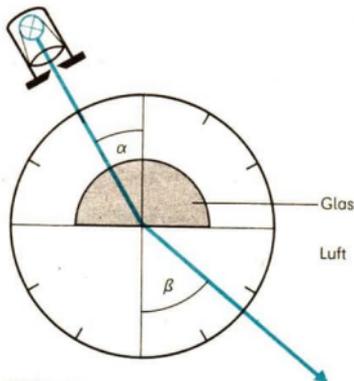


Bild 95/2

Das **Brechungsgesetz** kann damit wie folgt formuliert werden:

▶ **Tritt Licht unter einem Einfallswinkel  $\alpha \neq 0^\circ$  von einem optisch dünneren in ein optisch dichteres Medium über, so erfolgt Brechung. Der Einfallswinkel  $\alpha$  ist größer als der Brechungswinkel  $\beta$ . Einfallender Strahl, Einfallslot und gebrochener Strahl liegen in einer Ebene.**

Um noch genauere Aussagen treffen zu können, wollen wir Einfalls- und Brechungswinkel messen. ① ② ③ ④

- 34 ▼ Ein schmales Lichtbündel tritt von Luft in Kronglas über. Zu vorgegebenen Einfallswinkeln  $\alpha$  werden die Brechungswinkel  $\beta$  gemessen.  
Zur Auswertung der Meßergebnisse werden die Quotienten  $\alpha : \beta$  und  $\sin \alpha : \sin \beta$  berechnet.

$\alpha$ (in Luft)	$\beta$ (in Kronglas)	$\alpha : \beta$	$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$
20°	13°	1,5	1,5
40°	25°	1,6	1,5
60°	35°	1,7	1,5
80°	41°	2,0	1,5

Die Quotienten  $\sin \alpha : \sin \beta$  sind konstant.

- ① Nennen Sie je drei Stoffpaare für den Übergang des Lichtes
  - a) von einem optisch dichteren in ein optisch dünneres Medium,
  - b) von einem optisch dünneren in ein optisch dichteres Medium!
- ② Formulieren Sie verbal das Brechungsgesetz für den Übergang des Lichtes von einem optisch dichteren in ein optisch dünneres Medium!
- ③ Vergleichen Sie Brechungswinkel  $\beta$  und Einfallswinkel  $\alpha$  für den Übergang des Lichtes ( $\alpha \neq 0^\circ$ )
  - a) von Wasser in Luft, b) von Luft in Flintglas!
 Begründen Sie Ihre Aussagen!
- ④ Skizzieren Sie den Lichtweg für ein Lichtbündel, das unter einem Einfallswinkel  $\alpha = 45^\circ$  a) von Luft in Diamant, b) von Wasser in Luft übertritt!

Experimente für den umgekehrten Übergang bzw. mit anderen Medien zeigen ebenfalls, daß diese Quotienten (für die jeweils zwei betrachteten Medien) konstant sind. Außerdem zeigt sich, daß der Quotient  $\sin \alpha : \sin \beta$  genauso groß ist wie der Quotient  $c_1 : c_2$  der Lichtgeschwindigkeiten in beiden Medien. Am Beispiel des Übergangs von Licht aus Luft in Kronglas soll das verdeutlicht werden:

$$\sin \alpha : \sin \beta = 1,5; \quad c_{\text{Luft}} : c_{\text{Kronglas}} = \frac{3 \cdot 10^5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}}{2 \cdot 10^5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}} = 1,5.$$

Viele weitere experimentelle Untersuchungen belegen den Zusammenhang, der in der *mathematischen Formulierung des Brechungsgesetzes* seinen Ausdruck findet:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2}$$

**Einfallender Strahl, Einfallslot und gebrochener Strahl liegen in einer Ebene.**

**Anwendung des Brechungsgesetzes.** Die Kenntnis dieses Gesetzes ermöglicht es, für viele Vorgänge in Natur und Technik vorauszubestimmen, wie einfallende Lichtbündel nach der Brechung verlaufen. Das ist beispielsweise wichtig beim Bau präziser optischer Geräte.

- Einfarbiges Licht trifft auf die ebene Grenzfläche Luft–Flintglas unter einem Einfallswinkel von  $45^\circ$ . Wie groß ist der Brechungswinkel?

Analyse

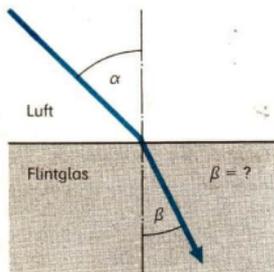


Bild 96/1

Gesucht:  $\beta$  (in Grad)

Gegeben:  $\alpha = 45^\circ; \sin 45^\circ = 0,7071$

$$c_1 = c_{\text{Luft}} = 3,00 \cdot 10^5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$c_2 = c_{\text{Flintglas}} = 1,86 \cdot 10^5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$$

Lösung:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_L}{c_{\text{Fl}}}$$

$$\sin \beta = \frac{c_{\text{Fl}}}{c_L} \cdot \sin \alpha$$

$$\sin \beta = \frac{1,86 \cdot 10^5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 0,7071}{3,00 \cdot 10^5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}}$$

$$\sin \beta = 0,4384$$

$$\underline{\underline{\beta = 26,0^\circ}}$$

**Ergebnis:** Unter Berücksichtigung einer sinnvollen Genauigkeit gilt: Der Brechungswinkel beträgt  $26^\circ$ .

① ②

- Das auf Seite 92 aufgeworfene Problem der scheinbar geringeren Tiefe eines Gewässers kann nun gelöst werden (Bild 97/1). Aus dem Physikunterricht der Klasse 6 ist uns bekannt, daß man stets die Gegenstände in der Richtung sieht, aus der die in das Auge fallenden Lichtbündel kommen. Richtungsänderungen der Lichtausbreitung führen zu Täuschungen. ③

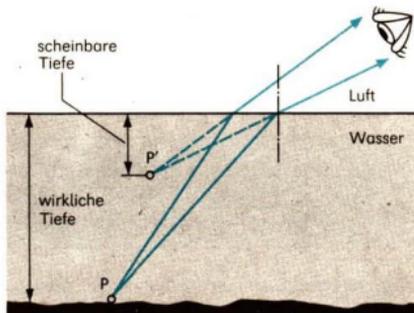


Bild 97/1

## Totalreflexion

Da sich Licht geradlinig ausbreitet, kann es nicht durch einen stark gekrümmten Schlauch gelangen. Ein *Lichtleitkabel* ist biegsam und besteht aus vielen dünnen Glas- oder Plastikfasern. Jede einzelne Faser hat einen Kern und einen Mantel aus optisch unterschiedlich dichten Medien (Bild 97/2).

Ein Lichtleitkabel läßt das Licht auch dann hindurch, wenn das Kabel stark gekrümmt ist. Ist das ein Widerspruch zu unseren bisherigen Erkenntnissen?

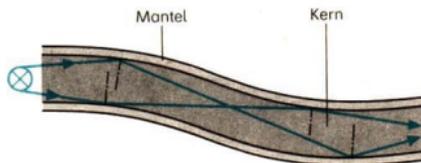


Bild 97/2 Schematische Darstellung der Lichtleitung in einer Faser eines Lichtleitkabels

**Totalreflexion und Grenzwinkel.** Um die Vorgänge in einem Lichtleitkabel verstehen zu können, wollen wir die Brechung des Lichtes für den Fall des Übergangs des Lichtes von einem optisch dichteren in ein optisch dünneres Medium untersuchen.

- 35 ▼ Licht trifft aus einem optisch dichteren Medium kommend auf die Grenzfläche zu einem optisch dünneren Medium. Beim stetigen Vergrößern des Einfallswinkels  $\alpha$  wird der Lichtweg verfolgt (Bild 97/3).

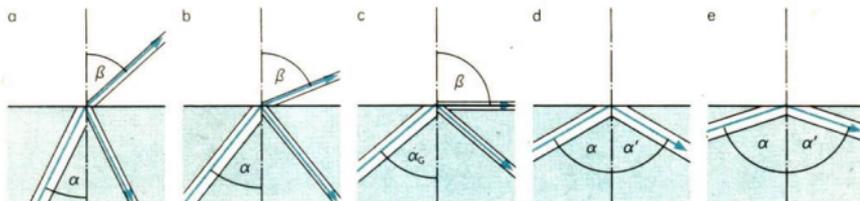


Bild 97/3

- ① Licht trifft auf die Grenzfläche a) Luft–Wasser, b) Kronglas–Luft unter einem Einfallswinkel von  $25^\circ$ . Wie groß ist jeweils der Brechungswinkel?
- ② Licht tritt durch die Grenzfläche Luft–Kronglas unter einem Brechungswinkel von  $30^\circ$ . Wie groß ist der Einfallswinkel?
- ③ Erklären Sie anhand von Bild 92/1 das Zustandekommen des Eindrucks der geringeren Tiefe eines klaren Gewässers!

Von einem bestimmten Einfallswinkel  $\alpha$  an wird das Licht nicht mehr gebrochen, sondern vollständig in das optisch dichtere Medium zurück reflektiert. Das Licht wird **total reflektiert**.

Der Einfallswinkel  $\alpha_G$ , der zum Brechungswinkel  $\beta = 90^\circ$  gehört, wird **Grenzwinkel der Totalreflexion** genannt.

**Totalreflexion tritt ein, wenn Licht aus einem optisch dichteren Medium kommend auf die Grenzfläche zu einem optisch dünneren Medium trifft und der Einfallswinkel größer als der Grenzwinkel ist.**

*Grenzwinkel der Totalreflexion für den Übergang des Lichtes in Luft*

Medium	Grenzwinkel $\alpha_G$
Wasser	$48,6^\circ$
Flintglas	$38,3^\circ$
Kohlenstoffdisulfid	$37,8^\circ$
Diamant	$24,6^\circ$

Der Grenzwinkel für eine gegebene Stoffkombination kann experimentell bestimmt oder mit Hilfe des Brechungsgesetzes berechnet werden.

- Berechnen Sie den Grenzwinkel der Totalreflexion für die Stoffkombination Wasser – Luft!

*Analyse:*

Gesucht:  $\alpha_G$

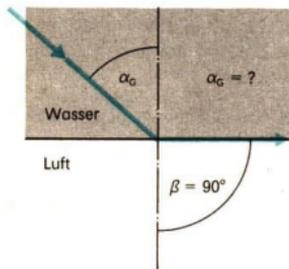


Bild 98/1

Gegeben:  $c_{\text{Wasser}} = 2,25 \cdot 10^5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$

$c_{\text{Luft}} = 3,00 \cdot 10^5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$

$\beta = 90^\circ$

*Plan zur Lösung:* Der Grenzwinkel  $\alpha_G$  ist der Einfallswinkel, unter dem das Licht auf die Grenzfläche zu einem optisch dünneren Medium trifft, bei dem der Brechungswinkel  $\beta = 90^\circ$  beträgt.

*Lösung:*

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_W}{c_L}$$

$$\sin \alpha = \frac{c_W \cdot \sin \beta}{c_L}$$

$$\sin \alpha_G = \frac{2,25 \cdot 10^5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 1}{3,00 \cdot 10^5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}}$$

$$\sin \alpha_G = 0,7500$$

$$\underline{\underline{\alpha_G = 48,6^\circ}}$$

*Ergebnis:* Der gesuchte Grenzwinkel beträgt  $48,6^\circ$ .

**Aufgabe**

Berechnen Sie den Grenzwinkel der Totalreflexion für die Stoffkombination Kronglas–Luft, und bestätigen Sie das Ergebnis experimentell!

**Vorbereitung**

Berechnen Sie den geforderten Grenzwinkel!

**Durchführung und Auswertung**

- Überprüfen Sie nach Bild 99/1 den berechneten Grenzwinkel!
- Überzeugen Sie sich davon, daß bei weiterer Vergrößerung des Einfallswinkels  $\alpha > \alpha_G$  keine Brechung mehr, sondern Totalreflexion erfolgt! ①

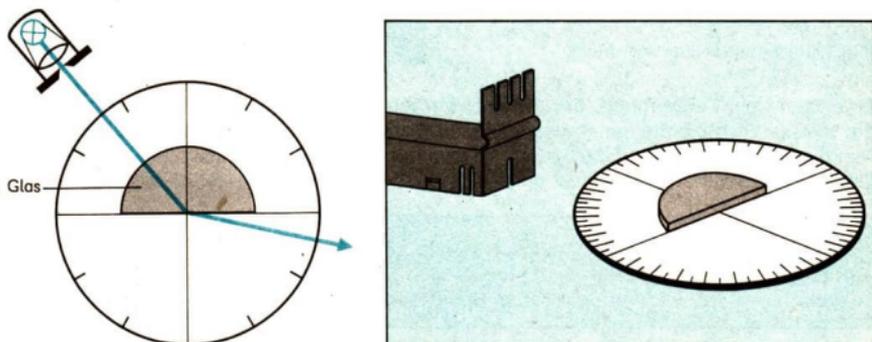


Bild 99/1 Experimentieranordnung

**Anwendung der Totalreflexion.** Die Totalreflexion wird im **Lichtleitkabel** angewandt (vgl. S. 97). In jeder einzelnen biegsamen Faser des Lichtleitkabels wird das Licht geleitet, weil Kern und Mantel aus unterschiedlichen Medien bestehen, wobei der Mantel optisch dünner als der Kern sein muß (Bild 97/2).

Lichtleitkabel werden u. a. in der Medizin für das Ausleuchten von Körperhöhlen und in der Technik zum Untersuchen von Hohlräumen in Maschinen verwendet.

Große Bedeutung werden Lichtleitkabel für die Informationsübertragung erlangen (vgl. S. 86). ②

**Brechung und Farbzerlegung an Prismen**

Licht wird an den Grenzflächen von optischen Prismen nach dem Brechungsgesetz gebrochen (Bild 99/2). Bei der Brechung weißes Lichtes an Prismen können außerdem *Farben* auftreten, wie wir sie z. B. vom Regenbogen kennen.

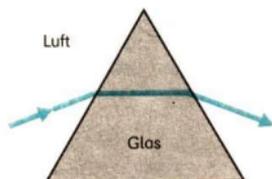


Bild 99/2 Zweimalige Brechung an einem Prisma

- Berechnen Sie jeweils den Grenzwinkel der Totalreflexion für die Stoffkombination a) Diamant–Luft, b) Flintglas–Luft!
- Erklären Sie die Wirkungsweise eines Lichtleitkabels!

Ein schmales, weißes Lichtbündel wird so auf ein optisches Prisma gerichtet, daß es zweimal gebrochen wird. Das aus dem Prisma austretende Licht trifft auf einen Schirm (Bild 100/1).

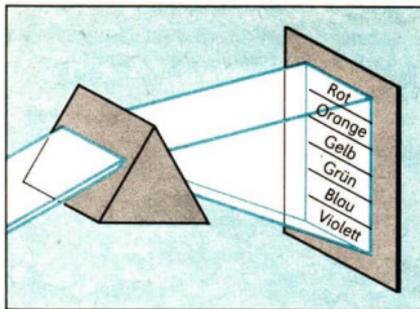


Bild 100/1 Experimentieranordnung

Es entsteht ein Farbenband, bei dem die Farben kontinuierlich ineinander übergehen. Ein solches Farbenband nennt man **kontinuierliches Spektrum**. Deutlich erkennbare Farben dieses Spektrums sind die *Spektralfarben* Rot, Orange, Gelb, Grün, Blau und Violett. Das kontinuierliche Spektrum ist durch Zerlegung von weißem Licht entstanden.

**Weißes Licht ist zusammengesetztes Licht. Weißes Licht kann man durch Brechung in die farbigen Bestandteile zerlegen. Dabei entsteht ein kontinuierliches Spektrum.**

Mit diesen Kenntnissen ist es möglich, die interessante Naturerscheinung eines Regenbogens zu erklären (→ Bild 90/1).

**Entstehung eines Regenbogens.** Sonnenlicht dringt in die Regentropfen ein. Es wird an der Grenzfläche Luft–Wasser (für  $\alpha \neq 0^\circ$ ) gebrochen und in Farben zerlegt. Trifft dieses gebrochene und zerlegte Licht auf die Innenseite (Grenzfläche Wasser–Luft) unter einem Winkel, der größer als der Grenzwinkel der Totalreflexion ist, so wird es total reflektiert (Bild 100/2). Beim Übergang Wasser–Luft wird es erneut gebrochen und gelangt schließlich in das Auge des Betrachters. Da die Zerlegung von vielen Regentropfen an unterschiedlichen Stellen erfolgt, sieht dieser einen Regenbogen. ①

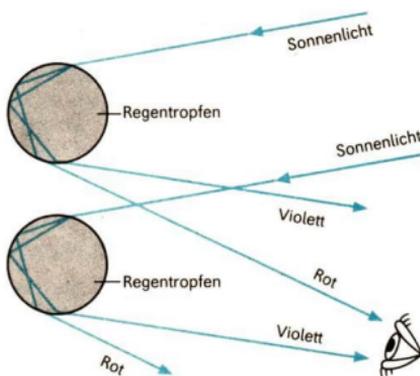


Bild 100/2 Schematische Darstellung der Entstehung eines Regenbogens

### Reelle Bilder an Sammellinsen

Im Haushalt und in vielen anderen Bereichen werden optische Geräte verwendet, in denen mittels Sammellinsen Bilder von Gegenständen erzeugt werden (Bild 101/1).

**Entstehung reeller Bilder mittels Sammellinsen.** Bilder, die man auf einem Schirm auffangen kann, bezeichnet man als **reelle Bilder**.

Ein reelles Bild entsteht, wenn sich der beleuchtete oder selbstleuchtende Gegenstand außerhalb der einfachen Brennweite einer Sammellinse befindet. Im Bild 101/2 sind der Strahlenverlauf und die Entstehung eines reellen Bildes an einer Sammellinse dargestellt. Von dem Gegenstandspunkt G breitet sich Licht nach allen Seiten aus. Bei der zeichnerischen Darstellung verwendet man wegen ihres übersichtlichen Verlaufs häufig zwei der drei besonderen Strahlen (*Mittelpunkt-, Parallel- und Brennpunktstrahl*) zur Bildkonstruktion.

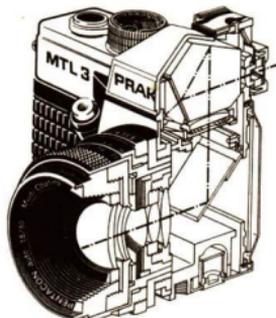


Bild 101/1 Schnittbild einer Spiegelreflexkamera

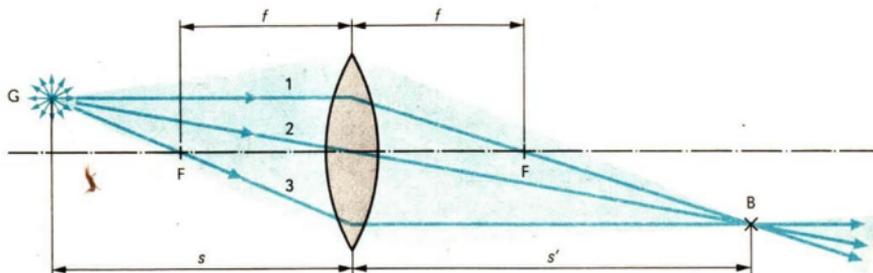


Bild 101/2 1 – Parallelstrahl, 2 – Mittelpunktstrahl, 3 – Brennpunktstrahl, G – Gegenstandspunkt, B – Bildpunkt,  $f$  – Brennweite,  $s$  – Gegenstandsweite,  $s'$  – Bildweite

Soll auf einem Schirm mittels einer Sammellinse ein umgekehrtes reelles Bild erzeugt werden, so kann man den Gegenstand in verschieden großer Entfernung von der Linse bringen, wenn dabei seine *Gegenstandsweite*  $s$  nur größer als die Brennweite  $f$  ist.

Wie hängt der Abstand des Bildes von der Linse – die *Bildweite*  $s'$  – von der Gegenstandsweite  $s$  ab?

38

▼ Außerhalb der Brennweite der Linse wird als Gegenstand das angestrahlte L-Dia aufgestellt. Es wird schrittweise so entlang der optischen Bank verschoben, daß die Gegenstandsweite stets größer als die Brennweite bleibt. Für jede Stellung wird der Schirm so aufgestellt, daß ein scharfes Bild entsteht (Bild 101/3).

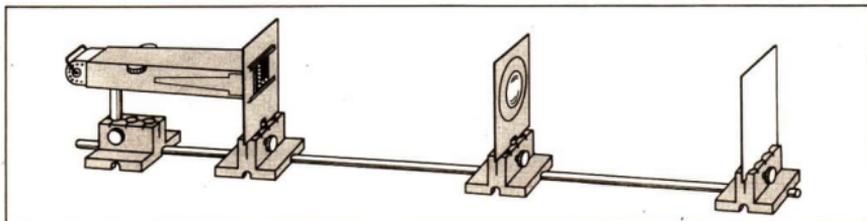


Bild 101/3 Experimentieranordnung auf einer optischen Bank

- ① Warum erscheint uns ein mit weißem Licht beleuchteter Gegenstand farbig, wenn man ihn durch ein geeignetes Stück geschliffenes Glas betrachtet?

Die Bildweite des reellen Bildes einer Sammellinse ist von der Gegenstandsweite abhängig. Je größer die Gegenstandsweite ist, um so kleiner ist die Bildweite.

**Entfernungseinstellung bei einem Fotoapparat.** Beim Fotoapparat befindet sich der Film zwischen einfacher und doppelter Brennweite der Linse (des Objektivs). Auf dem Film entsteht ein reelles Bild (Bild 102/1). Soll dieses reelle Bild scharf sein, dann muß durch Bewegen der Linse (des Objektivs) die Bildweite entsprechend verändert werden (Bild 102/2).

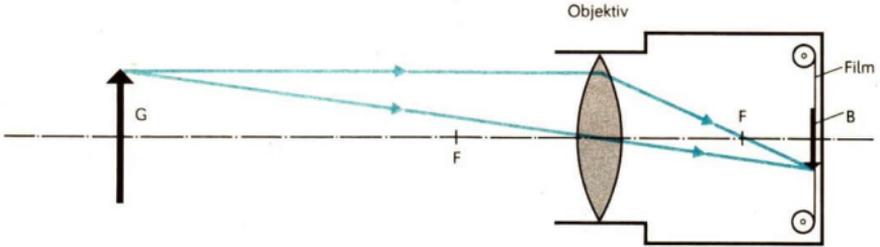


Bild 102/1 Bildentstehung in einem Fotoapparat

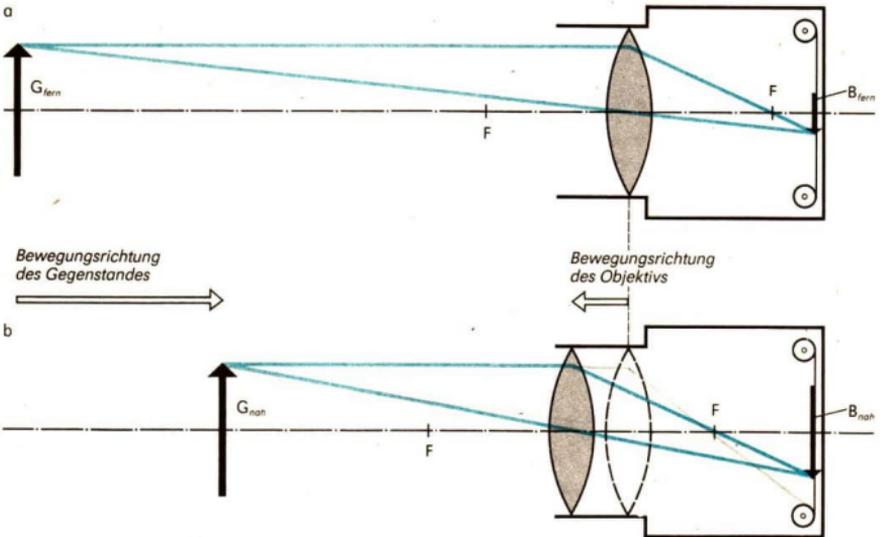


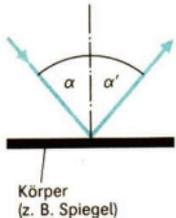
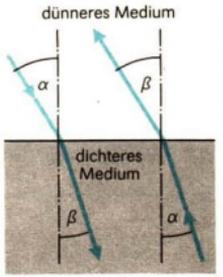
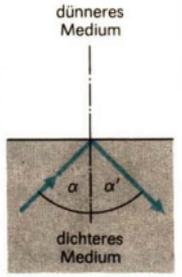
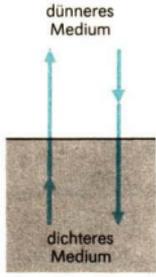
Bild 102/2 Entfernungseinstellung bei einem Fotoapparat

Bei einem Fotoapparat stellt man durch Bewegen des Objektivs die Bildweite so ein, daß ein scharfes Bild auf dem Film entsteht.

## Zusammenfassung

Die Strahlenoptik ist das Teilgebiet der Physik, in dem optische Erscheinungen und Vorgänge mit Hilfe des *Modells Lichtstrahl* beschrieben werden. Der Lichtstrahl kennzeichnet den Weg des Lichtes.

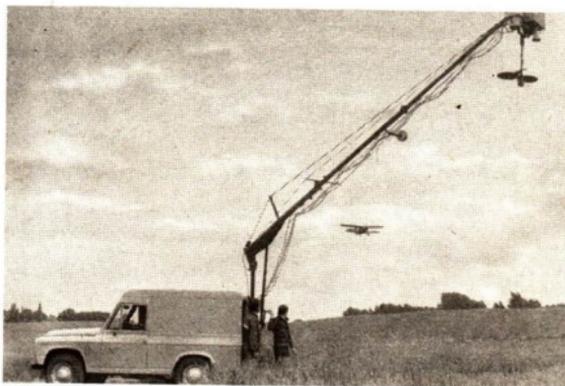
Trifft Licht auf die Grenzfläche zweier unterschiedlicher Medien, so treten unter bestimmten Bedingungen Reflexion, Brechung, Totalreflexion oder geradliniger Durchgang auf.

<b>Reflexion</b>  Körper (z. B. Spiegel)	<b>Brechung</b> 	<b>Totalreflexion</b> 	<b>geradliniger Durchgang</b> 
$\alpha \neq 90^\circ$  <i>Reflexionsgesetz</i> $\alpha = \alpha'$	dünnere Medium: $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ dichteres Medium: $\alpha \leq \alpha_G$  <i>Brechungsgesetz</i> $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2}$	dünnere Medium: $\alpha > \alpha_G$ dichteres Medium: - dünnere Medium: $\alpha > \alpha_G$	$\alpha = 0^\circ$
Einfallender Strahl, Einfallslot und reflektierter/gebrochener Strahl liegen in einer Ebene.			

- Ermitteln Sie durch Konstruktion, unter welchen Bedingungen bei der Abbildung eines Gegenstandes durch eine Sammellinse
  - ein vergrößertes reelles Bild, b) ein verkleinertes reelles Bild, c) ein gleichgroßes reelles Bild entsteht!
- Beschreiben Sie den Aufbau und erklären Sie die Wirkungsweise eines Fotoapparates!
- Erklären Sie die Entfernungseinstellung bei einem Fotoapparat!

In der DDR wurden 1986 Bodenerkundungen gleichzeitig von der Erde, von Flugzeugen und von der sowjetischen Raumstation Mir aus vorgenommen. Bei Aufnahmen mit normalen Luftbildkameras haben viele Objekte der Erde gleiche Farbe und Helligkeit.

Warum sind die Fotos der Multispektralkamera (VEB Kombinat Carl Zeiss Jena) aus verschiedenen Spektralbereichen wesentlich informativer als eine einzelne gewöhnliche Aufnahme?



### Das Licht und seine Welleneigenschaften

Licht kann – wie mechanische Wellen und Hertzsche Wellen – **reflektiert** und **gebrochen** werden. Es liegt deshalb nahe anzunehmen, daß Licht und diese Wellen noch weitere gemeinsame Eigenschaften haben. Diese Auffassung vertrat bereits Christiaan Huygens. Er ordnete den Lichtbündeln Wellenfronten zu (Bilder 104/2a und b).

