

Inhalt der Vorlesung Physik A2 / B2

1. Einführung

Einleitende Bemerkungen

Messung physikalischer Größen

2. Mechanik

Kinematik

Die Newtonschen Gesetze

Anwendung der Newtonschen Gesetze

Koordinaten und Bezugssysteme

Arbeit und Energie

Starrer Körper, Rotationsbewegungen

Schwingungen, harmonischer Oszillator

Mechanische Wellen

Flüssigkeitsmechanik

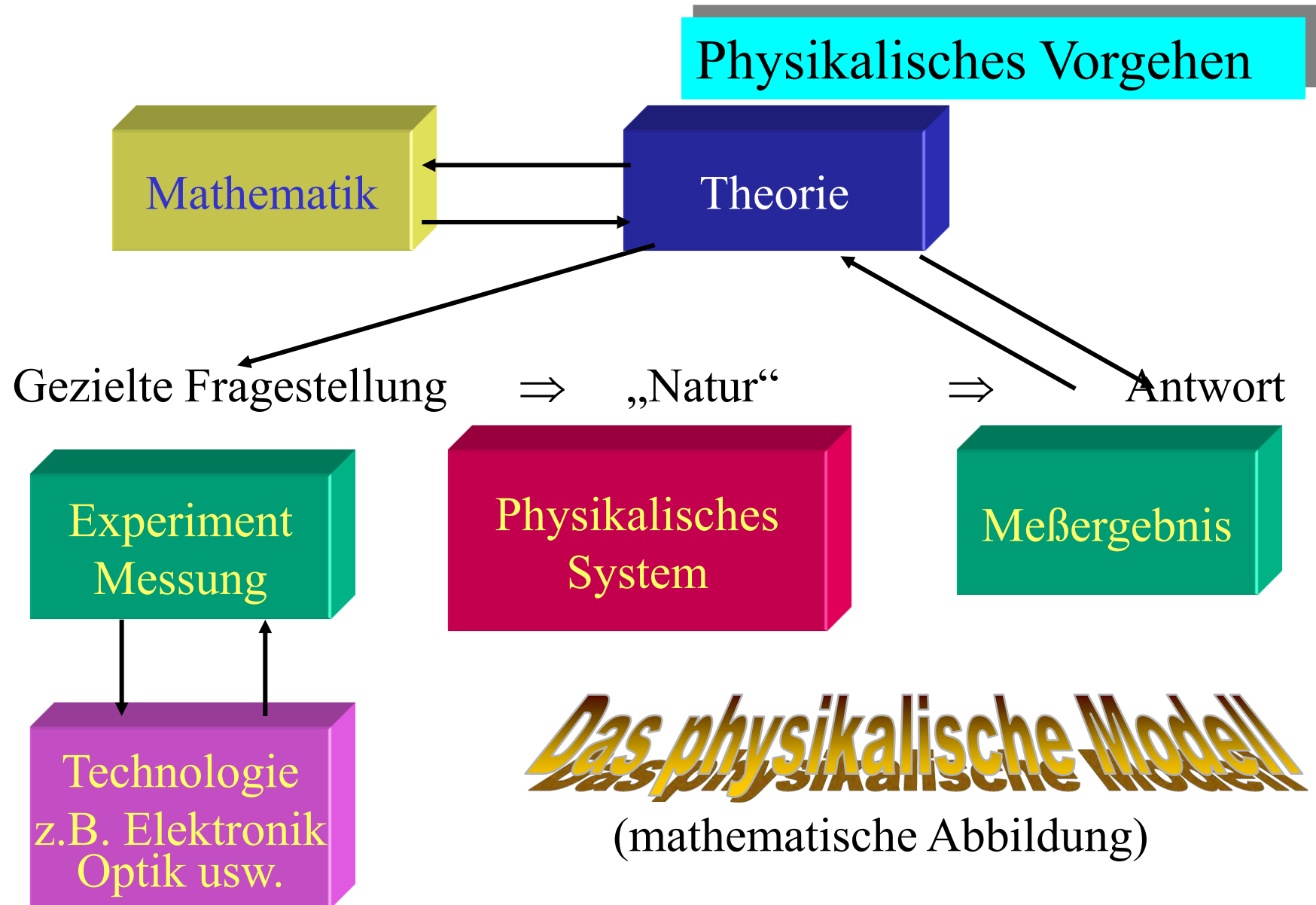
1.1 Einleitende Bemerkungen

Womit beschäftigt sich die Physik?

