technische universität dortmund

Physik A2 und Physik B2
WS 19/20 & SS20

Prof. Dr. Manfred Bayer

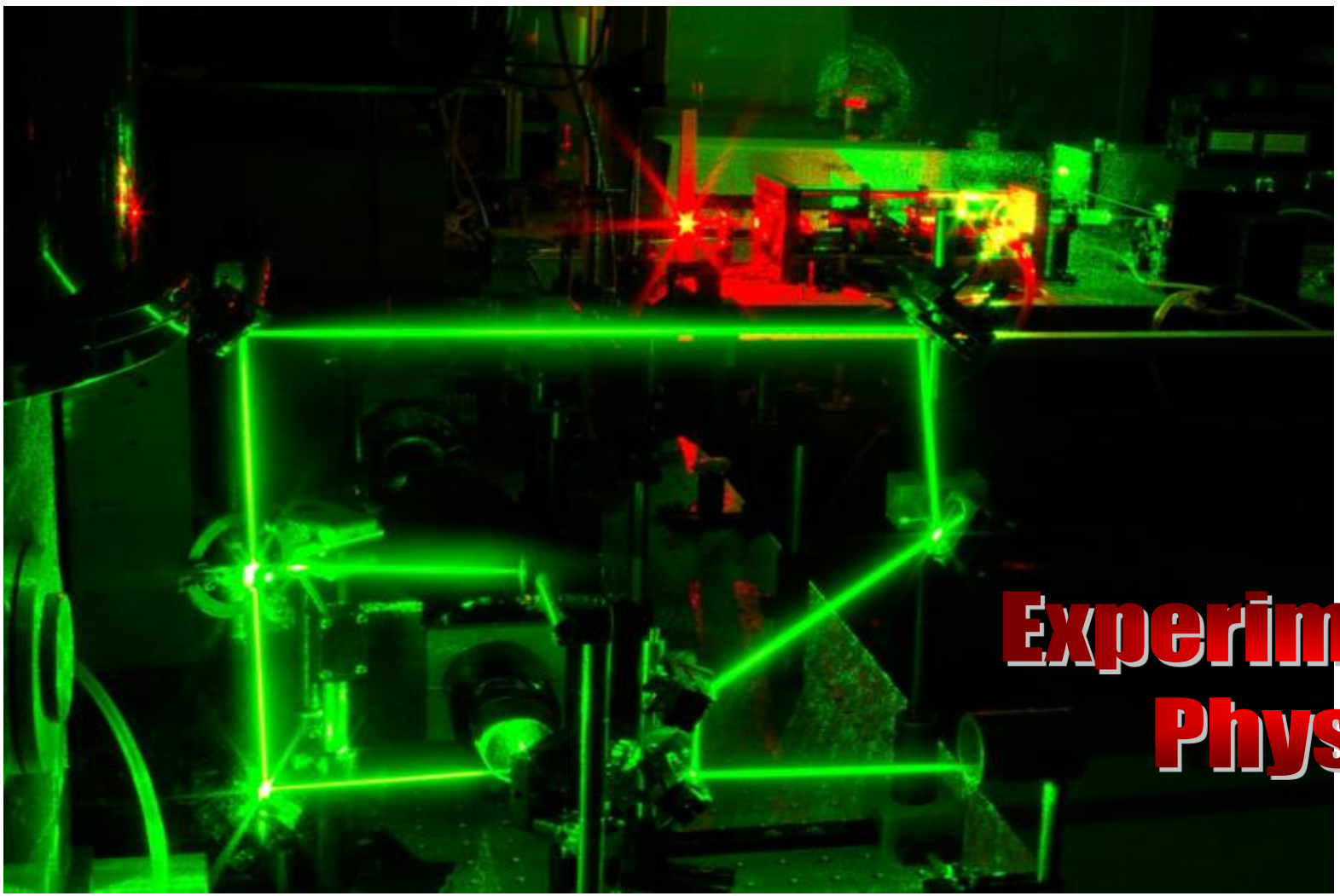
Dozent: Manfred Bayer
Dienstzimmer: CP1-01-180, Tel. 755-3532
e-mail: manfred.bayer@tu-dortmund.de

Übungen: Erik Kirstein
e-mail: erik.kirstein@tu-dortmund.de

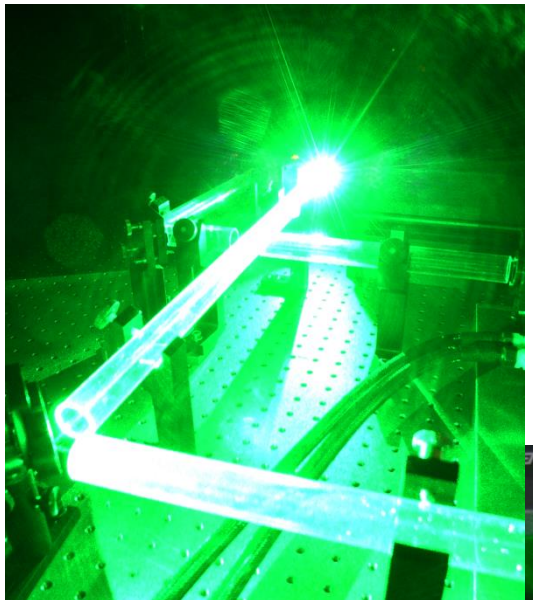
Gelesen wird immer!

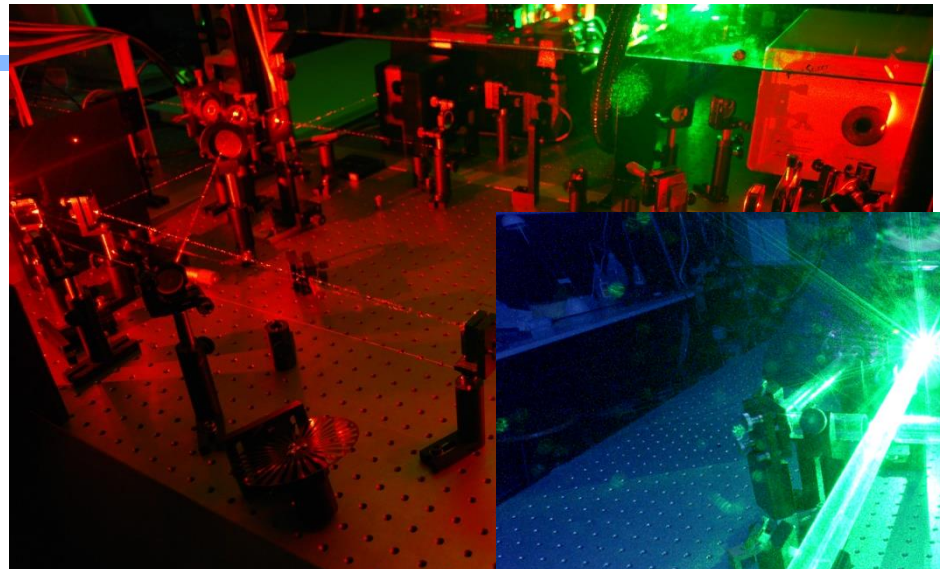
Sprechstunden: Immer!!!

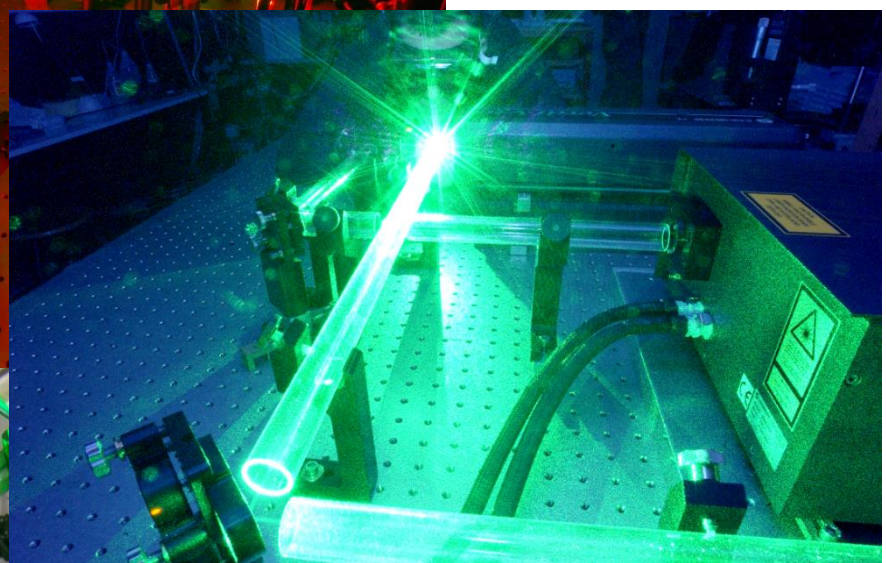
Laserspektroskopie an kondensierter Materie
mit Schwerpunkt auf quantenphysikalischen Fragen

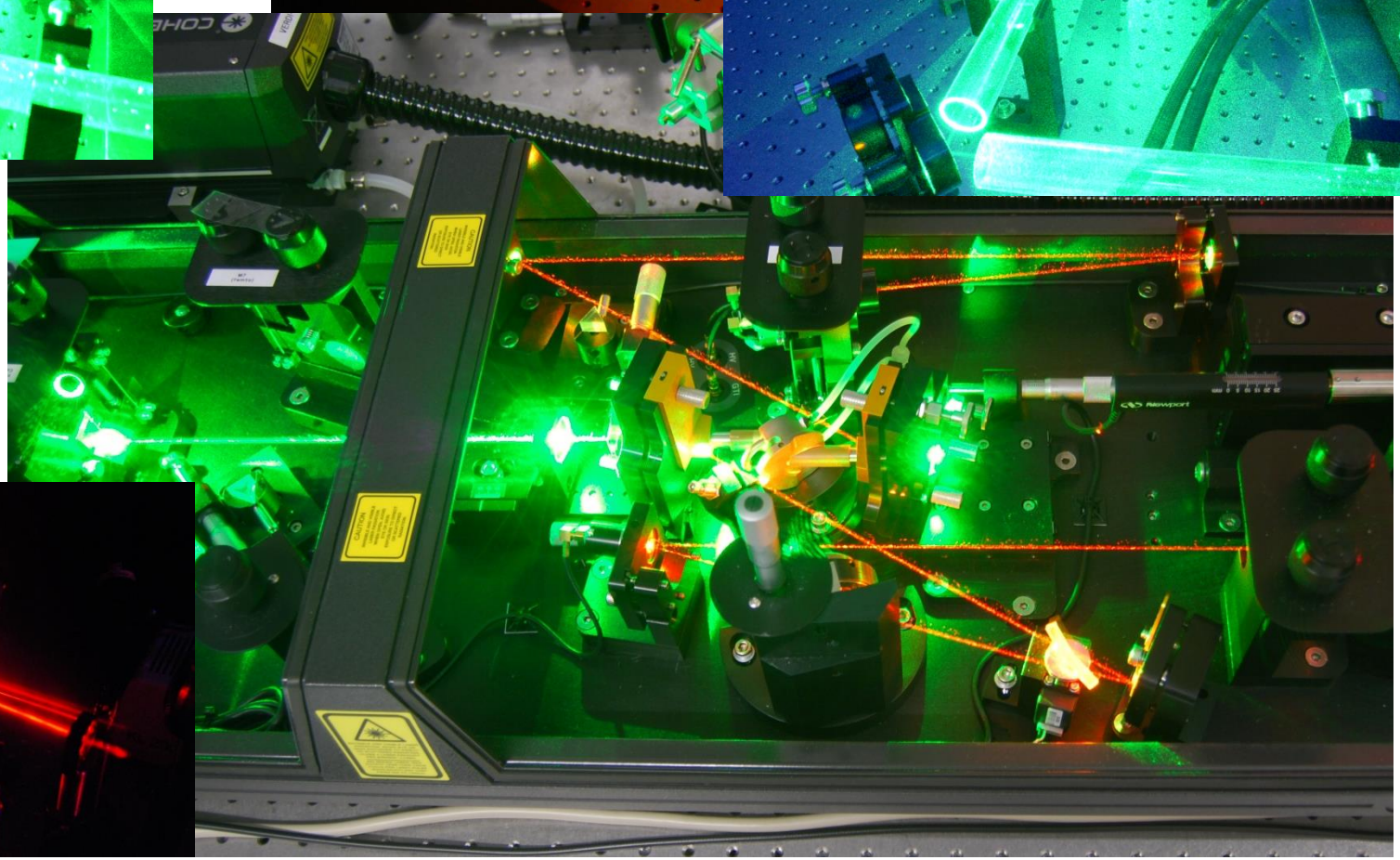


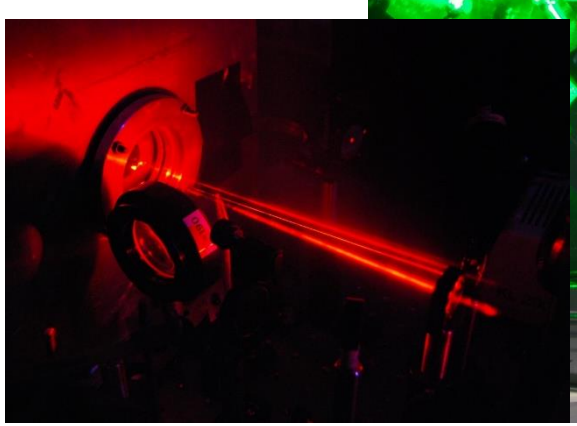
Experimentelle Physik 2











Informationen zur Vorlesung

Vorlesung Physik A2 (WS 2018/20) / **B2** (SS 2020)

für Studierende der	**Chemie + Chemische Biologie**
für Studierende des	**Informatik, Wissenschaftsjournalismus, Mathematik und Statistik**

Ort:	Hörsaalgebäude II, Hörsaal 1
Zeit:	Donnerstag: 8^{15} bis 9^{45} Uhr (2 Stunden)

Freiwilliges Angebot:

Mathematische Ergänzung zu Physik A2/B2

Ort:	Mathematik M E 2
Zeit:	Freitag, 16.15 Uhr (1 Stunde)

Beginn: 18. Oktober 2019

Die in der Vorlesung verwendeten Folien sowie die Übungsblätter (ohne Lösungen) sind im Internet unter folgender Adresse zu finden:

http://www.e2.physik.tu-dortmund.de

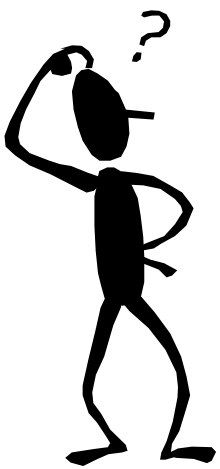
dann: teaching -> ws 2019/20

Die Files liegen im *.pdf-Format vor.

Übungen

Jede Woche ein Übungszettel mit Aufgaben zu aktuellen Themen der Vorlesung PHYSIK A2

Übungsbeginn 14.10.2019



Übungsgruppen:

1-stdg. Übungen in Form von Frontalübungen:

Chemie und Chemische Biologie

Mo, 12:15 – 13.00 Uhr,	C HS 3
Do, 14:15 – 15.00 Uhr,	HGII / HS4
Fr, 11.15 – 12.00 Uhr,	HGII / HS7

Weitere Übungsgruppen:

2-stdg. Übungen:
Wissenschaftsjournalismus, Mathematik, Statistik et al.

Zeit: Mo, 8.15-9.45 Uhr
Ort: SRG 1 1.004

Übungsbetrieb

Die Übungen können schriftlich ausgearbeitet zur Korrektur abgegeben werden!!

Sie können Ihre Übungszettel GEMEINSAM abgeben, d.h. es können sich ungefähr drei Studierende zum Lösen der Aufgaben zusammenfinden. Es hat sich durch langjährige Erfahrung herausgestellt, dass das Besprechen (nicht das sinnlose Abschreiben!) der Aufgaben mit Ihren Kommilitonen sehr stark beim Verständnis der Aufgaben hilft. Also: Bilden Sie kleine Arbeitsgruppen! Selbstverständlich korrigieren wir aber auch Einzelabgaben.

Abgabetermin: Donnerstags, bis 12.00 Uhr!
Abgabeort: Briefkästen vor Eingang zu Hörsaalgebäude II

Der Besuch der Übungen ist freiwillig, aber unbedingt ratsam!

Zudem werden wir eine Liste von Ansprechpartnern veröffentlichen, die neben der Korrektur Ihrer Übungsblätter für fachliche Fragen zur Verfügung stehen:

siehe Vorlesungs-Homepage!

Am Ende jedes Semesters wird eine Klausur geschrieben!

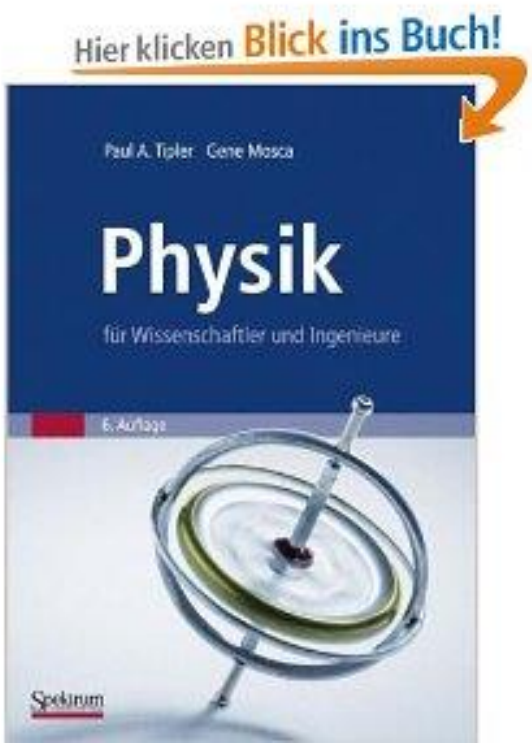
Klausurtermin A2:
24.02.2020

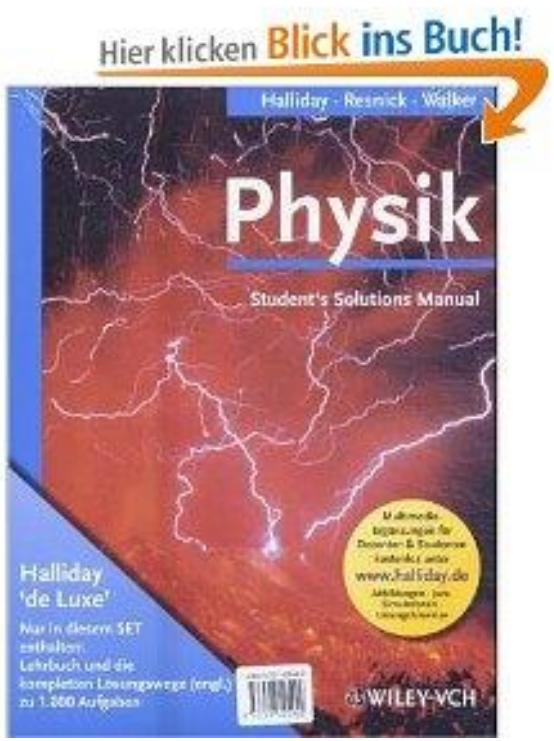
Nachklausurtermin A2:
27.03.2020

Empfohlene Literatur: PHYSIK A2/B2

• Tipler	Physik	Spektrum-Verlag
• Halliday	Physik	Wiley VCH

sowie jedes andere einführende Buch.





Inhalt der Vorlesung A2

1. Einführung

Methode der Physik

Physikalische Größen

Übersicht über die vorgesehenen Themenbereiche

2. Teilchen

A. Einzelteilchen

Beschreibung von Teilchenbewegung

Kinematik: Quantitative Erfassung

Dynamik: Ursachen der Bewegung

Energie, Arbeit + Leistung

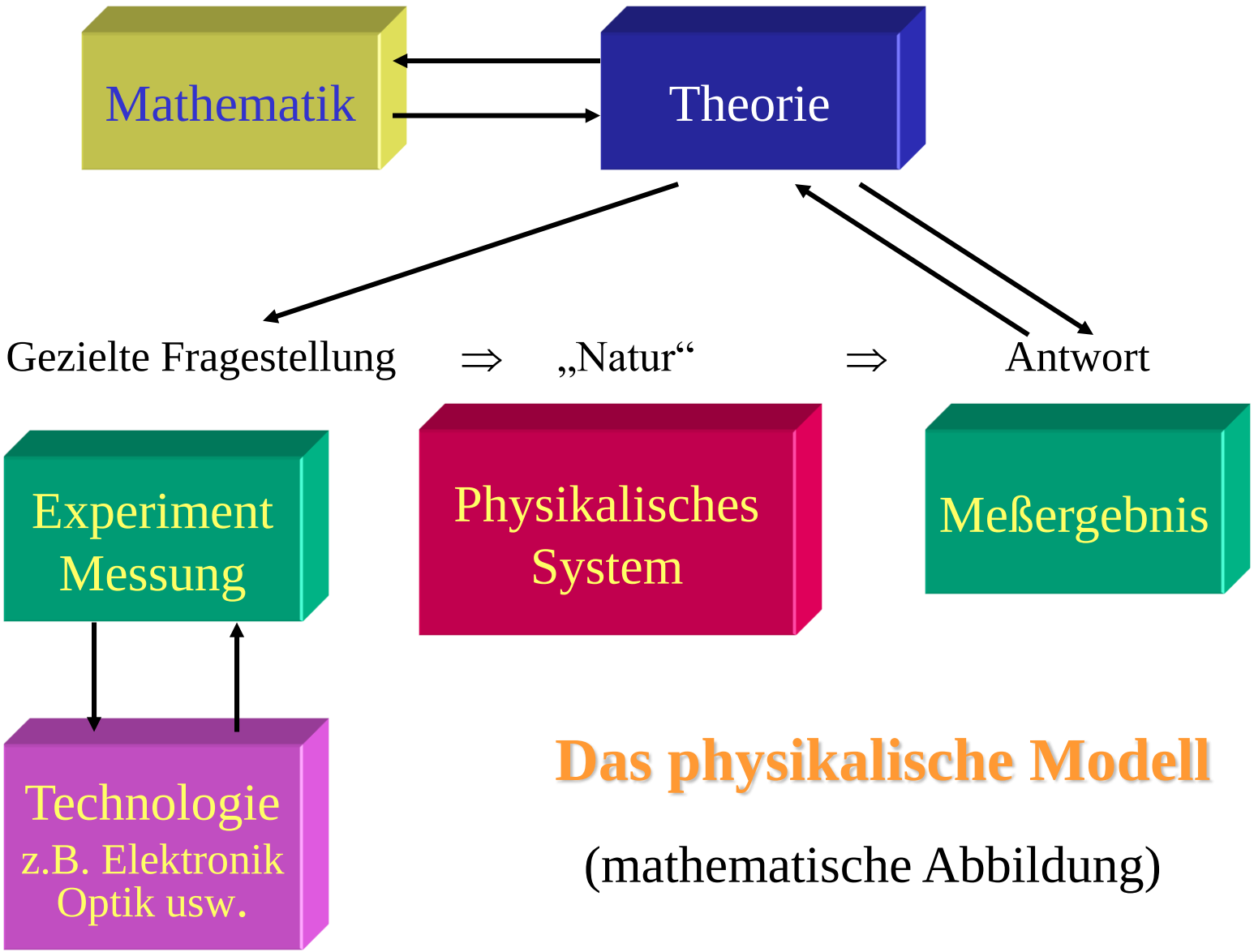
Erhaltungssätze: Impuls+Energieerhaltung

Drehbewegung

Schwingungen, harmonischer Oszillator

B. Teilchensysteme

1.1 Methode der Physik



Das physikalische Modell

(mathematische Abbildung)

Die Mathematik ist unverzichtbares Hilfsmittel
zur quantitativen Behandlung
naturwissenschaftlicher und technischer Probleme.