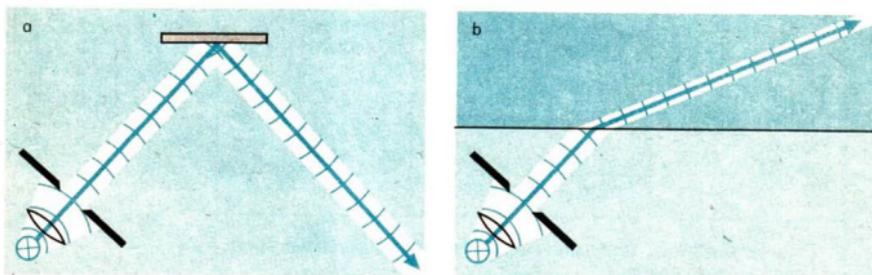


Bild 104/2

Wir nutzen ein Experiment, um festzustellen, ob beim Licht Beugung und Interferenz auftritt.

Zur Untersuchung verwenden wir einfarbiges (rotes) Licht und – wie bei mechanischen Wellen und Hertzschen Wellen – einen Doppelspalt. ①

**Ableiten einer Voraussage.** Wenn Licht *gebogen* wird, müßte es auch in den Schattenraum hinter den beiden Spalten gelangen. Wenn die beiden Lichtbündel miteinander *interferieren*, müssen auf einem Schirm Bereiche der Verstärkung (Helligkeit) und Abschwächung (Dunkelheit) in regelmäßiger Folge auftreten (Bild 105/1).

Im Gegensatz zu den Experimenten mit Wasserwellen können wir nicht die einzelnen Wellenfronten wie in Bild 41/5 sehen, sondern nur die Auftreffstellen des Lichtes auf dem Schirm. Es müßten deshalb parallele helle und dunkle Streifen auftreten.

transparenter Schirm



Bild 105/1 Erwartetes Beobachtungsergebnis nach Beugung und Interferenz des Lichtes an einem Doppelspalt



**Experimentelle Prüfung der Voraussage.** Zur Überprüfung dieser Voraussage führen wir das folgende Experiment durch.

39

Das von dem schmalen Spalt ausgeblendete rote Licht (Bild 105/2) durchdringt den Doppelspalt und gelangt auf den Schirm. Es treten parallele rote Streifen in gleichen Abständen voneinander auf. Zwischen den roten Streifen sind dunkle Streifen vorhanden.

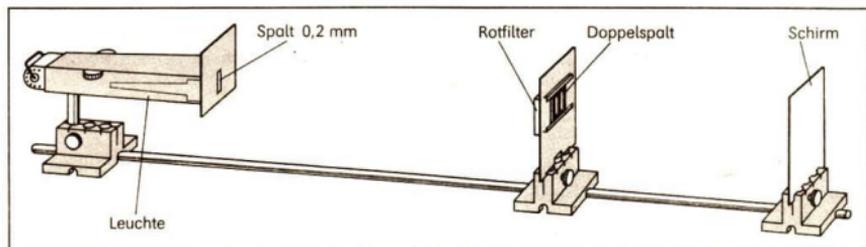


Bild 105/2 Experimentieranordnung

**Auswertung des Experiments:** Da das Licht in den Schattenraum hinter dem Doppelspalt eindringt, liegt Beugung vor. Die roten und die dunklen Stellen belegen, daß die beiden Lichtbündel, die den Doppelspalt durchdringen, miteinander interferieren. Die Entstehung der roten und dunklen Streifen läßt sich so wie bei der Interferenz zweier Wasserwellen erklären (Bild 105/3).

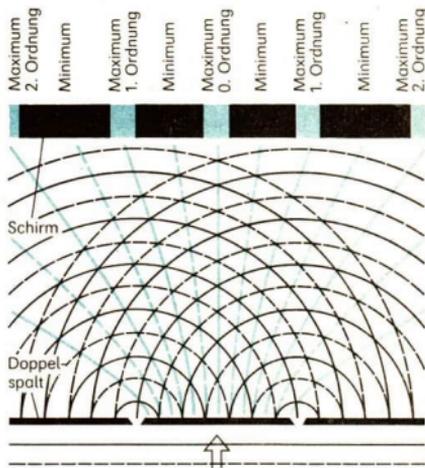


Bild 105/3 Schematische Darstellung der Interferenz zweier Kreiswellen

Maximum: Helligkeitsmaximum (heller Interferenzstreifen)

Minimum: Helligkeitsminimum (Dunkelheit)

- ① Erläutern Sie, wie man die Beugung und Interferenz bei mechanischen Wellen und Hertzchen Wellen experimentell nachweisen kann!

Damit ist unsere Voraussage bestätigt:

**Am Doppelspalt tritt Beugung und Interferenz von Licht auf.  
Licht hat Welleneigenschaften.**

### Grenzen des Modells Lichtstrahl

Wir wissen, daß das Modell Lichtstrahl zur *Beschreibung* der geradlinigen Ausbreitung in einheitlichem Stoff, der Reflexion, der Brechung und der Totalreflexion gut geeignet ist. Der Weg des Lichtes wird mit dem Lichtstrahl gekennzeichnet. Eine Beschreibung und Erklärung der Beugungs- und Interferenzerscheinungen ist dagegen mit dem Modell Lichtstrahl nicht möglich.

Will man das Eindringen von Licht in den Schattenraum hinter einem Hindernis oder das Entstehen von Verstärkungen und Abschwächungen beschreiben oder erklären, so muß man das Licht als Welle betrachten.

Das zeigt, daß mit **einem** Modell nur bestimmte Seiten eines Objekts erfaßt werden können.

Will man ein Objekt umfassend charakterisieren, so bedarf es dazu oft mehrerer Modelle. Das ist auch beim Licht der Fall.

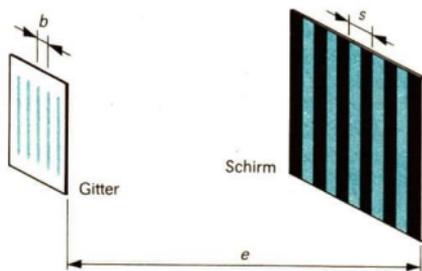
### Zerlegung des Lichtes durch Interferenz in Farben

Die Zerlegung des Lichtes in Farben wurde bereits bei der Brechung weißen Lichtes an einem optischen Prisma beobachtet ( $\nearrow$  S. 100). Auch bei der Interferenz von *weißem* Licht nach der Beugung an einem Doppelspalt treten Farberscheinungen auf ( $\nearrow$  Farbbeilage). Vergrößert man die Anzahl der Spalte, so können diese Farberscheinungen noch besser beobachtet werden. Ein solches System von Spalten heißt *Gitter*. Wegen der besseren Sichtbarkeit benutzen wir zur Untersuchung der Farberscheinungen ein solches Gitter.

#### 40 Aufgabe

1. Betrachten Sie Interferenzbilder nach Beugung weißen Lichtes an einem Gitter! Beschreiben Sie das Aussehen der betrachteten Maxima!
2. Untersuchen Sie die Abhängigkeit des Streifenabstandes  $s$  von der Farbe des Lichtes (Bild 106/1)!

Bild 106/1 Schematische Darstellung des Streifenabstandes  $s$ , der Entfernung  $e$  zwischen Gitter und Schirm und des Abstandes  $b$  zweier benachbarter Spalte



#### Durchführung

1. Bauen Sie die Experimentieranordnung (zunächst ohne Verwendung von Filter und Gitter) nach Bild 107/1 auf!
2. Stellen Sie den Abstand Leuchte–Schirm auf 800 mm ein! Sorgen Sie durch Drehen am Lampenstiel für Parallelstellung von Glühwendel und Spalt! Bilden Sie den beleuchteten Spalt mit der Linse scharf auf dem Schirm ab!
3. Schieben Sie das Gitter ( $b = 0,05 \text{ mm}$ ) in den Schiebeshacht und führen Sie die Untersuchungen zu Aufgabe 1 durch!
4. Verwenden Sie bei der Untersuchung zur Aufgabe 2 nacheinander ein Rot- und ein Blaufilter! Halten Sie  $e = 500 \text{ mm}$  konstant!

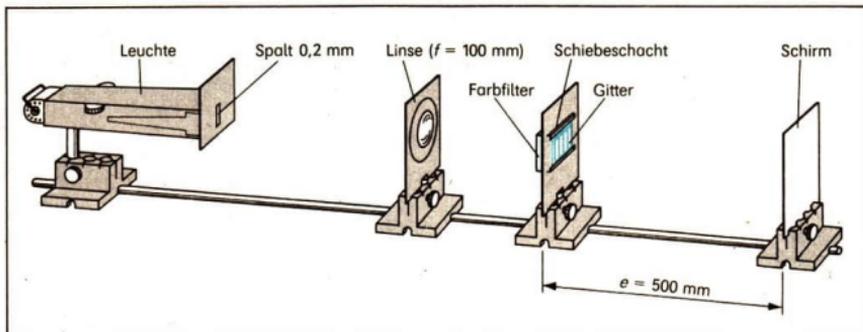


Bild 107/1 Experimentieranordnung

Tragen Sie die Meßwerte in die Tabelle ein!

Filterfarbe	Rot	Blau
Streifenabstand $s$		

#### Auswertung

- Beschreiben Sie die Maxima erster Ordnung und die höherer Ordnungen!
- Formulieren Sie die Abhängigkeit zwischen Streifenabstand  $s$  und Lichtfarbe!

Bei der *Interferenz* durch Beugung ergeben sich bei der Verwendung von *weißem Licht* auf dem Schirm in den Maxima erster und aller folgenden Ordnungen *kontinuierliche Spektren*.

Bei der Verwendung von *Licht unterschiedlicher Farben* liegen die *Maxima* (außer die der nullten Ordnung) *an verschiedenen Stellen* des Schirmes.

Damit haben wir eine weitere Möglichkeit der Farbzerlegung des weißen Lichtes kennengelernt.

► **Weißes Licht kann durch Interferenz in seine farbigen Bestandteile zerlegt werden. Dabei entstehen kontinuierliche Spektren.**

**Zusammenhang zwischen Farbe und Wellenlänge des Lichtes.** Besteht ein Zusammenhang zwischen Farbe und Wellenlänge des Lichtes? Diese Frage kann mit Hilfe physikalischer und geometrischer Kenntnisse beantwortet werden. In der grafischen Darstellung (→ hintere Umschlaginnenseite des Buches) werden unterschiedliche Wellenlängen durch unterschiedliche Abstände benachbarter Kreise dargestellt. Es wird deutlich, daß im gleichen Medium bei konstant gehaltenem Abstand  $b$  zweier benachbarter Spalte und gleicher Entfernung  $e$  zwischen Gitter und Schirm die blauen Interferenzstreifen enger beieinander liegen als die roten Interferenzstreifen, weil  $\lambda_{\text{rot}} > \lambda_{\text{blau}}$  ist.

- Erläutern Sie, was man unter Beugung bzw. Interferenz des Lichtes versteht!
- Erläutern Sie am Beispiel zweier Wellen (gleicher Amplitude und gleicher Wellenlänge), unter welchen Bedingungen bei der Interferenz dieser Wellen Verstärkung bzw. Auslöschung auftreten!

Die unterschiedlichen Lagen der einzelnen farbigen Interferenzstreifen werden durch die verschiedenen Wellenlängen bedingt.

Da die Wellenlänge verschiedener Lichtfarben vom Medium abhängig ist, muß man dieses immer mit angeben.

In der nebenstehenden Tabelle sind die mittleren Wellenlängen der einzelnen Lichtfarben (in Luft) zusammengestellt.

① ② ③

Farbe	Wellenlänge in nm
Rot	700
Orange	620
Gelb	580
Grün	530
Blau	460
Violett	410

**Berechnung der Frequenz einfarbigen Lichtes.** Mit unseren Kenntnissen über die Ausbreitung des Lichtes als Welle können wir die Frequenz von Licht berechnen.

- Wie groß ist die Frequenz roten Lichtes der Wellenlänge 700 nm?

Gesucht:  $f_{\text{rot}}$  (in Hz)

Gegeben:  $\lambda_{\text{rot}} = 700 \text{ nm}$

Lösung:  $c = \lambda \cdot f$

$$\lambda_{\text{rot}} = 700 \cdot 10^{-9} \text{ m}$$

$$f_{\text{rot}} = \frac{c}{\lambda_{\text{rot}}}$$

$$c_{\text{Luft}} = 300000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$f_{\text{rot}} = \frac{3,00 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{7,00 \cdot 10^2 \cdot 10^{-9} \text{ m}}$$

$$c_{\text{Luft}} = 300000 \cdot 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$f_{\text{rot}} = 0,428 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1}$$

$$\underline{\underline{f_{\text{rot}} = 4,3 \cdot 10^{14} \text{ Hz}}}$$

Ergebnis: Die Frequenz des roten Lichtes der Wellenlänge 700 nm beträgt  $4,3 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ .

④ ⑤

## Arten von Spektren

**Kontinuierliche Spektren.** Über die Farbzerlegung weißen Lichtes wissen wir bereits:

- Ein kontinuierliches Spektrum kann man sowohl durch Interferenz als auch durch Brechung von weißem Licht erzeugen.
- Weißes Licht des glühenden Metalldrahtes einer Glühlampe ergibt bei spektraler Zerlegung ein kontinuierliches Spektrum.

**Linienpektren.** Es liegt nun die Frage nahe: Treten kontinuierliche Spektren auch bei der Zerlegung von Licht anderer Lichtquellen auf? Um sie zu beantworten, führen wir ein Experiment mit einer Quecksilberdampf Lampe durch, wie sie zur Straßenbeleuchtung Verwendung findet. Sie enthält als Füllgas Quecksilberdampf.

- 41 ▼ Das Licht einer leuchtenden Quecksilberdampf-  
lampe wird mit einem Gitterspektralapparat  
zerlegt (Bild 109/1).

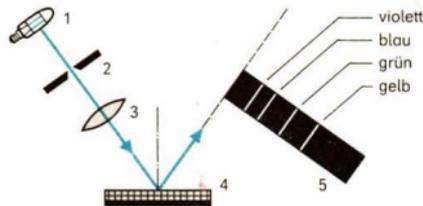


Bild 109/1 Experimentieranordnung

1 – Quecksilberdampf-Lampe, 2 – Spalt,  
3 – Linse, 4 – Reflexionsgitter, 5 – Schirm

Das Spektrum des zum Leuchten angeregten gasförmigen Quecksilbers unter niedrigem Druck ist nicht kontinuierlich, es besteht aus wenigen farbigen Linien.

Man nennt ein solches Spektrum *Linienspektrum*. Zerlegt man das Licht anderer atomarer Gase niedrigen Drucks (z. B. von Natrium, Helium, Wasserstoff) spektral, so ergeben sich ebenfalls Linienspektren (↗ Farbtafel).

Gustav Kirchhoff (1824 bis 1887) und Robert Wilhelm Bunsen (1811 bis 1899) erkannten in der Mitte des 19. Jahrhunderts, daß das Spektrum der zum Leuchten angeregten atomaren gasförmigen Stoffe unter niedrigem Druck für jedes Element anders ist. Die Spektren unterscheiden sich in der Anzahl und der Lage (und damit der Farbe) der Linien. Jeder Stoff hat sein eigenes Spektrum. Aus dem Spektrum kann man erkennen, um welchen Stoff oder um welche Stoffe es sich handelt. Diese Tatsache wird in der von Kirchhoff und Bunsen entwickelten *Spektralanalyse* genutzt. Zur Ermittlung der Stoffe wird das Spektrum meist fotografiert und mit den bekannten Spektren der verschiedenen Stoffe verglichen (↗ Farbtafel). ⑥

**Spektren leuchtender Gase unter hohem Druck.** Der Druck leuchtender Gase steigt in einigen Lampenarten, z. B. in einer XENON-Höchstdrucklampe, nach dem Einschalten stark an. Wenn das Licht dieser Lampe spektral zerlegt wird, erhält man – im Unterschied zu den Spektren von leuchtenden Gasen unter niedrigem Druck – ein *kontinuierliches Spektrum* (↗ Farbtafel).

**Glühende feste und flüssige Körper sowie leuchtende Gase unter hohem Druck senden Licht aus, das bei spektraler Zerlegung ein kontinuierliches Spektrum ergibt.**

**Bei Zerlegung des Lichtes atomarer Gase unter geringem Druck entsteht ein Linienspektrum.**

- ① Erklären Sie die Abhängigkeit des Abstandes der Interferenzstreifen von der Wellenlänge des verwendeten Lichtes (↗ hintere innere Umschlagseite des Lehrbuches)!
- ② Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Wellenlänge in Luft und der Farbe des Lichtes?
- ③ Berechnen Sie mit den Meßwerten aus dem Schülerexperiment (↗ S. 106) die Wellenlänge des verwendeten roten bzw. blauen Lichtes nach der Gleichung

$$\lambda = \frac{b \cdot s}{e} \quad (\text{↗ Bild 106/1})!$$

Vergleichen Sie die berechneten Wellenlängen mit den im Tafelwerk angegebenen!

- ④ Berechnen Sie die mittlere Frequenz violetten Lichtes!
- ⑤ Welche Wellenlänge (in Luft) hat gelbes Licht der Frequenz  $f = 5,2 \cdot 10^{14}$  Hz?
- ⑥ Beschreiben Sie jeweils das Aussehen der Spektren von Natrium bzw. Quecksilber (niedriger Druck)! Wie erzeugt man derartige Spektren? Welche Informationen liefern sie?

**Das Spektrum des Sonnenlichts.** Bei der Untersuchung des Sonnenlichts zu Beginn des 19. Jahrhunderts fiel Josef Fraunhofer (1787 bis 1826) auf, daß Sonnenlicht – grob betrachtet – ein kontinuierliches Spektrum hat. Beim genaueren Betrachten fand er jedoch viele schwarze Linien. Worauf sind diese *Fraunhoferschen Linien* (↗ Farbtafel) im Sonnenspektrum zurückzuführen?

Von Farbfiltern wissen wir bereits, daß sie nur bestimmte Farbanteile hindurchlassen. So läßt ein Rotfilter vom auftretenden Licht vor allem rotes Licht hindurch, ein Grünfilter vor allem grünes Licht. Das Licht der übrigen Farben wird absorbiert (verschluckt). Betrachtet man das Spektrum von Glühlampenlicht, das durch ein Filter hindurchgegangen ist, so bemerkt man, daß nur die Lichtfarben auftreten, die vom Filter hindurchgelassen wurden. Die übrigen Stellen im Spektrum sind schwarz (Bild 110/1). Ähnliche Erscheinungen treten auch auf, wenn Licht durch bestimmte Gase hindurchtritt.

Bild 110/1 Spektrum nach Absorption von Anteilen des weißen Lichtes durch eine blau-grüne Farbfolie



Auf der Sonne durchdringt das von der Photosphäre ausgesandte Licht die äußere Gashülle. Diese Gashülle wirkt dabei wie ein Filter. Wir wollen ihren Einfluß in einem Experiment untersuchen.

42

Das von einer Glühlampe ausgesandte Licht wird spektral zerlegt. Es entsteht ein kontinuierliches Spektrum. Nun bringt man in den Lichtweg eine Natriumflamme.

Im Spektrum tritt an der Stelle, wo im Linienspektrum des Natriums eine gelbe Linie vorhanden ist, eine schwarze Linie auf (Bild 110/2; ↗ Farbtafel).

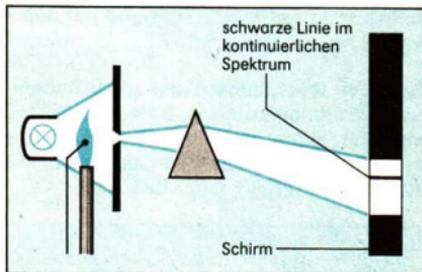


Bild 110/2 Experimentieranordnung

Bei anderen absorbierenden atomaren Gasen geringen Drucks liegen die Absorptionslinien an anderen Stellen.

Zwischen den Linienspektren leuchtender Gase und den Absorptionslinien besteht folgender Zusammenhang: Ein leuchtendes Gas absorbiert Licht der Farbe, die es selbst aussendet (↗ Farbtafel).

Die dunklen Linien im Spektrum des Sonnenlichts entstehen durch teilweise Absorption des Lichtes von der Photosphäre in der äußeren Sonnenhülle. Sie lassen erkennen, welche Elemente sich dort befinden.

①

## Infrarote und ultraviolette Strahlung

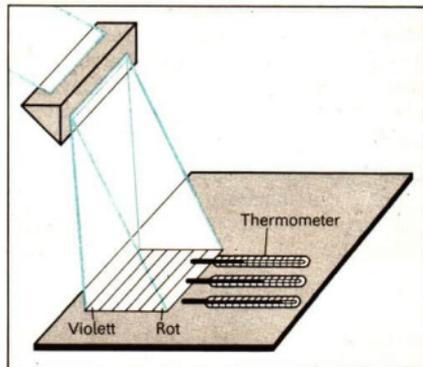
**Infrarote Strahlung (Wärmestrahlung).** Das kontinuierliche Spektrum erstreckt sich vom Rot über Orange, Gelb, Grün, Blau bis zum Violett. Stellen die Farben Rot und Violett die zwei Enden des Spektrums dar oder tritt auch außerhalb dieser Farben noch Strahlung auf, die wir mit unseren Augen nur nicht wahrnehmen können?

▼ Bewegt man ein Thermometer, dessen Thermometergefäß geschwärzt ist, sehr langsam über das rote Ende des Spektrums von Glühlampenlicht hinaus (Bild 111/1), so stellt man fest, daß die Temperatur noch weiter ansteigt.

Damit ist nachgewiesen, daß auch außerhalb des sichtbaren roten Teils des Spektrums noch Strahlung auftritt. Diese Strahlung nennt man *infrarote Strahlung*. Ihre Wellenlänge in Luft ist größer als 770 nm.

Infrarote Strahlung hat die gleichen Welleneigenschaften wie Licht.

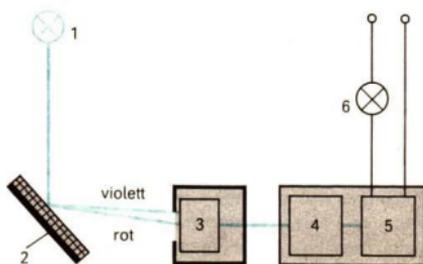
Bild 111/1 Nachweis der infraroten Strahlung



Infrarotstrahlung ist die Strahlung, die wir bereits als Wärmestrahlung kennen. Eine Messung der Infrarotstrahlung ist z. B. mit einem Fototransistor möglich, dessen elektrische Leitfähigkeit sich bei Bestrahlung ändert (Bild 111/2).

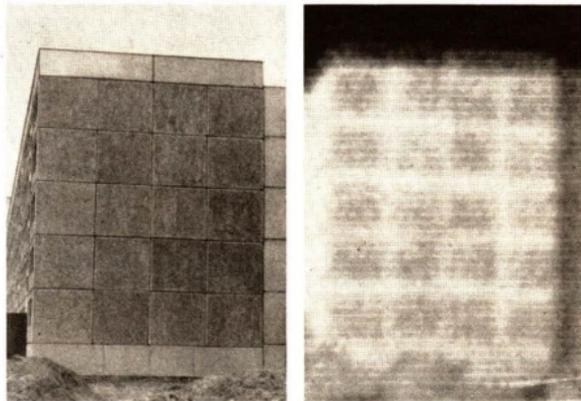
Bild 111/2 Messen der Infrarotstrahlung

1 – Glühlampe, 2 – Reflexionsgitter, 3 – Halbleiterbauelement (infrarotempfindlich), 4 – Verstärker, 5 – Relais, 6 – Nachweisgerät (z. B. Glühlampe)



- **Anwendung der infraroten Strahlung.** Zur Aufdeckung von Wärmeverlusten an Gebäuden und Industrieanlagen werden Infrarotaufnahmen angefertigt. Objekte höherer Temperatur (z. B. Wärmedämmungsfehler an Plattenfugen eines Wohnhauses) heben sich als hellere Stellen auf der Infrarotaufnahme ab (Bild 111/3).

Bild 111/3 Tageslichtfoto (links) und Infrarotfoto (rechts)



- ① Nennen Sie Arten von Spektren, beschreiben Sie das Aussehen der einzelnen Arten und erläutern Sie deren Entstehung!

- An bestimmten Waffen der NVA sind Nachtsichtgeräte angebracht, damit auch im Dunklen Ziele erkannt werden können. Das Scheinwerferlicht, mit dem man das Objekt anleuchtet, wird so gefiltert, daß nur Infrarotstrahlung übrigbleibt. Diese Strahlung wird vom Ziel reflektiert. Das optische System des Gerätes nimmt die reflektierte Strahlung wieder auf, leitet sie auf den Bildwandler. Im Okular wird das „angeleuchtete“ Objekt sichtbar.

Unter günstigen Bedingungen genügt es bereits, die Infrarotstrahlung zu nutzen, die vom „unbeleuchteten“ Objekt ausgeht (Bild 112/1).



Bild 112/1 Nachtsichtgerät NSP-2 der NVA

- Zur Bodenerkundung werden mit Multispektralkameras auch im infraroten Spektralbereich Fotos angefertigt. Dies kann im Dunkeln geschehen. Im Bereich des nahen Infrarots von 750 nm bis 1350 nm zeigen Pflanzen eine hohe Reflexionsfähigkeit, so daß Pflanzen auf solchen Infrarotfotos deutlich zu lokalisieren sind. Darüber hinaus kann man mit Multispektralaufnahmen z. B. Veränderungen landschaftlich oder industriell genutzter Flächen erfassen.

**Ultraviolette Strahlung.** Es liegt nun die Frage nahe, ob auch jenseits des violetten Endes des sichtbaren Spektrums Strahlung auftritt. Sie soll durch das folgende Experiment beantwortet werden.

- 44 ▼ Es wird das Spektrum des Lichts einer Quecksilberdampflampe erzeugt. Anstelle des Schirmes benutzt man einen Fluoreszenzschirm, also einen Schirm, der beim Auftreffen bestimmter Strahlungen aufleuchtet. Dieser Schirm leuchtet auch noch außerhalb des violetten Teils des Spektrums (Bild 112/2).