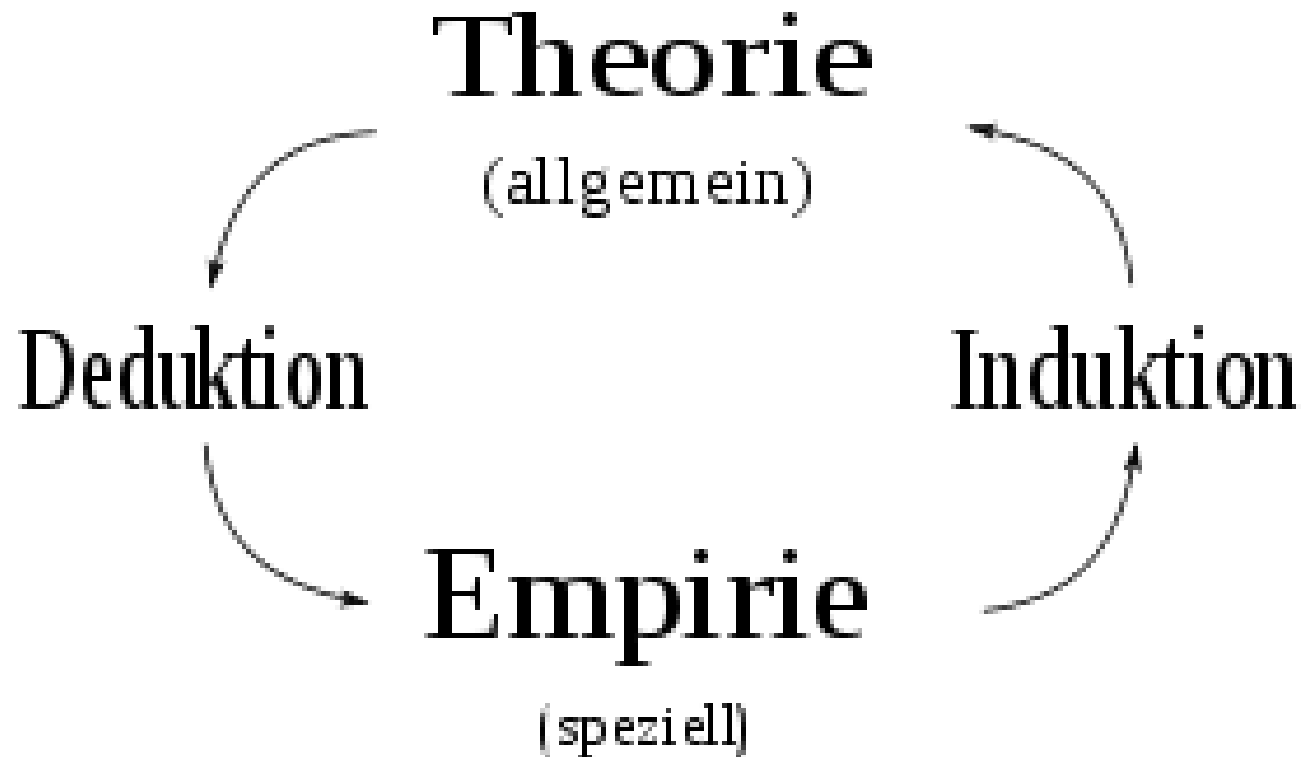
- Naturwissenschaft (Basisnaturwissenschaft für abgeleitete Fachrichtungen)
- Makroskopische Struktur und Verhalten der Materie *wie?, was?*
- Mikroskopische Struktur, Bausteine (ab ~ 1900) *warum?*

Grundabsichten physikalischer Beschreibung?