-> Übungsblatt 1

Beispiel für Meßgenauigkeiten:

Loschmidt'sche Zahl L
"Avogadro-Konstante" N_A
} Anzahl der Atome pro Mol einer Substanz

Loschmidt	(1865)	$L = (0.76 \pm ?) \cdot 10^{23}$
Millikan	(1910)	$L = (6.064 \pm 0.006) \cdot 10^{23}$
Kappler	(1931)	$L = (6.059 \pm 0.061) \cdot 10^{23}$
ICSU	(1973)	$L = (6.022045 \pm 0.000031) \cdot 10^{23}$
PTB	(1981)	$L = (6.0221360 \pm 0.0000069) \cdot 10^{23}$
ICSU	(1985)	$L = (6.0221358 \pm 0.0000041) \cdot 10^{23}$

1.2 Physikalische Größen

Jede physikalische Größe muss durch eine eindeutige und präzise **Messvorschrift** definiert werden.

Physikalische Größe = Maßzahl · Maßeinheit

Beispiel: Elektrischer Strom

$I = 6.78 \cdot \text{Ampere} = 6.78\ \text{A}$

Das gebräuchlichste Maßsystem ist das **SI-System**:

„Standard International Units“

Physikalische Größen hängen oft auf wohldefinierte Weise von anderen Größen ab. Die Verknüpfung wird durch eine **Formel** angegeben.

<u>Beispiel:</u>

$$\text{Beschleunigung} = \frac{\text{Weg}}{\text{Zeit}^2}$$

oder in symbolischer Schreibweise

$$a = \frac{s}{t^2}$$

Es lässt sich ein Satz an Basisgrößen definieren, auf den andere Größen zurückgeführt werden können.

Die von der Wahl des speziellen Maßsystems unabhängige Relation „Weg durch Zeit^2“ bestimmt die Dimension der Beschleunigung, beispielsweise im SI-System zu m/s^2.

Basisgrößen und zugehörige Einheiten:

Länge	Meter, m
Zeit	Sekunde, s
Masse	Kilogramm, kg
Temperatur	Kelvin, K
Stromstärke	Ampère, A
Lichtstärke	Candela, Cd
Stoffmenge	Mol, mol

Einheiten für zusammengesetzte Größen:

Kraft = Masse ·Beschleunigung [kg m/s^2]

= Newton [N]

Dichte = Masse / Volumen [kg/m^3]

Tabelle 1.1 Wichtige physikalische Größen und ihre SI-Einheiten

Größe	Name der SI-Einheit (Basiseinheit bzw. abgeleitete Einheit)	Symbol, Zusammenhang mit Basiseinheiten
Länge	Meter	m
Zeit	Sekunde	s
Masse	Kilogramm	kg
Fläche	Quadratmeter	m^2
Volumen	Kubikmeter	m^3
Frequenz	Hertz	$Hz = s^{-1}$
Geschwindigkeit	Meter/Sekunde	$m\ s^{-1}$
Beschleunigung	Meter/Quadratsekunde	$m\ s^{-2}$
Kraft	Newton	$N = kg\ m\ s^{-2}$
Druck	Pascal	$Pa = N\ m^{-2} = kg\ m^{-1}\ s^{-2}$
Arbeit, Energie, Wärmemenge	Joule	$J = Nm = kg\ m^2\ s^{-2}$
Leistung	Watt	$W = J\ s^{-1} = kg\ m^2\ s^{-3}$
Dichte	Kilogramm/Kubikmeter	$kg\ m^{-3}$
Temperatur	Kelvin	K
Stromstärke	Ampere	A
Ladung	Coulomb	$C = A\ s$
Stromdichte	Ampere/Quadratmeter	$A\ m^{-2}$
Spannung	Volt	$V = J\ C^{-1} = kg\ m^2\ s^{-3}\ A^{-1}$
Widerstand	Ohm	$\Omega = V\ A^{-1} = kg\ m^2\ s^{-3}\ A^{-2}$
Kapazität	Farad	$F = C\ V^{-1} = kg^{-1}\ m^{-2}\ s^4\ A^2$
elektrische Feldstärke	Volt/Meter	$V\ m^{-1} = kg\ m\ s^{-3}\ A^{-1}$
magnetische Feldstärke	Ampere/Meter	$A\ m^{-1}$
magnetische Induktion	Tesla	$T = V\ s\ m^{-2} = kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
Induktivität	Henry	$H = V\ s\ A^{-1} = kg\ m^2\ s^{-2}\ A^{-2}$
Lichtstärke	Candela	cd
Energiedosis	Gray	$Gy = J\ kg^{-1} = m^2\ s^{-2}$
Aktivität	Becquerel	$Bq = s^{-1}$
Stoffmenge	Mol	mol

Definition der wichtigsten Basiseinheiten

Meter

1 m ist die Strecke, die das Licht im Vakuum zurücklegt in 1/299792458 Sekunde (im Prinzip exakt!)

Kilogramm

1 kg ist die Masse des internationalen Kilogrammtyps (Fehler: $\Delta m/m \approx 10^{-9}$)

neue SI-Definition!

Sekunde

1 s ist das 9192631770 fache der Periodendauer beim Übergang zwischen den Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustandes von ^{133}Cs (Fehler: $\Delta t/t \approx 10^{-14}$)

Ampère

1 A ist die Stärke eines konstanten Stromes, der durch zwei gerade, parallele und unendlich lange Leiter im Abstand von 1 m fließt und dabei pro Meter Leiterlänge die Kraft $F = 2 \cdot 10^{-7}$ N erzeugt (Fehler: $\Delta I/I \approx 10^{-6}$)

neue SI-Definition!

SI-Einheiten

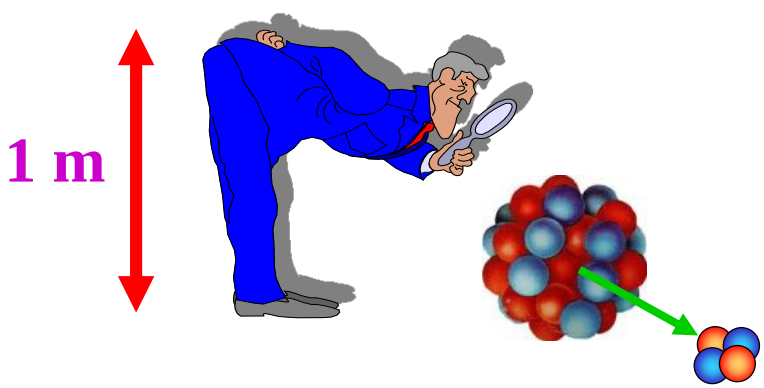
Da die Werte physikalischer Größen einen extrem großen Wertebereich überstreichen, führt man Bezeichnungen für bestimmte Zehnerpotenzen ein.

Begriff: Unterschied um eine Größenordnung
= "Faktor 10 Unterschied"

femto, f	10^{-15}
pico, p	10^{-12}
nano, n	10^{-9}
micro, µ	10^{-6}
milli, m	10^{-3}
centi, c	10^{-2}
deci, d	10^{-1}
deca, da	10
hecto, h	10^{2}
kilo, k	10^{3}
mega, M	10^{6}
giga, G	10^{9}
tera, T	10^{12}
peta, P	10^{15}

$l \approx 10^{26}$ m

$t \approx 6 \cdot 10^{17}$ s



$l \approx 1$m

$t \approx 1$s

$l \approx 10^{-18}$ m

$t \approx 10^{-24}$ s

Tabelle 1.3 Größenordnungen verschiedener Strecken

Strecke	m
Protonenradius	10^{-15}
Atomradius	10^{-10}
Radius eines Virus	10^{-7}
Radius einer Riesenamöbe	10^{-4}
Radius einer Walnuß	10^{-2}
Körpergröße eines Menschen	10^{0}
Höhe der größten Berge der Erde	10^{4}
Erdradius	10^{7}
Sonnenradius	10^{9}
Abstand zwischen Erde und Sonne	10^{11}
Radius des Sonnensystems	10^{13}
Abstand zum nächsten Fixstern	10^{16}
Radius der Milchstraße	10^{21}
Radius des sichtbaren Universums	10^{26}

Tabelle 1.4 Größenordnungen verschiedener Massen

Masse	kg
Elektron	10^{-30}
Proton	10^{-27}
Aminosäure	10^{-25}
Hämoglobin	10^{-22}
Grippevirus	10^{-19}
Riesenamöbe	10^{-8}
Regentropfen	10^{-6}
Ameise	10^{-3}
Mensch	10^{2}
Saturn-5-Rakete	10^{6}
Pyramide	10^{10}
Erde	10^{24}
Sonne	10^{30}
Milchstraße	10^{41}
Universum	10^{52}

Genauigkeit von Messungen und Messfehler

Alle Messungen sind mit Fehlern behaftet!

1. Systematische Fehler:

Fehler der Meßinstrumente, nicht optimale Auslegung des Experiments in Bezug auf die Fragestellung.

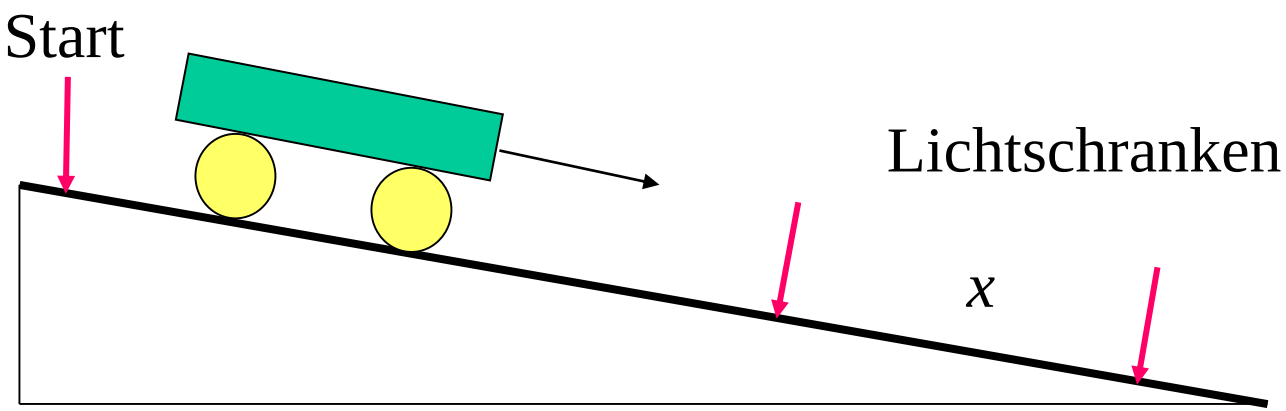
- keine Methode der Behandlung
- werden oft nicht erkannt
- sind schwer abzuschätzen
- können durch Verbesserung des Experiments vermieden werden

2. Statistische Fehler:

Schwankungen der Meßwerte bei Meßreihen, sind unvermeidbar

Angabe eines Wertes: $x \pm \Delta x_{\text{sys}} \pm \Delta x_{\text{stat}}$

Beispiel für statistische Fehler:



Der Wagen rollt 5 mal vom Startpunkt die schiefe Ebene herunter. Mit Hilfe von Lichtschranken wird jedes mal die Durchlaufzeit für die Strecke *x* gemessen.

Meßergebnisse:

Nr.	Zeit *t* [s]
1	1,34
2	1,29
3	1,31
4	1,33
5	1,28

Was ist der richtige Wert ?

Das weiß man nicht! Es kann nur der „Mittelwert“ $\langle t \rangle$ angegeben werden, der mit einem gewissen Fehler σ den „wahrscheinlichsten“ Wert angibt.

n Messungen: $t_1, t_2, t_3, \cdots, t_n$

Wahrscheinlichster Wert: $$\langle t \rangle = \frac{1}{n}(t_1 + t_2 + \cdots + t_n) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} t_i$$

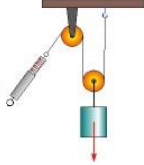
Für das Beispiel ergibt sich:

$$\sum_{i=1}^{5} t_i = 1{,}34s + 1{,}29s + 1{,}31s + 1{,}33s + 1{,}28s = 6{,}55s \quad \Rightarrow \quad \langle t \rangle = \frac{6{,}55s}{5} = 1{,}31s$$

Maß für den Meßfehler: <u>1. Versuch</u>

$$\Delta t = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \Delta t_i = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(t_i - \langle t \rangle\right) = \underbrace{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} t_i}_{\langle t \rangle} - \underbrace{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\langle t \rangle}_{\langle t \rangle} = 0$$

Nicht geeignet!



2. Versuch:

$$\Delta t^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(\Delta t_i)^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(t_i - \langle t\rangle\right)^2$$

$$\sum_{i=1}^{5}\left(t_i - \langle t\rangle\right)^2 = (0{,}03s)^2 + (-0{,}02s)^2 + 0^2 + (0{,}02s)^2 + (-0{,}03s)^2 = 0.0026s^2$$

Daraus folgt der „mittlere quadratische Fehler“ (die Streuung der Werte)

$$\Delta t = \tfrac{1}{2}\sqrt{0{,}0026s^2} = 0{,}0255s \approx 0{,}026s$$

Ein Meßwert wird angegeben in der Form:

Messwert = Mittelwert ± Standardabweichung

$$t = \langle t\rangle \pm \sigma$$

mit

$$\sigma^2 = \frac{1}{n(n-1)}\sum_{i=1}^{n}\left(t_i - \langle t\rangle\right)^2$$

Beispiel: $t = (1{,}31 \pm 0{,}01)\,\mathrm{s}$

Der „relative Fehler“ ist $\frac{\Delta t}{t} = \frac{\sigma}{\langle t\rangle}$

Beispiel: $\frac{\Delta t}{t} = 0{,}02 = 2\cdot 10^{-2}$

1.3 Übersicht über die Themengebiete der Vorlesung A2 und B2

- Mechanik
- (Thermodynamik)
- Elektrodynamik
- Optik
- (Atomphysik und Quantenmechanik)

Die (klassische) Mechanik

Newton‘sche Axiome/Gleichungen

1) In einem Inertialsystem bewegt sich ein Körper geradlinig gleichförmig, wenn auf ihn keine Kraft einwirkt.
2) Die Änderung des Impulses eines Körpers ist durch die Kraft, die auf ihn wirkt, gegeben.

$$\vec{F} = \frac{d}{dt}\vec{p}$$

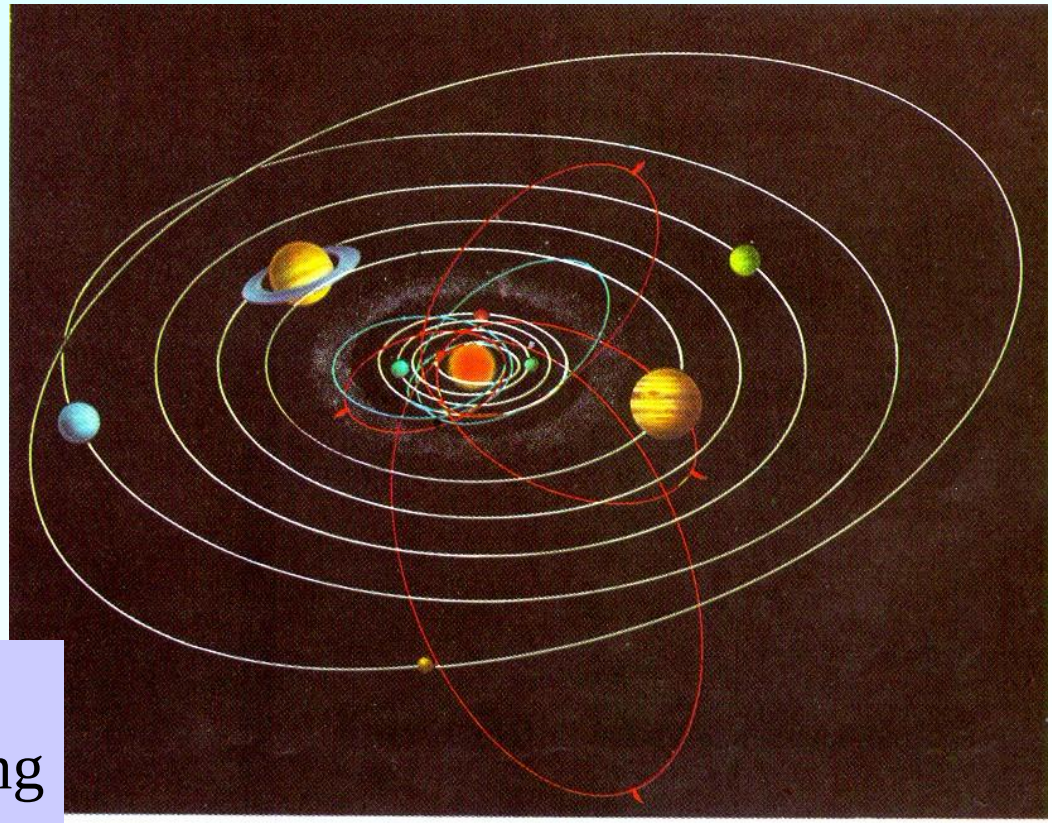
3) Kräfte treten immer paarweise auf: Wirkt Körper A auf Körper B mit einer bestimmten Kraft, so wirkt Körper B auf Körper A zurück mit einer Karft vom gleichen Betrag, aber entgegengesetzter Richtung.

Die (klassische) Mechanik

Sie ist die Grundlage aller physikalischen und technischen Phänomene!