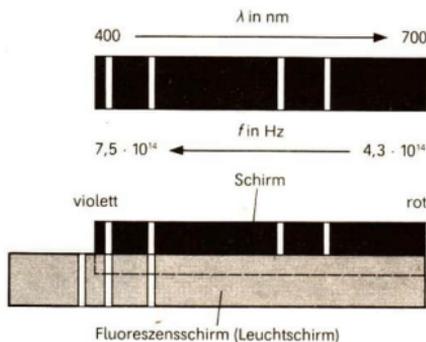
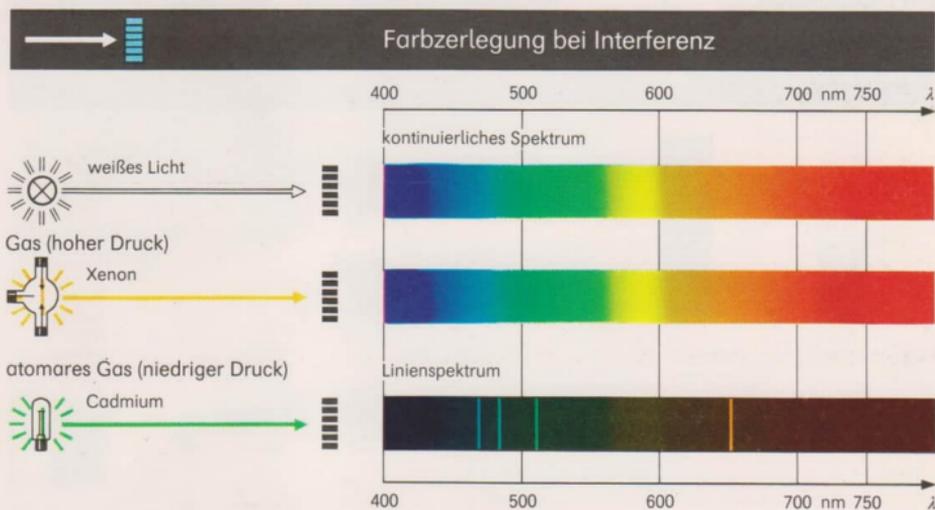
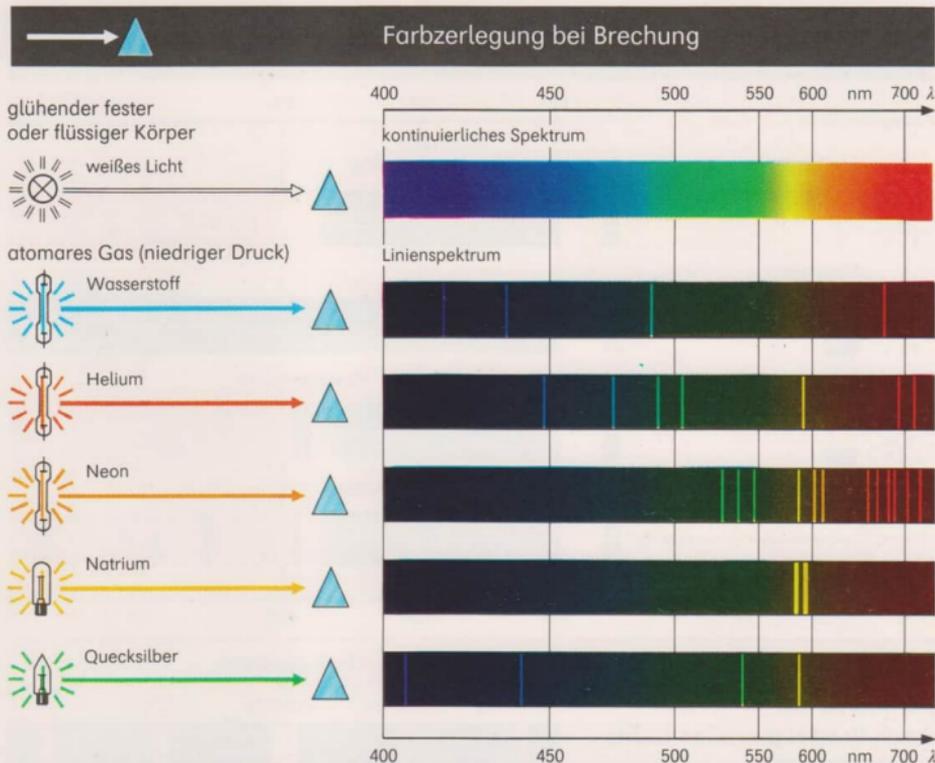


Bild 112/2 Experimentieranordnung

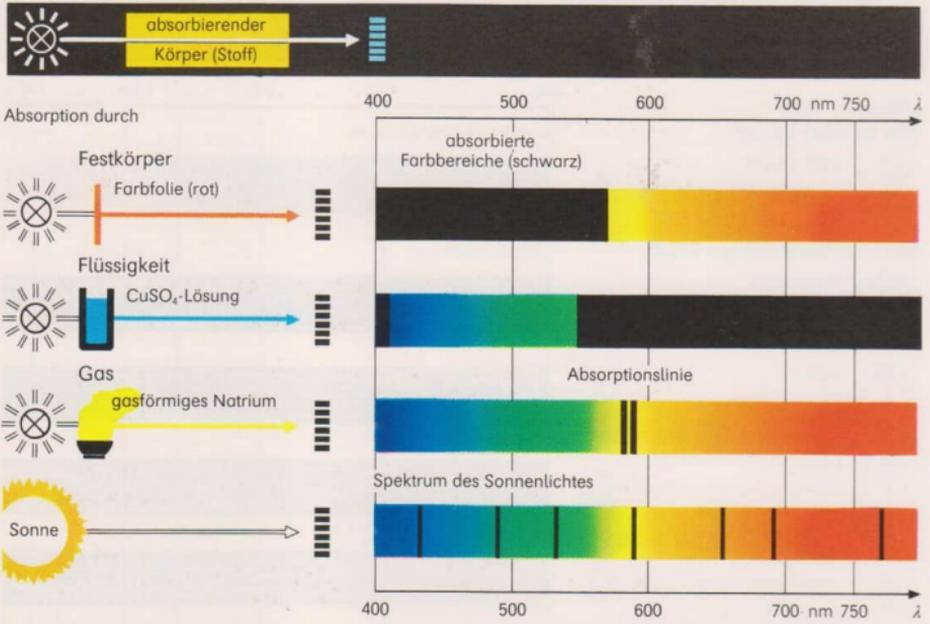
Die angezeigte unsichtbare Strahlung nennt man *ultraviolette Strahlung*. Ihre Wellenlänge in Luft ist kleiner als 390 nm. Ultraviolette Strahlung hat die gleichen Welleneigenschaften wie sichtbares Licht.

- **Anwendung ultravioletter Strahlung.** Ultraviolette Strahlung vermag Krankheitskeime zu vernichten und Pflanzenschädlinge zu töten. Sie wird zur Keimzahlminderung der Luft genutzt.

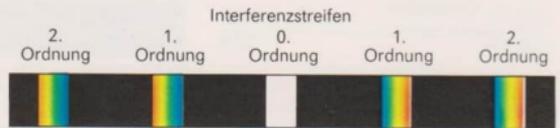
# Farbtafel 1 Spektren lichtaussendender Körper



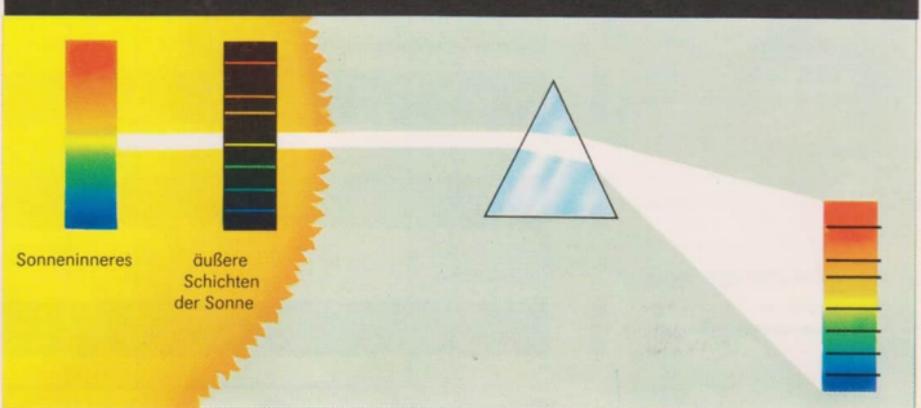
## Farbtafel 2 Spektren lichtabsorbierender Körper



Farberscheinungen  
bei Interferenz  
durch Beugung weißen Lichts  
am Doppelspalt



## Farbzerlegung des Sonnenlichts (schematisch)



- Ultraviolett-Bestrahlung mit Hilfe der Höhensonne bewirkt vor allem die Bräunung der Haut und die Förderung der Bildung des wichtigen Vitamins D in unserem Körper.
- Kurzwellige und intensive ultraviolette Strahlung schädigt die Haut („Sonnenbrand“). Vor allem die Augen müssen durch geeignete Mittel geschützt werden. Das erfolgt z. B. beim Lichtbogenschweißen durch besondere Schutzbrillen.

Jenseits des roten und violetten Endes des kontinuierlichen Spektrums tritt ebenfalls Strahlung mit Welleneigenschaften auf. Diese infrarote und ultraviolette Strahlung wird entsprechend ihren besonderen Eigenschaften vielfältig genutzt.

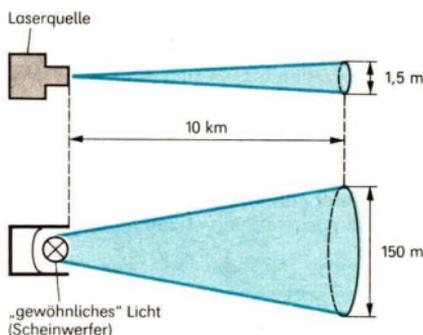
①

## Die Laserstrahlung

**Eigenschaften der Laserstrahlung.** Um 1960 wurde eine ungewöhnliche Lichtquelle – *Laser* genannt – entwickelt. Der Laser sendet Licht mit besonderen Eigenschaften aus:

- Laserlicht ist *einfarbig*, es hat nur eine Frequenz.
- Laserlicht ist weitgehend *parallel* (Bild 113/1).
- Laserlicht kann man mit *großen Intensitäten* erzeugen.

Bild 113/1 Vergleich von „gewöhnlichem“ Licht und Laserstrahlung hinsichtlich Parallelität



**Anwendung der Laserstrahlung.** Laserstrahlung wird wegen der besonderen Eigenschaften vielfach verwendet.

- Bündelt man Laserlicht, so kann man große Intensitäten erreichen, die es ermöglichen, Materialien zu bohren, zu trennen und zu verschweißen. Die Temperatur im Brennpunkt der gesammelten Strahlung kann 8000 K betragen. Es können damit sehr harte Materialien (z. B. Diamant) geschnitten oder gebohrt werden (Bild 113/2). Dabei sind so winzige Löcher möglich, wie sie mit keinem mechanischen Bohrer hergestellt werden können.

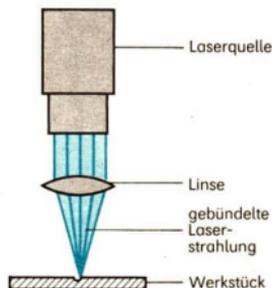


Bild 113/2 Materialbearbeitung mittels Laserstrahlung

① Informieren Sie sich über Einsatzmöglichkeiten der infraroten bzw. ultravioletten Strahlung!

- In der Medizin wird Laserlicht erfolgreich zur Behandlung von beginnenden Netzhautablösungen eingesetzt. Die Strahlung bewirkt dabei einen Brenneffekt, der erkrankte Gewebestellen zerstört und beseitigt. Daneben entsteht bei der späteren narbigen Ausheilung eine feste Verbindung der Gewebeschichten des Augenhintergrundes (→ vordere innere Umschlagseite). ① ②
- Laserlicht wird für viele Aufgaben der Meßtechnik verwendet. Es wird zum Steuern und Führen von Maschinen eingesetzt sowie bei Verbesserungs- und Fluchtungsaufgaben im Maschinenbau und im Bauwesen.

## Das elektromagnetische Spektrum

**Das Licht als elektromagnetische Welle.** Licht besitzt viele Gemeinsamkeiten mit Hertzschcn Wellen. Wie bei den Hertzschcn Wellen kann man auch Licht als Ausbreitung elektromagnetischer Schwingungen im Raum beschreiben. Die Wellenlänge ist beim Licht jedoch wesentlich geringer als bei Hertzschcn Wellen.

**Ordnen der elektromagnetischen Wellen nach ihrer Wellenlänge.** Die elektromagnetischen Wellen lassen sich nach ihrer Wellenlänge ordnen. Gegen Ende des 19. Jahrhunderts erhielt der russische Physiker Pjotr Lebedew (1866 bis 1912) auf diese Weise das in Bild 114/1 dargestellte *elektromagnetische Spektrum*. Zwischen den Hertzschcn Wellen und dem Licht trat eine Lücke auf. Diese Lücke wurde dadurch geschlossen, daß es gelang, noch kurzwelligere Hertzschcn Wellen zu erzeugen. Auch im Bereich viel kürzerer Wellenlängen wurde das elektromagnetische Spektrum durch den Nachweis weiterer Strahlungsarten vervollkommnet (Bild 115/1).

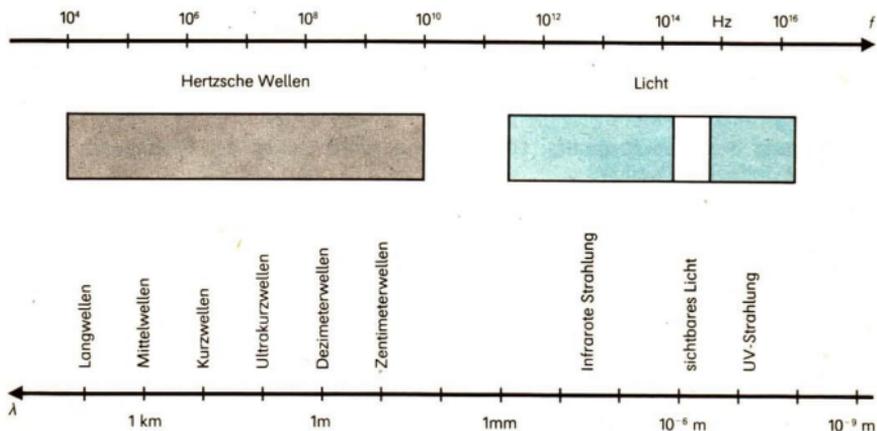


Bild 114/1 Ordnung einiger bisher im Physikunterricht behandelter elektromagnetischer Wellen nach Wellenlänge und Frequenz

Die einzelnen Wellenbereiche sind nicht scharf abgegrenzt, sondern überlappen sich zum Teil. Elektromagnetische Wellen einer bestimmten Frequenz, die auf unterschiedliche Weise erzeugt werden, unterscheiden sich nicht in ihren physikalischen Eigenschaften. ③ ④

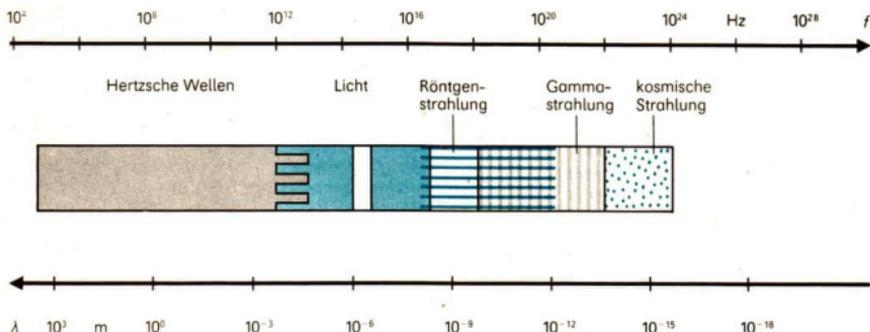


Bild 115/1 Schematische Darstellung des elektromagnetischen Spektrums

**Erzeugung und Eigenschaften der elektromagnetischen Wellen.** Elektromagnetische Wellen werden auf verschiedene Weise erzeugt.

Wellenart	Erzeugung (Gerät bzw. Vorgang)
<b>Hertzische Wellen</b>	Dipol Funken
<b>Licht</b> Infrarote Strahlung Sichtbares Licht Ultraviolette Strahlung	Infrarotstrahler Glühlampe, Leuchtstoffröhre Quecksilberdampf Lampe
<b>Röntgenstrahlung</b>	Röntgenröhre
<b>Gammastrahlung</b>	Atomkernumwandlung (↗ Kernphysik)
<b>Kosmische Strahlung</b>	Atomkernumwandlungen im Weltall

Elektromagnetische Wellen bestimmter Wellenlängenbereiche durchdringen die Körper sehr stark, andere werden stark absorbiert oder reflektiert.

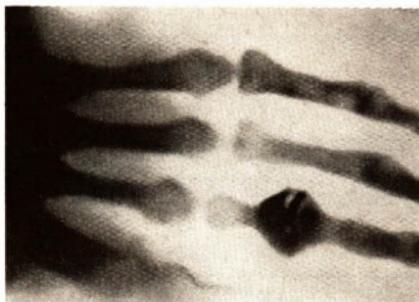
Durch Reflexion lassen sich Wellen einiger Bereiche gut bündeln.

*Kurze elektromagnetische Wellen* durchdringen Stoffe um so mehr, je kürzer sie sind. Die kürzesten dieser Wellen werden nur wenig reflektiert bzw. absorbiert.

- ① Informieren Sie sich anhand zugänglicher Literatur über Einsatzmöglichkeiten der Laserstrahlung!
- ② Machen Sie am Beispiel der Anwendung der Laserstrahlung deutlich, daß der Charakter der Nutzung wissenschaftlicher Erkenntnisse von der Gesellschaftsordnung abhängig ist!
- ③ Stellen Sie anhand von Bild 115/1 fest, welche Wellenbereiche sich überdecken! Welche Folgerungen ergeben sich daraus hinsichtlich der Eigenschaften der sich überdeckenden Bereiche?
- ④ Wodurch unterscheiden sich Hertzische Wellen höchster Frequenzen von langwelliger Infrarotstrahlung?

- Röntgen- und Gammastrahlung werden wegen ihres großen Durchdringungsvermögens zum „Durchleuchten“ von lichtundurchlässigen Körpern (z. B. bei der Fehlersuche in Gußstücken) verwendet. Während Röntgenstrahlung die Weichteile des menschlichen Körpers sehr gut durchdringen kann (Bild 116/1), dringt die ultraviolette Strahlung nur in die äußeren Hautschichten ein.

Bild 116/1 Röntgenaufnahme einer menschlichen Hand



- Für die Erzeugung von Gemüse, Obst und Blumen in allen Jahreszeiten nutzt man den „Treibhauseffekt“. Das kurzwelligere sichtbare Licht tritt durch das Glas des Gewächshauses. Dort wird es von der dunklen Erde absorbiert. Die Erde sendet langwelligere infrarote Strahlung (Wärmestrahlung) aus. Diese kann das Glas jedoch nicht durchdringen. Sie wird am Glas reflektiert bzw. absorbiert. Dadurch wird das Wachstum der Pflanzen begünstigt.
- Licht und andere elektromagnetische Wellen werden an Körperflächen reflektiert. Licht wird an ebenen, glatten Flächen (Spiegel) besonders stark in eine bestimmte Richtung reflektiert. Ultrakurzwellen werden wegen ihrer noch geringeren Wellenlänge auch an weniger glatten Flächen reflektiert (Radar). Die aus dem Weltall kommende Radiostrahlung ( $\lambda = 1 \text{ mm bis } 20 \text{ m}$ ) wird bereits an Reflektoren aus Gitterstäben gerichtet reflektiert.

## Zusammenfassung

- Elektromagnetische Wellen treten in einem Wellenlängenbereich von 30 km bis 0,0003 pm auf.
- Neben dem gleichen physikalischen Wesen dieser Wellen gibt es zwischen ihnen gewisse Gemeinsamkeiten, aber auch Unterschiede:

**Gemeinsamkeiten:** Elektromagnetische Wellen können sich in Stoffen *und* im Vakuum ausbreiten. Ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit im Vakuum beträgt  $c_{\text{Vakuum}} \approx 300000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ . Sie haben Welleneigenschaften.

**Unterschiede:** Die verschiedenen elektromagnetischen Wellen unterscheiden sich in der Erzeugung, dem Durchdringungsvermögen, der Bündelungsfähigkeit und der Reflexion und Absorption in den Stoffen.

Die nachfolgende Übersicht zeigt physikalische Vorgänge, die bei Licht, Hertzischen Wellen und mechanischen Wellen experimentell nachgewiesen wurden.

	Mechanische Wellen (z. B. Wasserwellen)	Hertzsche Wellen	Licht
Reflexion			
Brechung			
Beugung			
Interferenz			

- ① Geben Sie für die auf S. 117 dargestellten Vorgänge Beispiele aus der Praxis an! Nennen Sie die den Vorgängen zugrunde liegenden Gesetze bzw. Vorstellungen!

**Strahlenoptik**

1. Stellen Sie mit Hilfe des Nachschlagewerkes „Physik in Übersichten“ und anderer Literatur eine Übersicht von Anwendungsbeispielen zur Reflexion und Brechung des Lichtes zusammen! Erläutern Sie an einem Beispiel den Strahlenverlauf und die Bildentstehung an einer Sammellinse!
2. Ein Gegenstand, der 1 cm hoch ist und sich 5 cm vor einer Sammellinse mit einer Brennweite von 30 mm befindet, soll mit dieser Linse scharf abgebildet werden. Konstruieren Sie das entstehende Bild! Charakterisieren Sie Ort, Art, Lage und Größe des Bildes!
3. Eine Sammellinse hat eine Brennweite von 80 mm. In welchen Grenzen kann sich der Abstand des Gegenstandes von der Linse bewegen, damit das durch die Linse erzeugte Bild auf einem Schirm vergrößert ist?
4. Licht geht von Kronglas in Wasser über. Der Einfallswinkel ist  $45^\circ$ . Wie groß ist der Brechungswinkel?

Medium	Grenzwinkel $\alpha_G$
Polystyren	$39,1^\circ$
Kohlenstoffdisulfid	$37,8^\circ$
Diamant	$24,6^\circ$

5. Überprüfen Sie durch Rechnung die Richtigkeit der in der nebenstehenden Tabelle aufgeführten Grenzwinkel  $\alpha_G$  für den Übergang des Lichtes in Luft!

6. Eine auch im Hausexperiment leicht zu zeigende spektrale Zerlegung des Lichtes einer Kerzenflamme oder einer Glühlampe durch ein „Wasserprisma“ erhält man mit der im Bild 118/1 dargestellten Experimentieranordnung. Als ein solches Wasserprisma kann man sich das in einer Ecke der Kühlschranksbox befindliche Wasser vorstellen. Die Kerze steht nahe der Box an deren Längsseite. Der Beobachter blickt fast streifend auf die Schmalseite. Führen Sie ein solches Hausexperiment durch! Beschreiben Sie das Aussehen des entstehenden Spektrums!

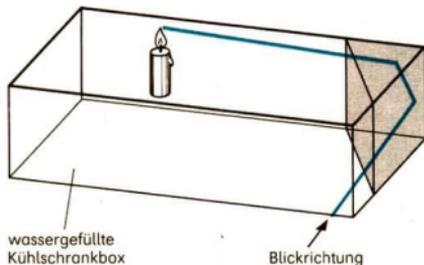


Bild 118/1 Experimentieranordnung

7. Erklären Sie das Zustandekommen der im Bild 118/2 dargestellten Täuschung!

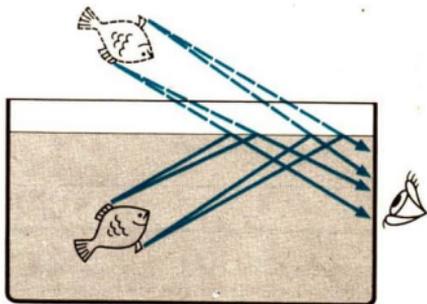
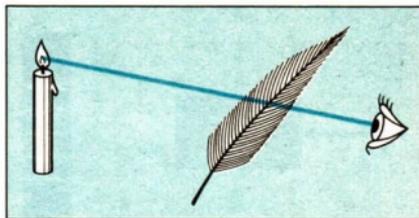


Bild 118/2

## Wellenoptik

1. Blicken Sie durch eine Vogelfeder, ein feines Sieb, durch Dederongewebe u. ä. gegen eine 2 m bis 4 m entfernte Kerzenflamme (Bild 119/1)! Erklären Sie die beobachtete Erscheinung! Was beobachten Sie, wenn Sie sich der Kerzenflamme nähern oder sich von ihr entfernen?

Bild 119/1



2. Begründen Sie die Richtigkeit der zunächst sehr merkwürdig anmutenden Feststellung des italienischen Physikers Grimaldi (1618 bis 1663) „Licht kann Dunkelheit erzeugen“. Durch zwei dicht nebeneinanderliegende kleine Öffnungen ließ er Sonnenlicht auf einen Schirm fallen, so daß die Lichtflecke einander überlappten. Die Begrenzungen der sich überlappenden Flächenstücke erschienen dunkler als die übrigen Flächenteile, obwohl auch sie vom Licht beider Öffnungen getroffen wurden (Bild 119/2).

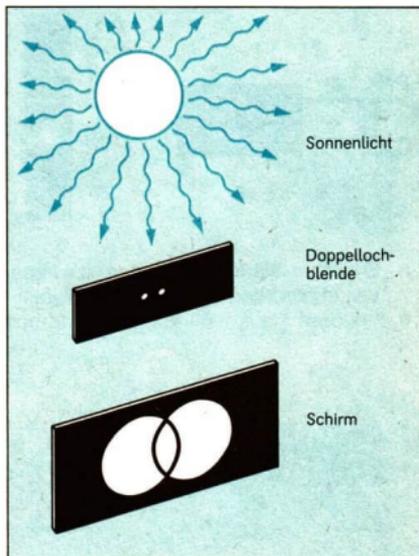


Bild 119/2 Experimentierordnung

3. Berechnen Sie die Wellenlänge grünen Lichtes der Frequenz  $5,7 \cdot 10^{14}$  Hz!
4. Ordnen Sie das Spektrum des Lichtes einer glühenden Metallwendel, von leuchtendem gasförmigem Helium unter niedrigem Druck und einer leuchtenden Bunsenbrennerflamme, in der Kochsalz verdampft wurde, nach
  - a) kontinuierlichen Spektren,
  - b) Linienspektren!Begründen Sie Ihre Entscheidungen!
5. Das Spektrum des Lichtes eines leuchtenden Gases zeigt eine Reihe von farbigen Linien auf dunklem Untergrund. Einige Linien entsprechen der Wellenlänge 405 nm, 408 nm, 434 nm, 436 nm, 546 nm, 557 nm und 579 nm. Ermitteln Sie mittels der Farbtabelle im Lehrbuch a) in welchen Farbbereichen diese Linien liegen und b) um welches Gas es sich vermutlich handelt!
6. Erläutern Sie, welche Eigenschaften der realen physikalischen Objekte Feld, Körper und Licht mit den zuzuordnenden Modellen Feldlinienmodell, Massepunkt und Lichtstrahl erfaßt werden, und nennen Sie Beispiele für Eigenschaften der realen Objekte, die mit den betreffenden Modellen nicht erfaßt werden!

7. Welche optischen Bauelemente befinden sich im Innern der „Schwarzen Kästen“ (Bilder 120/1a bis d)?

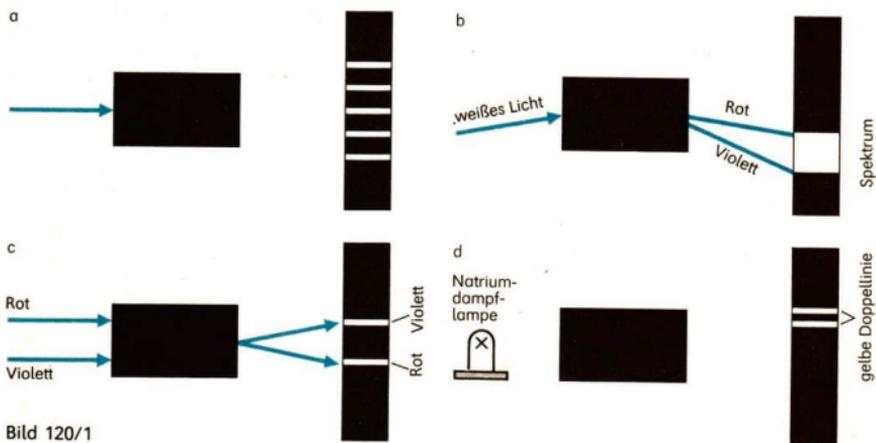
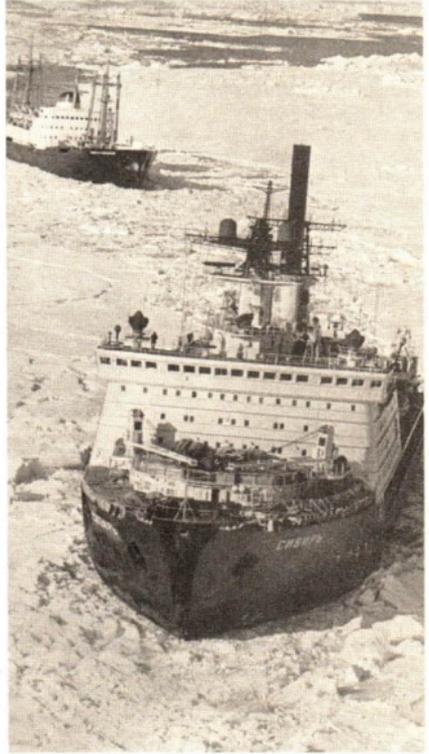


Bild 120/1

- Erläutern Sie Möglichkeiten des experimentellen Nachweises dreier Wellenbereiche des elektromagnetischen Spektrums!
- Erklären Sie die Wirkung der Frühbeetfenster als „Wärmefalle“ physikalisch!