- Vereinheitlichung (möglichst viel mit den gleichen Gesetzmäßigkeiten beschreiben)
- Vereinfachung (angemessene Beschreibung für Phänomene)
etwa: Längenskala der Atomphysik uninteressant für Mechanik
- Experimenteller Test für Beschreibung, durch möglichst viele Gruppen,
gegenseitige Kontrolle, voller Informationsaustausch
- Idealisierung
Physikalische Beschreibung stets idealisiert, Physik nie abgeschlossen,
alte Modellvorstellung in neuer Modellvorstellung enthalten



Begriffe aus der Philosophie und Logik:



Womit
befaßt
sich
die Physik ?

Universum: Sternhaufen



Raum-Zeit-Dimensionen:

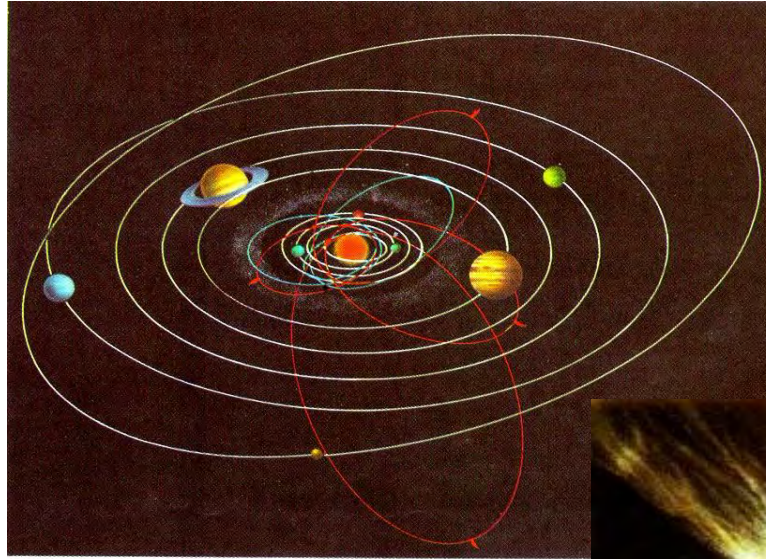
$$l_{\text{Distanz}} \approx 10^{23} \text{ km}$$

$$t \approx 2 \cdot 10^{10} \text{ Jahre}$$

Astrophysik, Teilchenphysik

Planetensystem

Kepler'sche
Gesetze der
Planetenbewegung



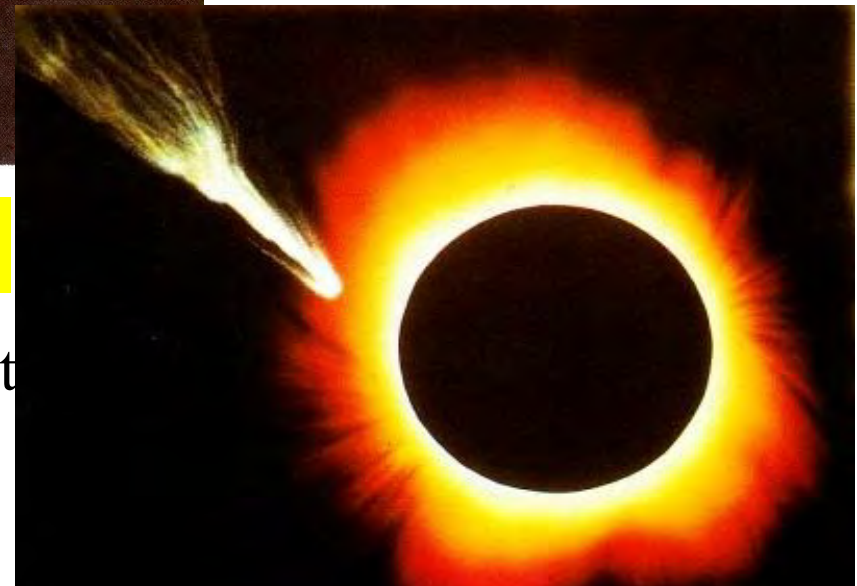
$$l_{\text{Distanz}} \approx 5 \cdot 10^9 \text{ km}$$