Kinematik: Beschreibung der Bewegung

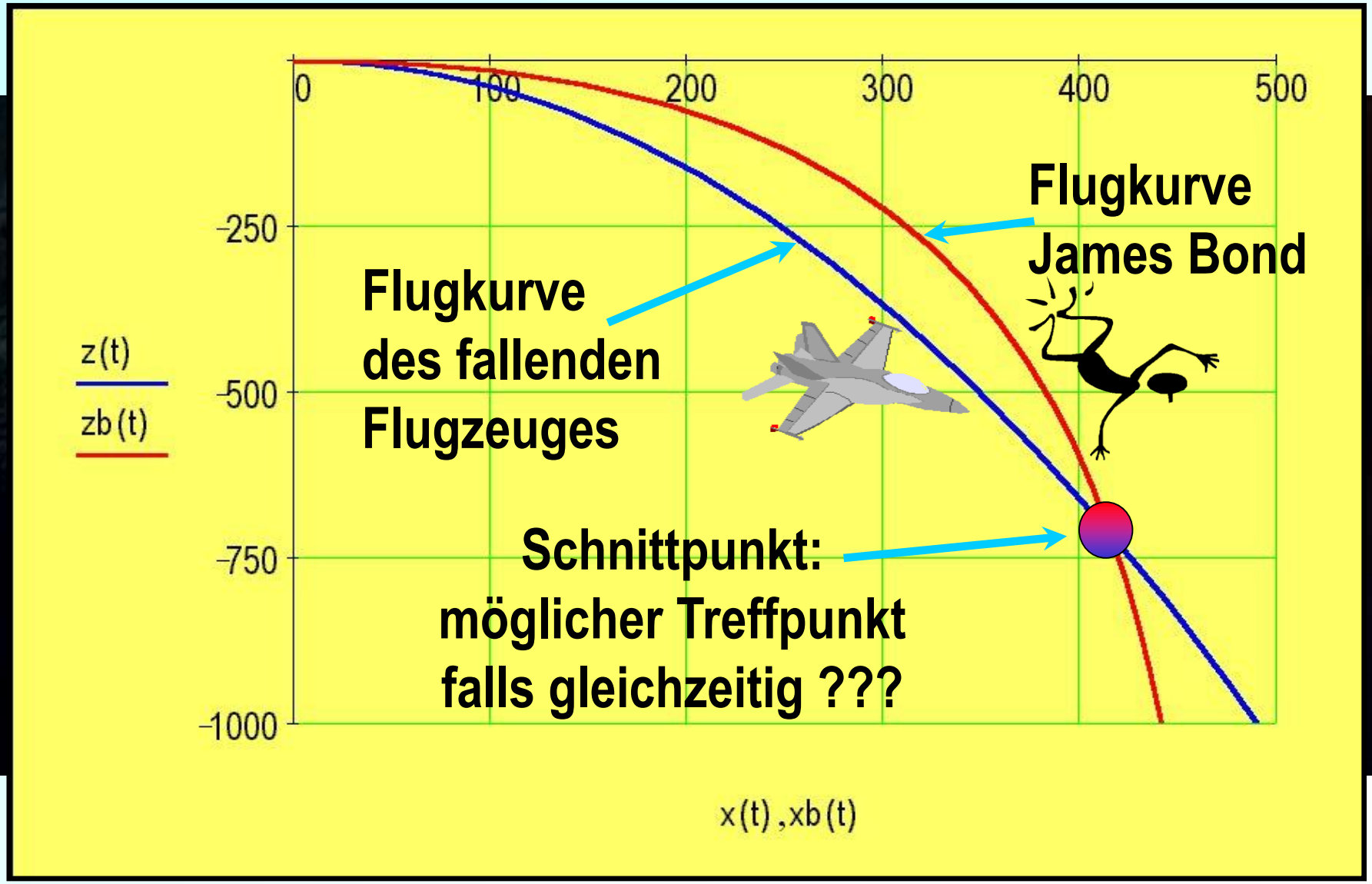
Dynamik: Beschreibung ihrer Ursachen



Die Gravitationskraft zwischen den Massen bestimmt auch die Bewegung der Planeten und Gestirne

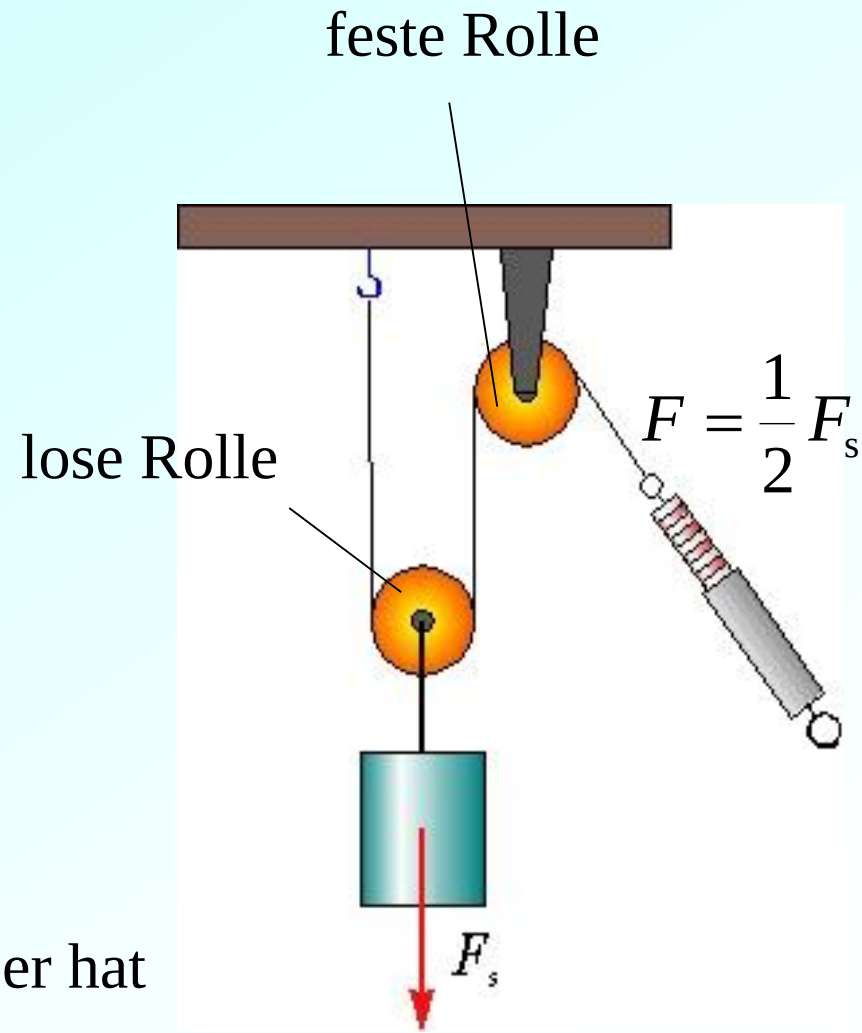
Die klassiche Mechanik ....

...behandelt die "Alltagsprobleme", zum Beispiel .....



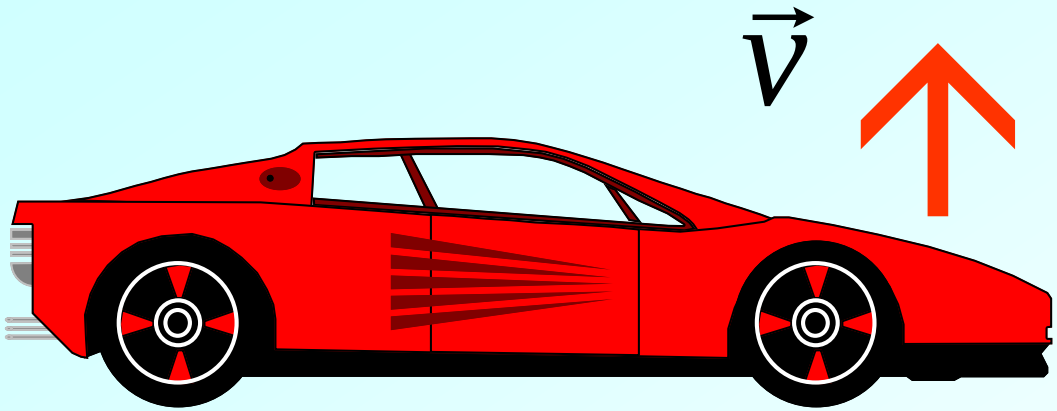
Wichtige Begriffe:

Bewegung wird durch das Ausüben einer Kraft hervorgerufen!

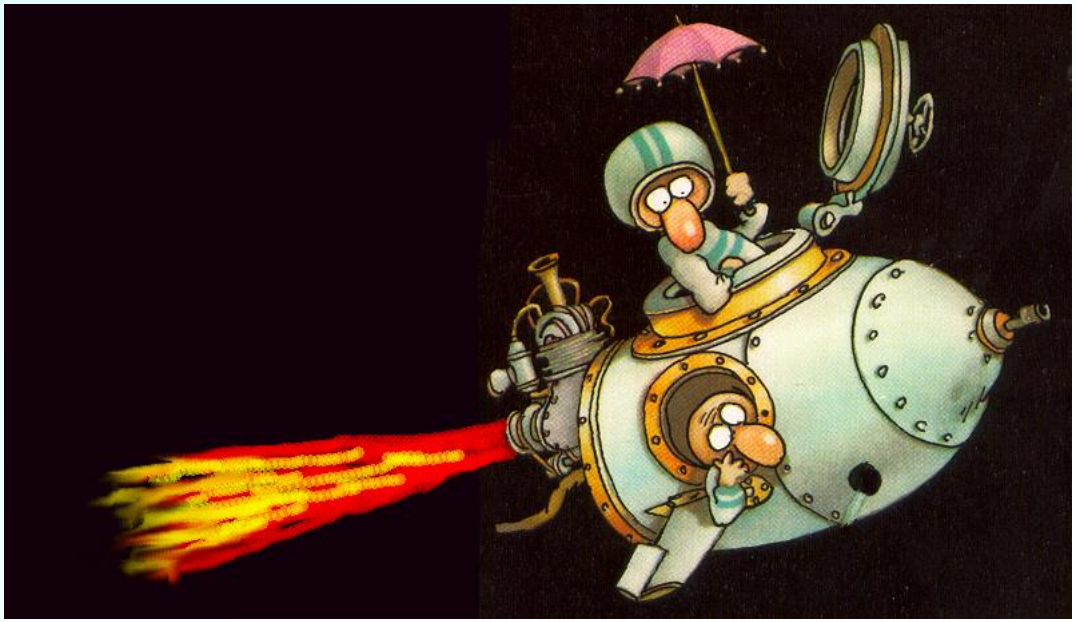


Um einen Körper anzuheben, muß man **Arbeit** leisten (z.B. mit Hilfe eines Flaschenzuges). Abhängig von der Zeit, wird us. **Leistung** erbracht.

Der angehobene Körper hat danach eine erhöhte **potentielle Energie**



Um z.B. ein Fahrzeug oder eine Rakete in Bewegung zu setzten, muß Energie aufgewendet werden. (Antriebsmotor)



Das Fahrzeug hat dann
kinetische Energie

Energieformen können ineinander umgewandelt werden.

Vielfach liegt Energie zunächst in mechanischer Form vor.
(Wärme, Wasser, Wind)

von grundlegender Bedeutung in Technik

mechanische Energie

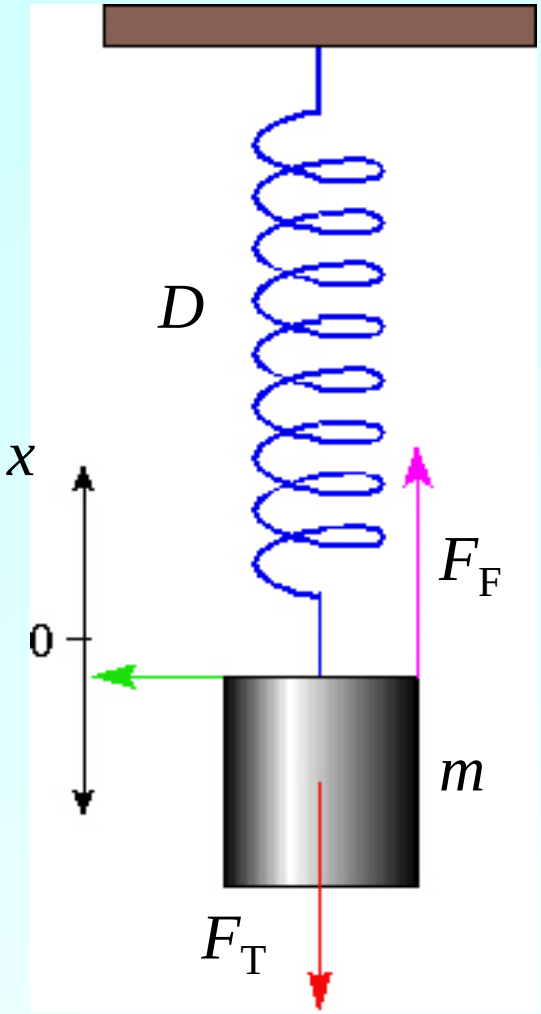
elektrische Energie

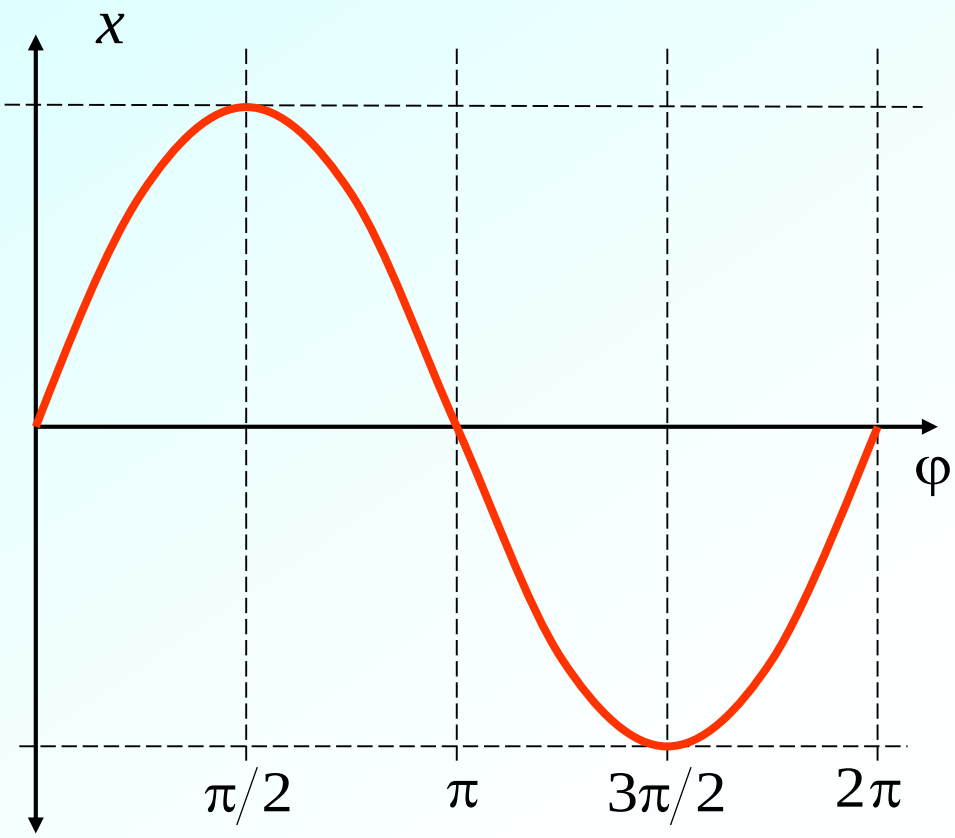
Generator

Umkehrung durch den Elektromotor

Schwingungen spielen in der Naturwissenschaft und Technik eine fundamentale Rolle

$\Rightarrow$ harmonischer Oszillator

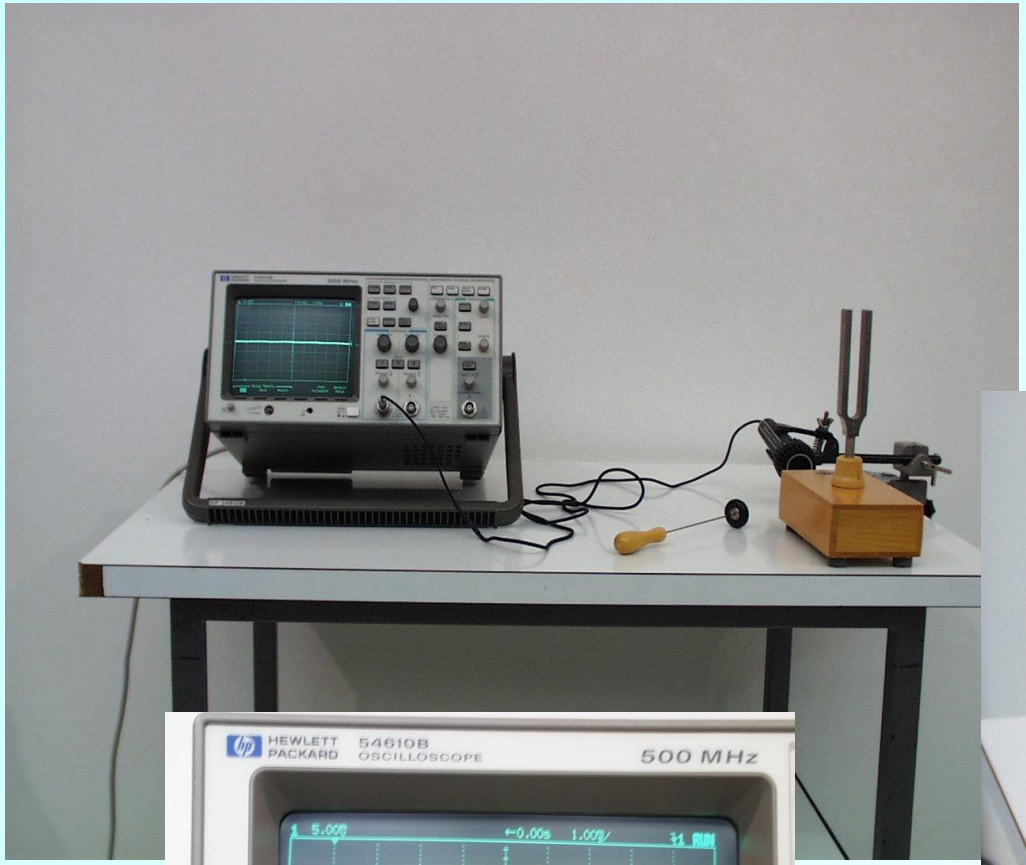


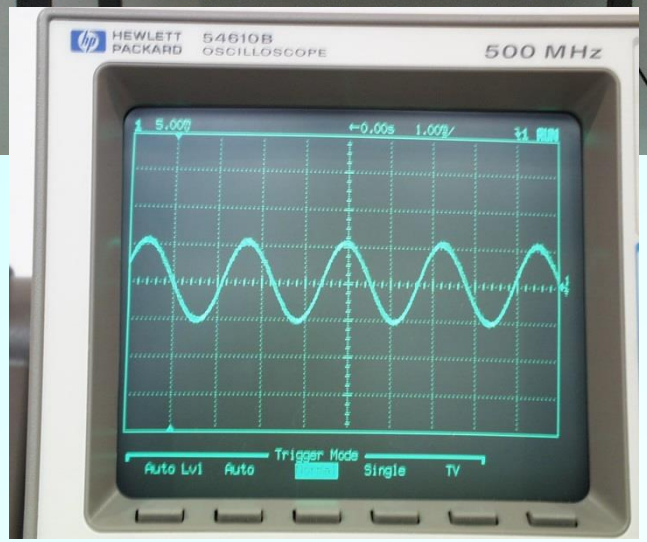


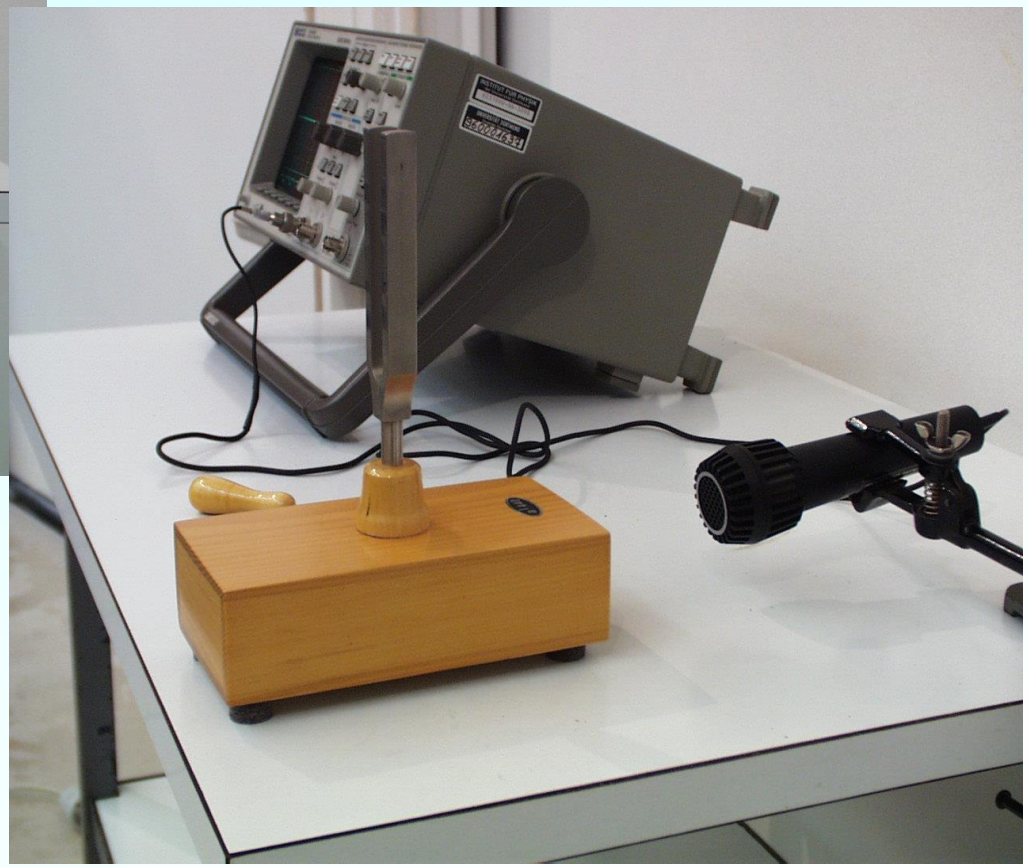
<u>Beispiel:</u>

Federpendel

Versuch: Schwingung einer Stimmgabel

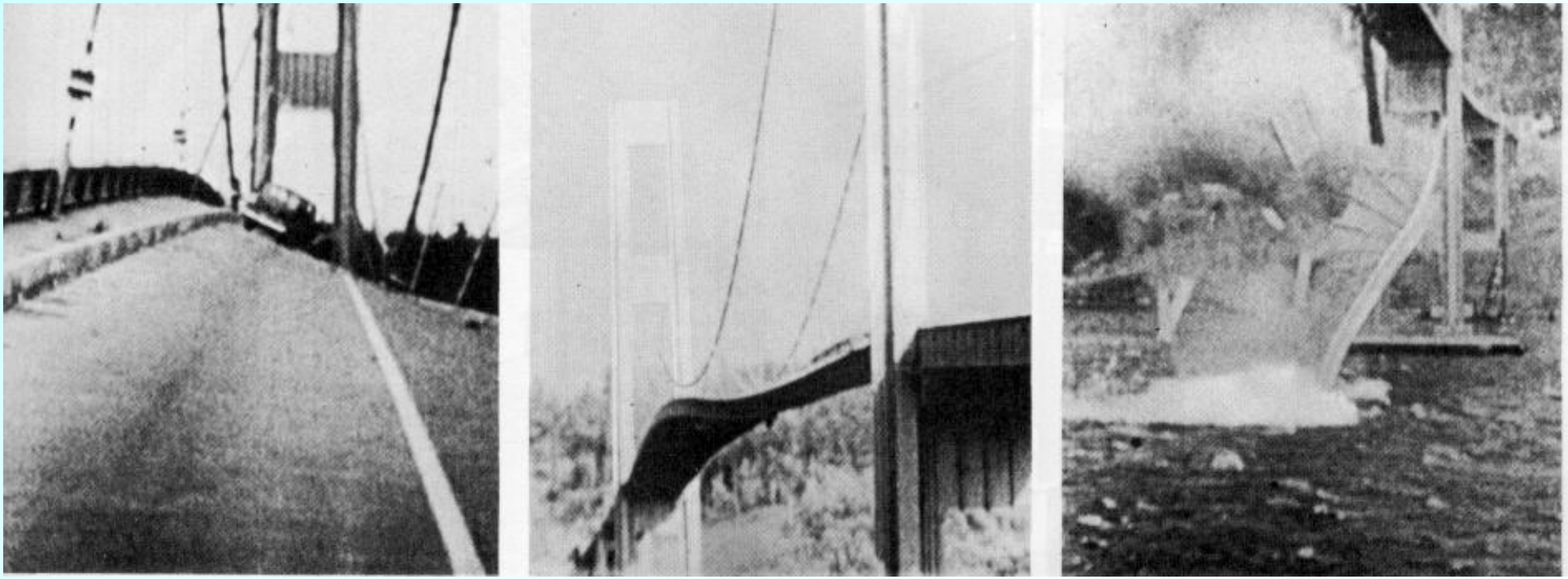






Die Resonanz

Durch Wind wurde die Brücke zu resonanten Schwingungen mit extrem großen Amplituden angeregt bis zur Zerstörung