# KERNPHYSIK



Im Jahre 1938 entdeckten Otto Hahn, Fritz Straßmann und Lise Meitner die Kernspaltung. Damit wurde eine neue Energiequelle gefunden, die den wohl bisher größten Einfluß auf die Entwicklung der menschlichen Gesellschaft und auf den Fortbestand der Menschheit hat.

Die Geschichte zeigt, daß die Anwendung der Kernphysik jedoch nicht nur eine Frage der Wissenschaft und der Technik, sondern auch eine Frage der Politik ist und damit entscheidend von der jeweils herrschenden Gesellschaftsordnung abhängt.

Von den Verantwortlichen der USA wurde durch den verbrecherischen Abwurf von Kernspaltungsbomben auf die Bürger der japanischen Großstädte Hiroshima und Nagasaki ein atomares Inferno mit verheerenden Folgen hervorgerufen. In der Sowjetunion dagegen wurde in Obninsk bei Moskau das erste Kernkraftwerk der Welt errichtet und damit der Weg zur friedlichen Nutzung der Kernenergie beschritten. Für die gesamte Menschheit, die den sozialen Fortschritt wünscht, besteht deshalb die Notwendigkeit des Kampfes für eine ausschließlich friedliche Anwendung der Erkenntnisse der Kernphysik und gegen die atomare Bedrohung.

Bei der Altersbestimmung von ägyptischen Königsgräbern nutzen die Archäologen Erkenntnisse der Kernphysik. So konnte mit der Kenntnis über die Gesetze des Kernzerfalls das Alter des Grabes von König Cheops Chufu der vierten ägyptischen Dynastie recht zuverlässig auf 2600 Jahre v. u. Z. bestimmt werden.

Wie ist das möglich?



### Entdeckung der Kernstrahlung

**Natürliche Radioaktivität.** Im Jahre 1896 erkannte Henri Becquerel (1852 bis 1909), daß von Uransalzen eine bis dahin unbekannte, unsichtbare Strahlung ausging, die in schwarzes Papier verpackte Fotoplatten „belichtete“. Ihr Auftreten wurde Radioaktivität, die Strahlung radioaktive Strahlung genannt. Heute wird die Bezeichnung Kernstrahlung verwendet, da diese Strahlung durch Umwandlungsprozesse innerhalb des Atomkerns entsteht. Marie Curie (1867 bis 1934) entdeckte, daß die von natürlichem Uranerz ausgehende Strahlung nicht nur von dem im Erz enthaltenen Element Uran kommen konnte. Nach mühevollen chemischen Analysen konnte sie gemeinsam mit ihrem Ehemann Pierre Curie (1859 bis 1906) ein neues radioaktives Element nachweisen. Sie nannten es Radium (lat.: das Strahlende).

Das Abtrennen des Radiums aus dem Uranerz war sehr schwierig. In einem einfachen Holzschuppen in Paris, der den Curies als Labor diente, konnten sie nach vierjährigen Bemühungen einige Zehntel Gramm Radiumchlorid herstellen. Für die Entdeckung des Elements Radium erhielten sie zusammen mit H. Becquerel 1903 den Nobelpreis für Physik. Es dauerte weitere 8 Jahre, bis Marie Curie reines Radium gewinnen konnte.

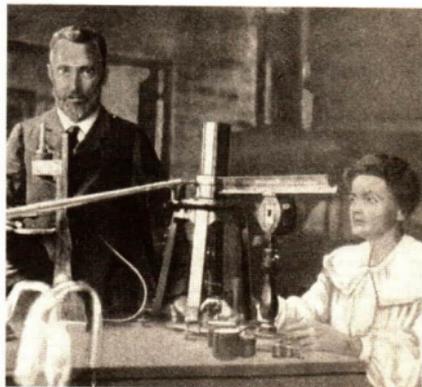


Bild 122/2 Marie und Pierre Curie in ihrem Labor in Paris

**Marie Curie.** Marie Curie-Sklodowska hatte an der Universität in Paris Mathematik und Physik studiert. Nach Beendigung des Studiums arbeitete sie fleißig, zielstrebig und ganz der Wissenschaft ergeben an der Erforschung der Radioaktivität. Für die erstmalige Gewinnung reinen Radiums wurde die Wissenschaftlerin 1911 zum zweiten Mal mit dem Nobelpreis, diesmal für Chemie, geehrt.

Marie Curie hat mit ihrem aufopferungsvollen Wirken das Zeitalter der Kernphysik mit eingeleitet. Sie beobachtete und studierte die Wirkungen der radioaktiven Strahlung auf menschliches Gewebe und schuf damit die Grundlagen für deren Nutzung in der Medizin. ①

**Arten der Kernstrahlung.** Durch Experimente hat man festgestellt, daß die Kernstrahlung aus verschiedenen Anteilen besteht:

- **$\alpha$ -Strahlung** ist eine Teilchenstrahlung. Die aus dem Kern herausgeschleuderten Teilchen sind *Helium-Atomkerne*.
- **$\beta$ -Strahlung** ist auch eine Teilchenstrahlung. Sie kommt in 2 Varianten vor: Die Teilchen der  $\beta^-$ -Strahlung sind *Elektronen*, die der  $\beta^+$ -Strahlung *Positronen*.
- **$\gamma$ -Strahlung** ist keine Teilchenstrahlung. Sie besteht aus *elektromagnetischen Wellen*, ähnlich wie Licht und Röntgenstrahlung ( $\nearrow$  elektromagnetisches Spektrum).

Wenn bestimmte Elemente  $\alpha$ - oder  $\beta$ -Strahlung aussenden, verlassen Teilchen die Atomkerne. Dabei finden Veränderungen in den Atomkernen statt.

### Aufbau der Atomkerne

Alle Atome bestehen aus Atomkern und Atomhülle. Die Atomkerne sind aus **Protonen** und **Neutronen** aufgebaut (Bild 123/1). Sie werden im Kern durch Kernkräfte zusammengehalten, die um ein Vielfaches stärker sind als die elektrostatischen Abstoßungskräfte der Protonen. ②

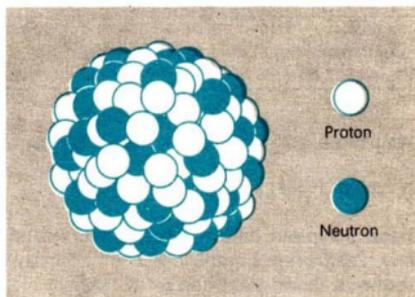


Bild 123/1 Aufbau eines Atomkerns

**Elementarteilchen.** Die Bausteine, aus denen der Atomkern besteht, gehören zu den Elementarteilchen. Die bekanntesten Elementarteilchen sind das Proton, das Neutron, das Elektron und das Positron. Die Erforschung der Elementarteilchen brachte folgende Erkenntnisse:

- Elementarteilchen sind entweder neutral oder sie haben eine Ladung, deren Betrag gleich der Elementarladung  $e$  ist. Das Vorzeichen der Ladung kann positiv ( $+e$ ) oder negativ ( $-e$ ) sein.

---

① Würdigen Sie die Leistungen der Kernphysikerin Marie Curie!

② Wiederholen Sie die Kenntnisse vom Bau des Atomkerns aus dem Chemieunterricht der Klasse 7 ( $\nearrow$  Chemie in Übersichten)!

- Elementarteilchen haben eine bestimmte Masse, die zwischen wenig größer Null und dem Zweitausendfachen der Masse des Elektrons liegt.
- Viele Elementarteilchen können sich unter bestimmten Bedingungen ineinander umwandeln. Die Umwandelbarkeit der Elementarteilchen stellt eine Besonderheit dar, die es nur in der Mikrophysik gibt.

Zur Kennzeichnung der Elementarteilchen wird die Symbolschreibweise verwendet:

↑ Elementarteilchensymbol

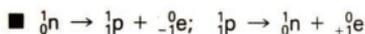
A: Massenzahl

L: Ladungszahl

Für das Proton und das Neutron wurde die Massenzahl 1 festgelegt. Dem Elektron und dem Positron wird die Massenzahl 0 zugeordnet, da die Elektronen- bzw. Positronenmasse im Verhältnis zur Protonen- bzw. Neutronenmasse verschwindend klein ist:

Elementarteilchen	Masse (Teilchen in Ruhe)	Ladung	Symbolschreibweise
Proton	$1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	$+e$	${}_1^1\text{p}$
Neutron	$1,6750 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	0	${}_0^1\text{n}$
Elektron	$0,0009 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	$-e$	${}_{-1}^0\text{e}$
Positron	$0,0009 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	$+e$	${}_{+1}^0\text{e}$

Neutronen und Protonen können sich in folgender Weise umwandeln:



Diese Beispiele liefern auch die Erklärung dafür, warum aus Atomkernen Elektronen bzw. Positronen emittiert werden können, obwohl sich zunächst nur Protonen und Neutronen in ihnen befinden (→ S. 123).

Neben den genannten gibt es noch eine Vielzahl weiterer Elementarteilchen.

► **Elementarteilchen sind sehr kleine Bausteine der Natur. Einige Elementarteilchen können sich ineinander umwandeln.**

**Kernaufbau.** Mit der Anzahl der Protonen im Atomkern ist die Anzahl seiner elektrisch positiven Ladungen bestimmt. Sie wird **Kernladungszahl Z** genannt.

Es gilt:

Ordnungszahl = Kernladungszahl = Protonenzahl (= Elektronenzahl)

Die Summe der Anzahl aller Protonen  $Z$  und der Anzahl aller Neutronen  $N$  im Atomkern nennt man **Massenzahl  $A$** .

$$\text{Massenzahl } A = Z + N$$

Sie entspricht dem gerundeten Wert der relativen Atommasse. Den Aufbau eines Atomkerns kann man, ähnlich wie bei den Elementarteilchen, in kurzer Form mit der Symbolschreibweise darstellen:

$\frac{A}{Z}$  Elementsymbol

- Symbolschreibweise für Atomkerne des Sauerstoffs und des Berylliums

${}^{13}_8\text{O}$ : Sauerstoff hat 6 Protonen und 7 Neutronen im Kern

${}^9_4\text{Be}$ : Beryllium hat 4 Protonen und 5 Neutronen im Kern

**Nuklide und Isotope.** Zur Kennzeichnung einer bestimmten Kernart hat man den Begriff *Nuklid* eingeführt.

**Als Nuklid bezeichnet man eine Atomkernart, die durch die Protonen- und die Massenzahl eindeutig bestimmt ist.**

Zum Beispiel besitzen Wasserstoff und Uran je 3 Nuklide (↗ Tabelle). Von den z. Z. bekannten 107 chemischen Elementen kennt man gegenwärtig etwa 1500 Nuklide. Im Periodensystem der Elemente kommt die unterschiedliche Häufigkeit der Nuklide eines Elements dadurch zum Ausdruck, daß die relativen Atommassen Dezimalbrüche und keine ganzen Zahlen ergeben.

Die Nuklide eines Elements haben gleiche Anzahl von Protonen, die Anzahl der Neutronen ist aber unterschiedlich. So besitzen z. B. Wasserstoffkerne zwei oder ein, meist jedoch kein Neutron.

Kohlenstoffkerne haben 6, 7 oder 8 Neutronen.

Solche Atomkernarten, die zum gleichen Element gehören, aber eine unterschiedliche Anzahl von Neutronen haben, nennt man **Isotope**.

**Isotope sind Atomkernarten eines chemischen Elements mit gleicher Anzahl Protonen, aber unterschiedlicher Anzahl von Neutronen und damit unterschiedlicher Massenzahl.**

① ② ③

- ① Welche Informationen gewinnen Sie aus der Angabe der Massenzahl und der Kernladungszahl über den Aufbau der Atome eines Elements?
- ② Für den Krypton-Atomkern schreibt man  ${}^{86}_{36}\text{Kr}$ . Berechnen Sie, aus wieviel Neutronen, Protonen und Elektronen ein Kryptonatom besteht!
- ③ Stellen Sie in einer Tabelle die Anzahl der Protonen und Neutronen für folgende Atomkerne zusammen:

${}^2_1\text{H}$ ,  ${}^4_2\text{He}$ ,  ${}^{16}_8\text{O}$ ,  ${}^{17}_8\text{O}$ ,  ${}^{60}_{27}\text{Co}$ ,  ${}^{206}_{82}\text{Pb}$ ,  ${}^{207}_{82}\text{Pb}$ ,  ${}^{235}_{92}\text{U}$ ,  ${}^{238}_{92}\text{U}$

Element (Name und Symbol)	in der Natur vor- kommende Nuklide	Z	A	N = A-Z	Häufigkeit %	relative Atommasse
Wasser- stoff H	${}^1_1\text{H}$	1	1	0	99,984	1,008
	${}^2_1\text{D}$ (Deuterium)	1	2	1	0,016	
	${}^3_1\text{T}$ (Tritium)	1	3	2	$10^{-10}$	
Uran U	${}^{238}_{92}\text{U}$	92	238	146	99,274	238,03
	${}^{235}_{92}\text{U}$	92	235	143	0,72	
	${}^{234}_{92}\text{U}$	92	234	142	0,006	
Chlor Cl	${}^{37}_{17}\text{Cl}$	17	37	20	24,47	35,45
	${}^{35}_{17}\text{Cl}$	17	35	18	75,53	
Gold Au	${}^{197}_{79}\text{Au}$	79	197	118	100	196,97

① ② ③

## Entstehung der Kernstrahlung

**Spontanzfall.** Die Eigenschaft bestimmter Nuklide, von selbst Kernstrahlung zu emittieren, bezeichnet man als **Spontanzfall**, die beteiligten Atomkerne als **instabile Kerne**. Die überwiegende Anzahl der Kerne, deren Kernladungszahl größer als 82 ist, gehört zu den instabilen Kernen. Je größer die Kernladungszahl ist, desto größer sind die elektrischen Abstoßungskräfte der Protonen und desto instabiler wird der Kern.

► **Spontanzfall ist ein Vorgang, bei dem sich bestimmte Nuklide ohne äußere Beeinflussung von selbst in andere Nuklide umwandeln. Dabei tritt Kernstrahlung auf.**

**Emission von  $\alpha$ -Strahlung.**  $\alpha$ -Teilchen bestehen aus 2 Protonen und 2 Neutronen (Helium-Kerne). Verläßt ein  $\alpha$ -Teilchen den Kern, so entsteht ein neuer Kern. Dieser neue Kern hat eine um 2 kleinere Kernladungszahl und eine um 4 verringerte Massenzahl. Bei der Emission von  $\alpha$ -Teilchen entsteht also immer ein neues Element. Diesen Vorgang kann man mit einer **Zerfallsleichung** beschreiben.

■ Spontanzfall des Uran-238 (Bild 126/1)

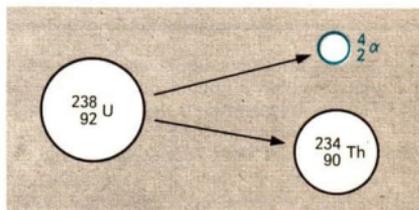
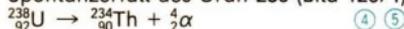


Bild 126/1 Spontanzfall eines Uran-238-Atomkerns

**$\alpha$ -Teilchen bestehen aus zwei Protonen und zwei Neutronen. Bei der Emission von  $\alpha$ -Strahlung wandeln sich Atomkerne eines Elements in Kerne eines anderen Elements mit kleinerer Ordnungszahl um.**

**Emission von  $\beta$ -Strahlung.** Bei der Emission eines  $\beta$ -Teilchens ändert sich die Massenzahl des Atomkerns nicht ( $\rightarrow$  S. 124). Der Folgekern hat jedoch eine veränderte Kernladungszahl:

- Emission eines  $\beta^-$ -Teilchens  $\rightarrow$  Kernladungszahl nimmt um 1 zu, da sich ein Neutron in ein Proton umwandelt.

- Spontanzfall von Krypton-85 (Bild 127/1)

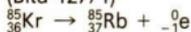
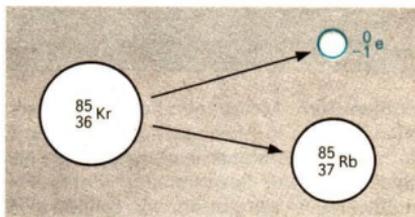


Bild 127/1 Spontanzfall eines Krypton-85-Atomkerns



- Emission eines  $\beta^+$ -Teilchens  $\rightarrow$  Kernladungszahl nimmt um 1 ab, da sich ein Proton in ein Neutron umwandelt.

- Spontanzfall von Natrium-22 (Bild 127/2)

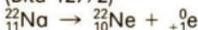
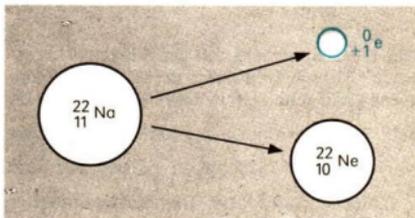


Bild 127/2 Spontanzfall eines Natrium-22-Atomkerns



**$\beta$ -Strahlung besteht aus Elektronen ( $\beta^-$ -Strahlung) oder aus Positronen ( $\beta^+$ -Strahlung). Bei der Emission von  $\beta$ -Strahlen wandeln sich die Atomkerne eines Elements in Kerne eines Elements größerer ( $\beta^-$ -Strahlung) oder kleinerer ( $\beta^+$ -Strahlung) Ordnungszahl um.**

⑥ ⑦

**Emission von  $\gamma$ -Strahlung.** Bei der Emission von  $\alpha$ - oder  $\beta$ -Strahlung tritt häufig eine weitere energiereiche Strahlung auf. Man bezeichnet diese Strahlung als  $\gamma$ -Strahlung.

- ① Erläutern Sie an Beispielen den Begriff isotope Kerne!
- ② Welche isotonen Kerne finden Sie unter den in Aufgabe 3, S. 125 genannten Atomkernen? Begründen Sie Ihre Auswahl!
- ③ Erläutern Sie den Unterschied zwischen isotonen Atomkernen und Nukliden!
- ④ Was verstehen Sie unter Spontanzfall?
- ⑤  ${}_{88}^{226}\text{Ra}$  zerfällt unter Aussendung von  $\alpha$ -Teilchen. Bestimmen Sie den Folgekern durch Aufstellen der Zerfallsgleichung!
- ⑥ Begründen Sie, weshalb bei der Emission von  $\beta^-$ - bzw.  $\beta^+$ -Strahlung die Kernladungszahl des Folgekerns um 1 zu- bzw. um 1 abnimmt!
- ⑦  ${}_{55}^{137}\text{Cs}$  zerfällt unter Emission von  $\beta^-$ - und  $\gamma$ -Strahlung. Stellen Sie die Zerfallsgleichung auf!

■ Spontanzfall von Kobalt-60 (Bild 128/1)

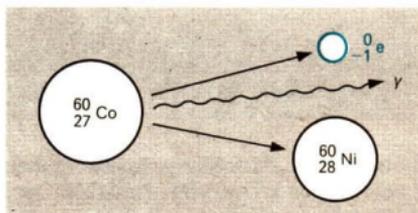
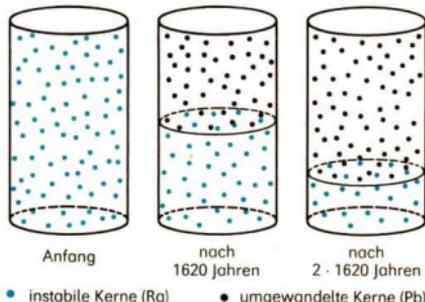


Bild 128/1 Spontanzfall eines Kobalt-60-Atomkerns

► **γ-Strahlung sind energiereiche elektromagnetische Wellen.**

**Halbwertszeit.** Messungen haben ergeben, daß von einer bestimmten Masse eines instabilen Nuklids in gleichen Zeitabständen immer der gleiche Anteil zerfällt. Dabei wandeln sich die Atomkerne des instabilen Nuklids in Atomkerne eines anderen Nuklids um (Bild 128/2). Zur Beschreibung dieses Vorgangs benutzt man die physikalische Größe Halbwertszeit. Sie gibt an, wie schnell sich ein Nuklid in ein anderes umwandelt.

Bild 128/2 Spontanzfall des Radiums  
 Nach 1620 Jahren hat sich die Hälfte der Atomkerne von 1 g Radium in Radonkerne umgewandelt. So ist dann noch  $\frac{1}{2}$  g Radium vorhanden.  
 Nach weiteren 1620 Jahren existiert nur noch  $\frac{1}{4}$  g des Radiums usw. Die Radonkerne sind auch instabil und wandeln sich über verschiedene Zwischenstufen schließlich in das stabile Nuklid Blei um.



► **Die Halbwertszeit ist die Zeit, in der sich jeweils die Hälfte der ursprünglich vorhandenen Atomkerne eines Nuklids in Kerne eines anderen Nuklids umwandelt.**

Die nebenstehende Tabelle gibt eine Übersicht über die Halbwertszeiten einiger instabiler Nuklide.

Das Gesetz, das angibt, daß von einer bestimmten Masse eines instabilen Nuklids in gleichen Zeitabständen immer der gleiche Anteil zerfällt, macht nur eine Aussage über das Verhalten einer großen Anzahl von Atomkernen. Vom einzelnen Atomkern kann nicht angegeben werden, ob er in der nächsten Sekunde, im Laufe der nächsten Stunde oder erst nach Jahren zerfällt. Die Einzelumwandlungen er-

Nuklid	Halbwertszeit
${}_{92}^{238}\text{U}$	$4,5 \cdot 10^9$ Jahre
${}_{88}^{226}\text{Ra}$	$1,62 \cdot 10^3$ Jahre
${}_{27}^{60}\text{Co}$	5,3 Jahre
${}_{86}^{222}\text{Rn}$	3,8 Tage
${}_{84}^{218}\text{Po}$	3,1 Minuten
${}_{84}^{214}\text{Po}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$ Sekunden

folgen rein zufällig. Ein solches Gesetz bezeichnet man als **statistisches Gesetz**. Die grafische Darstellung des Zerfallsgesetzes ergibt die Zerfallskurve (Bild 129/1).

Statistische Gesetze sind genauso wie die bisher behandelten Gesetze (z. B. Bewegungsgesetze der Mechanik) erkennbar und gestatten Voraussagen bestimmter Vorgänge. Durch die Angabe der Halbwertszeit erfolgt z. B. die Voraussage, wann die Hälfte der Atomkerne zerfallen ist. Statistische Gesetze gelten nur für große Gesamtheiten von Objekten. Sie unterscheiden sich von jenen Gesetzen, bei denen auf Grund des Anfangszustandes und der äußeren Bedingungen exakte Voraussagen für ein einzelnes Objekt gemacht werden können.

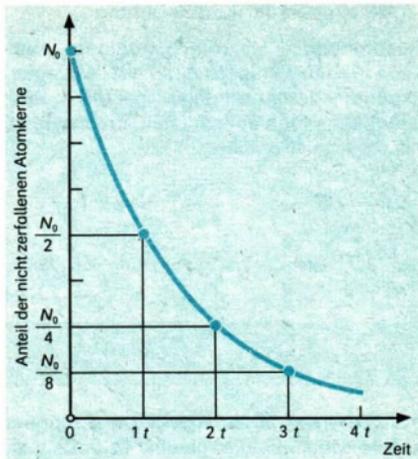


Bild 129/1 Radioaktive Zerfallskurve

► **Statistische Gesetze beinhalten sichere Aussagen über das Verhalten und die Eigenschaften der Gesamtheit von Objekten.**

**Anwendung der Erkenntnisse über den Spontanzfall.** Die Zusammensetzung eines chemischen Elementes, dessen Nuklide Spontanzfall zeigen, ändert sich mit der Zeit. Sind in einem Gestein solche radioaktiven Nuklide vorhanden, dann kann man aus dem Verhältnis der Anteile des radioaktiven Ausgangsnuklids und seines Zerfallsproduktes mit Hilfe der Halbwertszeit des radioaktiven Nuklids das *Alter des Gesteins* bestimmen. So wurde beispielsweise uranhaltiges Gestein der obersten Erdschichten auf seinen Bleigehalt untersucht (Blei ist das Zerfallsprodukt des Urans). Die Altersbestimmung ergab etwa 2 Milliarden Jahre.

Durch den Einfluß der kosmischen Strahlung entsteht in der Atmosphäre der Erde das Nuklid  $^{14}_6\text{C}$  (Kohlenstoff-14), das Spontanzfall zeigt. Dabei bildet sich ein Gleichgewicht zwischen der Zahl der zerfallenen und der neu gebildeten  $^{14}_6\text{C}$ -Kerne heraus. Dadurch hat sich in allen lebenden Organismen durch Nahrungsaufnahme oder durch Assimilation ein konstanter Kohlenstoff-14-Gehalt eingestellt. Mit dem Tod hört jedoch die Nahrungsaufnahme bzw. die Assimilation auf, und der radioaktive Zerfall des Kohlenstoff-14 wird nicht mehr durch Aufnahme neuer  $^{14}_6\text{C}$ -Kerne ausgeglichen. Die mit diesem Zerfall verbundene  $\beta$ -Strahlung nimmt deshalb ab, nach 5570 Jahren (Halbwertszeit des Kohlenstoff-14) beträgt sie nur noch die Hälfte der ursprünglichen Intensität. In der Archäologie ist das Alter von Holz aus alten Gräbern der ersten ägyptischen Dynastie mit dieser Methode recht zuverlässig auf 4900 Jahre bestimmt worden. ① ②

- 
- ①  $^{14}_6\text{C}$  zerfällt unter Aussendung von  $\beta$ -Strahlung. Stellen Sie die zugehörige Zerfallsgleichung auf!
  - ② Erläutern Sie, wie man mit Hilfe der Halbwertszeit Altersbestimmungen an Gesteinsformationen durchführen kann!

## Eigenschaften der Kernstrahlung

**Ausbreitung.** Elektronenstrahlung und Licht breiten sich geradlinig aus. Mit einer Experimentieranordnung gemäß Bild 130/1 kann man untersuchen, ob das auch für die Kernstrahlung zutrifft. ①

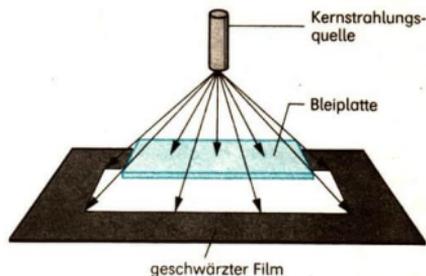


Bild 130/1 Geradlinige Ausbreitung der Kernstrahlung

**Kernstrahlung ist unsichtbar; sie breitet sich geradlinig aus.**

**Ablenkbare in elektrischen und magnetischen Feldern.** Bewegte Ladungsträger werden im Magnetfeld abgelenkt (z. B. Bewegung eines stromdurchflossenen Leiters in einem Magnetfeld, Ablenkung des Elektronenstrahls in der Braunschen Röhre). Es liegt deshalb die Voraussage nahe, daß auch die  $\alpha$ - und die  $\beta$ -Strahlung in einem Magnetfeld abgelenkt werden.

45

Die  $\beta$ -Strahlung einer Kernstrahlungsquelle wird einem Magnetfeld ausgesetzt (Bild 130/2). Mit einem Geiger-Müller-Zählrohr ( $\rightarrow$  S. 132) wird ermittelt, welchen Weg die Strahlung nimmt. In entsprechender Weise läßt sich die Ablenkung im elektrischen Feld nachweisen.

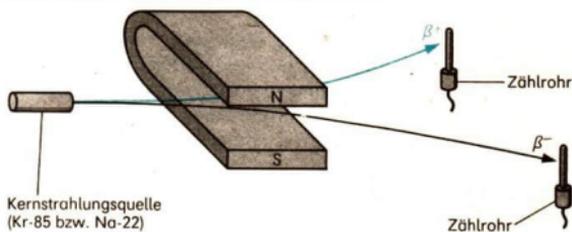


Bild 130/2 Verhalten der Kernstrahlung im Magnetfeld

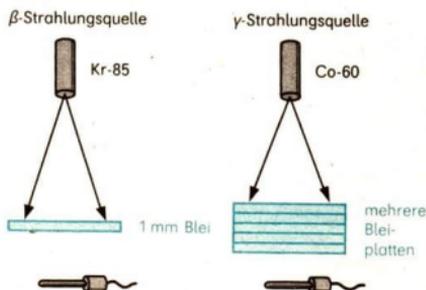
**$\alpha$ - und  $\beta$ -Strahlung werden im elektrischen und magnetischen Feld abgelenkt,  $\gamma$ -Strahlung nicht.**

**Durchdringungsfähigkeit.** Bei der Röntgenuntersuchung eines Patienten trägt der Arzt eine dicke Bleischürze, weil Blei die Röntgenstrahlung absorbiert. Welche Durchdringungsfähigkeit hat die Kernstrahlung?