Kometen
Sonnenfinsternis



Die Sonne

Wie erzeugt
sie ihre
Energie ?



Astrophysik, Teilchenphysik



Die Erde

Raum-Zeit-
Dimensionen:

$$l_{\text{Distanz}} \approx 6000 \text{ km}$$

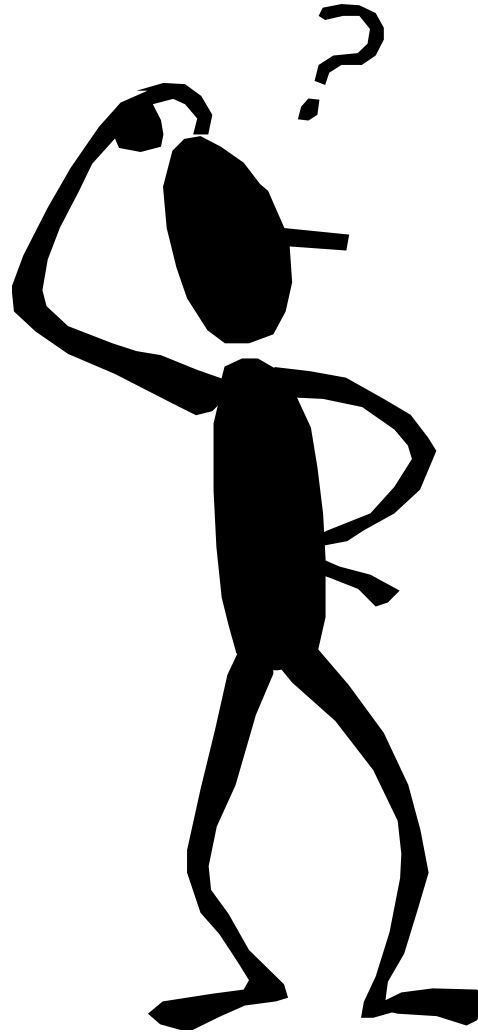
$$t \approx 24 \text{ Stunden}$$

Geophysik, Meteorologie

Der Mensch



1 m



$$l_{\text{Distanz}} \approx 1 \text{ m}$$

$$t \approx 1 \text{ s}$$

Der Mensch

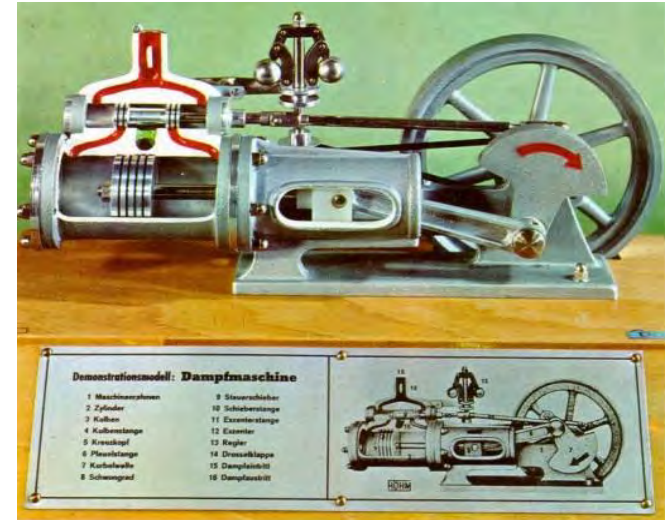
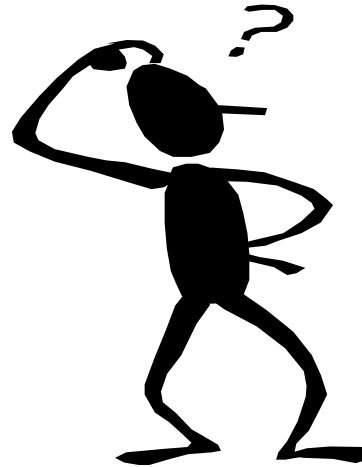
Raum-Zeit-Dimensionen
des Alltags:

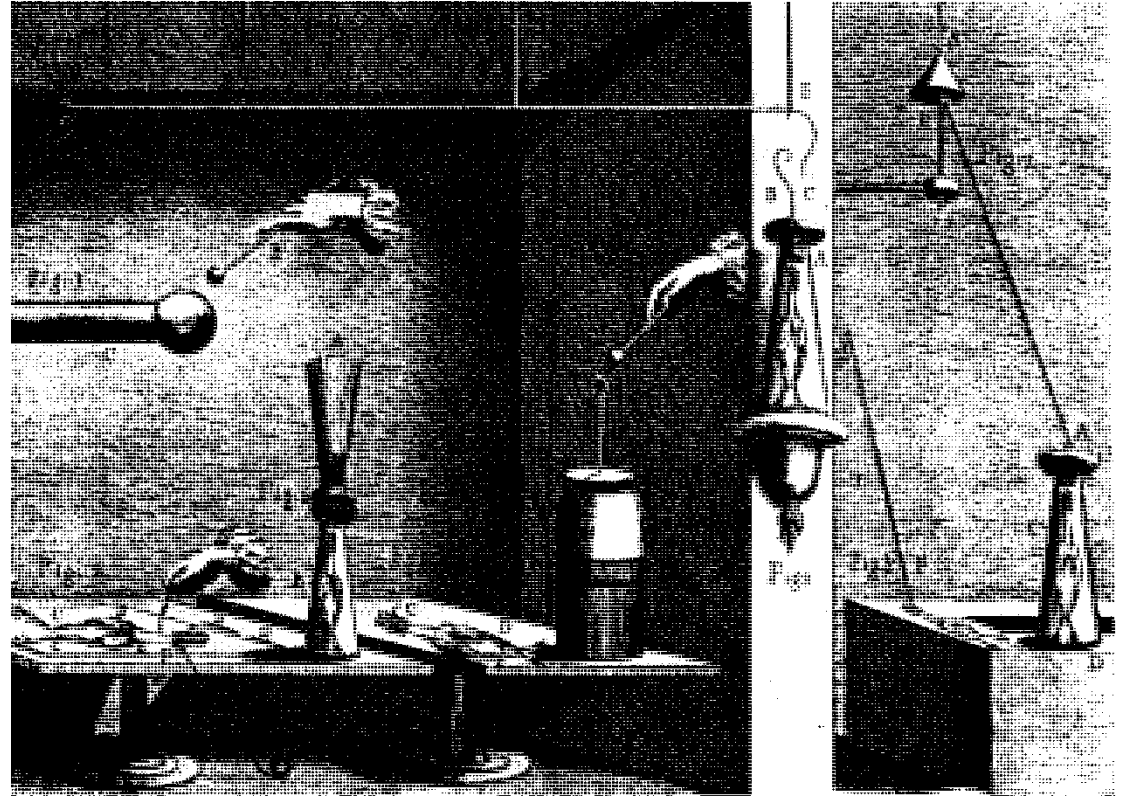
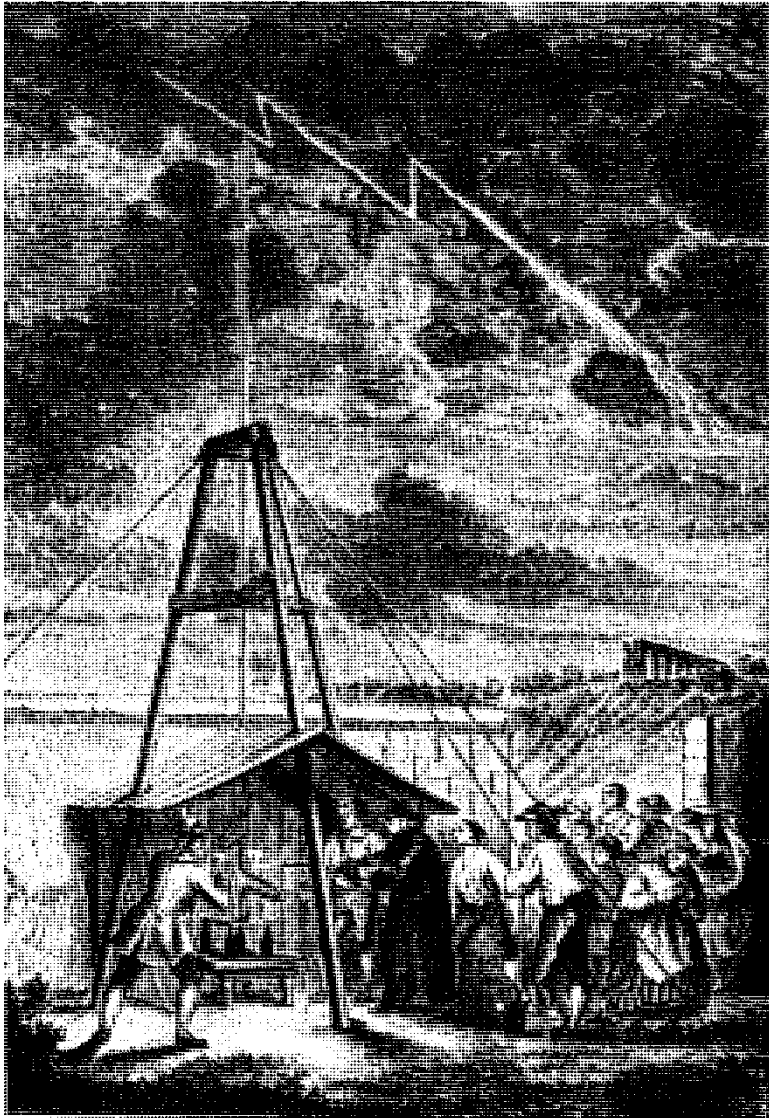
$$l_{\text{Distanz}} \approx 1 \text{ m}$$