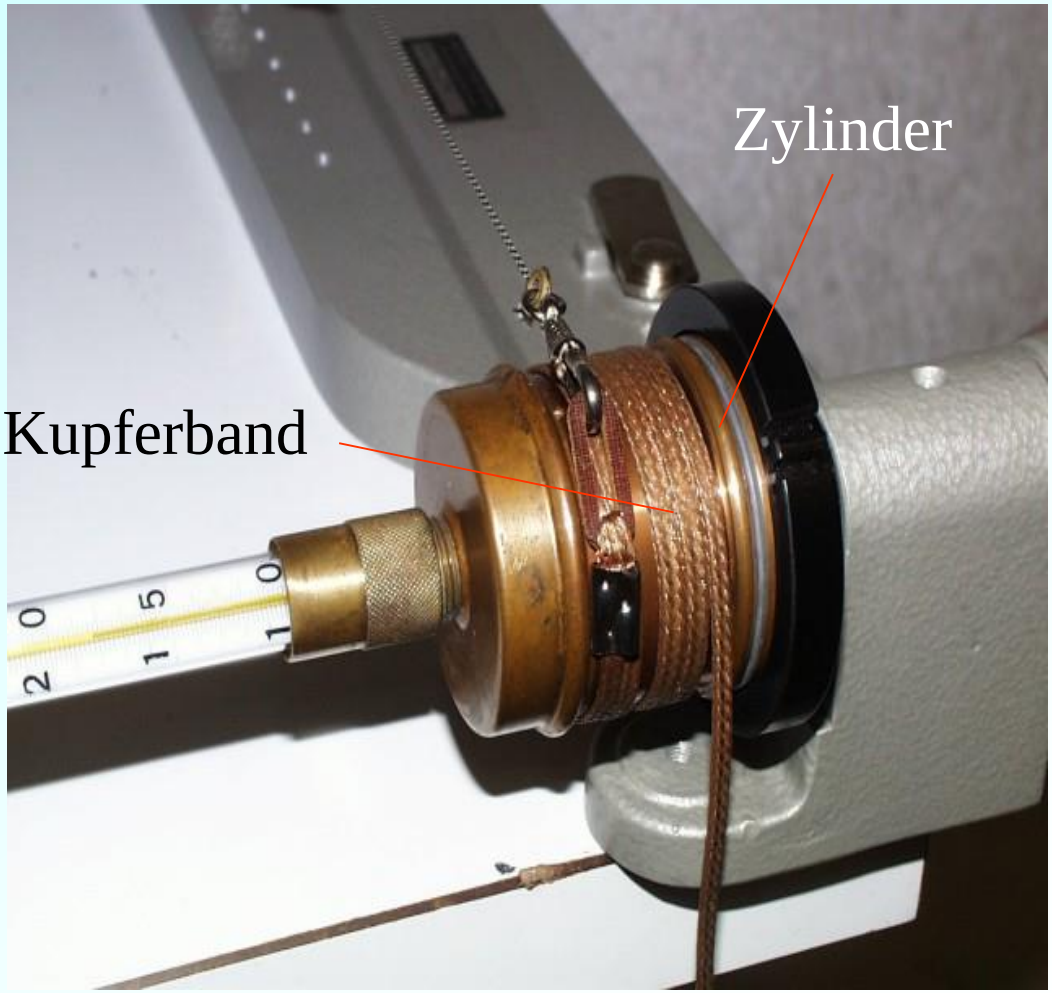
Einsturz der Tacoma Bridge („Galloping Gertie“) am 7. November 1940

Die Thermodynamik

Werden zwei Körper mit einer gewissen Kraft gegeneinander gerieben, werden sie warm.

Mechanische Energie wird in Wärme umgewandelt.

Beispiel: Bremsen



Die Thermodynamik

Hauptsätze der Thermodynamik

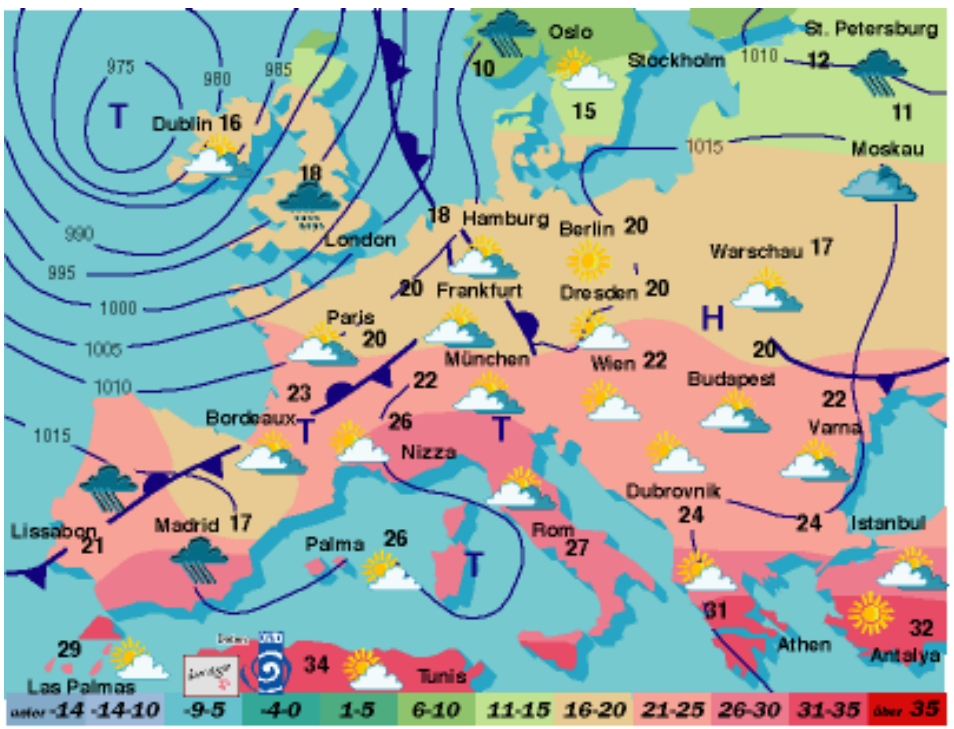
1. Hauptsatz: $$dU = \delta Q + \delta A$$

2. Hauptsatz:
   Es ist unmöglich, eine zyklisch Maschine zu konstruieren, die keinen anderen Effekt bewirkt, als Wärme aus einem Reservoir zu entnehmen und eine äquivalente Menge an Arbeit zu verrichten.

   Maximaler Wirkungsgrad einer Maschine: $$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

3. Hauptsatz
   Satz von der Unerreichbarkeit des absoluten Temperaturnullpunkts

Charakterisierung eines Systems:
Temperatur

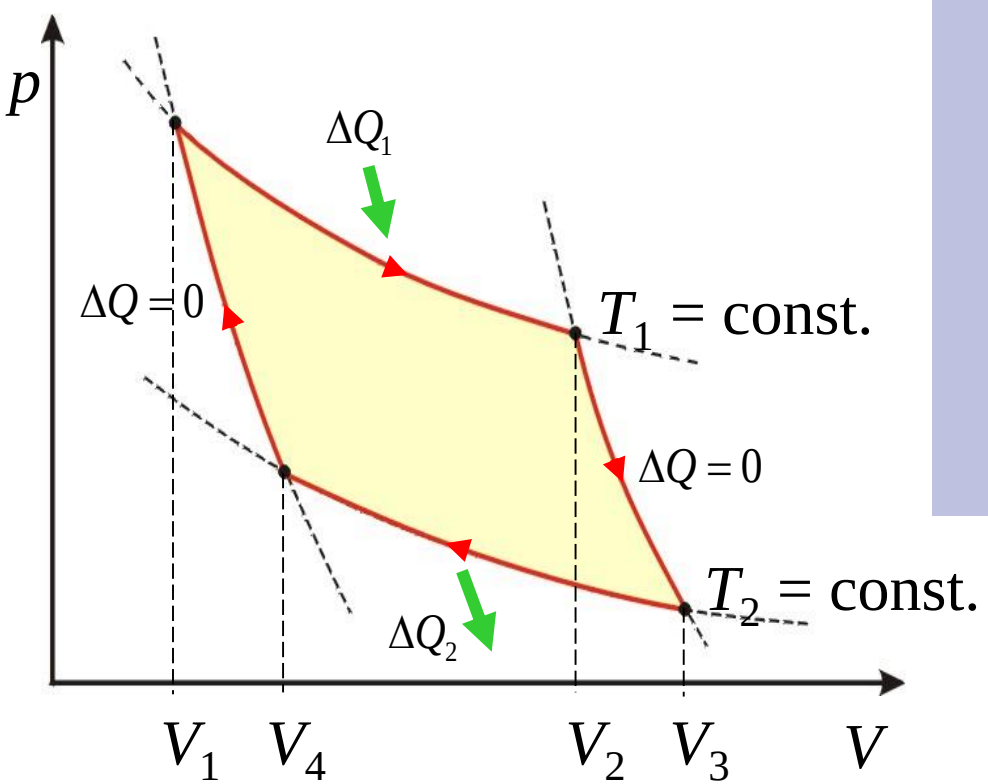


Thermodynamik: Phänomenologische Thermodynamik
Statistische Mechanik

Phänomenologische Thermodynamik

Periodische, thermodynamische Prozesse wie z.B. der Carnot-Prozeß haben eine große technische Bedeutung

$\Rightarrow$ Wärmekraftmaschinen

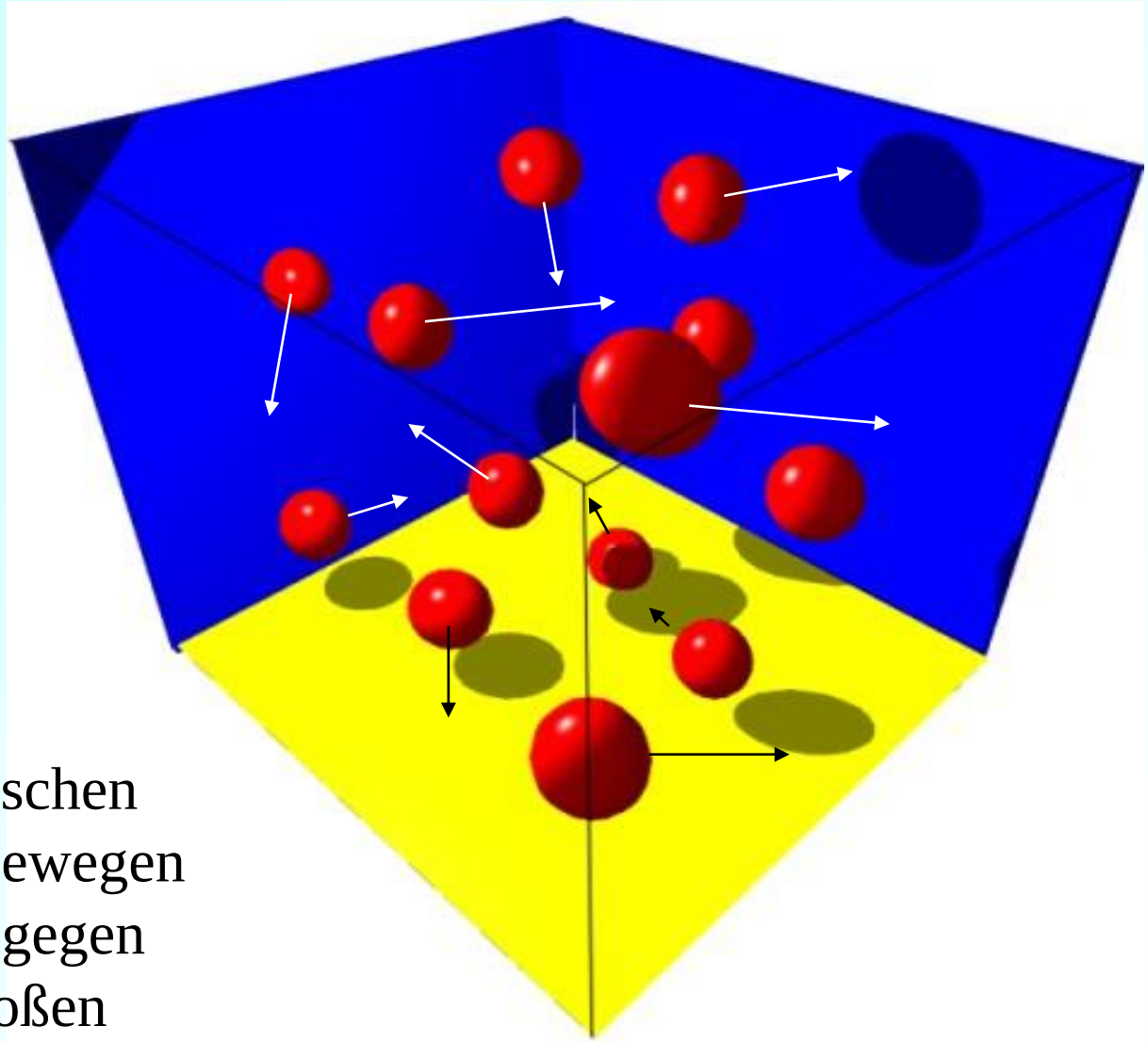


<u>Beispiel:</u>

Verbrennungsmotor

Mikroskopisches Verständnis

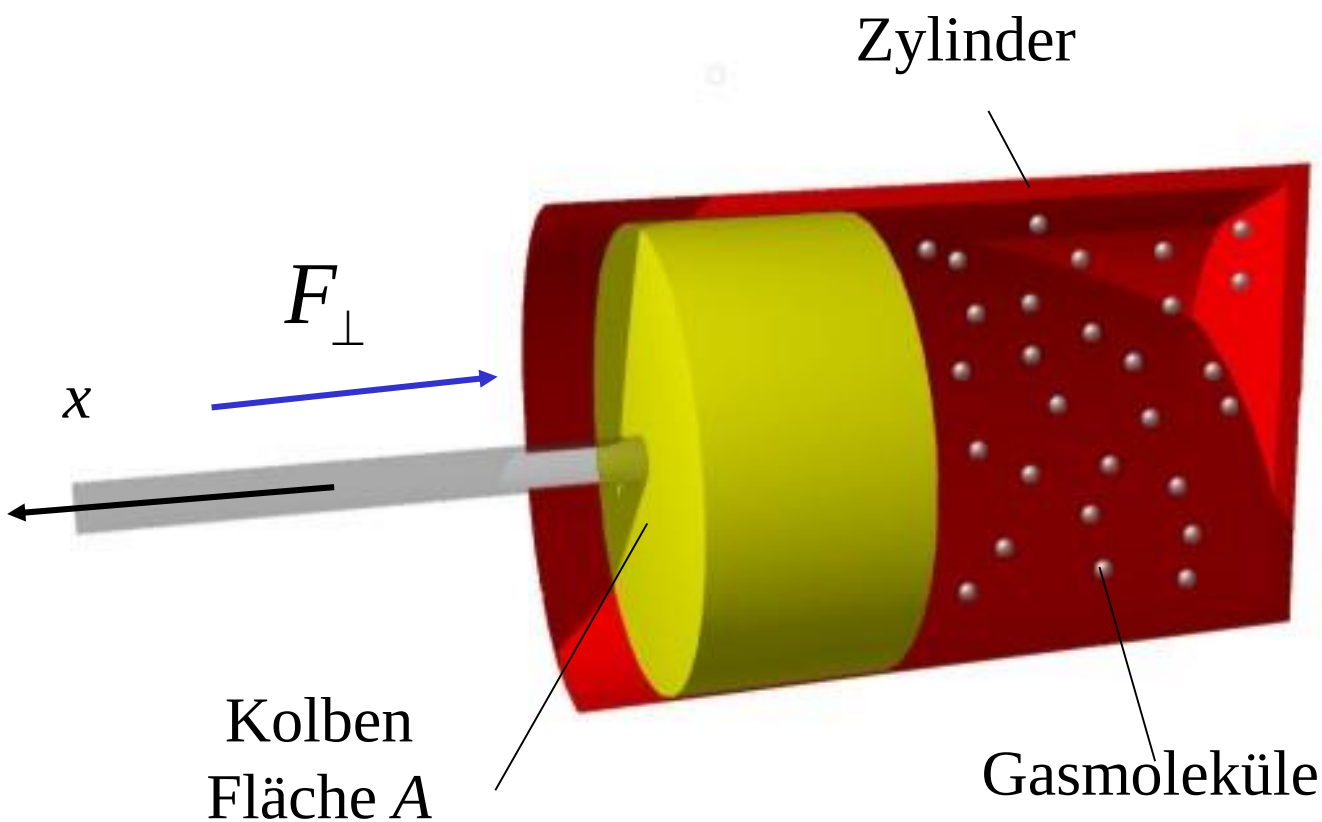
Zum Verständnis aller thermodynamischen Vorgänge braucht man ein Modell des Gases.



<u>Modell:</u>

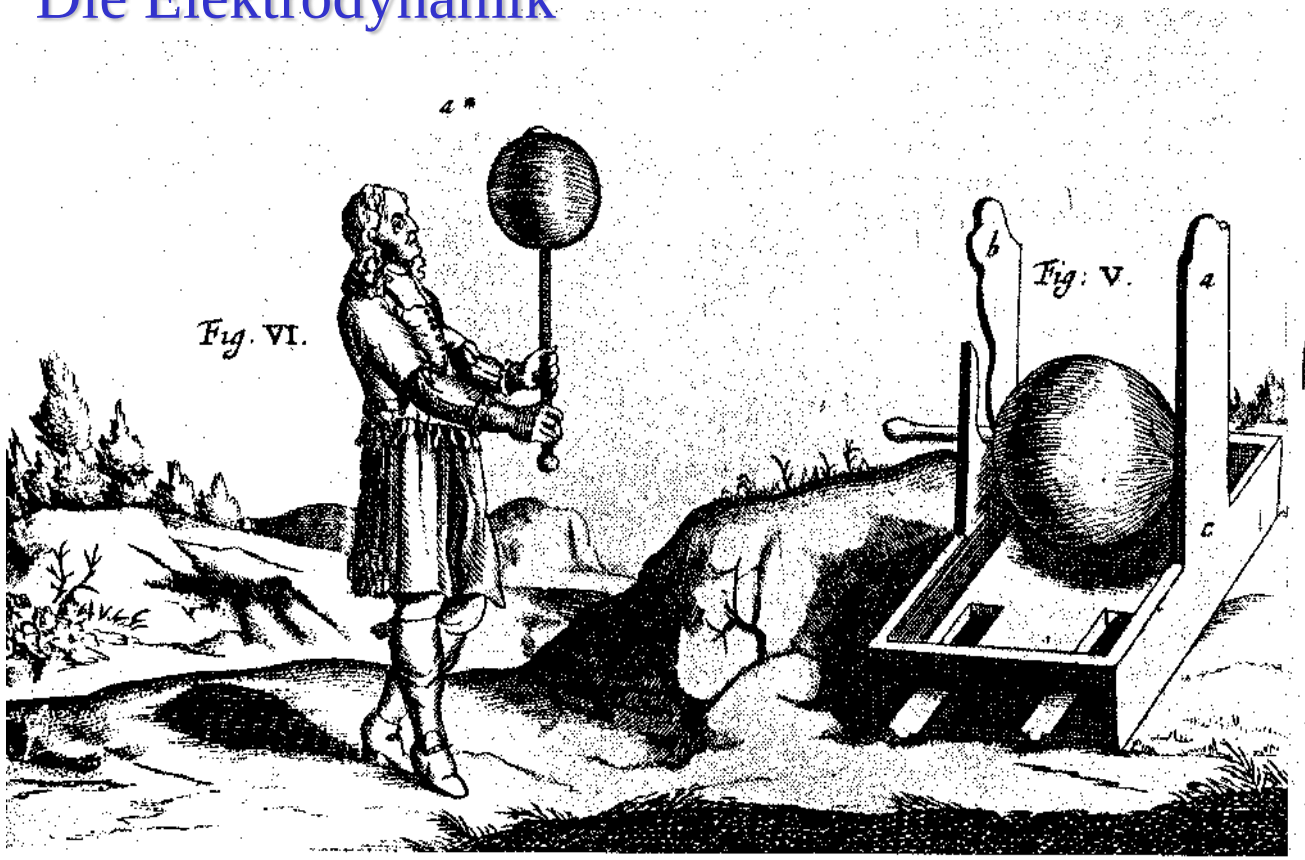
Das Gas besteht aus elastischen Kugeln, die sich ständig bewegen und gegeneinander sowie gegen die Begrenzungswände stoßen

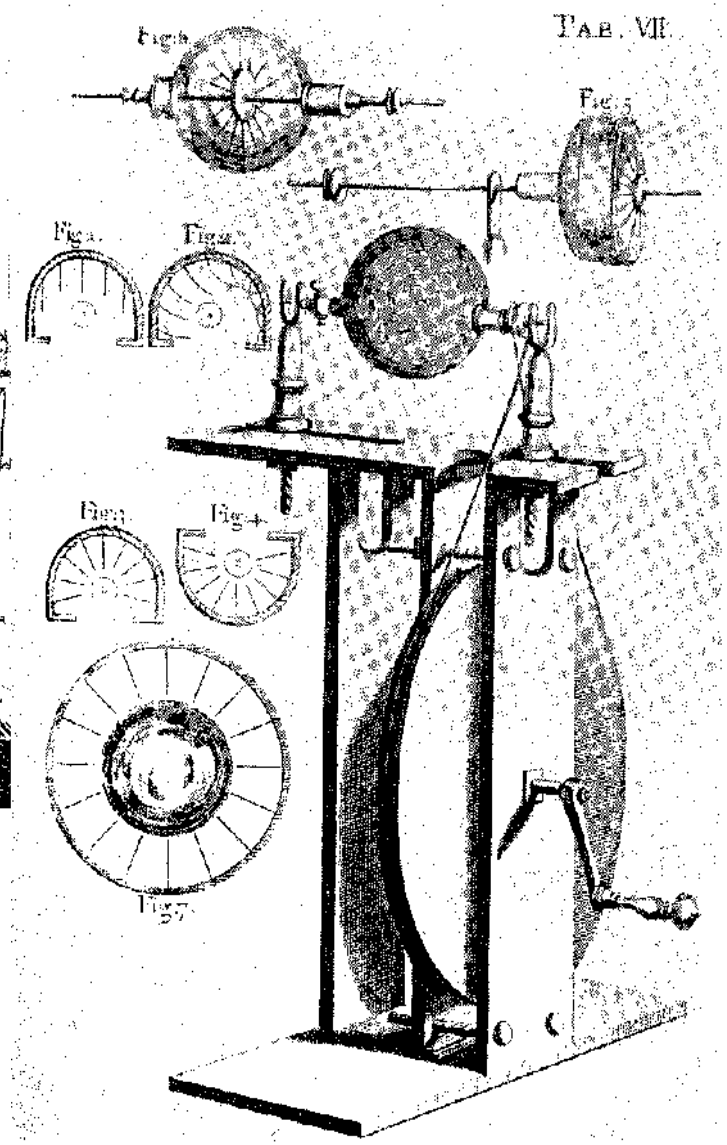
Der Druck entsteht durch den Aufprall der Gasmoleküle auf die Wandflächen.