46

Zwischen eine  $\beta$ - bzw.  $\gamma$ -Kernstrahlungsquelle und ein Geiger-Müller-Zählrohr werden Absorberplatten aus verschiedenen Materialien gebracht (Bild 130/3).

Bild 130/3 Durchdringungsfähigkeit der verschiedenen Kernstrahlungsarten



Ergebnis:  $\beta$ -Strahlung durchdringt Bleischichten bis zu 1 mm Dicke,  $\gamma$ -Strahlung wird nur durch dicke Bleischichten wesentlich geschwächt.

Die Durchdringungsfähigkeit der  $\alpha$ -Strahlung ist sehr gering.  $\alpha$ -Strahlung wird schon durch ein Blatt Papier vollständig absorbiert.

► **Kernstrahlung durchdringt Stoffe. Die Durchdringungsfähigkeit ist abhängig von der Strahlenart, von der Schichtdicke und von der Art des durchstrahlten Stoffes.**

**Energieübertragung durch Kernstrahlung.** Elektronenstrahlung, ultraviolette Strahlung und Hertzche Wellen übertragen Energie. Treffen z. B. Elektronen auf einen Leuchtschirm, so wird dieser zur Fluoreszenz angeregt. Da die Kernstrahlung aus schnellbewegten Teilchen bzw. aus elektromagnetischen Wellen besteht, überträgt auch sie Energie. <sup>②</sup>

► **Kernstrahlung ist Träger von Energie.**

### Wirkungen der Kernstrahlung <sup>③ ④</sup>

Durch die Energieübertragung der Kernstrahlung werden von elektrisch neutralen Atomen und Molekülen Elektronen aus der Atomhülle abgetrennt, d. h., sie werden ionisiert. Dadurch treten in vielen Objekten Veränderungen der physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften auf: <sup>⑤</sup>

Objekt	Wirkung
Gase, Halbleiter	Leitfähigkeitserhöhung durch Freisetzung von wanderungsfähigen Ladungsträgern
fotografische Schichten	Schwärzung durch chemische Veränderungen in der fotografischen Schicht infolge von Anregungsprozessen
Leuchtstoffe	Anregung zur Fluoreszenz
lebende Organismen	Zerstörung von lebenden, insbesondere von schnellwachsenden Zellen infolge von Ionisierungsprozessen

- ① Erläutern Sie anhand Bild 130/1 die geradlinige Ausbreitung der Kernstrahlung!
- ② Vergleichen Sie die Durchdringungsfähigkeit der Kernstrahlung mit der der Elektronen- bzw. UV-Strahlung!
- ③ Erläutern Sie die Eigenschaften der Kernstrahlung!
- ④ Vergleichen Sie die Eigenschaften der Kernstrahlung mit den Eigenschaften der Elektronenstrahlung!
- ⑤ Vergleichen Sie die Ionisation durch Kernstrahlung mit der thermischen Ionisation und der Stoßionisation!

Beim Einwirken von Kernstrahlung auf bestimmte Objekte werden in diesen Veränderungen ihrer Eigenschaften hervorgerufen. Sie beruhen auf Ionisierungsprozessen.

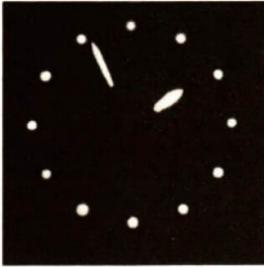


Bild 132/1 Schwärzung eines Films durch Leuchtziffern eines Weckers

### Nachweisgeräte für Kernstrahlung

**Geiger-Müller-Zählrohr.** Es ist eines der am meisten benutzten Nachweisgeräte für Kernstrahlung (Bild 132/2). Da das Gas im Zählrohr ein Isolator ist, fließt zunächst trotz angelegter Spannung kein Strom. Bringt man aber einen radioaktiven Strahler in die Nähe des Zählrohres, so dringt z. B. ein  $\beta$ -Teilchen in das Zählrohr ein und ionisiert Atome des Füllgases. Durch Stoßionisation kommt es zum lawinenartigen Anwachsen der Anzahl von Ladungsträgern, die im Zählrohrkreis einen kurzzeitigen Stromfluß hervorgerufen. Der dadurch am Widerstand auftretende Spannungsimpuls wird verstärkt, in einem Zählgerät registriert oder über einen Lautsprecher als Knacken hörbar gemacht. ① ②

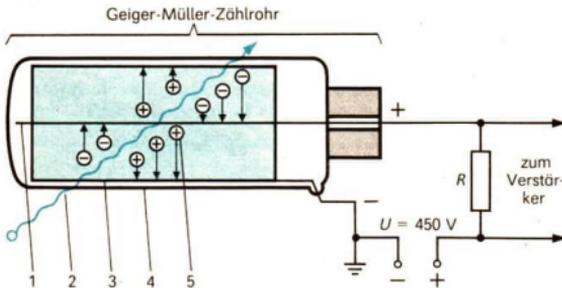


Bild 132/2 Aufbau eines Geiger-Müller-Zählrohrs  
1 – Innenelektrode (Anode), 2 – einfallende Kernstrahlung, 3 – Katode, 4 – Zählrohrkammer, 5 – ionisierte Gasteilchen, R – Arbeitswiderstand

Das Geiger-Müller-Zählrohr ist ein universelles Nachweisgerät für die Kernstrahlung. Seine Wirkungsweise beruht auf der Ionisation eines Füllgases.

**Nebelkammer.** Fliegt ein Flugzeug in großer Höhe, dann kann man oft einen Kondensstreifen beobachten. Er entsteht in kalter Luft durch Ablagerung feiner Wassertröpfchen an den Teilchen der Verbrennungsabgase (Nebelbildung) und markiert den Weg des Flugzeuges.

Auf entsprechende Weise können in einer Nebelkammer z. B. die Spuren von  $\alpha$ -Teilchen sichtbar gemacht werden. Diese ionisieren das Gas längs ihrer Bahn (Bild 133/1). An den entstehenden Gas-Ionen lagern sich nach Verringern des Gasdrucks (Abkühlung) Wassertröpfchen ab, die als Nebelspuren zu beobachten sind (Bilder 133/2 und 133/3). Weitere Nachweisgeräte sind Filme und Leuchtschirme.

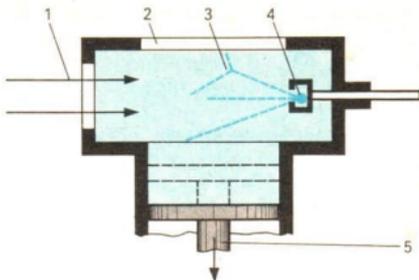


Bild 133/1 Nebelkammer nach Wilson  
1 – Lichteinfall, 2 – Beobachtungsfenster,  
3 – Nebelspuren, 4 – radioaktives Präparat ( $\alpha$ -Strahlenquelle), 5 – Kolben

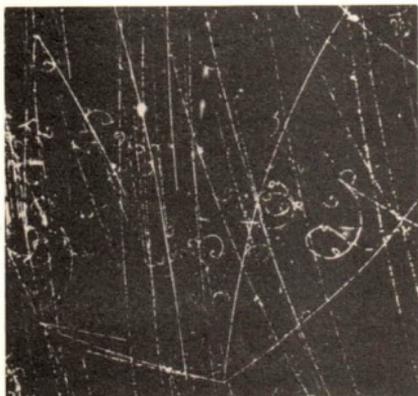


Bild 133/2 Nebelkammeraufnahme der Spuren von  $\alpha$ -Teilchen

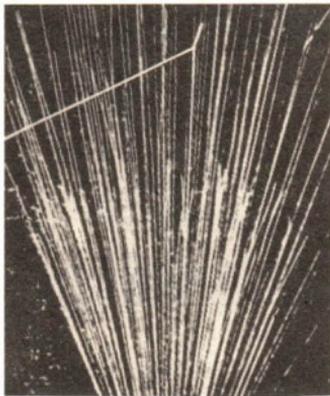


Bild 133/3 Aufnahme der Teilchenspuren verschieden geladener Teilchen. Die Kammer befand sich in einem Magnetfeld

### Anwendung der Kernstrahlung

Die von radioaktiven Nukliden emittierte Kernstrahlung findet in Industrie, Landwirtschaft, Medizin und Forschung vielfältige Anwendung.

**Bestrahlungsverfahren.** In der Landwirtschaft wird z. B. durch die Strahlungsbehandlung von Speisezwiebeln mit der  $\gamma$ -Strahlung des Nuklids Kobalt-60 ( $\nearrow$  S. 129) das Auskeimen der Zwiebeln vollständig unterdrückt. Dadurch wird eine erhebliche Senkung der Lagerverluste erreicht und Energie für die Lagerung in Kühlhäusern eingespart.

- ① Beschreiben Sie den Vorgang der Stoßionisation!
- ② Erklären Sie die Arbeitsweise eines Zählrohres mit Hilfe der Kenntnisse über den elektrischen Leitungsvorgang in Gasen!
- ③ Welche Wirkungen der Kernstrahlung finden bei den Nachweisgeräten Berücksichtigung?

In der Medizin verwendet man Kernstrahlung zur Entkeimung von Instrumenten, Arzneimitteln und Verbandstoffen und zur Geschwulstbehandlung (Bild 134/1).

**Durchstrahlungsverfahren.** Das große Durchdringungsvermögen der  $\gamma$ -Strahlung wird in der Industrie bei der Prüfung auf Materialfehler in Gußteilen und Schweißverbindungen ausgenutzt. Dabei befindet sich das Prüfgut zwischen einer  $\gamma$ -Strahlungsquelle und dem Nachweisgerät (Film oder Zählrohr). Enthält das Prüfgut z. B. einen Hohlraum, so wird an dieser Stelle die Strahlung weniger geschwächt (Bild 134/2).

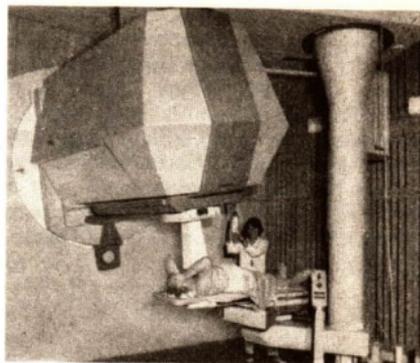


Bild 134/1 Kobaltkanone im Einsatz

Strahlenschranken werden häufig zur Füllstandsüberwachung eingesetzt (Bild 134/3).

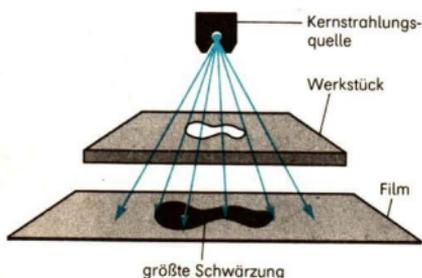


Bild 134/2 Prinzip der zerstörungsfreien Materialprüfung

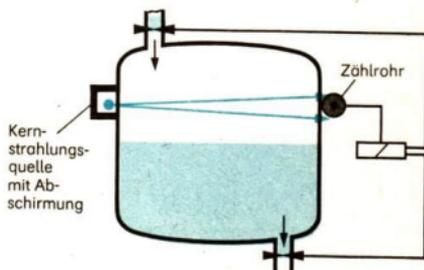
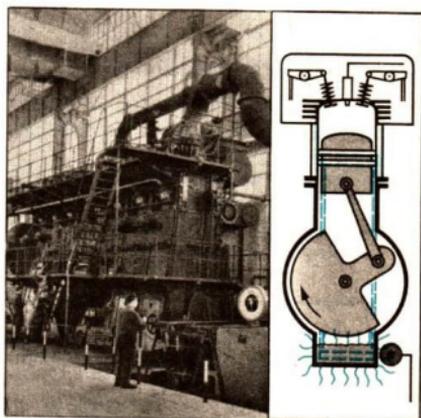


Bild 134/3 Prinzip der Füllstandsüberwachung. Durch das Relais kann die selbständige Füllung und Entleerung des Behälters gesteuert werden.

**Markierungsverfahren.** Radioaktive Nuklide (z. B. Jod-132) setzt man ein, wenn der Weg des Nuklids im lebenden Organismus, in Stoffen oder in schwer zugänglichen Anlagen verfolgt werden soll. Mit Strahlungsmeßgeräten werden ihre Ortsveränderungen beobachtet (z. B. Stoffwechsel und Stoffablagerung im menschlichen Organismus). Werden Maschinenteile mit radioaktiven Nukliden präpariert, so können ohne Ausbau der Teile die im Schmiermittel abgeführten Verschleißteilchen gemessen werden (Bild 134/4).

Bild 134/4 Verschleißmessung an einem stationären Dieselmotor



► Kernstrahlung findet in der Technik, Landwirtschaft, Medizin und Biologie in Form des Bestrahlungs-, Durchstrahlungs- und Markierungsverfahrens vielfältige Anwendung.

①

## Zusammenfassung

Bestimmte Atomkerne können sich ohne äußere Beeinflussung von selbst in andere Atomkerne umwandeln (Spontanzerfall). Dabei tritt Kernstrahlung auf:



Eigenschaften, Wirkungen, Nachweisgeräte und Anwendungen der Kernstrahlung

Kernstrahlung			
Eigenschaften	Wirkung	Nachweisgeräte	Anwendung
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Geradlinige Ausbreitung</li> <li>– Ablenkbarkeit in elektrischen und magnetischen Feldern (nur α- und β-Strahlung)</li> <li>– Durchdringungsfähigkeit</li> <li>– Träger von Energie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Ionisation von Gasen</li> <li>– Schwärzung fotografischer Schichten</li> <li>– Anregen von Leuchtstoffen zur Fluoreszenz</li> <li>– Zerstörung von lebenden Zellen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Geiger-Müller-Zählrohr mit Verstärker und Anzeigegerät</li> <li>– Wilsonsche Nebelkammer</li> <li>– Fotografische Schichten (Filme)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Bestrahlungsverfahren</li> <li>– Durchstrahlungsverfahren</li> <li>– Markierungsverfahren</li> </ul>

- ① Berichten Sie über die Anwendung radioaktiver Nuklide aus der Tagespresse und der populärwissenschaftlichen Literatur! Erläutern Sie dabei, welche Eigenschaften bzw. Wirkungen der Kernstrahlung bei den Anwendungsbeispielen genutzt werden!

Im Mittelalter versuchten die Alchimisten durch chemische Experimente Gold aus anderen Elementen künstlich herzustellen. Das mußte fehlschlagen, da man auf chemischem Weg nur Veränderungen in der Atomhülle erreicht. Der Atomkern und damit das Element bleibt jedoch unverändert. Heute sind die Physiker in der Lage, Atomkerne vieler Elemente in Atomkerne anderer Elemente umzuwandeln.



### Kernumwandlungen durch Elementarteilchen

**Entdeckung der künstlichen Kernumwandlung.** Die erste künstliche Kernumwandlung gelang Ernest Rutherford (1871 bis 1937) im Jahre 1919. Er ließ schnelle  $\alpha$ -Teilchen auf Stickstoff auftreffen und konnte dabei Wasserstoffkerne (Protonen) nachweisen:

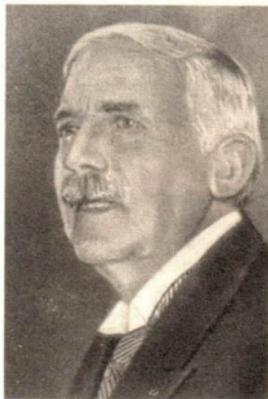
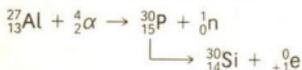


Bild 136/2 Ernest Rutherford (1871 bis 1937)

Irene (1897 bis 1956) und Frederic Joliot-Curie (1900 bis 1958) beobachteten 1934 erstmals, daß der bei einer künstlichen Kernumwandlung entstehende Folgekern instabil sein kann und unter Emission von Kernstrahlung in einen stabilen Kern zerfällt:



Enrico Fermi (1901 bis 1954) führte 1934 die ersten Experimente zur Kernumwandlung mit Neutronen durch. Neutronen eignen sich besonders gut für Kernumwandlungen, da sie ohne elektrische Abstoßung in den Atomkern eindringen können.

## ■ Kernumwandlung mit Neutronen:

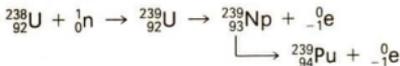


Das Nuklid Platin-197 wandelt sich unter Emission von  $\beta^-$ -Strahlung in das Nuklid Gold-197 um. ①

Damit wurde der Traum aller Alchimisten der vergangenen Jahrhunderte zwar Wirklichkeit, aber das Verfahren ist so teuer, daß es keine praktische Bedeutung besitzt.

**Herstellung radioaktiver Nuklide.** Durch künstliche Kernumwandlungen kann man aus einer Vielzahl von Elementen radioaktive Nuklide herstellen, die als Kernstrahlungsquellen Anwendung finden (→ S. 135).

Für den Betrieb von Kernkraftwerken ist das künstliche radioaktive Nuklid Plutonium-239 von großer Bedeutung (→ S. 140). Es wird durch Beschuß von in der Natur vorkommendem Uran-238 mit Neutronen gewonnen:



▶ **Durch Kernumwandlungen mit Elementarteilchen kann man künstlich radioaktive Nuklide herstellen. Sie finden als Kernstrahlungsquellen in der Praxis Anwendung.**

② ③ ④

## Kernspaltung

**Entdeckung.** Beim Beschuß von Urankernen mit Neutronen machten im Dezember 1938 die deutschen Kernforscher Otto Hahn (1879 bis 1968), Fritz Straßmann (1902 bis 1980) und Lise Meitner (1878 bis 1968) eine sensationelle Entdeckung: Beim Eindringen eines Neutrons in einen Urankern können zwei Folgekerne entstehen, deren Kernladungszahl zusammen gleich der des Urankerns ist. Dabei wird gleichzeitig eine sehr große Energie freigesetzt. Mit dieser Entdeckung wurde eine neue Form der Kernumwandlung und eine neue Energiequelle von sehr großer Ergiebigkeit gefunden.

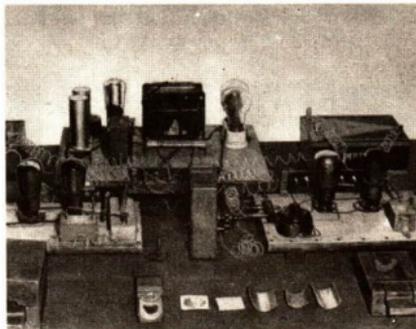


Bild 137/1 Experimentiertisch von Otto Hahn und Fritz Straßmann

- ① Stellen Sie die entsprechende Zerfallsgleichung auf!
- ② Beschreiben Sie die Kernumwandlung durch Elementarteilchen!
- ③ Wie kann man künstliche radioaktive Nuklide herstellen?
- ④  ${}^{14}_6\text{C}$  ist ein häufig angewandtes radioaktives Nuklid. Es kommt zwar in der Natur vor (→ S. 130), wird aber auch aus dem natürlich vorkommenden Stickstoff  ${}^{14}_7\text{N}$  durch Bestrahlung mit Neutronen künstlich hergestellt. Stellen Sie die entsprechende Kernumwandlungsgleichung auf! Welches Elementarteilchen wird dabei emittiert?

**Kernspaltung ist eine Form der Kernumwandlung, bei der ein schwerer Atomkern in zwei mittelschwere Kerne und zwei oder drei Neutronen zerlegt wird. Bei dieser Kernumwandlung wird sehr viel Energie freigesetzt.**

Bei der Spaltung eines Uran-235-Kerns können z. B. ein Barium- und ein Krypton-Kern entstehen (Bild 138/1). Die neu entstandenen Kerne sind instabil und emittieren Kernstrahlung.

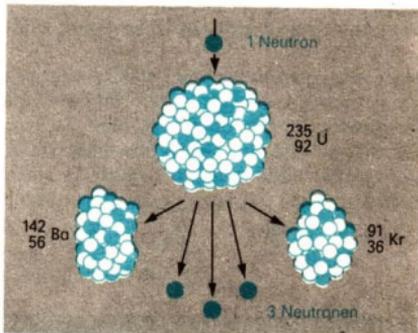
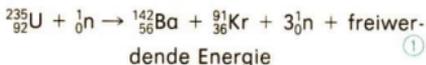


Bild 138/1 Spaltung des Uran-235-Atomkerns

**Kernenergie.** Die einem Atomkern innewohnende Energie wird Kernenergie genannt. Ein Teil dieser Kernenergie wird bei der Kernspaltung freigesetzt. Sie tritt zum einen in Form von Bewegungsenergie der Spaltstücke und der Neutronen, zum anderen in Form der  $\gamma$ -Strahlung auf.

Die Bewegungsenergie der Spaltstücke wandelt sich beim Abbremsen durch die umgebenden Körper in thermische Energie dieser Körper um. Die bei der Spaltung eines Urankerns freiwerdende Energie beträgt  $3,22 \cdot 10^{-11}$  J, bei der vollständigen Spaltung von 1 kg Uran-235 werden  $84 \cdot 10^6$  MJ frei.

**Der Betrag der bei vollständiger Spaltung von 1 kg  ${}_{92}^{235}\text{U}$  freiwerdenden Energie entspricht der Energie, die bei der Verbrennung von 10000 t Braunkohle (500 Güterwagen) entsteht.**

**Kettenreaktion.** Bei jeder Spaltung eines Uran-235-Kernes werden 2 bis 3 Neutronen frei. Diese können neue Spaltungen auslösen. Dadurch wächst die Zahl der Kernspaltungen in sehr kurzer Zeit lawinenartig an (Bild 138/2).

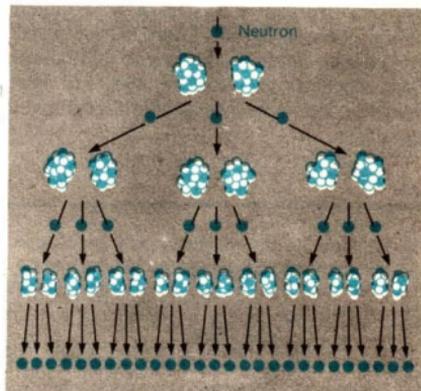


Bild 138/2 Prinzip der Kettenreaktion

Die Kettenreaktion wurde von F. Joliot-Curie und E. Fermi entdeckt. Zur praktischen Nutzung der bei der Kernspaltung freiwerdenden Energie muß der Ablauf der Kettenreaktion gesteuert werden können. Das ist z. B. dadurch möglich, daß mit Hilfe einer Reguliereinrichtung Stoffe, die Neutronen absorbieren (Bor, Kadmium), zugesetzt werden. Damit läßt sich erreichen, daß von den 2 bis 3 der bei der Spaltung freiwerdenden Neutronen immer nur eines eine weitere Kernspaltung herbeiführt. ②

Für das Zustandekommen einer Kettenreaktion müssen folgende Bedingungen erfüllt sein:

1. Es muß eine bestimmte Mindestmasse an spaltbarem Material vorhanden sein, damit die Neutronen nicht wirkungslos nach außen entweichen. Diese Mindestmasse nennt man **kritische Masse**.
2. Die frei werdenden Neutronen müssen zum Auslösen einer neuen Spaltung eine bestimmte kinetische Energie besitzen.

**Für das Zustandekommen einer Kettenreaktion ist eine Mindestmasse an spaltbarem Material (kritische Masse) und eine bestimmte Neutronenenergie nötig. Zur Nutzung der freiwerdenden Energie muß die Kettenreaktion gesteuert werden.**

**Kernreaktor.** Eine Anlage, in der eine kontrollierte und gesteuerte Kernspaltungs-Kettenreaktion abläuft, heißt **Kernreaktor**. Die erste kontrollierte Kettenreaktion in einem Kernreaktor gelang 1942 Fermi.

Ein Kernreaktor besteht aus folgenden Teilen (Bild 139/1):

1. **Stäbe aus Kernbrennstoff** (z. B.  $^{235}_{92}\text{U}$  oder  $^{239}_{94}\text{Pu}$ ).
2. **Bremssubstanzen** zum Abbremsen der bei der Spaltung freiwerdenden schnellen Neutronen (z. B. Wasser, Graphit).
3. **Neutronenreflektoren**, die in der Umgebung des Kernbrennstoffs angebracht werden. Sie verhindern das Ausreten von Neutronen aus dem Reaktorraum.
4. **Regelstäbe** aus Bor oder Kadmium zur Steuerung der Kettenreaktion.
5. **Kühlsystem** zur Abführung der durch die Kernspaltung freigewordenen thermischen Energie.
6. **Strahlenschutzmantel** aus meterdickem Schwerbeton zur Abschirmung der Kernstrahlung.

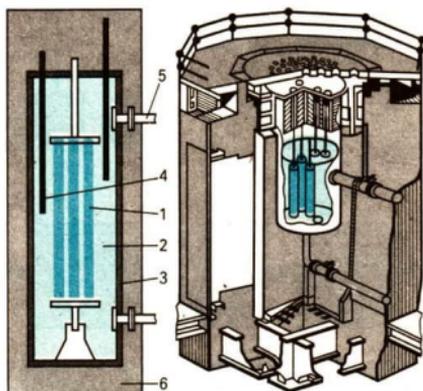


Bild 139/1 Aufbau eines Kernreaktors  
1 – Stäbe aus Kernbrennstoff, 2 – Bremssubstanz, 3 – Neutronenreflektoren, 5 – Kühlwasserzufluß (unten), Kühlwasserabfluß (oben), 6 – Strahlenschutzmantel aus Beton

- ① Erläutern Sie die Spaltung des Uran-235-Kerns!
- ② Erläutern Sie die Steuerung einer Kettenreaktion!

In den Kernbrennstoffstäben setzt durch das natürliche Vorhandensein von freien Neutronen eine Kettenreaktion ein. Die dabei entstehenden schnellen Neutronen werden durch Zusammenstöße mit den Wasserstoff- oder Kohlenstoffatomkernen der Bremssubstanz auf die für weitere Kernspaltungen notwendige Geschwindigkeit abgebremst (Bild 140/1). Die Anzahl der Neutronen wird durch das mehr oder weniger weite Einfahren der Regelstäbe in den Reaktorraum geregelt. Durch das Kühlmittel wird die freigesetzte thermische Energie abgeführt.

① ②

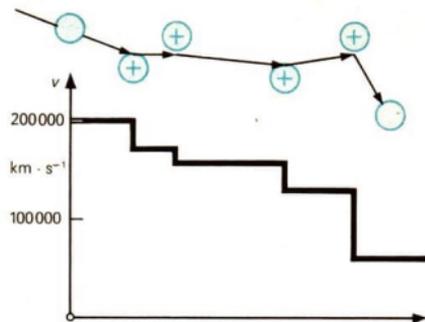


Bild 140/1 Neutronen werden durch Wasserstoffkerne (Protonen) gebremst.

**Kernkraftwerke.** Die bei der Kernspaltung freiwerdende thermische Energie wird in Kernkraftwerken zur Erzeugung von Elektroenergie genutzt. Hauptbestandteil eines Kernkraftwerkes ist der Reaktor. Besonders geeignet sind Druckwasserreaktoren, in denen Wasser sowohl als Bremssubstanz als auch als Kühlmittel dient. Den schematischen Aufbau eines Kernkraftwerkes zeigt Bild 140/2.