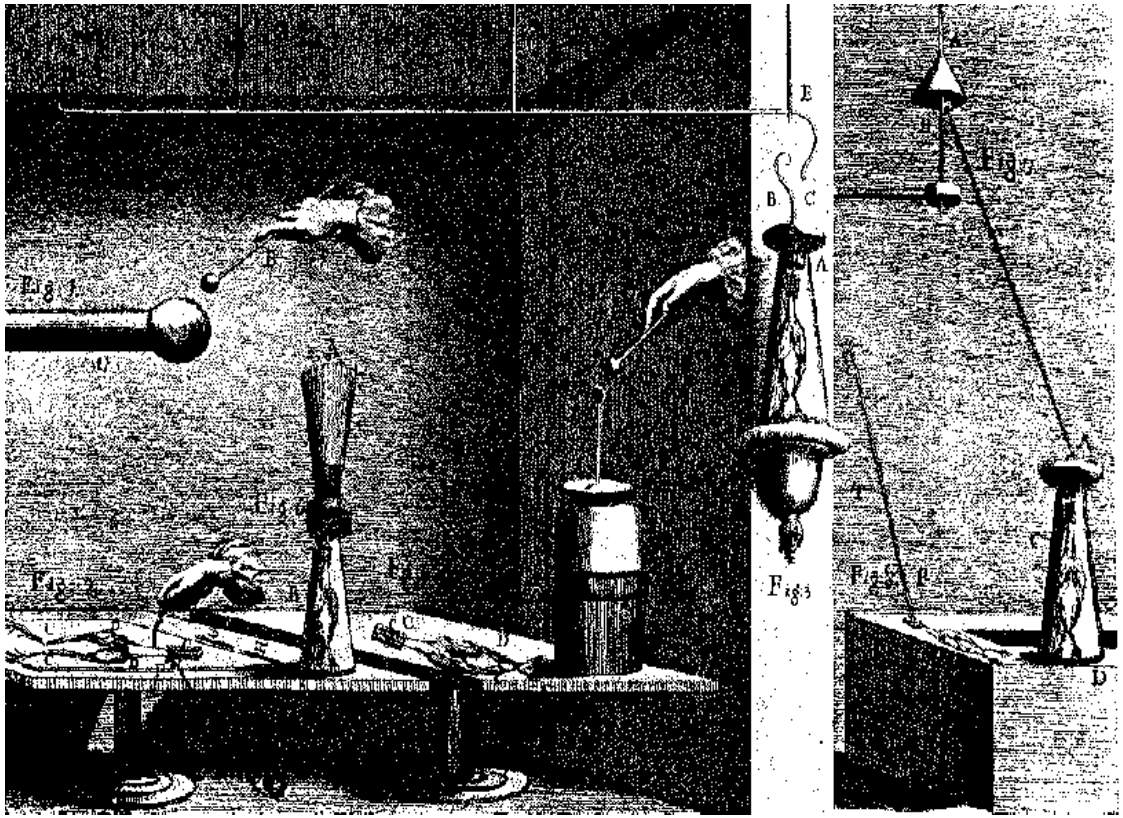
Studium der Gase und technische Anwendung kann z.B. mit Kolben und Zylinder erfolgen.

Die Elektrodynamik



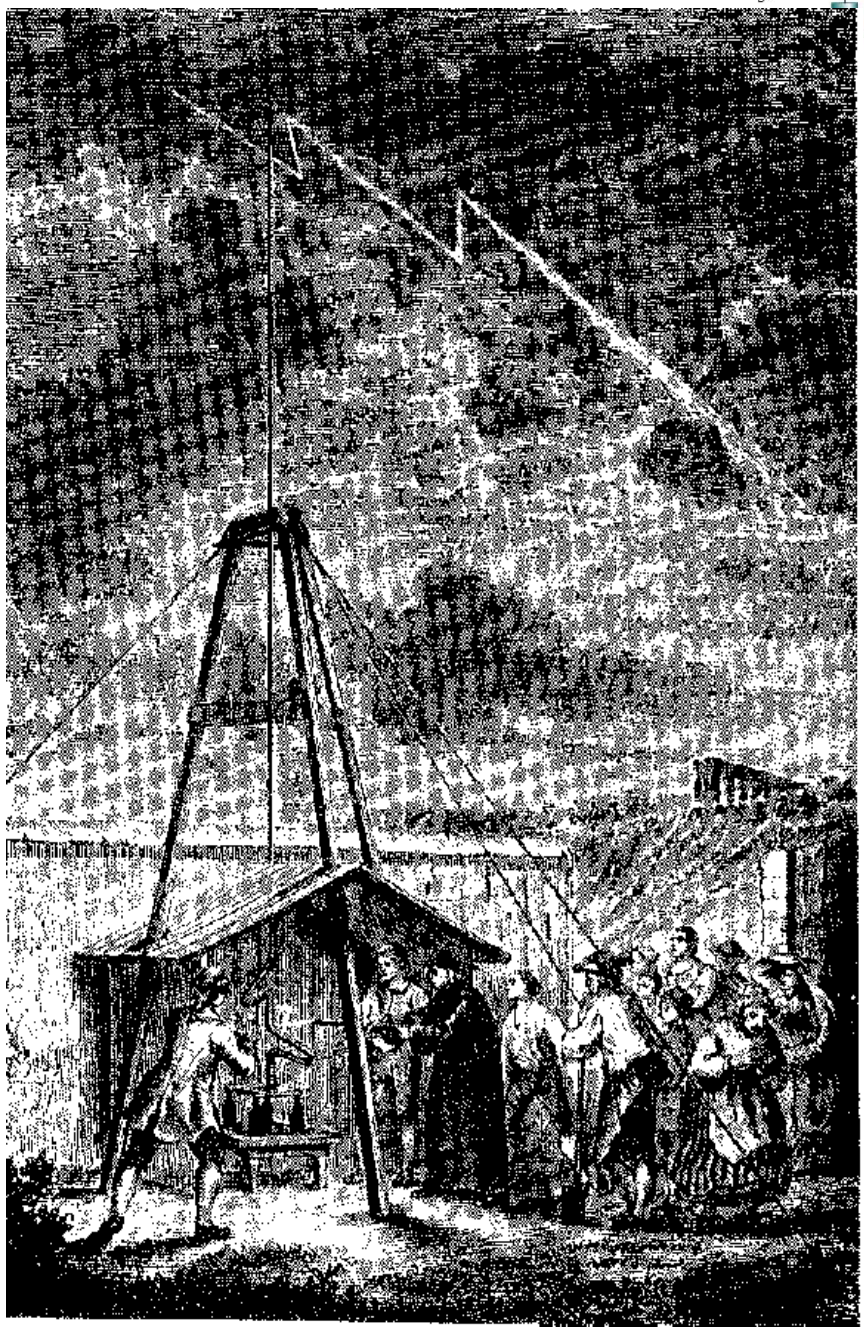


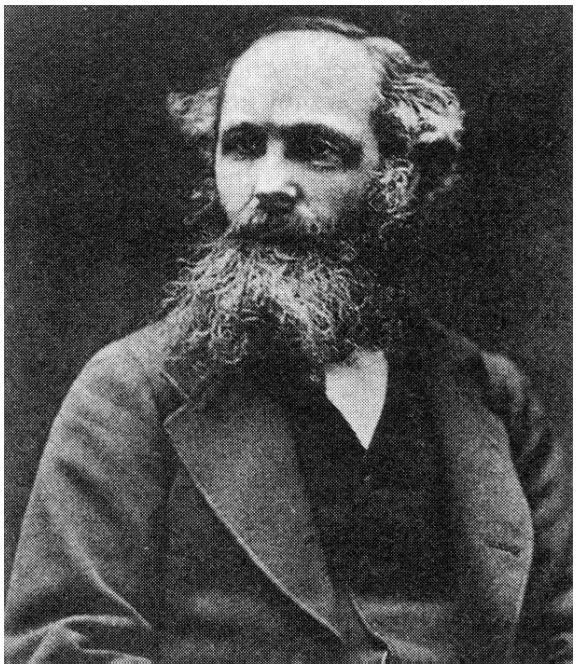
Im 18. Jahrhundert wurden erste Versuche mit Reibungselektrizität gemacht, indem man z.B. Schwefel- und Glaskugeln gerieben hat.



Versuche mit Froschschenkeln

Experimente mit Blitzen ⇒





James Clerk Maxwell
(1831 - 1879)

Die Maxwell'schen Gleichungen
(1864)

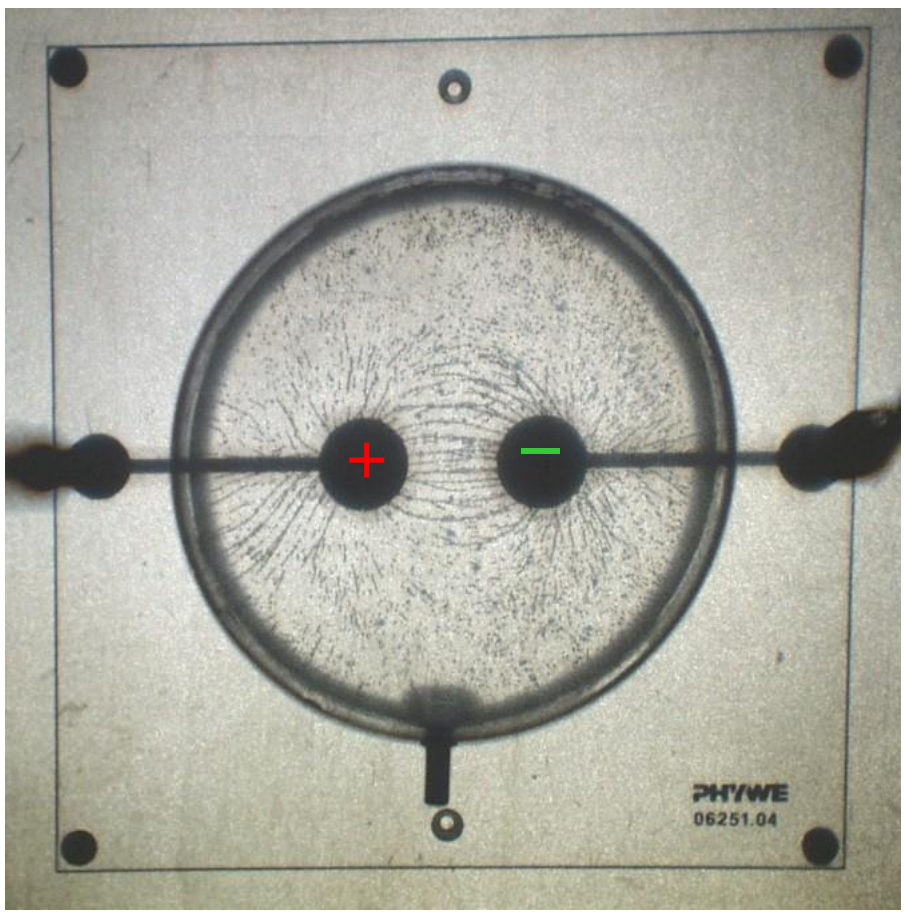
$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

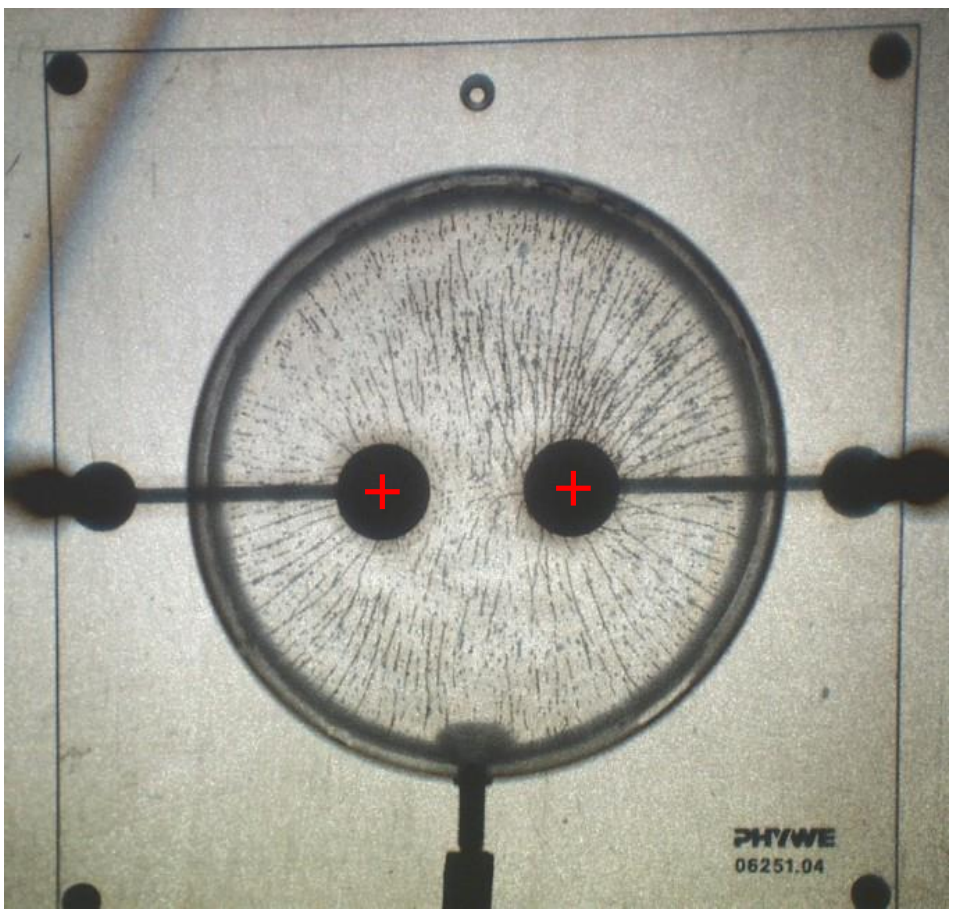
$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

Ladungen erzeugen im umgebenden Raum ein elektrisches Feld (Kraftfeld)
$\Rightarrow$ elektrische Feldlinien

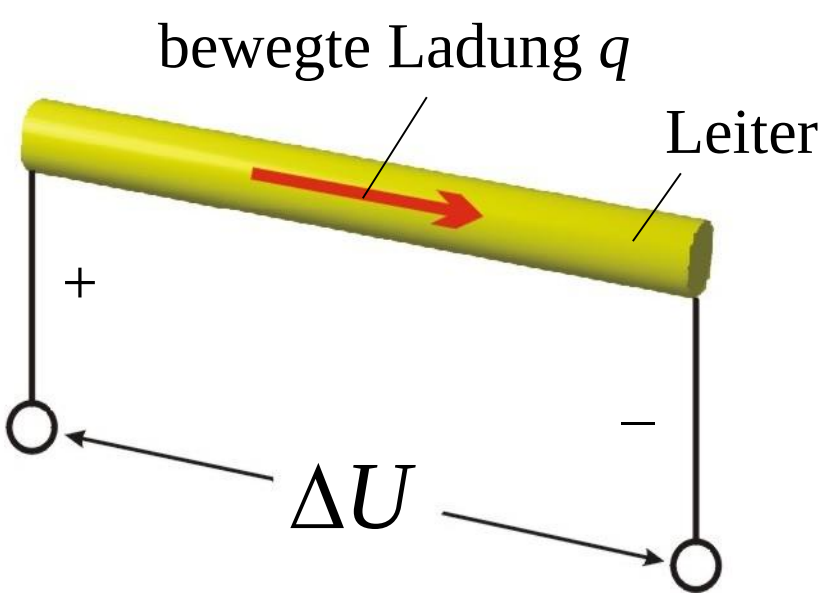


ungleiche Ladungen

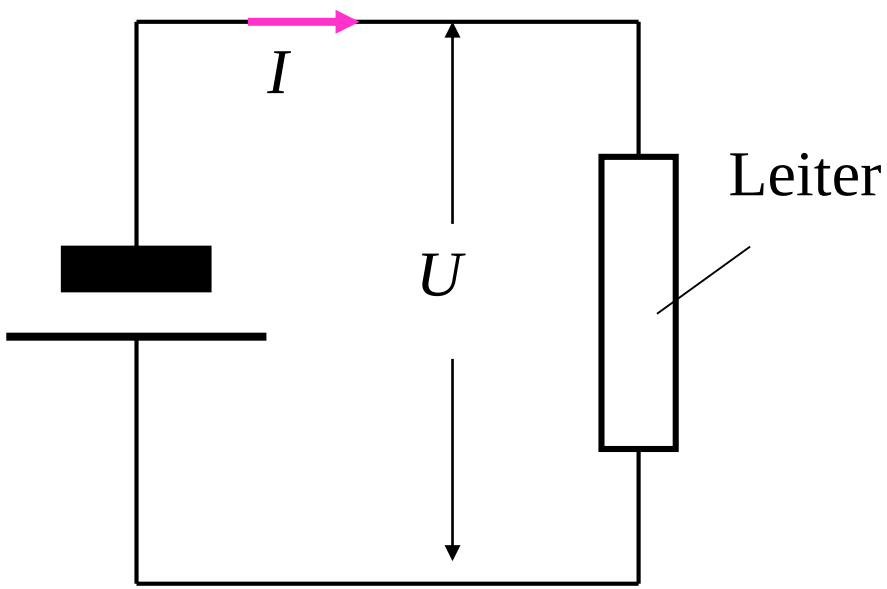


gleiche Ladungen

In einem **Leiter** sind elektrische Ladungen frei beweglich. Legt man an solch einen Leiter eine Spannung, geraten die Ladungen in Bewegung, es fließt ein **Strom**.



Häufig benutzt man ein idealisiertes Ersatzschaltbild für den Stromkreis:



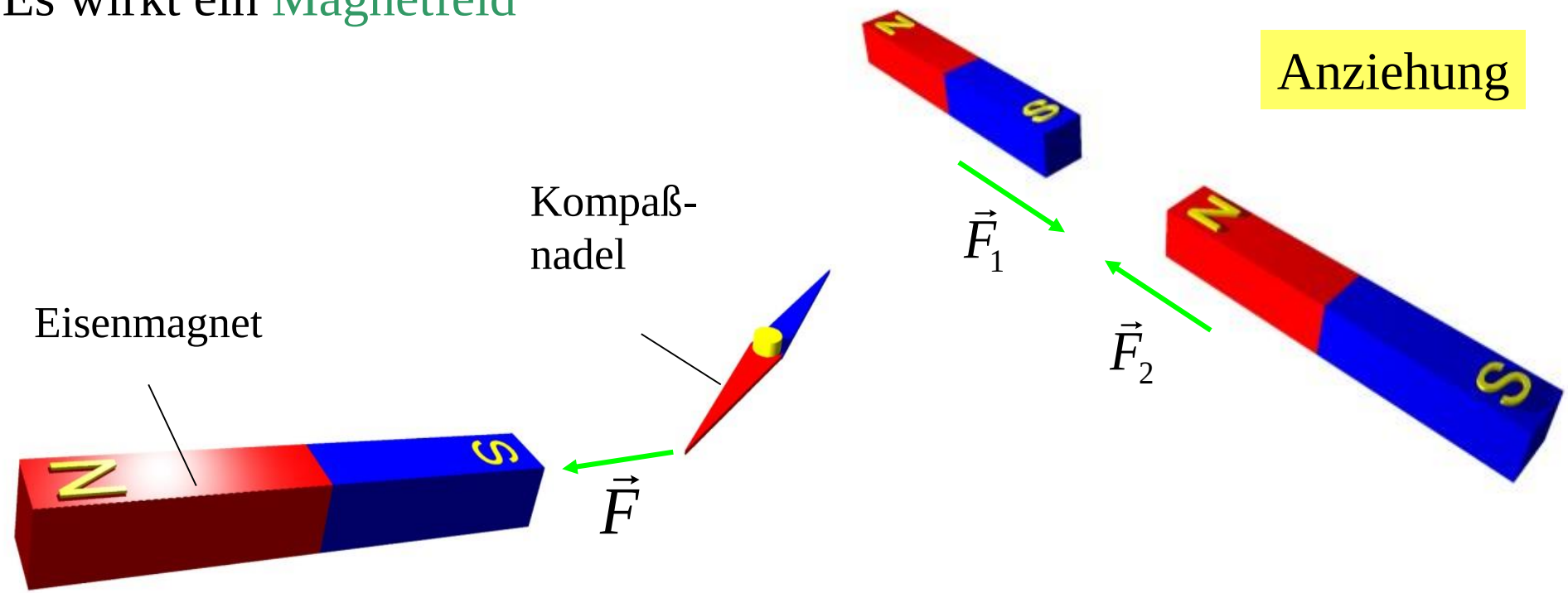
Der Leiter erhitzt sich in der Regel.

elektrische Energie $\Rightarrow$ Wärme

Von einem elektrisch ungeladenen Eisen kann eine *Kraftwirkung* auf anderes Eisen ausgehen.

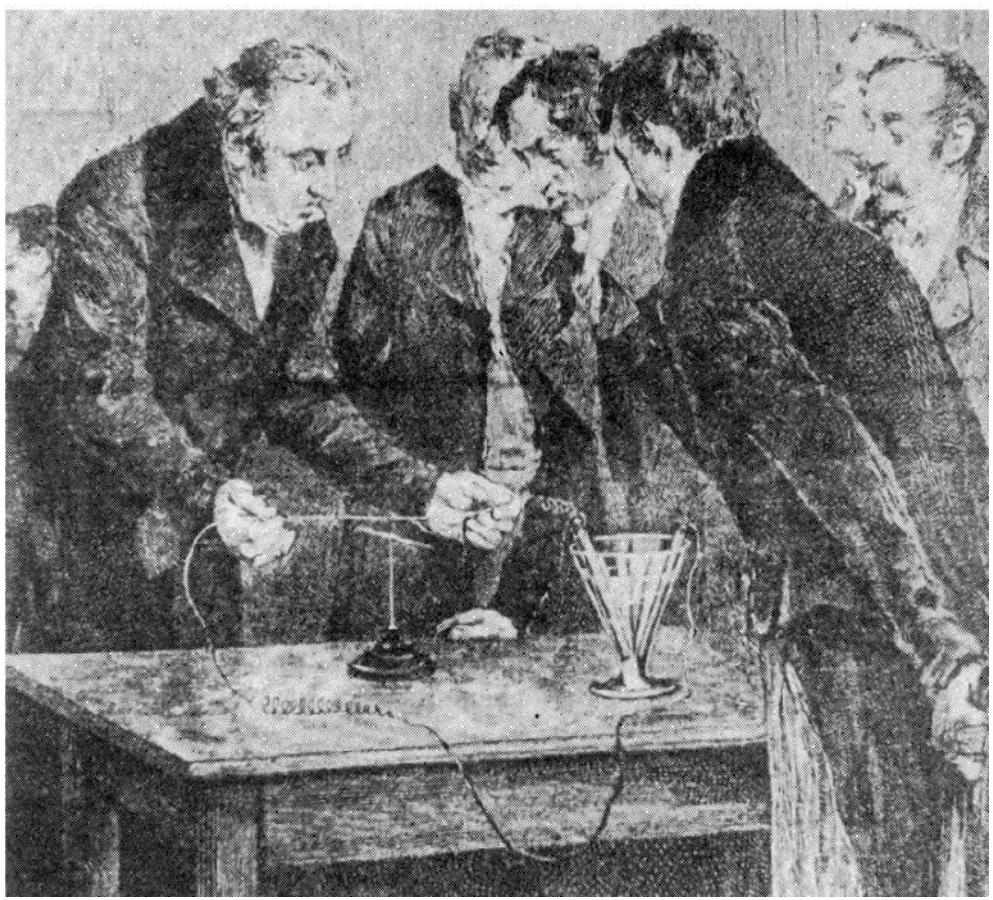
Es wirkt ein Magnetfeld

Je nach Ausrichtung des Magneten gibt es *Anziehung* oder *Abstoßung*

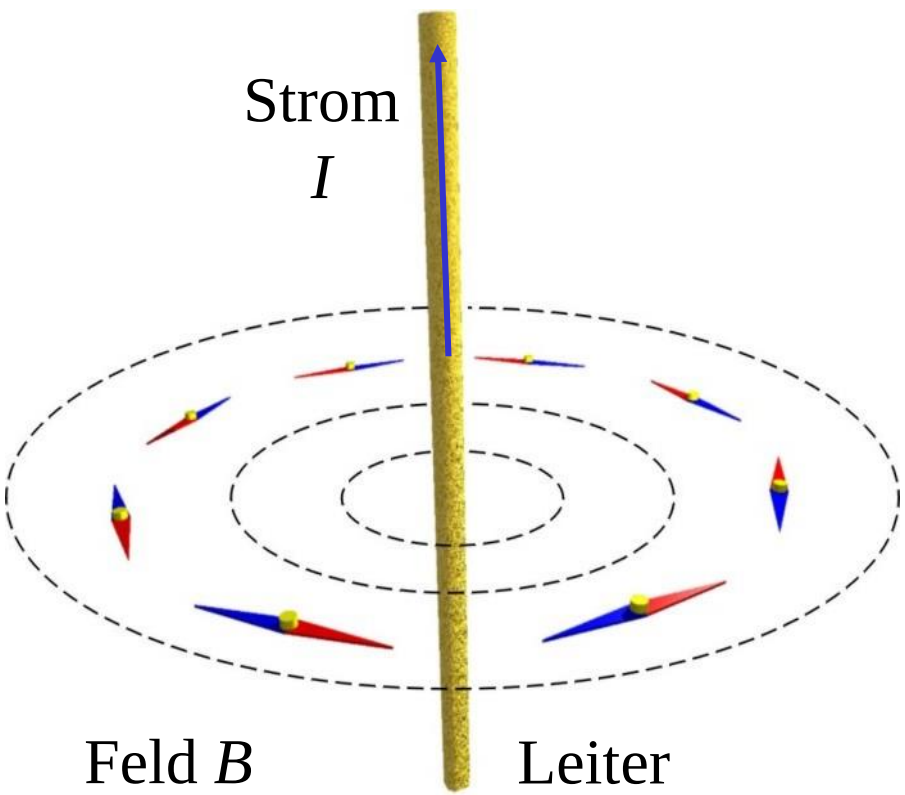


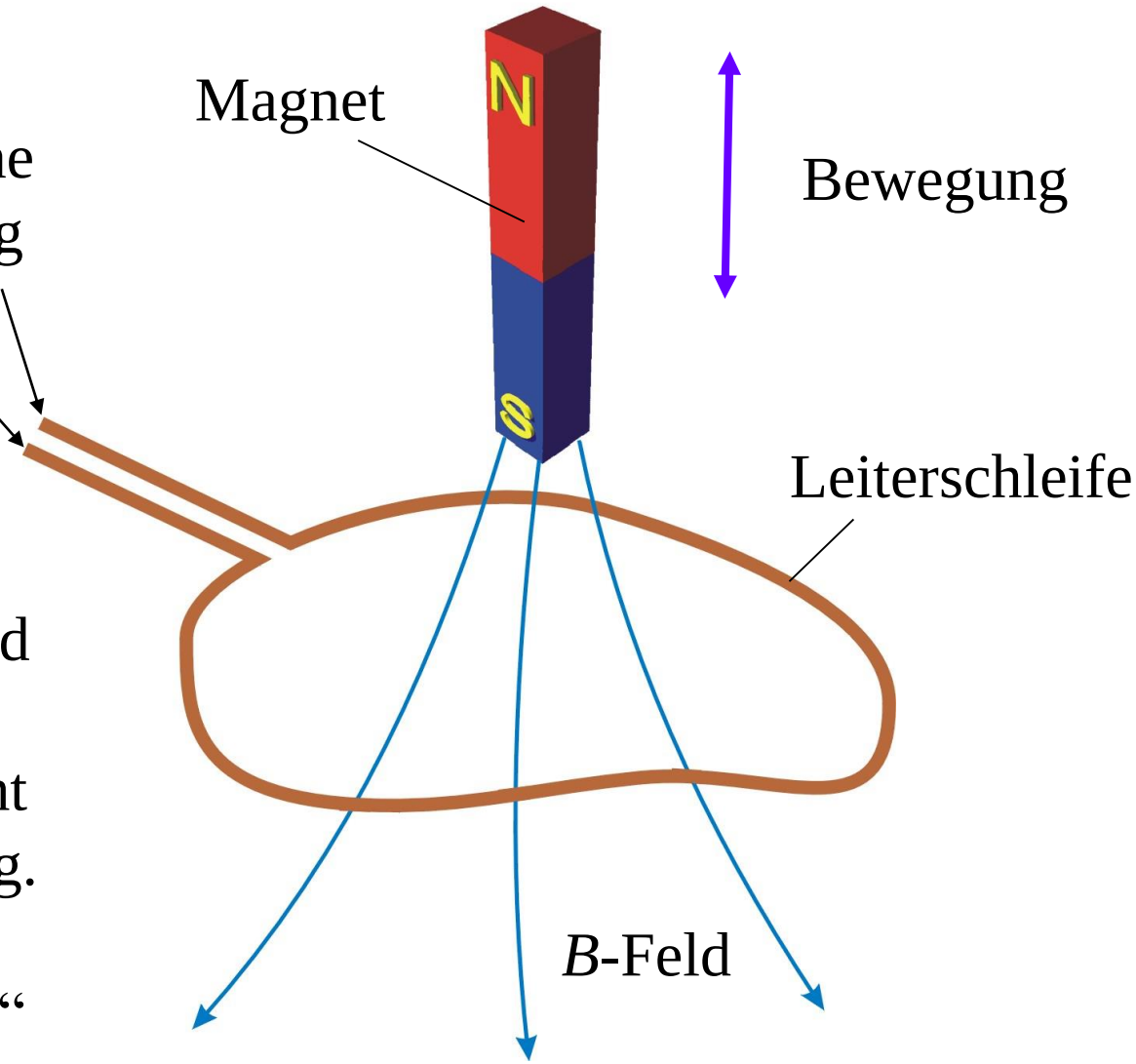
Anziehung

Ørsted entdeckt 1820 den Zusammenhang von Strom und Magnetfeld



Ein stromdurchflossener Leiter ist von einem kreisförmigen Magnetfeld umgeben.

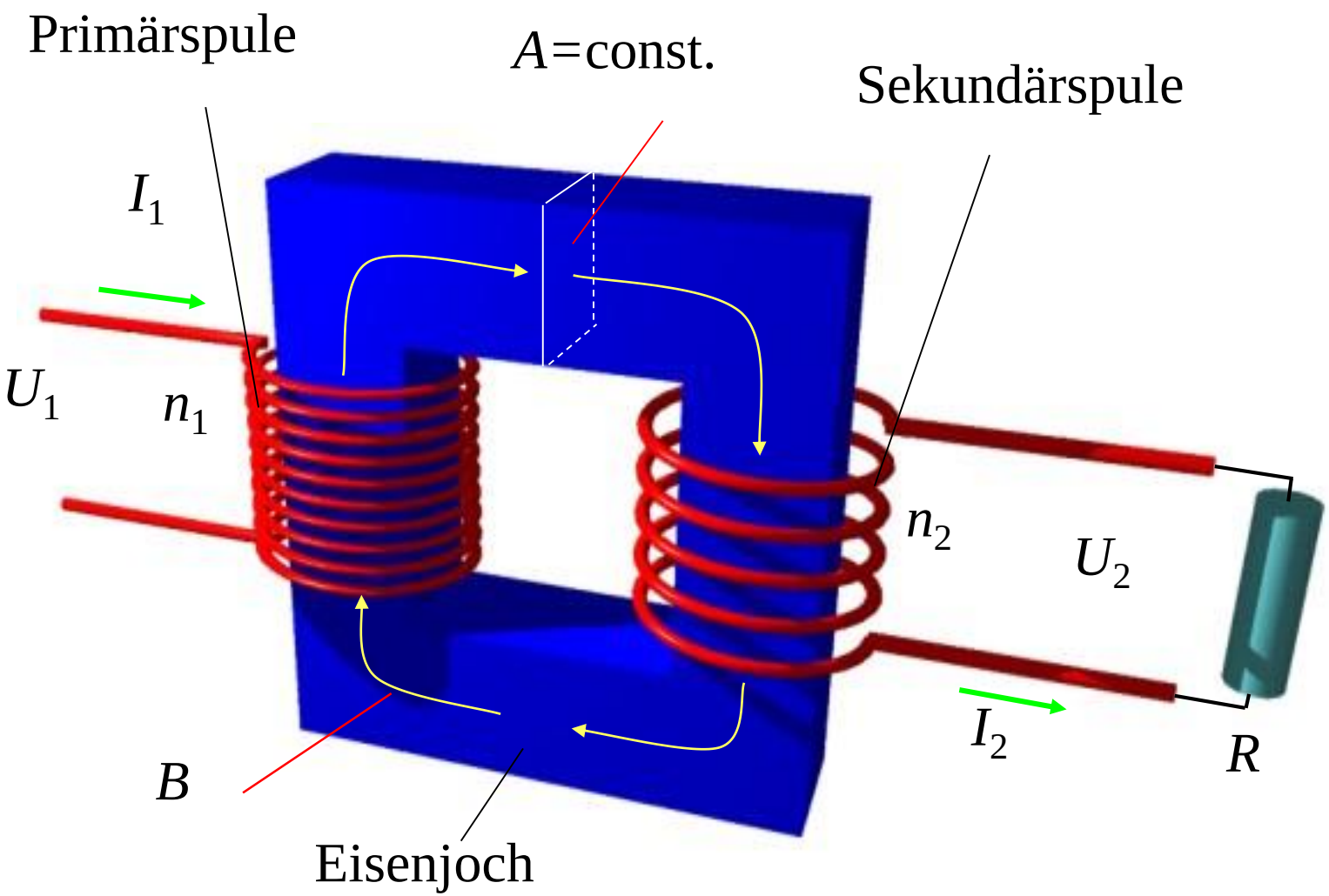




Wenn man ein Magnetfeld in einer Leiterschleife zeitlich verändert, entsteht eine elektrische Spannung.

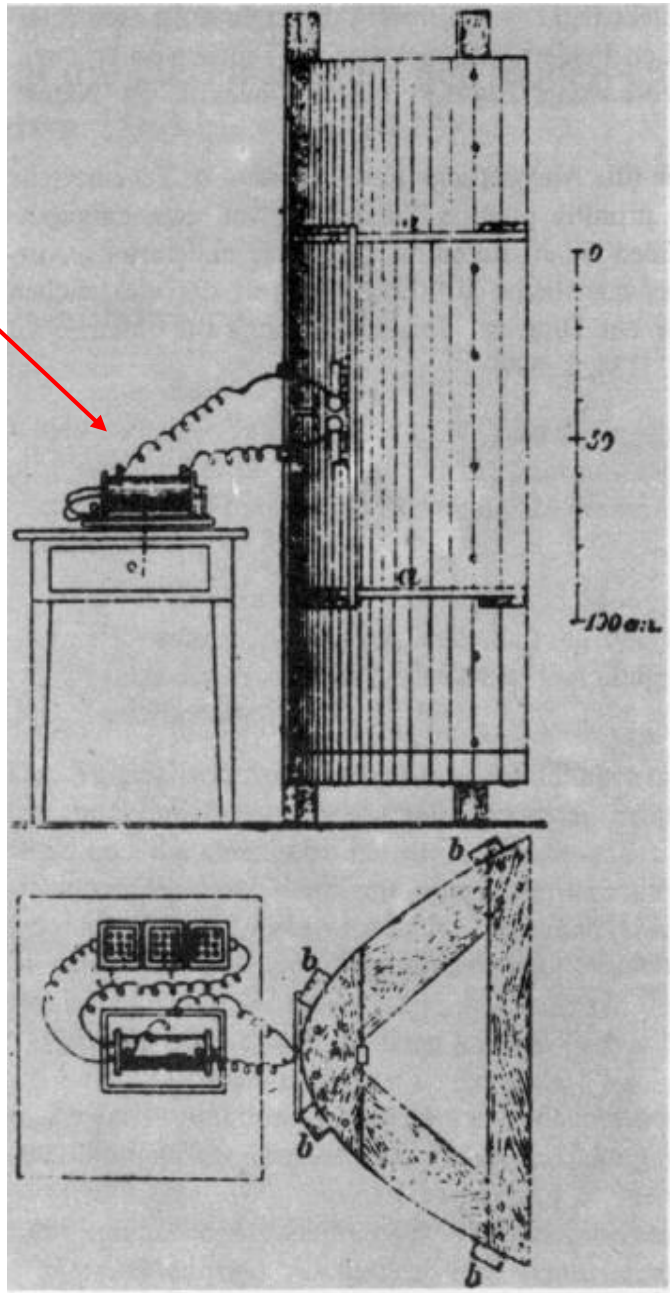
„Induktion“

Technische Anwendung: Der Transformator



Funkeninduktor

Im Jahre 1888 machte Heinrich Hertz erste Experimente mit elektromagnetischen Wellen.



Versuchsaufbau von H. Hertz ⇒

Erste Funkverbindung zwischen Cornwall (England) und Neufundland

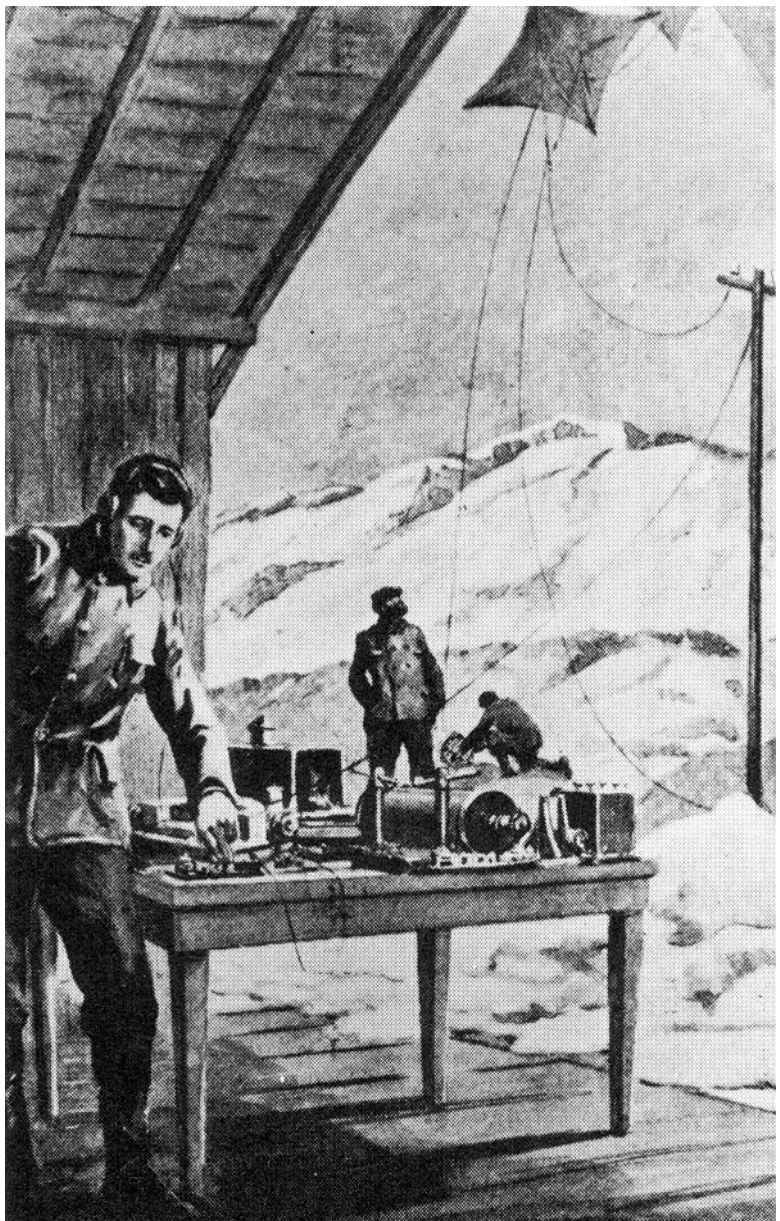
G. Marconi (1901)

Morse Code: ● ● ● = „S“ (success)