③

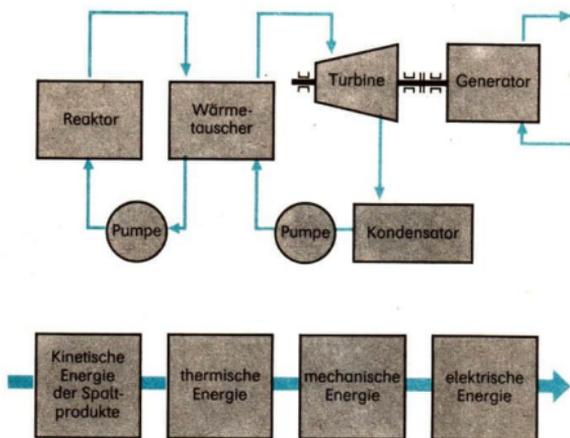


Bild 140/2 Blockschalbild eines Kernkraftwerkes und Energiefluß

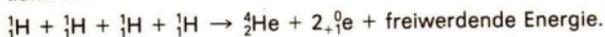
**In einem Kernreaktor läuft eine gesteuerte Kernspaltungs-Kettenreaktion ab. Die dabei freiwerdende thermische Energie wird in Kernkraftwerken in elektrische Energie umgewandelt.**

### Kernfusion

Wie aus dem Astronomieunterricht bekannt ist, gibt es noch eine andere Möglichkeit, Kernenergie freizusetzen. Das ist die als Kernfusion bezeichnete Verschmelzung leichter Atomkerne zu schwereren. Die dabei freigesetzte Energie ist etwa 8mal so groß wie bei der Kernspaltung:

Vorgang	freiwerdende Energie
Verbrennung von Braunkohle	18,5 MJ/kg
Spaltung von Uran-235	$8,4 \cdot 10^7$ MJ/kg
Fusion von Wasserstoffkernen	$66,6 \cdot 10^7$ MJ/kg

Eine Kernfusion läuft in der Sonne sowie auch in anderen Fixsternen ab. Dabei verschmelzen jeweils 4 Wasserstoffkerne über verschiedene Zwischenstufen zu einem Heliumkern: ④



Rechnungen ergaben, daß die durch die Heliumsynthese laufend erzeugte Sonnenenergie noch für  $10^{11}$  Jahre ausreicht.

Die Realisierung der Kernfusion als Grundlage für die Energiegewinnung in einem Kraftwerk ist sehr schwierig und technisch noch nicht gelöst.

▶ **Bei der Kernfusion verschmelzen leichte Atomkerne zu schwereren. Bei dieser Kernumwandlung wird etwa 8mal so viel Energie freigesetzt wie bei der Kernspaltung.**

## Kernwaffen

**Zur Entwicklung der Kernwaffen.** Etwa 3 Jahre nach der Entdeckung der Kernspaltung wurde vor allem in den USA eine neue Etappe der Kernforschung eingeleitet. Man wollte die gewaltige Energiemenge, die bei der Kernspaltung freigesetzt wird, für militärische Zwecke ausnutzen. In Los Alamos (USA-Staat New Mexiko) wurde unter Leitung von Robert Oppenheimer (1904 bis 1967) mit großem Aufwand an der Entwicklung einer Kernspaltungsbombe gearbeitet. Daran waren namhafte Wissenschaftler beteiligt, unter anderem die wegen des faschistischen Terrors nach den USA ausgewanderten Physiker Enrico Fermi und Eduard Teller (1879 bis 1955). Aber auch Albert Einstein, Leo Szilard (1898 bis 1964) und Nils Bohr (1885 bis 1962) waren indirekt an der Entwicklung der Bombe beteiligt. Einstein forderte auf Drängen Szilards 1939 in einem Brief an den amerikanischen Präsidenten Roosevelt die USA-Regierung auf, eine Kernspaltungsbombe zu entwickeln. Beide befürchteten nämlich, daß im faschistischen Deutschland auch an einer solchen Bombe gearbeitet werde. Als sich nach der Zerschlagung des deutschen Faschismus die Unbegründetheit dieser Befürchtung herausstellte, bedauerten beide tief, diesen Brief verfaßt zu haben.

In Los Alamos wurden jedoch – obwohl der Krieg in Europa beendet war und Hitlerdeutschland kapituliert hatte – die Arbeiten zur Herstellung einer Atombombe mit unvermindertem Tempo fortgesetzt.

- 
- ① Beschreiben Sie anhand Bild 139/1 den Aufbau und die Wirkungsweise eines Kernreaktors!
  - ② Begründen Sie, warum für den stationären Betrieb eines Kernreaktors immer nur je eins der bei den Spaltvorgängen frei werdenden Neutronen eine weitere Kernspaltung herbeiführen darf!
  - ③ Erläutern Sie anhand Bild 140/2 das Wirkungsprinzip eines Kernkraftwerks!
  - ④ Erläutern Sie die Gleichung für die Heliumsynthese!

Die herrschenden Kreise der USA hofften, gestützt auf ein Kernwaffenmonopol, die Weltpolitik allein bestimmen zu können. Obwohl eine Reihe verantwortungsbewußter Wissenschaftler, unter ihnen Bohr, Einstein und Szilard, die USA-Regierung vor dem Einsatz der Kernspaltungsbombe warnten, wurde am 6. August 1945 über Hiroshima in Japan die erste amerikanische Kernspaltungsbombe abgeworfen.

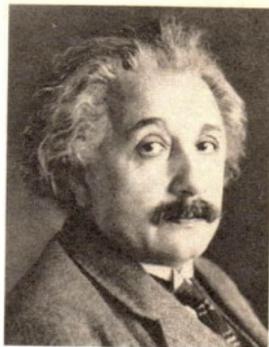


Bild 142/1 Albert Einstein (1879 bis 1955)

Von 420000 Einwohnern wurden durch diese Bombe 80000 Menschen sofort getötet. Über 200000 starben bis 1970 an den Spätfolgen dieser Kernwaffendetonation. Drei Tage nach diesem Inferno von Hiroshima wurde die japanische Stadt Nagasaki von einer weiteren amerikanischen Kernspaltungsbombe völlig zerstört. 75000 Menschen erlitten hierbei sofort den Tod. Die Spätfolgen forderten ein Vielfaches an Menschenleben.

**Der Einsatz der beiden Atombomben gegen japanische Städte sollte vor allem die waffentechnische Überlegenheit der USA über die Sowjetunion demonstrieren.**

Nach dem Abwurf der beiden Kernspaltungsbomben wurde in den USA die Entwicklung weiterer Massenvernichtungsmittel vorangetrieben. Ohne moralische Bedenken arbeitete Teller an der Entwicklung einer auf dem Prinzip der Kernfusion beruhenden Wasserstoffbombe, deren Vernichtungswirkung um vieles größer als die einer Kernspaltungsbombe ist. Oppenheimer war an dieser Entwicklung nur noch indirekt beteiligt. Obwohl er gegen den Bau der Wasserstoffbombe war, zog er keine persönlichen Konsequenzen daraus.

Weitere in den USA zuerst entwickelte Kernwaffen waren die Dreiphasenbombe, Raketen mit Mehrfachsprengköpfen und die Neutronenwaffe. ①

#### **Brechung des Kernwaffenmonopols durch die UdSSR.**

Der Mißbrauch der Physik durch die USA zwang die UdSSR dazu, ebenfalls Kernwaffen zu entwickeln, um das militärische Gleichgewicht zu sichern. Diese Entwicklung ist untrennbar verbunden mit dem Wirken von Igor Wassiljewitsch Kurtschatow (1903 bis 1960). Unter seiner Leitung wurde das amerikanische Kernwaffenmonopol in kürzester Zeit gebrochen. Nachdem 1942 in der Sowjetunion bekannt wurde, daß man in den USA unter strengster Geheimhaltung an einer Kernspaltungsbombe arbeitete, beschloß die sowjetische Regierung das Projekt der Schaffung einer Uran-Bombe.



Bild 142/2 Igor Wassiljewitsch Kurtschatow (1903 bis 1960)

Kurtschatow wurde mit der Leitung beauftragt. Am 29. August 1949 fand in Sibirien der erfolgreiche Test einer sowjetischen Kernspaltungsbombe statt. Das USA-Monopol war gebrochen und damit die Kriegsgefahr wesentlich verringert. I. W. Kurtschatow verkörpert das Vorbild eines sozialistischen Wissenschaftlers, der, vom tiefen Wissen um die gesellschaftlichen Zusammenhänge durchdrungen, seine ganze Kraft in den Dienst seiner Heimat stellte.

**Verantwortung der Kernphysiker.** Der Einsatz der Kernspaltungsbomben in Japan war nach der Niederlage des deutschen Faschismus eine völlig sinnlose Anwendung einer bedeutenden physikalischen Entdeckung. Er bewirkte, daß viele Wissenschaftler aufgerüttelt und sich ihrer großen Verantwortung bewußt wurden, die sie für die Nutzung ihrer Erkenntnisse tragen. Ein Wissenschaftler trat dabei besonders hervor, Frédéric Joliot-Curie. Er war nicht nur ein international anerkannter Wissenschaftler, sondern auch ein hervorragender Politiker.

Joliot-Curie erkannte sehr früh, daß naturwissenschaftliche Forschungsarbeit immer Konsequenzen für das Leben der Gesellschaft in sich trägt. 1942 trat er der Kommunistischen Partei Frankreichs bei. 1946 ernannte man ihn zum Hohen Kommissar für Atomenergie in Frankreich. Da er es ablehnte, Ergebnisse der Atomforschung in einem kapitalistischen Staat militärischen Zwecken dienstbar zu machen, wurde er 1950 seines Amtes enthoben. Als die Weltfriedensbewegung immer mehr erstarkte und 1949 der Weltfriedensrat gegründet wurde, wählte man F. Joliot-Curie zum Präsidenten.



Bild 143/1 Frédéric Joliot-Curie (1900 bis 1958)

In dieser Eigenschaft wurde er der Initiator des Stockholmer Appells zur Ächtung der Atombombe, zu dem sich 500 Millionen Menschen aller Erdteile durch ihre Unterschrift bekannten. Seine Arbeit für den Frieden wurde 1951 durch die Verleihung des Leninpreises gewürdigt. ②

**International anerkannte Wissenschaftler, an ihrer Spitze Albert Einstein und Frédéric Joliot-Curie, wurden ihrer politischen Verantwortung dadurch gerecht, daß sie die Teilnahme an Arbeiten zum militärischen Mißbrauch der Kernenergie ablehnten und öffentlich dagegen auftraten.**

**Nukleare Abrüstung – eine Lebensfrage der Menschheit.** Angesichts der verheerenden Wirkung der Kernwaffen hat die nukleare Abrüstung lebenswichtige Bedeutung. In einem Nuklearkrieg gibt es keine Besiegten und keine Sieger mehr; denn es wird danach keine Menschen mehr geben auf unserer Erde!

Die gegenwärtige Administration der USA treibt im Dienste der Befehlshaber des industriell-militärischen Komplexes dieses imperialistischen Staates die atomare Aufrüstung in nahezu unvorstellbarem Maße voran.

- ① Werten Sie die Haltungen und Motive von Albert Einstein, Leo Szilard, Robert Oppenheimer und Eduard Teller!
- ② Würdigen Sie die Wahrnehmung politischer Verantwortung als Wissenschaftler durch Frédéric Joliot Curie!

Demgegenüber kann die Sowjetunion mit all ihren Verbündeten einerseits nicht endlos geduldig zusehen, jedoch steht andererseits für uns wegen der großen Bedeutung der Kernenergie für die Verwirklichung der Ziele der sozialistischen Gesellschaft die friedliche Nutzung dieser Energiequelle im Vordergrund. Das gilt für alle Menschen auf unserer Erde, und deshalb besteht für die gesamte Menschheit die Notwendigkeit des Kampfes für eine friedliche Anwendung der Erkenntnisse der Kernphysik und gegen die atomare Bedrohung.

Für die sozialistischen Staaten ist der Kampf um nukleare Abrüstung einer der wichtigsten Bestandteile ihrer Konsequenz auf die aktive Verteidigung des Friedens und die Festigung der internationalen Sicherheit gerichteten Politik. Erfolge der sozialistischen Friedenspolitik sind das Abkommen über die Einstellung von Kernwaffenversuchen in der Atmosphäre, im Kosmos und unter Wasser (1963), der Kernwaffensperrvertrag (1968) und der Vertrag zwischen der UdSSR und den USA über die Verhinderung eines Nuklearkrieges. Der im Dezember 1987 unterzeichnete „Vertrag zwischen der UdSSR und den USA über die Liquidierung ihrer Raketen mittlerer und kürzerer Reichweite“ ist ein ermutigender Anfang für eine Welt ohne Kernwaffen, wie es im Programm der UdSSR vom Januar 1986 zur Befreiung der Welt von Kernwaffen bis zum Jahre 2000 vorgesehen ist.

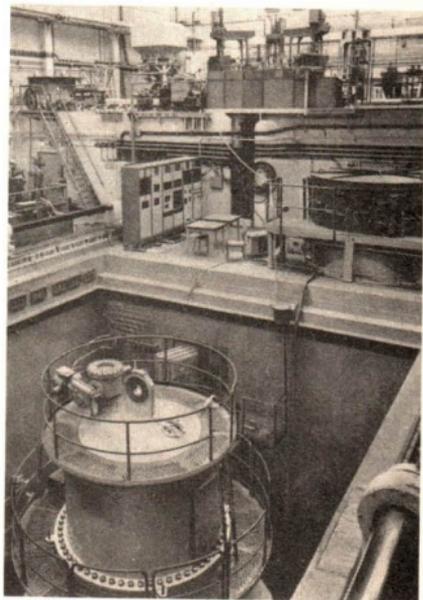
Im Genfer Abrüstungsausschuß und in der UNO verfolgen die sozialistischen Staaten weiterhin unermüdlich das Ziel, eine internationale, völkerrechtlich verbindliche Konvention zur Abrüstung und zum Verbot von Kernwaffen durchzusetzen.

Die Bedrohung der Menschheit durch Kernwaffen als Ergebnis der imperialistischen Politik ist durch weitere tiefgreifende Abrüstungsmaßnahmen zu beseitigen.

### Friedliche Nutzung der Kernenergie

**Kernkraftwerke in der DDR.** Gegenwärtig und in nächster Zukunft sind in der DDR noch die Braunkohlevorkommen die wichtigste Grundlage für die Erzeugung elektrischer Energie. Die Braunkohlegewinnung muß aber mit sehr viel Investitionen vorangetrieben werden, und je schwieriger die Abbaubedingungen werden, desto teurer wird die Braunkohle und damit die Elektroenergie für uns. Deshalb hat die DDR als moderner Industriestaat frühzeitig mit der Nutzung der Kernenergie begonnen. 1962 wurde mit Unterstützung der UdSSR das Versuchs-Kernkraftwerk Rheinsberg gebaut. Es besitzt einen Druckwasserreaktor und gibt eine elektrische Leistung von etwa 70 MW an das Netz ab (Bild 144/1). In Lubmin bei Greifswald wurde ein zweites Kernkraftwerk gebaut, dessen 4 Ausbaustufen jeweils eine elektrische Leistung von 800 MW besitzen.

Bild 144/1 Blick in den Reaktorraum des Kernkraftwerkes Rheinsberg



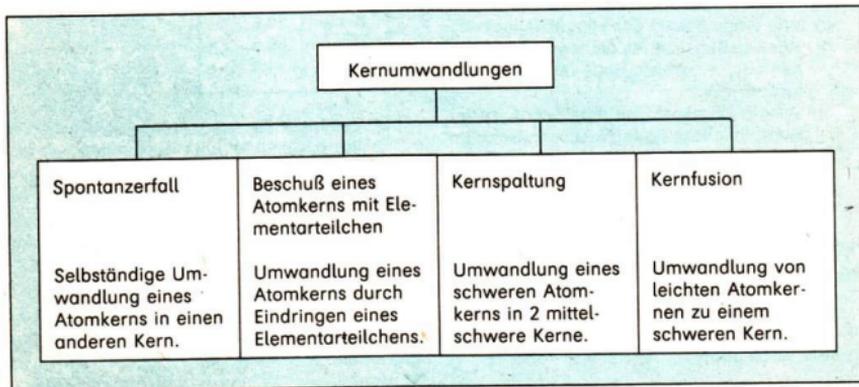
Die Kernspaltung findet umfangreiche Anwendung in allen modernen Industrieländern zur Erzeugung von Elektroenergie. Rheinsberg und Lubmin sind Standorte von Kernkraftwerken der DDR.

Die Nutzung der Kernenergie in Kernkraftwerken wirft aber auch Probleme auf; denn jede revolutionäre Entwicklung von Wissenschaft und Technik ist Vorstoß in Neuland. Sie birgt immer auch die Möglichkeit in sich, daß noch nicht erkannte Momente ihre Meisterung schwierig gestalten, und das um so mehr, wenn atomare Waffen auf solche Gebiete gerichtet werden, in denen sich Kernkraftwerke zur friedlichen Nutzung der Kernenergie befinden. Deshalb ist die Erhaltung des Friedens der größte, der wichtigste Sicherheitsfaktor bei der Nutzung der Kernenergie.

**Kernfusionsanlagen.** Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für die Energiegewinnung aus der gesteuerten Kernfusion erfordern sehr große materielle Aufwendungen. Sollte es in absehbarer Zeit gelingen, die gesteuerte Kernfusion zu realisieren, dann steht der Menschheit eine nahezu unerschöpfliche Energiequelle zur Verfügung. Man hat berechnet, daß in den Ozeanen soviel Wasserstoff enthalten ist, daß daraus in Fusionsreaktoren für  $500 \cdot 10^6$  Jahre Energie für die Menschheit gewonnen werden könnte.

Erfolgsversprechend sind die im Kurtschatow-Institut in Moskau entwickelten Kernfusionsanlagen vom Typ TOKAMAK.

### Zusammenfassung



- 1 Nennen Sie aktuelle Beispiele des Kampfes der sozialistischen Staaten um nukleare Abrüstung!
- 2 Begründen Sie, weshalb die Gewinnung von Elektroenergie in Kernkraftwerken lebensnotwendig ist!
- 3 Informieren Sie sich in der Tagespresse und in Zeitschriften über Forschungsergebnisse bzgl. der gesteuerten Kernfusion!

# Weitere Aufgaben zur Wiederholung und Übung

## MECHANIK

### Grundlagen, Kinematik, Dynamik

#### Gleichförmige Bewegung

1. Skizzieren und interpretieren Sie das Weg-Zeit-Diagramm und das Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm der gleichförmigen Bewegung!

Bei einem Schrägaufzug wird auf 150 m Länge ein Höhenunterschied von 30 m überwunden. Es werden Wagen mit einer Masse von 10 t bewegt.

- Wie groß ist die durchschnittliche Geschwindigkeit, wenn das Hinaufziehen 1,5 min dauert?
  - Wie groß muß die Zugkraft im Seil mindestens sein, wenn Reibungslosigkeit angenommen wird?
3. In einem Bergwerk bewegt sich ein Förderkorb mit der Masse von 900 kg mit einer Geschwindigkeit von 8 m/s eine Strecke von 0,6 km aufwärts.

- Wie lange dauert das Hinaufziehen?
- Wieviel Zugkraft ist bei dem Hinaufziehen über eine feste Rolle mindestens erforderlich?
- Wieviel Zugkraft ist mindestens nötig, wenn eine lose Rolle zwischengeschaltet wird? Wieviel Meter Seil müßten dabei auf die Abtriebswelle gewickelt werden?

#### Auswertung von Meßreihen

4. Für vier Körper wurden Folgen von Meßwertpaaren aufgenommen. Welcher Körper bewegt sich gleichförmig und welcher gleichmäßig beschleunigt? Begründen Sie Ihre Aussagen!

Körper A		Körper B	
t in s	s in m	t in s	s in m
0	0	0	0
2	6	1	3
4	16	3	27
6	30	4	48

Körper C		Körper D	
t in s	s in m	t in s	v in m/s
0	0	0	14
2	4	1	12
5	10	4	6
9	18	7	0

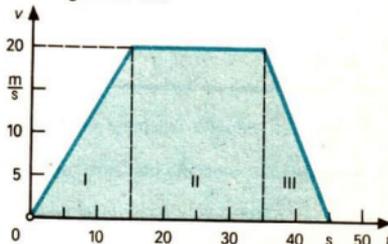
Die Untersuchung der Bewegung eines Schnellbootes vom DDR-Küstenschutz ergab beim Anfahren folgende Meßwerte:

t in s	s in m
0	0
3	3,4
6	13,6
9	30,6
12	54,4

- Zeichnen Sie das s-t-Diagramm! Welche Proportionalität liegt vermutlich vor? Begründen Sie das rechnerisch! Formulieren Sie eine Aussage über die Bewegung des Schnellbootes!
- Berechnen Sie die Geschwindigkeit des Schnellbootes zu den gemessenen Zeiten, und zeichnen Sie das v-t-Diagramm!

#### Auswertung eines Geschwindigkeit-Zeit-Diagrammes

Von einem Testfahrzeug liegt folgendes v-t-Diagramm vor:



Welche Bewegungen liegen in den drei Zeitabschnitten vor? Begründen Sie Ihre Aussagen!

7. Berechnen Sie die Beschleunigungen in den drei Zeitabschnitten!
8. Zeichnen Sie das  $a$ - $t$ -Diagramm!
9. Berechnen Sie für jeden der drei Zeitabschnitte das zurückgelegte Weg!
10. Skizzieren Sie je ein Weg-Zeit-Diagramm für den ersten und den zweiten Zeitabschnitt!

#### Personen im Straßenverkehr

11. Geben Sie für die physikalischen Größen Geschwindigkeit und Beschleunigung die physikalische Bedeutung, die Definitionsgleichung, das Formelzeichen und die Einheit an!
12. Seit dem 1. 1. 1980 ist für Pkw-Fahrer das Anlegen eines Sicherheitsgurtes Pflicht. Begründen Sie mit einem physikalischen Gesetz diese Forderung!
13. Im Stadtverkehr wurde der Fahrer eines Pkw zu einer Notbremsung gezwungen. Der Bremsweg betrug 32 m. Die Verkehrspolizei stellte nach dem Prüfen des Zustandes der Bremsanlage eine durchschnittliche Bremsverzögerung von  $4 \text{ m/s}^2$  fest. Wie groß war die Geschwindigkeit zu Beginn des Bremsvorganges? Betrachten Sie den Bremsvorgang als gleichmäßig beschleunigte Bewegung. Lag ein Verstoß gegen die Straßenverkehrsordnung hinsichtlich der erlaubten Höchstgeschwindigkeit vor?
14. Bei regennasser Straße darf die Bremsverzögerung höchstens halb so groß wie bei trockener Straße sein. Wie ändern sich dadurch Bremszeit und Bremsweg? Welche Schlussfolgerungen ziehen Sie daraus für Ihr Verhalten im Straßenverkehr (als Fußgänger, als Mopedfahrer)?

#### Gesetze der Mechanik

15. Nennen und erläutern Sie folgende Gesetze:  
a) Wechselwirkungsgesetz, b) Newtonsches Grundgesetz, c) Trägheitsgesetz!
16. Interpretieren Sie die Gleichung  $a = F/m$ !
17. Beschreiben und erklären Sie die Bewegung von Personen, die in einem Bus frei stehen (sich nicht festhalten), wenn  
a) der Bus plötzlich anhält,  
b) der Bus plötzlich abbremst,  
c) der Bus in eine Rechtskurve einbiegt!
18. Ein Junge will von einem leichten Boot, welches nicht verankert ist, ans Ufer springen. Obwohl er sich kräftig vom Boot abstößt, er-

reicht er das Ufer nicht und fällt in das Wasser. Das Boot jedoch bewegt sich auf den See hinaus. Erklären Sie den beschriebenen Vorgang!

19. Untersuchen Sie, ob beim Hinaufziehen eines Körpers entlang einer geneigten Ebene oder beim Hochheben mit einer losen Rolle die Goldene Regel der Mechanik gilt!

#### Bewegung von Fahrzeugen

20. Zum Abtransport von Schotter werden Kipper „Belas“ aus der Sowjetunion eingesetzt. Diese haben im belasteten Zustand die Masse von 28 t. Sie werden aus dem Stand in 20 s auf 54 km/h gleichmäßig beschleunigt.  
a) Berechnen Sie die Kraft, die dazu aufgebracht werden muß!  
b) Berechnen Sie den Beschleunigungsweg!
21. Ein unbeladener und ein beladener Lkw gleichen Typs halten vor einer Verkehrsampel. Beim Anfahren werden beide mit der gleichen Kraft beschleunigt. Bei welchem Lkw ist die Beschleunigung kleiner? Begründen Sie Ihre Aussage!
22. Ein Güterzug wird auf einer Strecke von 1000 m mit einer Beschleunigung von  $0,2 \text{ m/s}^2$  gleichmäßig beschleunigt. Wie groß ist die Geschwindigkeit am Ende der Strecke?
23. Ein Kind will mit einer konstanten Geschwindigkeit von 3,6 km/h eine 5 m breite Straße überqueren. Ein Pkw nähert sich mit 50 km/h. Wie weit muß das Fahrzeug mindestens entfernt sein, wenn das Kind die andere Straßenseite erreicht, bevor der Pkw herangefahren ist?

#### Bewegung von Körpern

24. Skizzieren und interpretieren Sie das Weg-Zeit-Diagramm und das Geschwindigkeit-Zeit-Diagramm der gleichmäßig beschleunigten Bewegung!
25. Ein Fallschirmspringer springt aus 0,5 km Höhe ab. Er legt die ersten 150 m im freien Fall zurück. Nach dem Öffnen des Fallschirmes bewegt er sich mit einer konstanten Geschwindigkeit von 5 m/s zur Erde. Wie lange braucht er, bis er auf der Erde auftrifft?
26. Zwei Steine fallen unterschiedlich lange frei herab. Ihre Fallzeiten verhalten sich wie 1 zu 4. Wie verhalten sich die Endgeschwindigkeiten und die Fallwege?
27. Berichten Sie über das Leben und Wirken von Galileo Galilei!

### Gleichförmige Kreisbewegung

- ~~X~~ Leiten Sie die Gleichung  $v = \frac{2\pi r}{T}$  her, und interpretieren Sie diese!
- ~~X~~ Der Läufer einer Dampfturbine mit einem Durchmesser von 2,0 m hat eine Drehzahl von  $2400 \text{ min}^{-1}$ . Wie groß ist die Geschwindigkeit eines Umfangspunktes?
30. Interpretieren Sie die beiden Gleichungen für die Radialkraft!
31. Erklären Sie die Wirkungsweise einer Wäscheschleuder!

### Mechanische Arbeit und mechanische Energie

32. a) Geben Sie für die Größen Arbeit und Energie die physikalische Bedeutung, das Formelzeichen und die Einheit an!  
b) Nennen und interpretieren Sie die Gleichungen für die mechanische Arbeit, die potentielle und die kinetische Energie!
33. Nennen Sie das Gesetz der Erhaltung der Energie bei reibungsfreien mechanischen Vorgängen!
- ~~X~~ Ein Pkw hat mit Insassen eine Gesamtmasse von 900 kg. Er fährt mit einer Geschwindigkeit von 40 km/h.  
a) Berechnen Sie die kinetische Energie in Joule!  
b) Wieviel thermische Energie muß sich in den Bremsen bilden, wenn der Pkw bis zum Stillstand abgebremst werden soll?  
c) Wie ändert sich die kinetische Energie des Pkw, wenn sich dessen Geschwindigkeit verdreifacht?
35. Eine Ramme mit der Masse 250 kg wird durch einen Elektromotor auf 2 m Höhe gehoben. Dann fällt sie frei auf einen Pfahl herab, der dadurch 10 cm tief in den Boden eindringt.  
a) Beschreiben Sie die Energieumwandlungen, die bei dem gesamten Vorgang auftreten!  
b) Berechnen Sie die potentielle Energie der Ramme im höchsten Punkt!  
c) Wie groß ist die Geschwindigkeit der Ramme kurz vor dem Auftreffen auf den Pfahl?  
d) Beim Auftreffen auf den Pfahl wandeln sich 50% der mechanischen Energie in thermische um. Der Rest dient zum Verdrängen von Reibungsarbeit. Wie groß ist die mittlere Reibungskraft, die zwischen Erdboden und Pfahl wirkt?

### Gravitation

#### Gravitationsgesetz

36. Nennen und interpretieren Sie das Gravitationsgesetz!
- ~~X~~ Wie muß sich der Abstand zweier Massenpunkte verändern, damit sich die Gravitationskraft  
a) auf ein Neuntel vermindert,  
b) auf das Vierfache erhöht?
38. Die Gewichtskraft eines Körpers ist auf dem Mond nur 1/6 seiner Gewichtskraft auf der Erde. Erklären Sie das!
39. Warum bemerken wir nur die Anziehung der Körper durch die Erde und nicht die gegenseitige Gravitation der uns umgebenden Gegenstände untereinander?
40. Leiten Sie aus dem Gravitationsgesetz und dem Gesetz der Radialkraft eine Gleichung zur Berechnung der Kreisbahngeschwindigkeit einer Raumstation her!
41. Berichten Sie über Leben und Wirken von Isaac Newton!