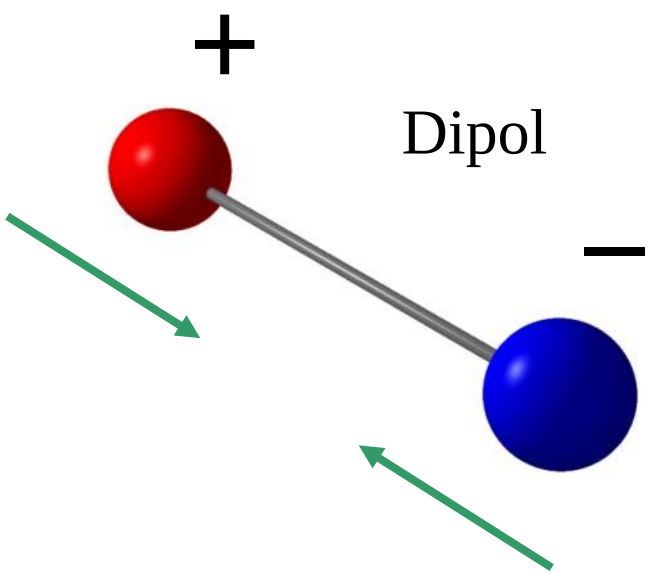
Sendeantenne an 4 Masten von 61 m

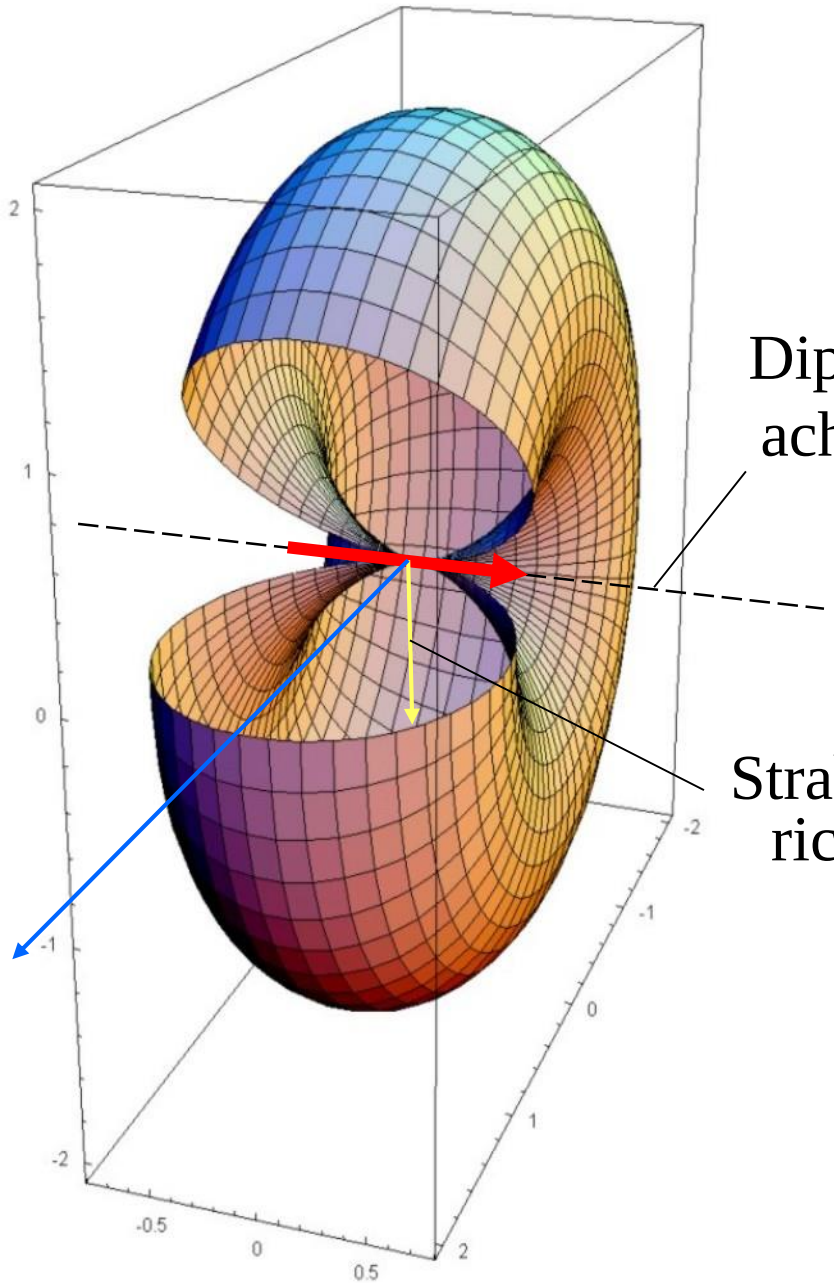
Empfangsantenne 122 m am Drachen

Marconis Empfangsstation in Neufundland ⇒

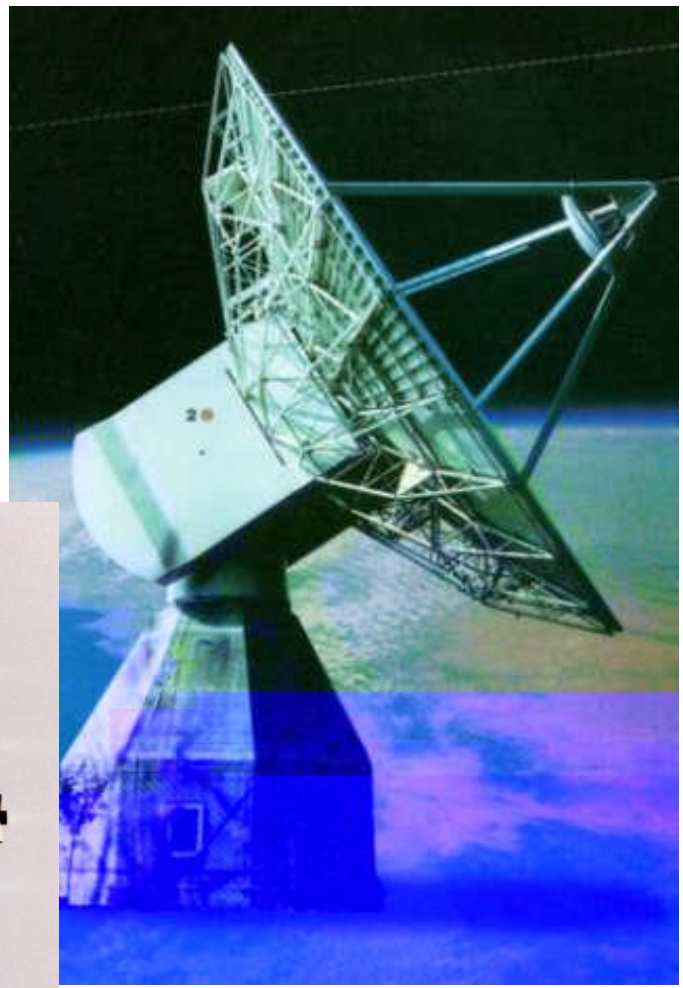


Strahlungscharakteristik
eines Hertz'schen Dipols



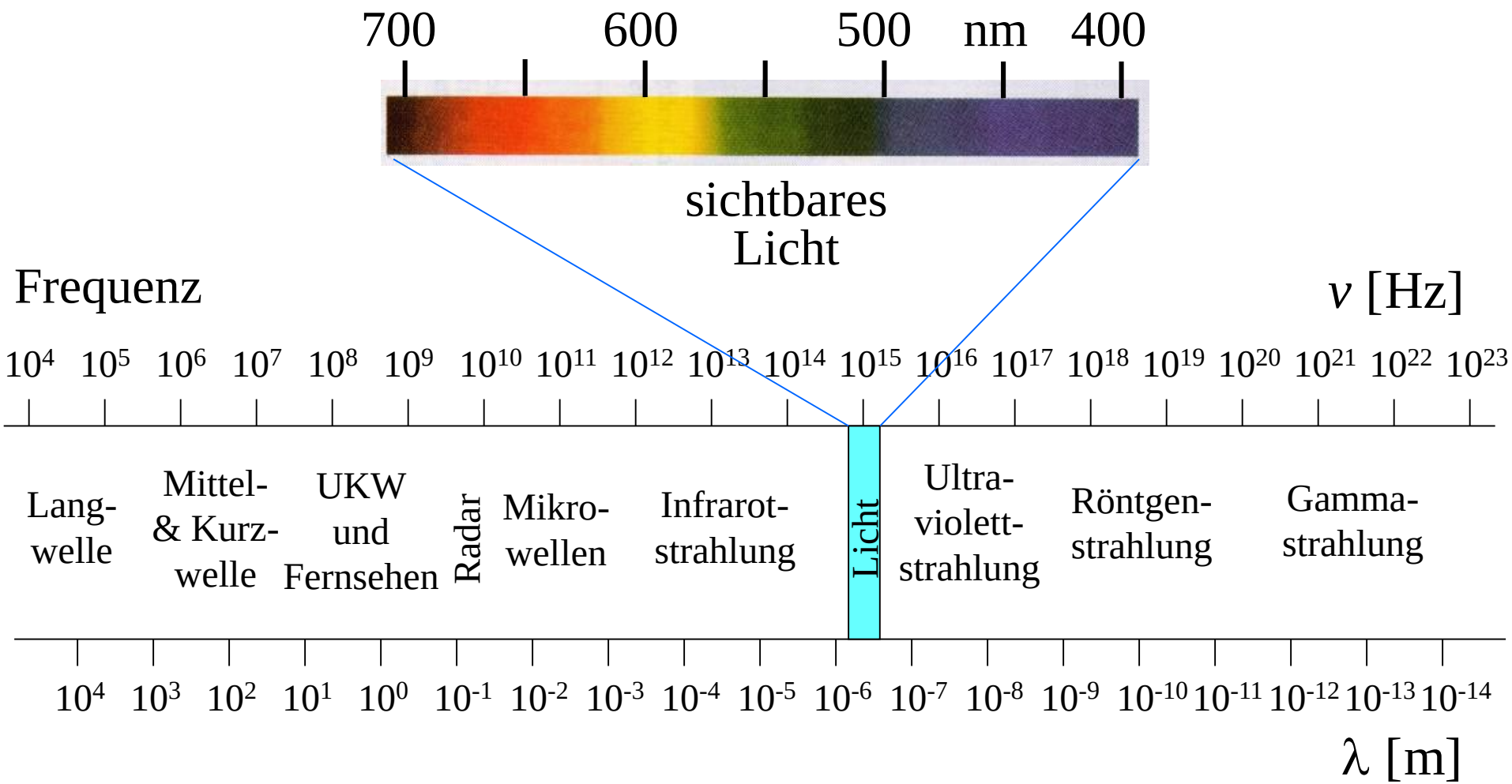


beschleunigte Ladungen
erzeugen elektromagnetische
Wellen

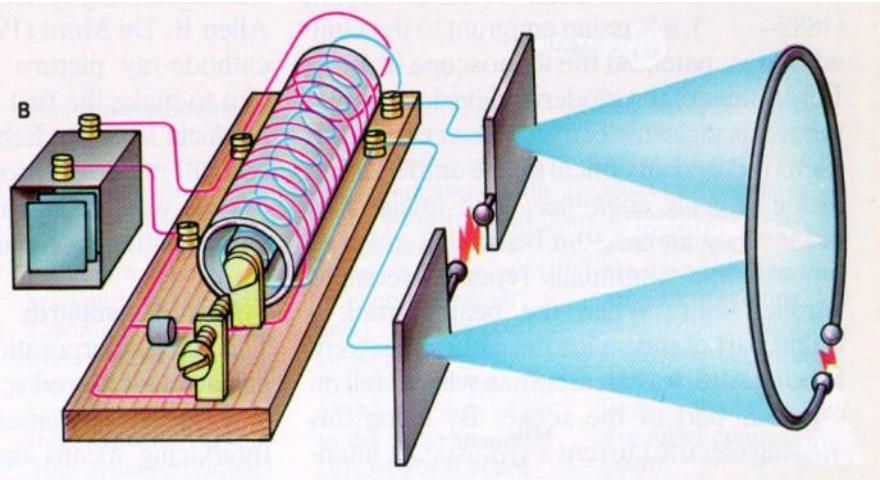


Beispiele von technischen Antennenanlagen

Spektrum der elektromagnetischen Wellen



Historische Erzeugung von Radiowellen durch Hochspannungsfunken.

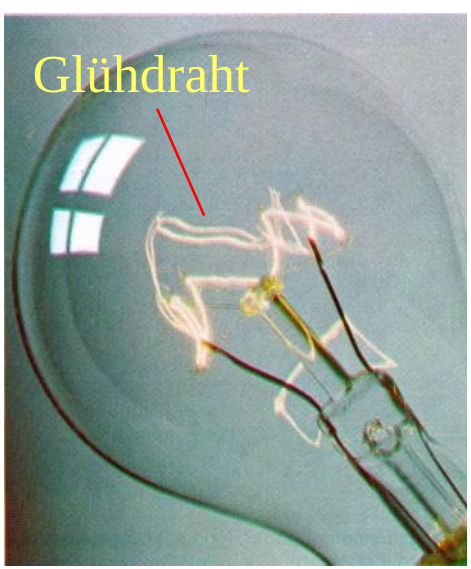


Die hohe Spannung baut ein entsprechend hohes *E*-Feld auf. Schlägt der Funken über, bricht innerhalb von ns das Feld zusammen. Dabei werden die Ladungen stark bescheunigt und strahlen.

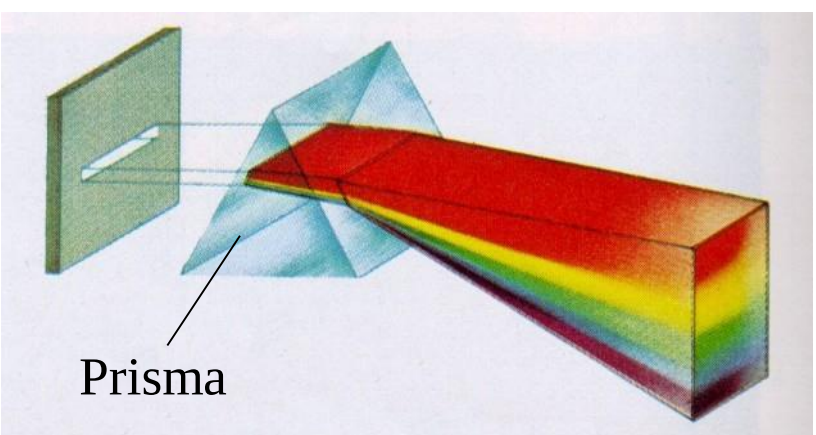
Heute wird der primitive Funken durch aktive Bauelemente (Röhren und Transistoren) ersetzt.

Erzeugung von Licht durch eine Glühbirne

Durch hohe Temperatur werden die Ladungen in den Molekülen so stark zu thermischen Bewegungen (Bescheunigung) angeregt, daß sie EM-Wellen aussenden.



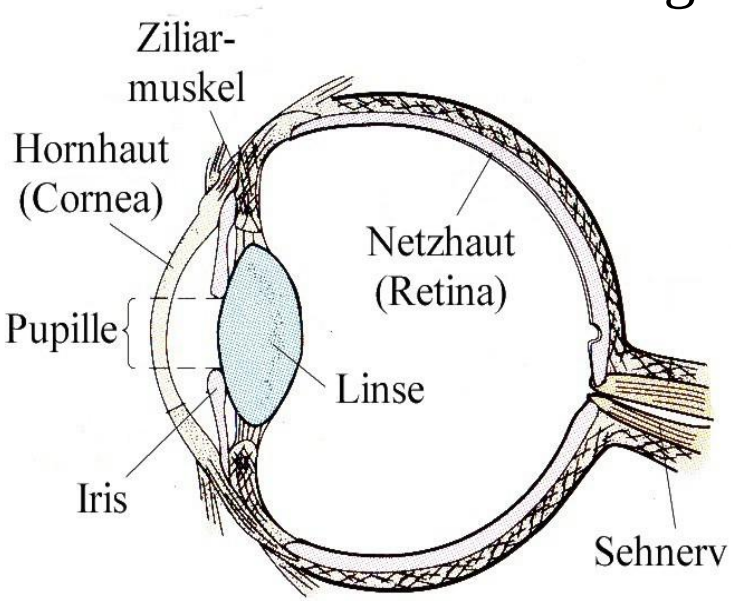
Weißes Licht enthält EM-Wellen verschiedener Frequenzen = „Farben“



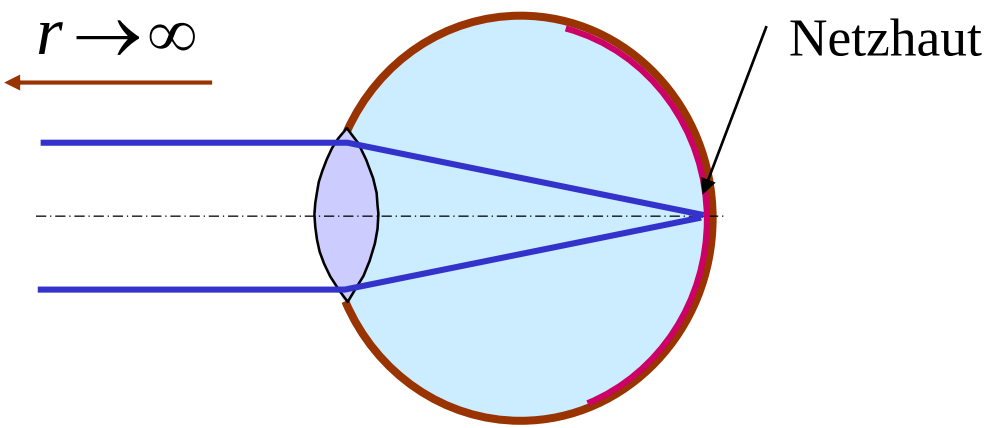
Optik: Geometrische Optik
Wellenoptik
Quantenoptik

Geometrische Optik

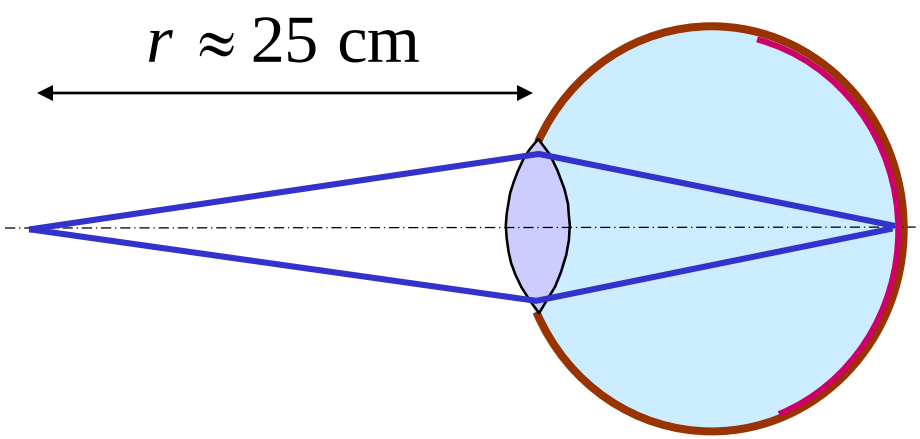
Das Auge erzeugt mit einer Linse ein Bild auf der Netzhaut. Die Brennweite der Linse ist in einem bestimmten Bereich variabel, um Nah- und Fernsicht zu ermöglichen.



Fernsicht:



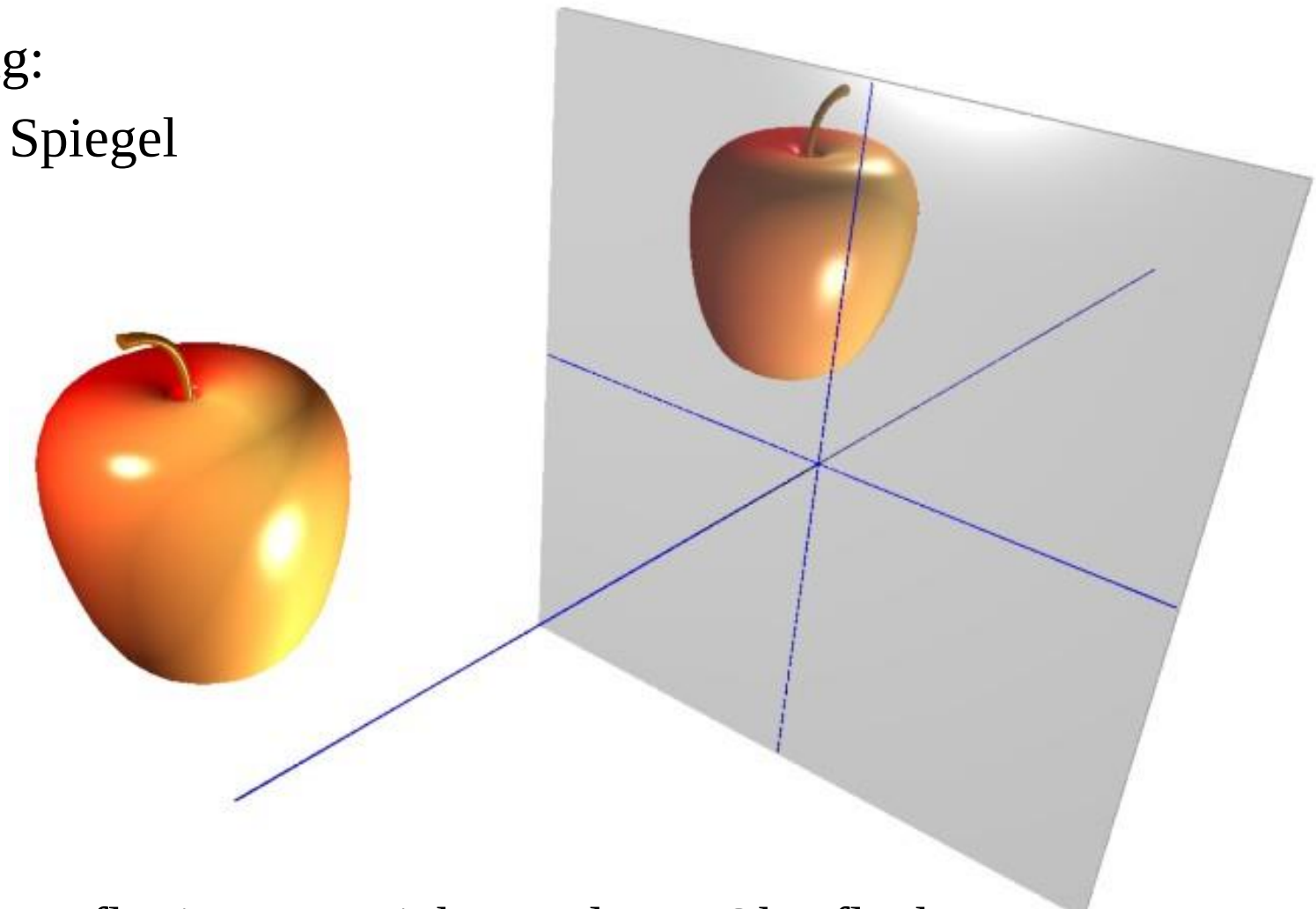
Nahsicht:



Geometrische Optik

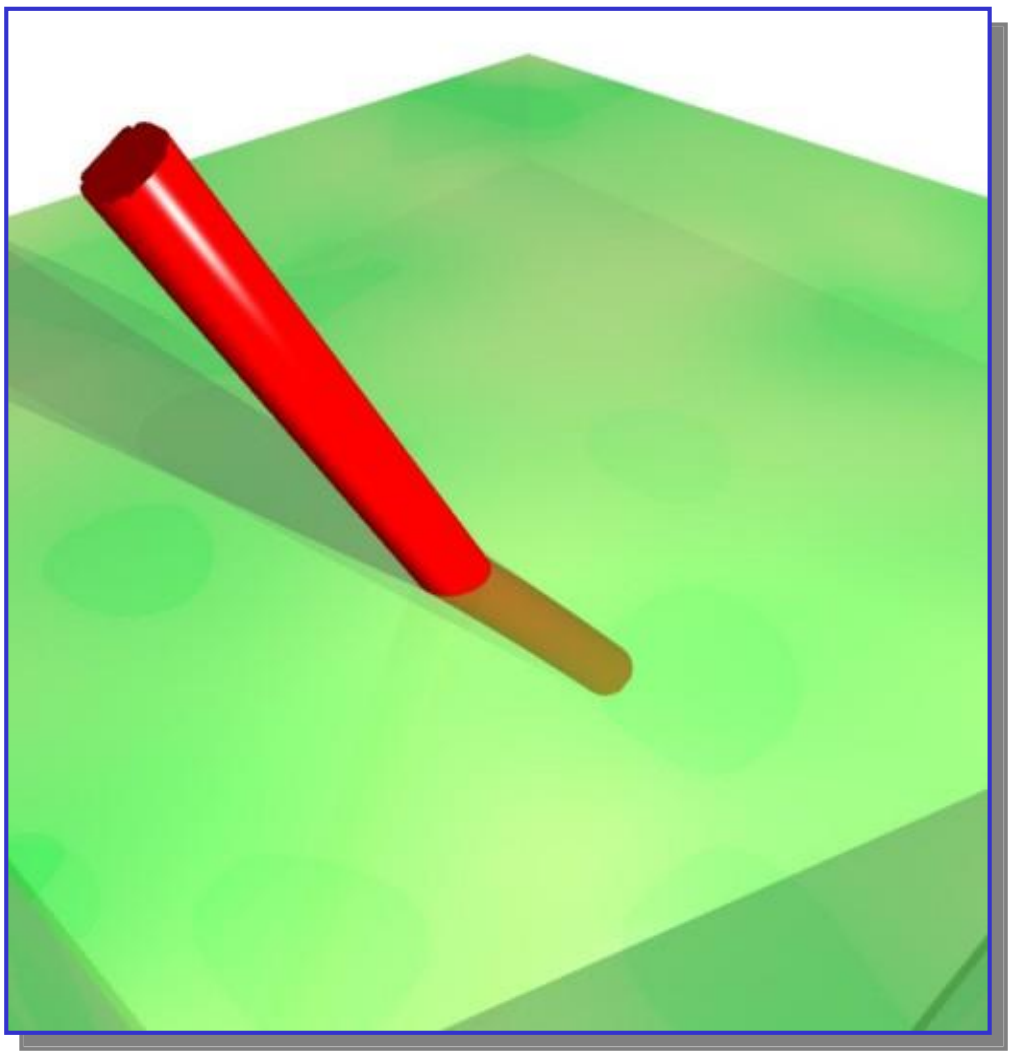
Anwendung:

der Spiegel



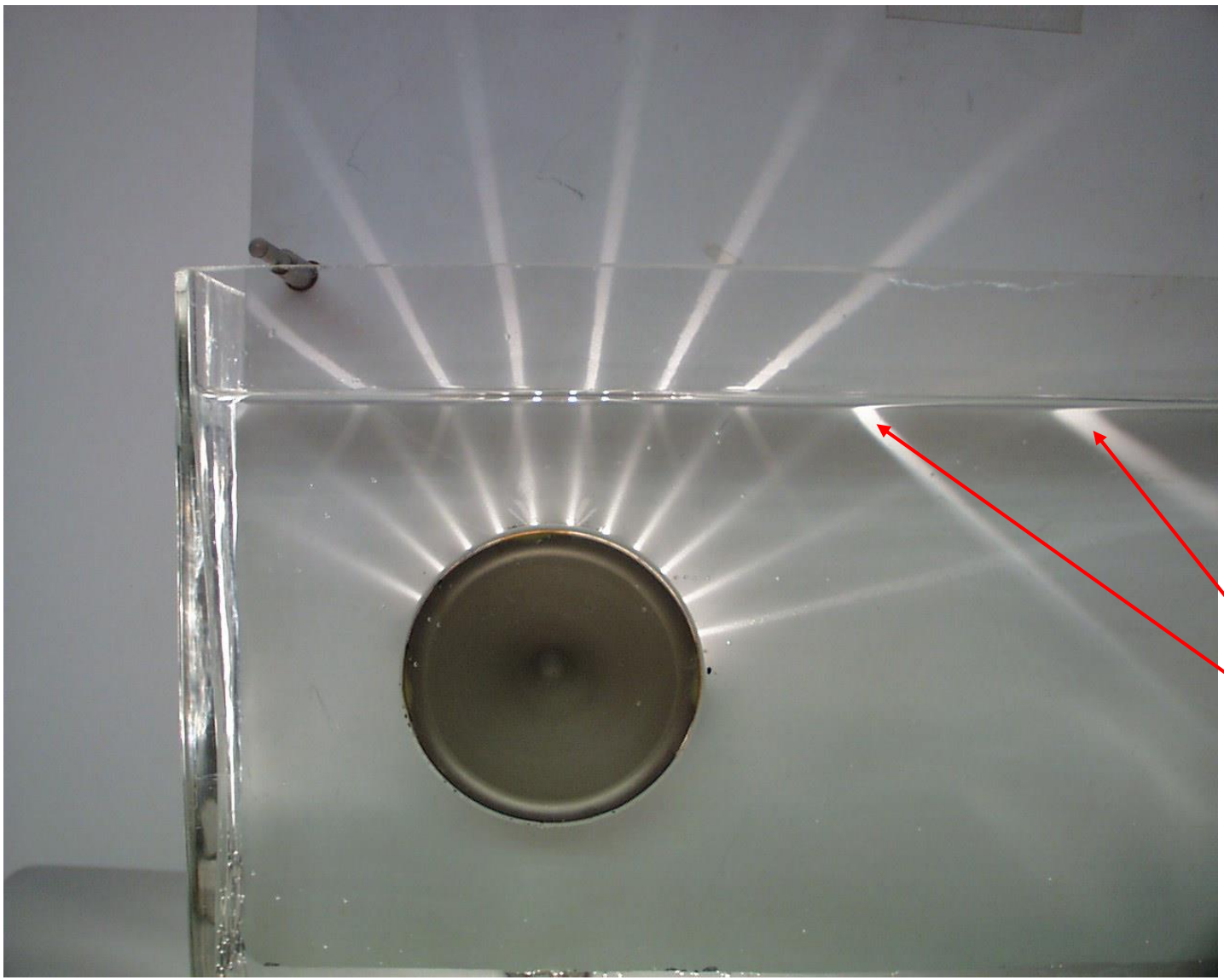
Reflexion von Licht an glatter Oberfläche

Geometrische Optik



Beobachtung der Lichtbrechung an einem geraden Stab im Wasser

Totalreflexion an Grenzflächen (hier: Wasser-Luft)

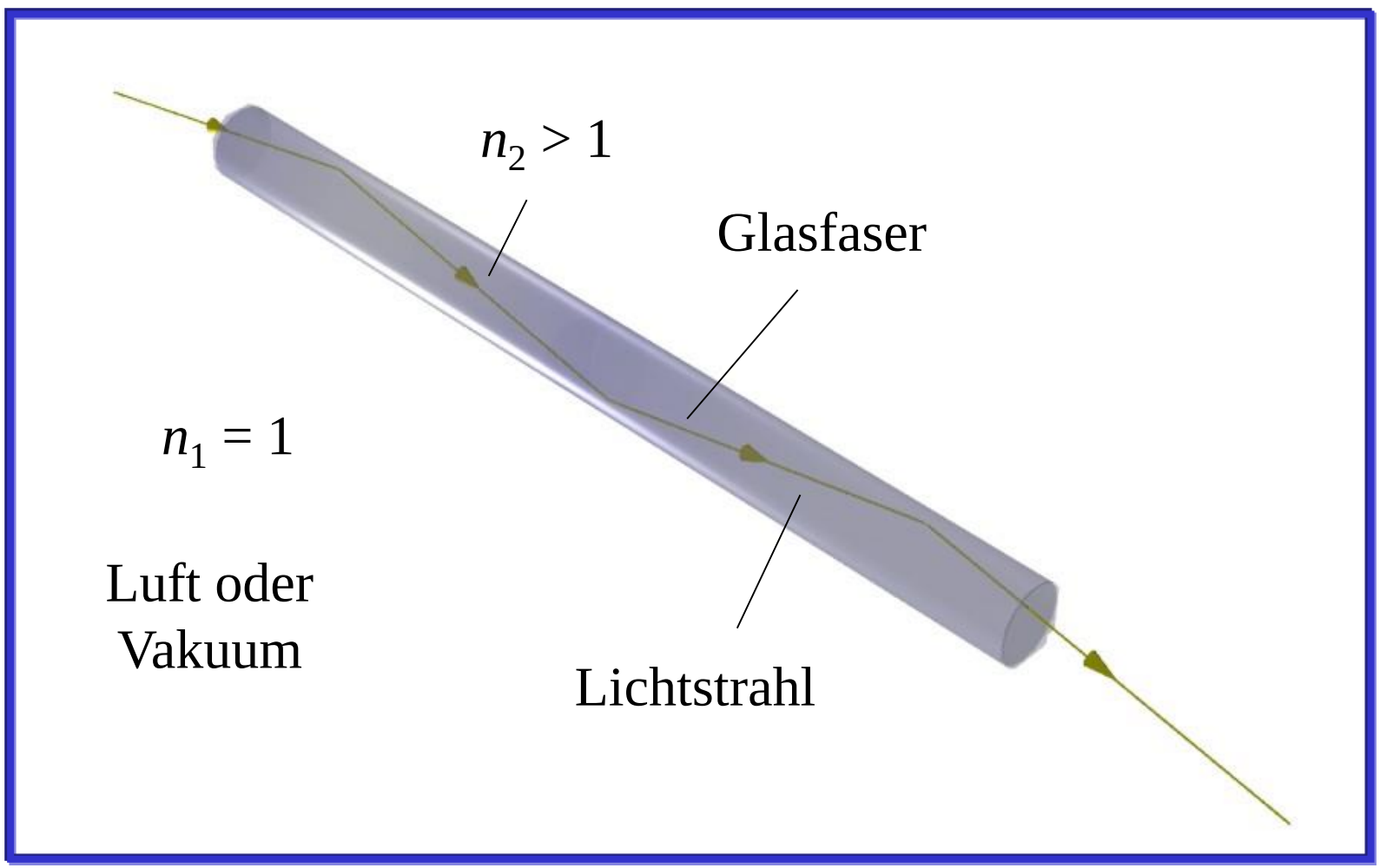


Totalreflexion

Geometrische Optik

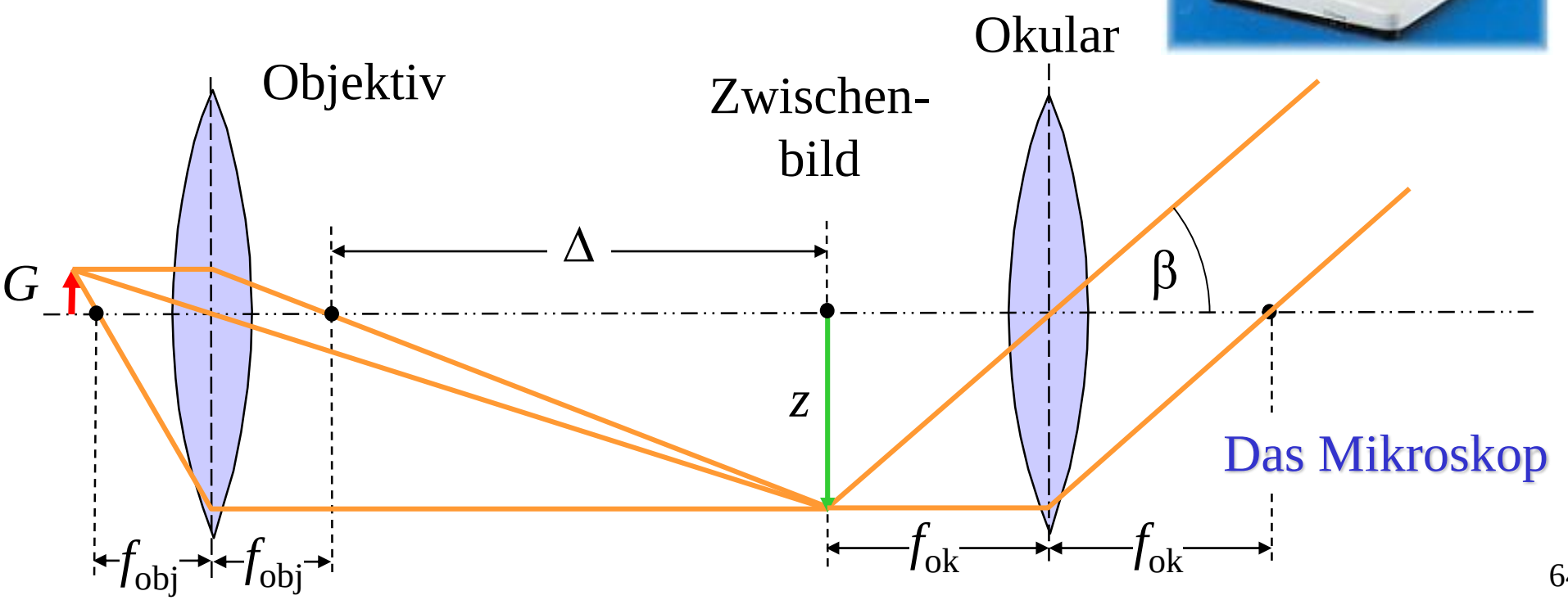
Anwendung:

Das Prinzip der Totalreflexion wird bei Glasfaserkabeln angewendet.



Linsen

Geometrische Optik

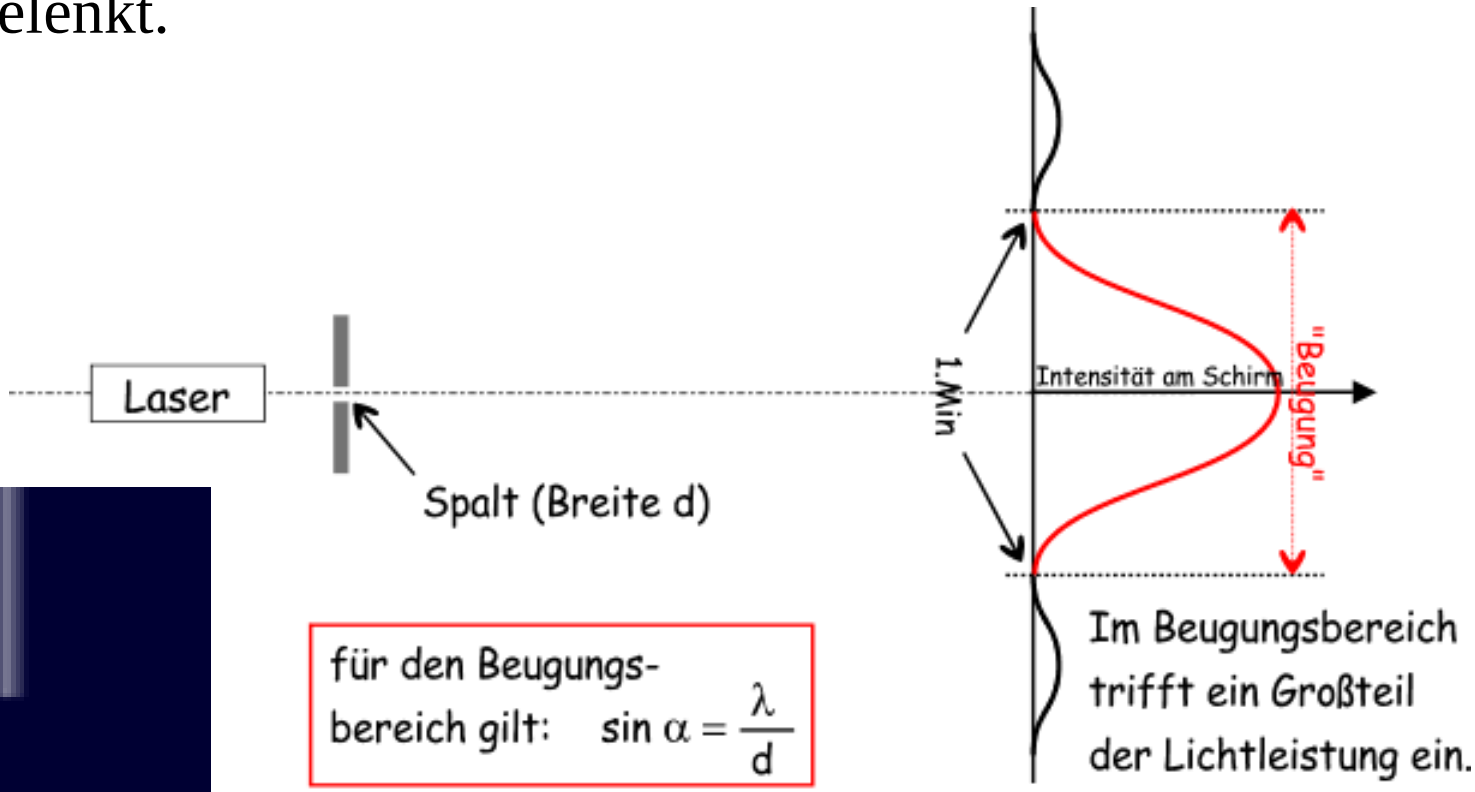


Das Mikroskop

Wellenoptik

Beugung

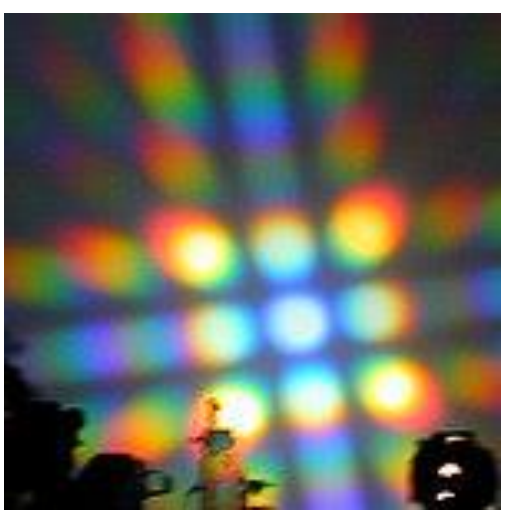
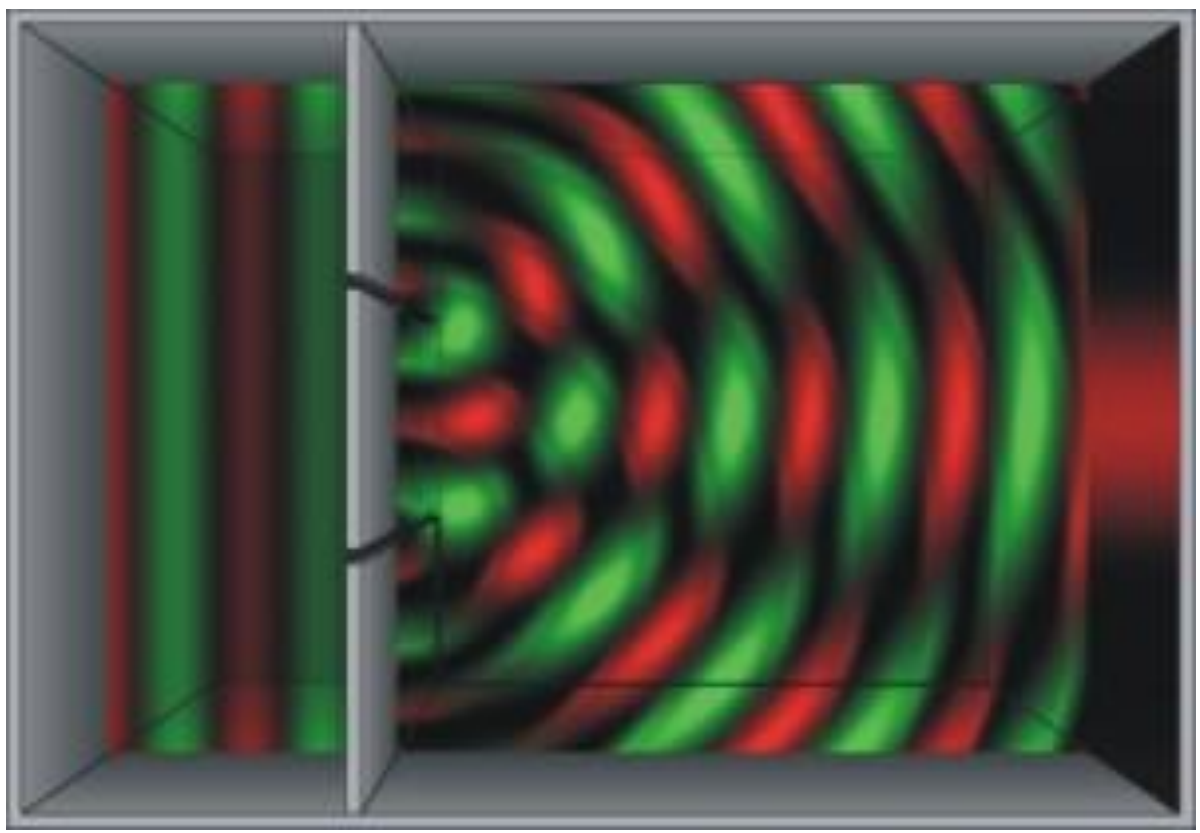
Licht wird durch ein Objekt mit Abmessungen vergleichbar zur Licht-wellenlänge abgelenkt.



für den Beugungs-bereich gilt: $\sin\alpha = \frac{\lambda}{d}$

Wellenoptik

Interferenz

Bei Überlagerung von kohärenten Licht kann es zur konstruktiven bzw. destruktiven Interferenz kommen, abhängig von der Relativphase.

Wasserwelle