### Mechanische Schwingungen und mechanische Wellen

#### Mechanische Schwingungen

42. Erläutern Sie den Begriff mechanische Schwingungen, nennen Sie die Voraussetzungen für ihr Entstehen, und geben Sie die physikalischen Größen zu ihrer Beschreibung an!
43. Beschreiben und erklären Sie die Bewegung eines horizontalen Federschwingers von einem Umkehrpunkt zum anderen!
- ~~X~~ Interpretieren Sie die Gleichung
- $$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$
- ~~X~~ An eine Schraubenfeder wird ein Körper mit einer Masse von 1 kg gehängt, wodurch sie sich um 10 cm verlängert.  
a) Berechnen Sie die Federkonstante!  
b) Berechnen Sie die Periodendauer der Schwingungen, wenn der Federschwinger zum Schwingen erregt wird!  
c) Zeichnen Sie das  $y$ - $t$ -Diagramm für zwei Perioden, wenn die Amplitude 2 cm beträgt!
46. Untersuchen Sie die Abhängigkeit der Periodendauer eines Federschwingers von der Masse!

#### Ungedämpfte und gedämpfte Schwingungen

- ~~X~~ Ein als Massepunkt zu betrachtender Körper schwingt mit einer Amplitude von 4 cm. Er führt 300 Schwingungen in 1 min aus.

- a) Zeichnen Sie das  $y$ - $t$ -Diagramm für 3 Perioden!
- b) Kennzeichnen Sie die Auslenkung bei 0,075 s nach dem Beginn des Schwingens!
- c) Skizzieren Sie den Graphen einer gedämpften Schwingung der gleichen Frequenz in dasselbe Koordinatensystem!
48. Beschreiben Sie die Energieumwandlungen bei ungedämpften und bei gedämpften Schwingungen!
49. Erläutern Sie technische Geräte, bei denen die Dämpfung der Schwingungen erwünscht ist!

#### *Eigenschwingungen und erzwungene Schwingungen*

50. Erläutern Sie mit Hilfe von zwei Fadenpendeln, die sich koppeln lassen, was man unter Eigenschwingungen, erzwungenen Schwingungen und Resonanz versteht!
51. Skizzieren Sie die Resonanzkurve und interpretieren Sie diese!
52. Nennen und erläutern Sie Beispiele aus der Technik, in denen die Resonanz gefürchtet bzw. gewünscht ist!

#### *Mechanische Wellen*

53. Erläutern Sie den Begriff mechanische Welle, nennen Sie die Voraussetzungen für ihr Entstehen, und geben Sie die physikalischen Größen zu ihrer Beschreibung an!
54. Bestimmen Sie  $y_{\max}$ ,  $T$ ,  $f$  und  $v$  einer Wasserwelle anhand der Diagramme im Lehrbuch, Bild 37/3!
55. Vergleichen Sie eine mechanische Schwingung mit einer mechanischen Welle!
56. An einem Beobachter, der an einem See steht, laufen Wellenberge vorbei. Vom Vorbeigang des ersten bis zum Vorbeigang des fünften Wellenberges vergehen 8 s. Der Abstand zwischen dem ersten und dritten Wellenberg beträgt 12 m. Berechnen Sie die Periodendauer, mit der die Teilchen des Wassers schwingen, die Wellenlänge und die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle!

#### *Ausbreitungsgeschwindigkeit von Wellen*

57. Leiten Sie die Gleichung für die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Wellen her!
58. Ein Beobachter, der sich 4 km von einem Geschütz entfernt befindet, hört den Abschuss 12 s nach dem Aufblitzen. Bestimmen Sie die Schallgeschwindigkeit in Luft! Welche Lufttemperatur lag vor?
59. Erläutern Sie das Echolotverfahren zur Abstandsbestimmung!

60. Die obere Hörschwelle des Menschen liegt bei 20 kHz. Welche Wellenlänge ist bei dieser Frequenz in Luft (20°C) vorhanden?

#### *Eigenschaften mechanischer Wellen*

61. Skizzieren Sie die Ausbreitungsrichtung und die Wellenfronten bei Reflexion und bei Brechung von Wasserwellen, und nennen Sie die geltenden Gesetze!
62. Erläutern Sie die Begriffe Beugung und Interferenz mechanischer Wellen!
63. Geradlinige Wasserwellen treffen auf einen Doppelspalt. Beschreiben Sie die Erscheinung hinter dem Doppelspalt, und erklären Sie diese!
64. Nennen und erläutern Sie Beispiele für die Anwendung von Ultraschall in der Technik und in der Medizin!

## THERMODYNAMIK

#### *Temperatur, thermische Energie, Wärme*

1. Geben Sie für die physikalischen Größen Temperatur, thermische Energie und Wärme die physikalische Bedeutung, das Formelzeichen und die Einheit an! Deuten Sie die Temperatur und die thermische Energie mit Hilfe der Vorstellungen vom Aufbau der Stoffe aus Teilchen!
2. Beschreiben Sie Vorgänge, bei denen eine bestimmte Temperatur eingehalten werden muß, um volkswirtschaftliche und persönliche Verluste zu vermeiden!
3. Formulieren Sie den ersten Hauptsatz der Thermodynamik!
4. Erläutern Sie die Gültigkeit des ersten Hauptsatzes am Beispiel des Energiehaushaltes der Erde!
5. Nennen Sie Beispiele für die rationelle Nutzung von Energie!

#### *Längenausdehnung*

65. Interpretieren Sie die Gleichung  $\Delta l = \alpha \cdot l \cdot \Delta T$ !
66. Der Stahlträger einer Eisenbahnbrücke hat im Winter bei einer Temperatur von  $-35^\circ\text{C}$  die Länge von 75 m. Um wieviel verschiebt sich das auf Rollen gelagerte freie Ende des Trägers, wenn im Sommer die Temperatur auf  $+40^\circ\text{C}$  steigt?
67. Warum löst sich bei Temperaturänderung einer Stahlbetonkonstruktion der Beton nicht von dem darin befindlichen Eisen ab?
68. Erklären Sie die Wirkungsweise eines Dehnungsausgleichers bei Rohrleitungen und die eines Bimetallstreifens als Schalter!

### Gleichung zur Berechnung der Wärme

10. Interpretieren Sie die Gleichung  $Q = c \cdot m \cdot \Delta T$ , und erläutern Sie, wie man vorgehen muß, um die in der Gleichung enthaltenen Abhängigkeiten experimentell zu untersuchen!
11. Das folgende Diagramm gilt für 100 g Wasser. Wäre der Verlauf der Geraden steiler oder flacher, wenn statt 100 g Wasser
- 50 g Wasser, b) 300 g Wasser, c) 100 g Alkohol erhitzt würden?

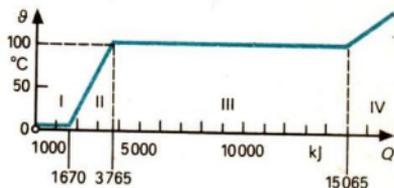


12. Eine Kupferkugel, eine Aluminiumkugel und eine Stahlkugel mit gleicher Masse haben die Temperatur von 90°C. Die drei Kugeln werden auf Eis gelegt. Welche Kugel schmilzt mehr Eis? Begründen Sie Ihre Antwort!
13. In drei gleichen Gefäßen befindet sich Wasser, Petroleum und Alkohol. Sowohl die Massen als auch die Temperaturen sind gleich. Den drei Gefäßen wird jeweils eine gleich große Wärme zugeführt. In welcher Flüssigkeit ist der Temperaturanstieg am größten und in welcher am kleinsten? Begründen Sie Ihre Antwort!
14. Bestimmen Sie die Wärme, die beim Mischen zweier Wassermengen an das Gefäß abgegeben wird!
15. In einem elektrischen Warmwasserbereiter wird in 5 min 1 Liter Wasser von 15°C auf 95°C erwärmt.
- Wieviel Wärme ist dazu erforderlich?
  - Berechnen Sie die elektrische Leistung unter der Annahme, daß die gesamte Stromwärme nur dem Wasser zugeführt wird!
16. In einem Experiment wurde ein fester Körper mit der Masse von 150 g auf 100°C erhitzt und anschließend in kaltes Wasser gebracht, wobei er sich auf 26°C abkühlte. Die Auswertung ergab, daß dabei eine Wärme von 10 kJ vom festen Körper abgegeben wurde. Aus welchem Stoff besteht der feste Körper?
17. Nennen und erläutern Sie Beispiele für die Bedeutung der großen spezifischen Wärmekapazität von Wasser in Natur und Technik!

### Aggregatzustandsänderung

18. Wieviel Schmelzwärme ist für 8 kg Blei erforderlich?

19. Für Wasser mit einer bestimmten Masse wurde folgendes  $\theta$ -Q-Diagramm aufgenommen:



- Geben Sie an, welche Vorgänge in den vier Zeitabschnitten vorliegen!
  - Erklären Sie den Verlauf des Graphen in den Abschnitten 1 und 3!
  - Wie groß ist die Masse des Wassers?
20. Erklären Sie die Wirkungsweise eines Schnellkochtopfes!
21. a) Warum erhöht sich die Lufttemperatur während des Schneefalles?  
b) Warum verbriht man sich mit Dampf stärker als mit Wasser der gleichen Temperatur?

### Viertakt-Ottomotor

22. Beschreiben Sie den Aufbau eines Viertakt-Ottomotors!
23. Nennen Sie die vier Takte!
24. Erläutern Sie die Vorgänge in jedem Takt!
25. Geben Sie Beispiele für den Einsatz von Ottomotoren an!
26. Vergleichen Sie den Aufbau und die Arbeitsweise des Ottomotors mit dem Aufbau und der Arbeitsweise des Dieselmotors!

## ELEKTRIZITÄTSLEHRE

### Gesetze des Gleichstromkreises

#### Gleichstromkreis

- Geben Sie für die Größen Stromstärke, Spannung und elektrischer Widerstand die physikalische Bedeutung, das Formelzeichen sowie die Einheit an! Deuten Sie diese Größen mit dem Modell der Elektronenleitung!
- Interpretieren Sie die Gleichung  $I = U/R$ !
- Berechnen Sie aus den Angaben der folgenden Tabelle jeweils die Stromstärke  $I$ ! Welche Zusammenhänge erkennen Sie aus den Ergebnissen in einer Zeile, in einer Spalte und in der Diagonalen?

Tabelle:

$R \backslash U$	30 V	60 V	120 V
5 $\Omega$			
10 $\Omega$			
20 $\Omega$			

4. Eine Heizplatte für Schülerexperimente trägt die Aufschrift 220 V/150 W.
- Berechnen Sie die Stromstärke und den elektrischen Widerstand für die angegebene Spannung!
  - Wieviel kostet der Betrieb einer solchen Heizplatte in 10 Stunden nach Haushaltstarif?
  - Wieviel solcher Heizplatten können in den Stromkreis geschaltet werden, wenn der Kreis mit 10 A abgesichert ist?
5. Bestimmen Sie den elektrischen Widerstand eines Bauelements im Gleichstromkreis:
- Festwiderstand, b) Glühlampe im Kalt- und im Betriebszustand, c) Thermistor bei Zimmertemperatur und beim Eintauchen in heißes Wasser!

#### Unverzweigter Stromkreis

6. Zeichnen Sie den Schaltplan eines unverzweigten Stromkreises mit zwei Festwiderständen, nennen Sie die geltenden Gesetze, und erläutern Sie diese an einem selbstgewählten Beispiel!
- ~~X~~ An eine Spannungsquelle mit einer konstanten Klemmenspannung von 12 V sind zwei Bauelemente mit den elektrischen Widerständen 20  $\Omega$  und 40  $\Omega$  in Reihe geschaltet.
- Ermitteln Sie die Teilspannungen an den beiden Widerständen!
  - Wie ändern sich die Teilspannungen, wenn das zweite Bauelement den elektrischen Widerstand von 60  $\Omega$  hat?
- ~~X~~ Eine 125-V-Lampe eines Projektionsapparates mit einer Stromstärke von 3,5 A soll an eine Spannungsquelle mit 220 V Klemmenspannung angeschlossen werden. Berechnen Sie den elektrischen Widerstand des Vorschaltwiderstandes!
9. Erläutern Sie den Spannungsverlust an Kontakten und deren mögliche Folgen!

#### Verzweigter Stromkreis

10. Zeichnen Sie den Schaltplan eines verzweigten Stromkreises mit zwei Festwiderständen, nennen Sie die geltenden Gesetze, und er-

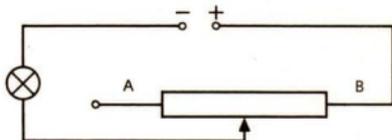
läutern Sie diese an einem selbstgewählten Beispiel!

- ~~X~~ An einer Spannungsquelle mit einer konstanten Klemmenspannung von 6 V sind zwei Glühlampen parallel geschaltet. Die Gesamtstromstärke beträgt 0,5 A. Die erste Lampe trägt die Aufschrift 6 V/0,6 W.
- Berechnen Sie die Stromstärke in der ersten Lampe und ihren elektrischen Widerstand!
  - Berechnen Sie für die zweite Lampe die Stromstärke, den elektrischen Widerstand und die elektrische Leistung!
12. Nennen Sie Beispiele für die Anwendung der Parallelschaltung von Bauelementen!
13. Bestätigen Sie die Gesetze für die Spannung und die Stromstärke im unverzweigten und im verzweigten Stromkreis!

#### Widerstandsgesetz

14. Interpretieren Sie die Gleichung  $R = \rho \cdot l/A!$
15. Nachdem in einem Stromkreis ein Draht gegen einen anderen Draht ausgewechselt wurde, zeigt der Strommesser im Vergleich zu vorher a) eine kleinere Stromstärke und b) eine größere Stromstärke an. Worin könnte sich in beiden Fällen der neue Draht von dem ursprünglichen Draht unterscheiden? Die Spannung blieb konstant.

- ~~X~~ Zwischen den beiden Drähten einer in der Erde verlegten Fernspreitleitung ist ein Kurzschluss entstanden. Der Draht besteht aus Kupfer und hat den Querschnitt 0,20 mm<sup>2</sup>. Um herauszufinden, in welcher Entfernung sich die Schadensstelle befindet, wird an den Anfang der Leitung eine Spannung angelegt und ein elektrischer Widerstand von 15,3  $\Omega$  bestimmt. Berechnen Sie die Entfernung der Schadensstelle!
17. Wie ändert sich im folgenden Stromkreis die Stromstärke, wenn der Gleitkontakt nach Punkt A oder Punkt B verschoben wird? Begründen Sie Ihre Antwort!



#### Felder und Induktion

##### Elektrische und magnetische Felder

18. Erläutern Sie je eine Möglichkeit zum Nachweis und zur Beschreibung elektrischer und magnetischer Felder!

19. In der Mitte zwischen zwei elektrisch entgegengesetzt geladenen Metallplatten hängt eine Weihnachtsbaumkugel an einem Federfadens. Was geschieht, wenn diese Kugel elektrisch negativ aufgeladen wird? Beschreiben und erklären Sie den Vorgang!

20. Elektromagnet:

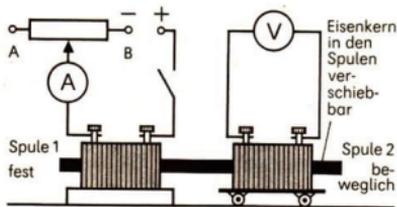
- Beschreiben Sie den Aufbau und erklären Sie die Wirkungsweise eines Elektromagneten!
- Wovon hängt die Kraft eines Elektromagneten auf einen ferromagnetischen Körper ab?
- Nennen Sie technische Anwendungen des Elektromagneten, und erläutern Sie zwei Beispiele!

21. Beschreiben Sie den Aufbau und erklären Sie die Wirkungsweise eines Gleichstrommotors!

### Elektromagnetische Induktion

22. Nennen Sie das Induktionsgesetz und das Lenzsche Gesetz!

23. Beschreiben Sie die Ihnen bekannten Möglichkeiten, die die folgende Experimentieranordnung bietet, um an der Spule 2 eine Induktionsspannung zu erzeugen! Erklären Sie jeweils das Entstehen der Induktionsspannung!



Wovon ist der Betrag der Induktionsspannung abhängig?

24. Berichten Sie über Leben und Wirken von Michael Faraday!

25. Weisen Sie das Entstehen einer Induktionsspannung durch mechanische Bewegung und durch Änderung der Stärke des Magnetfeldes nach!

### Wechselstromgenerator

26. Erklären Sie das Entstehen von Wechselspannung beim gleichförmigen Drehen einer Spule im homogenen Magnetfeld!

27. Skizzieren Sie das Diagramm der Netzwechselspannung mit der Frequenz von 50 Hz! Was versteht man unter Momentanwert, unter Maximalwert und unter Effektivwert der Wechselspannung?

28. Beschreiben Sie den Aufbau und erklären Sie die Wirkungsweise des Wechselstromgenerators (Innenpolmaschine)!

29. Erläutern Sie die Energieumwandlungen im Wechselstromgenerator!

### Transformator

30. Beschreiben Sie den Aufbau und erklären Sie die Wirkungsweise des Transformators!

31. Entwerfen Sie zwei Schaltpläne, nach denen man das Gesetz der Spannungsübersetzung und das Gesetz der Stromstärkeübersetzung bestätigen könnte!

32. Ein Netztransformator hat die Windungszahlen  $N_1 = 2350$  und  $N_2 = 137$ . Die Primärspannung beträgt 220 V.

- Wie groß ist die Sekundärspannung bei Leerlauf?
- Wieviel Windungen müßte eine zweite Sekundärwicklung haben, wenn man 4,5 V Spannung entnehmen will?

33. Bei einer Punktschweißmaschine beträgt das Verhältnis der Windungszahlen  $N_1 : N_2 = 200$ . Beim Einsatz der Maschine nimmt der Transformator eine Stromstärke von 150 A auf.

Berechnen Sie die Kurzschlußstromstärke!

34. Erläutern Sie Geräte und Anlagen, in denen Transformatoren eingesetzt werden!

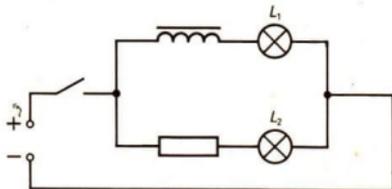
35. Bestätigen Sie das Gesetz der Spannungsübersetzung beim Transformator!

### Selbstinduktion

36. Geben Sie eine Definition des Begriffs Selbstinduktion!

37. An eine Spule mit Eisenkern ist eine Gleichspannung von 6 V gelegt. Erklären Sie das Auftreten sehr hoher Spannungen beim Unterbrechen des Stromkreises!

38. Beim Schließen des Schalters leuchtet die Lampe  $L_1$  in der folgenden Schaltung später als die Lampe  $L_2$ . Erklären Sie diese Erscheinung!



39. In einem geschlossenen Gleichstromkreis sind eine Spule und ein Strommesser in Reihe geschaltet. Welche Veränderungen müßten an der Anzeige des Strommessers erkennbar sein, wenn man a) einen Eisen-

kern in die Spule einführt, b) einen Eisenkern aus der Spule entfernt? Begründen Sie Ihre Voraussagen!

### Elektrische Leitungsvorgänge

#### Gemeinsamkeiten bei elektrischen Leitungsvorgängen

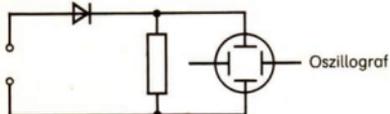
40. Nennen Sie die Gemeinsamkeiten aller elektrischen Leitungsvorgänge hinsichtlich Voraussetzung und Verlauf!
- ~~41.~~ Erläutern Sie die verschiedenen Möglichkeiten der Bereitstellung von Ladungsträgern in Gasen und im Vakuum!
42. Erklären Sie den elektrischen Leitungsvorgang im Vakuum! Gehen Sie dabei von den bei 40. genannten Gemeinsamkeiten aus!
43. Beschreiben Sie den Aufbau und erklären Sie die Wirkungsweise der Elektronenstrahlröhre (gehen Sie auf das Strahlerzeugungssystem und auf das Ablensystem ein)!
44. Nennen Sie Anwendungen der Elektronenstrahlröhre!

#### Thermistor (Heißleiter)

45. Wie hängt der elektrische Widerstand bei Metallen (z. B. Glühlampe) und bei Halbleitern (z. B. Thermistor) von der Temperatur ab?
- ~~46.~~ Erklären Sie die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes bei Metallen und bei Halbleiterbauelementen!
47. Ein Thermistor wurde an eine konstante Spannung angeschlossen und in einem Wasserbad allmählich erwärmt. Gemessen wurden die jeweils zusammengehörenden Werte von Stromstärke und Temperatur. Skizzieren Sie das  $I$ - $\theta$ -Diagramm des Heißleiters, und interpretieren Sie es!
48. Erläutern Sie ein Beispiel, wo die Temperaturabhängigkeit eines Halbleiters a) genutzt wird, b) unerwünscht ist!

#### Halbleiterdiode

- ~~49.~~ Beschreiben Sie den Aufbau von n-leitenden und von p-leitenden Halbleitern, und erläutern Sie den elektrischen Leitungsvorgang in diesen Stoffen!
50. Beschreiben Sie den Aufbau einer Halbleiterdiode, und erläutern Sie die Vorgänge in der Diode bei unterschiedlicher Polung der Spannungsquelle!
51. Folgende Experimentieranordnung ist gegeben:



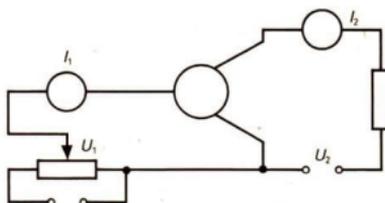
Skizzieren Sie die Bilder auf dem Oszillografenscreen für die beschriebenen Fälle, und begründen Sie Ihre Aussagen!

Spannungsquelle	Diode	Bild auf dem Oszillografenscreen
$\pm$	wie im Schaltplan	
$\mp$	wie im Schaltplan	
$\sim$	wie im Schaltplan	
$\sim$	umgekehrt wie im Schaltplan	
$\sim$	durch einen Draht überbrückt	

52. Nennen Sie Beispiele für die technische Nutzung der Halbleiterdioden!
- ~~53.~~ Zeigen Sie die Wirkungsweise einer Halbleiterdiode bei Durchlaß- und bei Sperrrichtung!

#### npn-Silizium-Transistor

54. Beschreiben Sie den Aufbau des npn-Si-Transistors, und geben Sie das Schaltzeichen an!
55. Zur Untersuchung des Transistors ist eine Emitterschaltung vorgegeben:



- a) Ergänzen Sie den Schaltplan (Bezeichnung für  $I_1$  und  $I_2$ , Schaltzeichen, Polarität der Spannungen  $U_1$  und  $U_2$ )!

- b) Formulieren Sie Aussagen über die Stromstärken:

$U_1$	$U_2$	$I_1$	$I_2$
0	0		
> 0	0		
> 0	> 0		

- a) Zeichnen Sie die  $I$ - $U$ -Diagramme!  
 b) Gilt das Ohmsche Gesetz? Begründen Sie Ihre Aussage!  
 c) Berechnen Sie die elektrischen Widerstände für das zweite, das fünfte und das siebente Wertepaar! Um welche Bauelemente könnte es sich handeln? Begründen Sie Ihre Entscheidung!

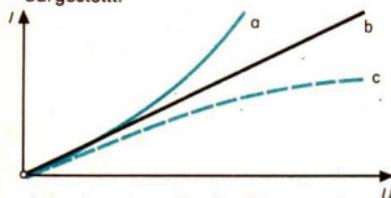
### Wechselstromkreis

#### Spule im Wechselstromkreis

56. a) Stellen Sie den Zusammenhang der beiden Stromstärken  $I_1$  und  $I_2$  in einem Diagramm dar!  
 b) Erläutern Sie die Steuerung der Stromstärke  $I_2$  durch die Stromstärke  $I_1$ !  
 c) Woraus ergibt sich die Verstärkerwirkung des Transistors?  
 57. Geben Sie Beispiele für die Anwendung von Transistoren an!

#### $I$ - $U$ -Diagramm

58. Die Graphen von drei elektrischen Bauelementen sind im folgenden  $I$ - $U$ -Diagramm dargestellt:



61. Eine Spule wird zunächst an 5 V Gleichspannung und danach an 5 V Wechselspannung angeschlossen. Vergleichen Sie die Stromstärke bei Gleichspannung mit der bei Wechselspannung! Begründen Sie Ihre Aussage!  
~~62.~~ a) Geben Sie für die Größe Induktivität die physikalische Bedeutung, das Formelzeichen und die Einheit an!  
 b) Berechnen Sie die Induktivität einer Spule aus den Meßwerten  $U = 125$  V,  $I = 0,75$  A,  $f = 50$  Hz!  
 63. a) Interpretieren Sie die Gleichung  $X_L = 2\pi \cdot f \cdot L$ !  
 b) Erklären Sie das Auftreten des induktiven Widerstandes im Wechselstromkreis!  
 64. In einer elektrischen Leitung werden Gleich- und Wechselströme übertragen. Die Wechselströme sollen stark behindert werden. Welches Bauelement würden Sie in die Leitung einbauen? Begründen Sie Ihre Aussage!

- a) Interpretieren Sie das Diagramm!  
 b) Um welche Bauelemente könnte es sich handeln? Begründen Sie Ihre Aussage!  
 c) Skizzieren Sie zu den drei Bauelementen das  $R$ - $\theta$ -Diagramm!

#### Kondensator im Wechselstromkreis

65. Ein Kondensator wird zunächst an 5 V Gleichspannung und danach an 5 V Wechselspannung angeschlossen. Vergleichen Sie die Stromstärke bei Gleichspannung mit der bei Wechselspannung! Begründen Sie Ihre Aussage!

- ~~66.~~ a) Geben Sie für die Größe Kapazität die physikalische Bedeutung, das Formelzeichen und die Einheit an!  
 b) Berechnen Sie die Kapazität eines Kondensators aus den Meßwerten  $U = 40$  V,  $I = 35$  mA,  $f = 100$  Hz!  
 67. a) Interpretieren Sie die Gleichung

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}$$

- b) Erklären Sie das Auftreten des kapazitiven Widerstandes im Wechselstromkreis!  
 68. In einer elektrischen Leitung liegen ein ohmsches Bauelement (100  $\Omega$ ) und ein Kondensator (0,53  $\mu$ F) in Reihe. An den Eingang der

59. Zeichnen Sie einen Schaltplan zur Aufnahme der  $I$ - $U$ -Diagramme von Bauelementen!  
 60. Die experimentelle Untersuchung ergab folgende Meßwerte:

#### Bauelement I

$U$ in V	0	0,2	0,45	0,75	1,3	2,05	3,15
$I$ in A	0	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30

#### Bauelement II

$U$ in V	0	5	10	15	20	25	30
$I$ in mA	0	3,5	7,5	12	18	24,5	40

Leitung wird eine Wechelspannung gelegt. In welchem Verhältnis stehen die Teilspannungen an den beiden Bauelementen bei der Frequenz 30 Hz und in welchem Verhältnis stehen sie bei der Frequenz 30 kHz?

69. Bestimmen Sie die Induktivität einer Spule und die Kapazität eines Kondensators im Wechselstromkreis durch Messungen!

## Elektrischer Schwingkreis und Hertzische Wellen

### Geschlossener elektrischer Schwingkreis

70. Skizzieren Sie den Schaltplan eines geschlossenen Schwingkreises, und benennen Sie die Bauelemente!

71. Beschreiben und erklären Sie den Ablauf einer elektrischen Schwingung! Gehen Sie dabei auf die Spannung, die Stromstärke und die Energieumwandlung ein. Beginnen Sie beispielsweise bei maximal geladenem Kondensator!

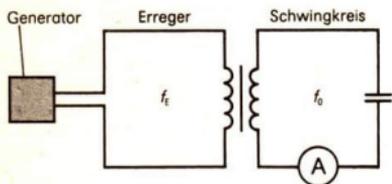
72. a) Interpretieren Sie die Gleichung

$$T = 2\pi \sqrt{L \cdot C}$$

- b) Berechnen Sie die Eigenfrequenz eines Schwingkreises mit  $L = 2,5 \text{ mH}$  und  $C = 1,5 \text{ }\mu\text{F}$

73. Ein elektrischer Schwingkreis ist nach folgendem Schaltplan mit einem Erreger gekoppelt:

Die Erregerfrequenz soll verändert werden, so daß drei Fälle entstehen: 1. Fall  $f_E < f_0$ , 2. Fall  $f_E = f_0$ , 3. Fall  $f_E > f_0$ .



- a) Wie groß ist in jedem der drei Fälle die Frequenz im Schwingkreis?  
 b) Was läßt sich über die Stromstärke im Schwingkreis aussagen?  
 c) Stellen Sie die Stromstärke im Schwingkreis über der Erregerfrequenz grafisch dar! Wie heißt dieses Diagramm? Kennzeichnen Sie den Resonanzfall!
74. Mit der bei 73. gegebenen Experimentieranordnung soll Resonanz hergestellt werden, obwohl  $f_E$  unverändert bleibt. Beschreiben Sie, wie Sie vorgehen könnten!

### Eigenschaften Hertzischer Wellen

75. Warum heißen diese Wellen so? Nennen und erläutern Sie die Eigenschaften Hertzischer Wellen!  
 76. Berechnen Sie die Wellenlänge nach Lehrbuch, Seite 77, Aufgabe 3!  
 77. Vergleichen Sie mechanische Wellen und Hertzische Wellen!  
 78. Erläutern Sie Anwendungen Hertzischer Wellen!

### Senden und Empfangen Hertzischer Wellen

79. Wie kann man sich einen Sendedipol aus einem geschlossenen Schwingkreis entstanden denken? Beschreiben Sie die Feldlinienbilder um einen schwingenden Dipol!

80. Beschreiben Sie das Zustandekommen von elektrischen Schwingungen in einem Empfangsdipol!

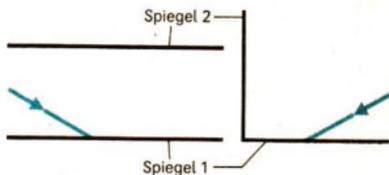
81. Der Abstimmkreis eines Rundfunkempfängers hat die Induktivität  $0,32 \text{ mH}$ , während sich die Kapazität zwischen  $31 \text{ pF}$  und  $260 \text{ pF}$  verändern läßt!

- a) Begründen Sie die Notwendigkeit des Abstimmkreises und erklären Sie seine Wirkungsweise!  
 b) Berechnen Sie die kleinste und die größte Eigenfrequenz des Abstimmkreises!  
 c) Welcher Wellenlängenbereich kann mit diesem Gerät empfangen werden?

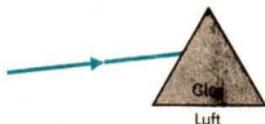
## OPTIK

### Reflexionsgesetz und Brechungsgesetz

1. Zwei ebene Spiegel sind a) parallel und b) senkrecht zueinander angeordnet. Ein Lichtstrahl trifft auf Spiegel 1 (Einfallswinkel  $60^\circ$ ). Der reflektierte Strahl trifft auf den Spiegel 2 und wird erneut reflektiert. Zeichnen und erklären Sie den Strahlenverlauf!



2. Ein Strahl von einfarbigem Licht fällt auf ein gleichseitiges Prisma aus Glas.



- Beschreiben und erklären Sie den weiteren Strahlenverlauf!
- Wie ändert sich die Erscheinung beim Verwenden von weißem Licht?
- a) Nennen Sie das Brechungsgesetz in Form einer Gleichung!
- b) Ein Lichtstrahl trifft unter dem Einfallswinkel von  $60^\circ$  auf die Oberfläche einer ebenen Platte aus Kronglas. Berechnen Sie den Brechungswinkel und zeichnen Sie den weiteren Strahlenverlauf!



#### Totalreflexion

- Erläutern Sie die Bedingungen, unter denen Totalreflexion auftritt!
- Ein Lichtstrahl trifft, aus Flintglas kommend, unter  $40^\circ$  Einfallswinkel auf die Grenzfläche nach Luft. Entscheiden Sie durch Rechnung, ob Brechung oder Totalreflexion eintritt!
- Skizzieren Sie, wie mit einem gleichschenkligen, rechtwinkligen Glasprisma ein Lichtstrahl um  $90^\circ$  oder um  $180^\circ$  abgelenkt werden kann! Begründen Sie Ihre Aussagen!
- Beschreiben Sie den Aufbau und erläutern Sie die Wirkungsweise eines Lichtleitkabels! Nennen Sie Beispiele für Anwendungen solcher Kabel!

#### Sammellinsen

- Erklären Sie die zweimalige Brechung eines Parallelstrahles beim Durchgang durch Sammellinsen!
- Skizzieren Sie den vereinfachten Verlauf dieses Strahles!
- Ein Gegenstand von 2 cm Größe steht 8 cm vor einer Sammellinse mit 3 cm Brennweite. Ermitteln Sie die Bildweite und die Bildgröße durch Konstruktion!

- Wie hängt die Bildweite von der Gegenstandsweite ab? Erläutern Sie die Scharfeinstellung des Bildes bei der Kamera!
- Nennen Sie verschiedene Fälle der Erzeugung von Bildern mit Sammellinsen, und nennen Sie solche optischen Geräte, bei denen diese Bilderzeugung ausgenutzt wird!

#### Wellenoptik

- Ein einfarbiges Lichtbündel durchläuft einen Doppelspalt und trifft auf einen Schirm auf. Was ist auf dem Bildschirm zu beobachten (zu betrachten)? Erklären Sie diese Erscheinung! Welche Modellvorstellung vom Licht versagt bei dieser Erklärung?
- Nennen Sie den Zusammenhang zwischen Wellenlänge des Lichtes und seiner Farbe!
- Die höchste Lichtempfindlichkeit hat das menschliche Auge bei einer Wellenlänge von 555 nm. Berechnen Sie die Frequenz des Lichtes!
- Nennen Sie außer dem sichtbaren Licht noch weitere elektromagnetische Wellen und deren Anwendungen!

#### Kernphysik

- Nennen Sie die Arten der Kernstrahlung, deren Eigenschaften und Wirkungen!
- Beschreiben Sie den Aufbau und erklären Sie die Arbeitsweise des Zählrohres!
- Nennen Sie Beispiele für Anwendungen der Kernstrahlung in Industrie, Landwirtschaft, Medizin und Forschung, und erläutern Sie zwei Beispiele!
- a) Geben Sie eine Definition des Begriffs „Halbwertszeit“ an!  
b) Von 100 g eines radioaktiven Nuklids sind nach 10 Jahren nur noch 25 g vorhanden. Wie groß ist die Halbwertszeit?  
c) Das radioaktive Nuklid Jod hat die Halbwertszeit von 8 Tagen. Auf welchen Bruchteil vermindert sich das Nuklid innerhalb von 24 Tagen?

## 4. Wiederholung und Übung

### Schwingungen

3. A:  $f = 500 \text{ Hz}$   
 B:  $f = 1000 \text{ Hz}$   
 5.  $T = 0,36 \text{ s}$   
 $f_0 = 2,8 \text{ Hz}$

## 8. Wiederholung und Übung

### Wechselstrom

- |    |                             |                             |
|----|-----------------------------|-----------------------------|
| 8. | Spule 1                     | Spule 2                     |
| a) | $X_L = 100 \Omega$          | $X_L = 25 \Omega$           |
| b) | $X_L = 100 \text{ k}\Omega$ | $X_L = 25 \text{ k}\Omega$  |
| c) | $X_L = 100 \text{ M}\Omega$ | $X_L = 25 \text{ M}\Omega$  |
| 9. | Kondensator 1               | Kondensator 2               |
| a) | $X_C = 400 \text{ k}\Omega$ | $X_C = 100 \text{ k}\Omega$ |
| b) | $X_C = 400 \Omega$          | $X_C = 100 \Omega$          |
| c) | $X_C = 0,4 \Omega$          | $X_C = 0,1 \Omega$          |
10. 1    2    3    4    5  
 400 mH 5 mH 4,5 mH 0,8 mH 5 mH  
 11. 1    2    3    4    5  
 4,3  $\mu\text{F}$  2,9  $\mu\text{F}$  1,4 pF 3,2  $\mu\text{F}$  1 pF

### Schwingkreis

4.  $C = 0,1 \mu\text{F}$   
 5.  $L = 0,11 \text{ mH}$

### Hertzische Wellen

3.  $f = 60 \text{ MHz}$   
 4.  $f = 200 \text{ MHz}$   
 5.  $\lambda = 287,6 \text{ m}$   
 8.  $\lambda_1 = 2000 \text{ m}$   
 $\lambda_2 = 2,78 \text{ m}$   
 9.  $C_1 = 477 \text{ pF}$   
 $C_2 = 47,7 \text{ pF}$   
 10.  $f = 3,56 \text{ MHz}$   
 11.  $\frac{s}{2} = 384000 \text{ m}$

## 11. Wiederholung und Übung

### Strahlenoptik

4.  $\beta = 52,7^\circ$

### Wellenoptik

3.  $\lambda = 526 \text{ nm}$

### Fragen und Aufträge

#### S. 11

2.  $F = 2,8 \cdot 10^{-7} \text{ N}$

#### S. 13

1. vgl. Tafelwerk

#### S. 15

2. a) vgl. Tafelwerk  
 b)  $h = 36 \cdot 10^3 \text{ km}$   
 c) vgl. = Tafelwerk  
 d)  $v \approx 1,7 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$   
 e)  $r = 2650 \text{ km}$

#### S. 19

1.  $f = 2,4 \text{ Hz}$   $T = 0,42 \text{ s}$

3. a)  $y_{\text{max}} = 6 \text{ cm}$   
 $T = 2,4 \text{ s}$   
 $f = 0,42 \text{ Hz}$   
 b)  $y_{\text{max}} = 4 \text{ mm}$   
 $T = 0,01 \text{ s}$   
 $f = 100 \text{ Hz}$

#### S. 21

$$T = 25 \mu\text{s}$$

#### S. 25

2.  $T = 0,063 \text{ s}$   
 $f = 16 \text{ Hz}$

4.  $T_1 = 1,4 \text{ s}$   
 $f_1 = 0,7 \text{ Hz}$   
 $T_2 = 2,0 \text{ s}$   
 $f_2 = 0,5 \text{ Hz}$   
 $T_3 = 2,4 \text{ s}$   
 $f_3 = 0,42 \text{ Hz}$

#### S. 35

2.  $y_{\text{max}} = 0,5 \text{ dm}$   
 $\lambda = 1,6 \text{ m}$   
 $T = 5 \text{ ms}$

#### S. 37

1.  $s = 5,2 \text{ km}$   
 3. a)  $v = 1260 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$   
 b)  $v = 410 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$   
 4.  $f = 0,25 \text{ Hz}$   
 $v = 0,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

#### S. 39

1.  $h_1 = 467 \text{ m}$  ( $\theta = 20^\circ\text{C}$ )  
 $h_2 = 441 \text{ m}$  ( $\theta = 4^\circ\text{C}$ )

#### S. 49

2.  $l = 35 \text{ m}$   
 3. a)  $R = 260 \Omega$   
 b)  $R = 20 \Omega$   
 c)  $R = 2300 \Omega$   
 d)  $R = 33 \Omega$   
 e)  $R = 3500 \Omega$

**S. 55**

- a)  $X_L = 63 \Omega$   
b)  $X_L = 1,3 \text{ M}\Omega$
- $I = 0,18 \text{ A}$

**S. 57**

- $R_{\text{vor}} = 51 \Omega$
- a)  $W_{\text{el}} = 90000 \text{ W} \cdot \text{s}$   
b)  $W_{\text{el}} = 3210000 \text{ W} \cdot \text{s}$

**S. 61**

- a)  $X_C = 6,4 \text{ M}\Omega$   
b)  $X_C = 40 \Omega$
- $I = 0,035 \text{ A}$

**S. 71**

- $f_E = 700 \text{ Hz}$

**S. 77**

- $\lambda = 0,0698 \text{ m}$
- $c = 200000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$
- $f = 600 \text{ MHz}$

**S. 83**

- $\lambda/2 = 1,47 \text{ m}$

**S. 93**

- $c = 315000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$

**S. 97**

- a)  $\beta = 18^\circ$   
b)  $\beta = 39^\circ$
- $\alpha = 49^\circ$

**S. 99**

- a)  $\alpha_G = 25^\circ$   
b)  $\alpha_G = 38^\circ$

**S. 109**

- $\lambda_{\text{rot}} = 650 \text{ nm}$   
 $\lambda_{\text{blau}} = 500 \text{ nm}$
- $f_{\text{violett}} \approx 7,3 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$
- $\lambda_{\text{gelb}} = 580 \text{ nm}$

## Register

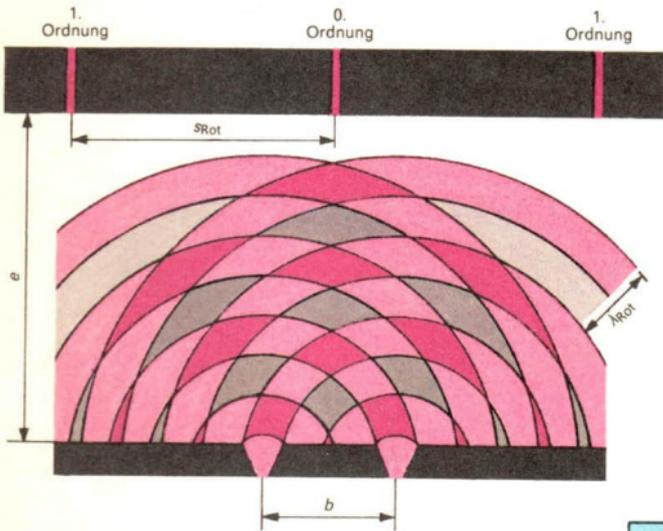
- Ablenbarkeit 130  
Abrüstung, nukleare 143  
Abschwächung 41  
Abstimmkreis 83  
Alter des Gesteins 129  
Amplitude 17, 19, 21, 25, 28  
Atomkern 123  
Augenblicksbild 34  
Ausbreitung 34, 38, 43, 76  
Ausbreitungsgeschwindigkeit 35, 36, 37, 43, 76  
Ausbreitungsrichtung 35, 39  
Auslenkung 17, 21
- Bahngeschwindigkeit 13  
Bauelement, ohmsches 48, 50, 65  
Becquerel 122  
Bestrahlungsverfahren 133  
Beugung 39, 43, 79, 104  
Bild, reell 100  
Bildweite 101  
Blockschaltbild 85, 87  
Brechung 38, 43, 79, 94  
Brechungsgesetz 39, 79, 94
- Copernicus 6  
Curie 122
- Demodulation 85  
Dipol 80, 82  
Doppelspalt 42  
Drosselspule 56  
Durchdringungsfähigkeit 76, 130  
Durchstrahlungsverfahren 134
- Ebbe 15  
Echolot 42  
Eigenfrequenz 28, 31, 69  
Eigenschaften  
– der Laserstrahlung 113  
– elektromagnetischer Wellen 115  
Einstein 141  
Eisenkern 51  
Elektronen 123  
Elementarteilchen 123  
Energie,  
–, elektrische 45, 50  
–, kinetische 26  
–, mechanische 27  
–, potentielle 26  
–, thermische 27, 50, 69  
–transport 34  
–übertragung 34, 131  
–umwandlung 26, 50, 55, 62, 65, 67  
Erde 6, 8, 10, 15  
Erregerfrequenz 28, 31, 71  
Erregung 32
- Fadenpendel 25, 31  
Fallbeschleunigung 14  
Farad 57  
Faraday 57  
Farbe 107  
Farbzerlegung 99  
Federkonstante 23  
Federschwinger 19, 24, 31  
Feld  
–, elektrisches 62, 82  
–, magnetisches 55, 82  
Feldenergie  
–, elektrische 62, 65, 68  
–, magnetische 56, 65, 68  
Fermi 136, 139, 141  
Fizeau 93  
Flut 15  
Fotoapparat 102  
Fraunhofer 110  
Fraunhofersche Linien 110  
Frequenz 18, 29  
–bereiche 83  
–, des Lichtes 108  
– des Wechselstromes 47, 53, 60  
–wandler 47
- Galvani 74  
Gammastrahlung 115  
Gegenstandsweite 101  
Generator 47  
Geschwindigkeit, kosmische 13  
Gesetz, statistisches 129  
Gewichtskraft 8, 15  
Gitter 106  
Glättung 63  
Gleichgewichtslage 17, 21, 36  
Gleichlauf, zeitlicher 50  
Gleichstromkreis 46, 52, 58  
Goethe 90  
Gravitation 6, 8, 14  
Gravitationsgesetz 5, 7, 11, 14  
Gravitationskraft 8, 11, 15  
Gravitationskonstante 9, 11, 14  
Grenzschicht 39  
Grenzwinkel 97
- Hahn 121, 137  
Halbwertszeit 128
- Hertz, 18, 75  
Hertz (Einheit) 18  
Hertzsche Wellen 74  
Himmelsmechanik 7, 15  
Hochfrequenzermwärmung 72  
Hochfrequenzgenerator 48  
Huygens 91
- Induktivität 51, 53  
Informationselektrik 47  
Informationsübertragung 84  
Interferenz 40, 43, 80, 105  
Isotope 125
- Joliot-Curie 136, 139, 143
- Kapazität 56, 58, 60  
Kepler 7  
Keplersche Gesetze 7  
Kern-energie 138  
–fusion 140, 145  
–, instabiler 126  
–kraftwerk 140, 144  
–ladungszahl 124  
–physik 121  
–reaktor 139  
–spaltung 121, 137, 141  
–strahlung 122, 130  
–umwandlung, künstliche 136  
–waffen 141  
Kettenreaktion 138  
Kohäsionskräfte 33  
Kondensator 49, 56, 58, 63, 65  
Kopplung 28, 33  
Kraft, zurücktreibende 21  
Kreisbahn 6  
Kreisbahngeschwindigkeit 13  
Kreisbewegung 7, 12  
Kreiswelle 43  
Kurtschatow 142  
Kurzwelle 73
- Laserstrahlung 113  
Leistung im Wechselstromkreis 64  
Leistungselektrik 47  
Leistungsfaktor 64  
Licht  
–, Beugung des 105  
–, Brechung des 94  
–geschwindigkeit 76, 93  
–, Interferenz des 105  
–leitkabel 86, 99  
–strahl 92, 106  
–, weißes 106  
–, Wellenlänge des 107  
–, Zerlegung des 106  
Linienspektrum 108

- Marconi** 75  
**Markierungsverfahren** 134  
**Masse der Erde** 12  
**Masse, kritische** 139  
**Massenzahl** 124  
**Maximalwert** 47  
**Maxwell** 74  
**Mechanik, irdische** 7, 15  
**Medium**  
 –, optisch dichtes 94  
 –, optisch dünnes 94  
**Meitner** 121, 137  
**Modell** 92, 106  
**Modulation** 84  
**Mond, 6, 8, 10, 15**
- Nachlauf, zeitlicher** 55  
**Nachweisgeräte** 132  
**Nebelkammer** 132  
**Neutron** 123, 136  
**Newton** 5, 8, 90  
**Nuklid** 125  
 –, radioaktives 137
- Oppenheimer** 141  
**Optik** 90
- Parabelbahngeschwindigkeit**  
 14  
**Pendel** 19  
 –, gekoppelte 33  
**Periodendauer** 18, 21, 23, 31, 55, 70  
**Planet** 6  
**Popow** 75  
**Positron** 123  
**Prisma** 99  
**Proton** 123
- Radar** 75, 86  
**Radialkraft** 8, 15  
**Radioaktivität** 122  
**Reflexion** 38, 43, 77, 94  
**Reflexionsgesetz** 38, 78, 94  
**Regenbogen** 100  
**Reibungskräfte** 27  
**Resonanz** 28, 31  
**Resonanzbedingung** 29  
**Richardson** 9  
**Römer** 90
- Röntgenstrahlung** 115  
**Rückkopplung** 71  
**Rundfunkempfänger** 86
- Sammellinse** 100  
**Satelliten**  
 –, Geschwindigkeit von 13  
 –, geostationäre 14  
**Schalldämpfung** 42  
**Schallgeschwindigkeit** 36  
**Schallschwingung** 20  
**Scheinleistung** 64  
**Schwingkreis** 66, 69  
 –, geschlossener 66  
 –, geöffneter 80  
**Schwingung** 16, 25, 30  
 –, elektrische 47, 66  
 –, elektromagnetische 67, 72, 82  
 –, erzwungene 28, 71, 82  
 –, gedämpfte 27, 31, 68  
 –, mechanische 16, 32, 43  
 –, nichtsinusförmige 20  
 –, sinusförmige 19  
 –, ungedämpfte 26, 31, 69  
**Schwingungsdämpfer** 27  
**Selbstinduktion** 52, 55  
**Sonne** 6, 7  
**Spalt** 40  
**Spannung** 46, 51, 55  
**Spektralfarben** 100  
**Spektralanalyse** 109  
**Spektrum**  
 –, elektromagnetisches 114  
 –, kontinuierliches 100, 107  
**Spontanzerfall** 126  
**Spule** 48, 51, 53, 55, 65  
**Stimmgabel** 19  
**Strahlung**  
 –, Alpha- 123, 126  
 –, Beta- 123, 127  
 –, Gamma- 115, 123, 127  
 –, infrarote 110  
 –, kosmische 115  
 –, Röntgen- 115  
 –, ultraviolette 110, 112  
**Stromstärke** 46, 51, 55  
**Strassmann** 121, 137  
**Szillard** 141
- Teller** 141  
**Thomsonsche Schwingungsgleichung** 70  
**Ton** 20  
**Trägheit** 22  
**Trennung von Gleich- und Wechselstrom** 63  
**Transformator** 64
- Übertragung elektrischer Energie** 64  
**Ultraschall** 42  
**Umkehrpunkt** 17, 22
- Verstärkung** 41  
**Vorlauf, zeitlicher** 61
- Watt (Einheit)** 64  
**Wechselstrom** 46  
 –, Erzeugung von 47  
 –, sinusförmiger 46  
 –, Frequenz des 47, 53  
**Wechselstromkreis, Leistung im** 64  
**Welle**  
 –, elektromagnetische 45, 114,  
 –, mechanische 32  
**Wellen**  
 -berge 32  
 -front 38  
 -kraftwerk 34  
 -länge 35  
 -längenbereiche 83  
 -optik 104  
 -täler 34  
**Weltbild**  
 –, geozentrisches 6  
 –, heliozentrisches 6  
**Widerstand**  
 –, elektrischer 49, 52, 58, 65  
 –, induktiver 51, 53  
 –, kapazitiver 58  
 –, ohmscher 49  
**Wirkleistung** 64
- Zählrohr** 132  
**Zerlegung des Lichtes** 106  
**Zungenfrequenzmesser** 29

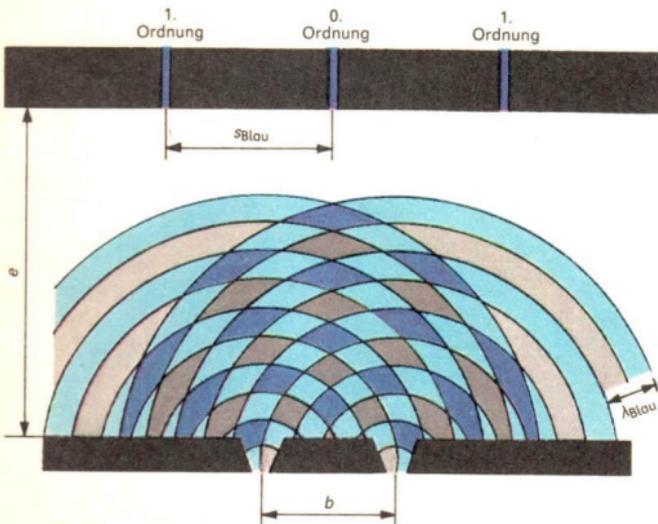
#### Quellenverzeichnis der Abbildungen (Fotos)

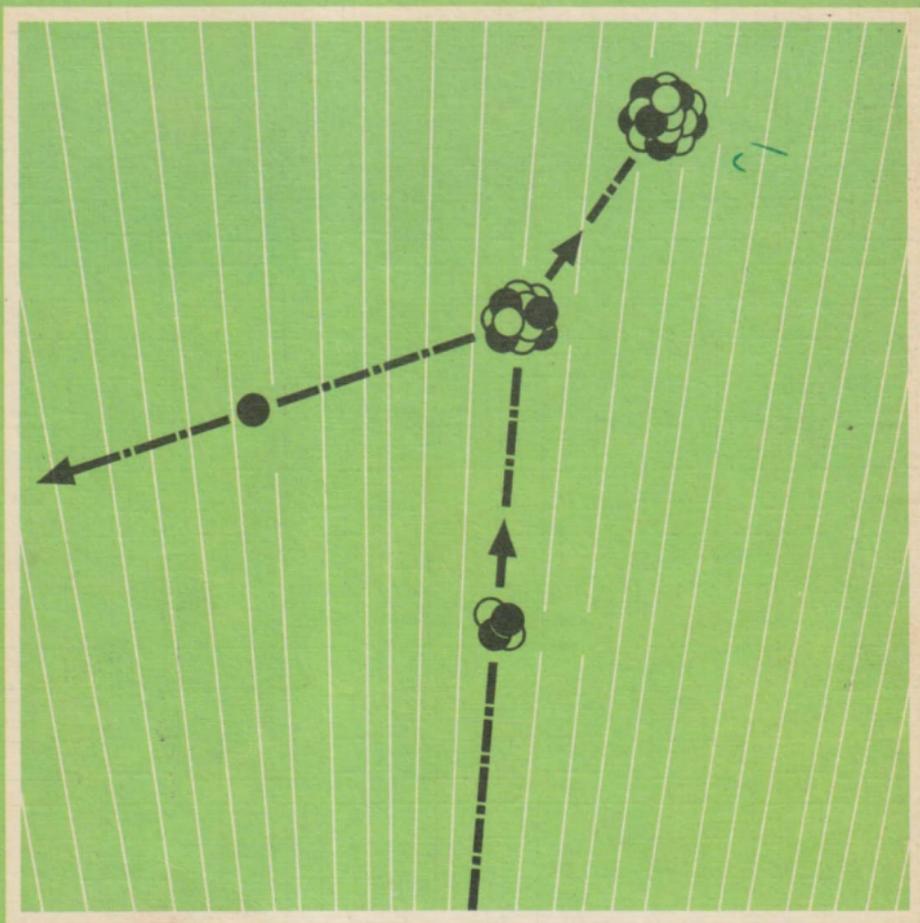
AdW/Fröbus, Berlin: 104/1 · AR/Gebauer, Berlin: 112/1 · Beyer, Halle: 16/1 (ZLB/L 850037) · Charité Berlin/Lewandowski: 134/1 · Janowski, Hennigsdorf: 111/3a, b · Meyer-Archiv, Berlin: 74/3 · MBD/Wehlisch, Berlin: 86/3 · Müller, Potsdam: 132/1 · Stache-Archiv, Berlin: 66/1 · VVW/Archiv: 5/1, 7/1, 27/1, 27/2, 41/5, 46/1, 57/1 b, 90/1, 91/2, 91/3, 101/1, 116/1, 121/1, 121/2, 122/1, 122/2, 134/4, 136/1, 136/2, 137/1, 142/1, 142/2, 143/1, 144/1 · VVW/Seifert: 92/1, 93/1 · Zentralbild, Berlin: 32/1, 34/2, 74/1, 78/2

# Interferenzstreifen (Maxima)



$\lambda_{\text{Rot}} > \lambda_{\text{Blau}}$   $\rightarrow$   
 $s_{\text{Rot}} > s_{\text{Blau}}$   
 $e, b = \text{konstant}$





Kurzwort: 021010 Lehrb.Physik KI10  
Schulpreis DDR: 2,70  
ISBN 3-06-021010-1