$$t \approx 1 \text{ s}$$

Mechanik
Thermodynamik
Elektrodynamik

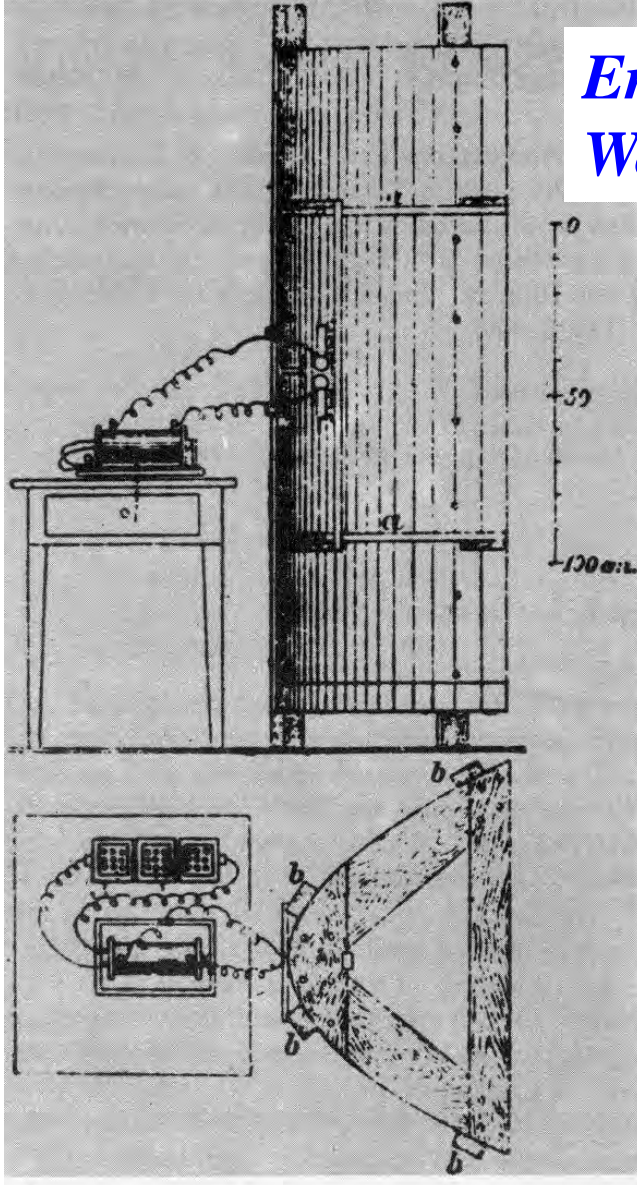
1 m



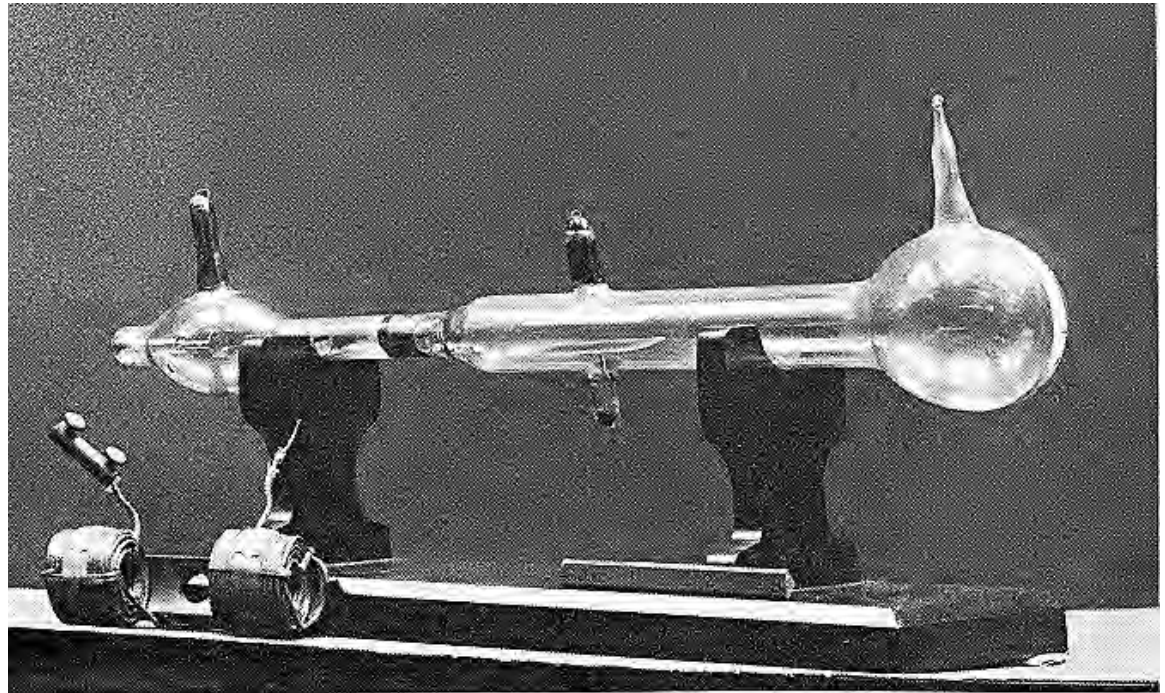


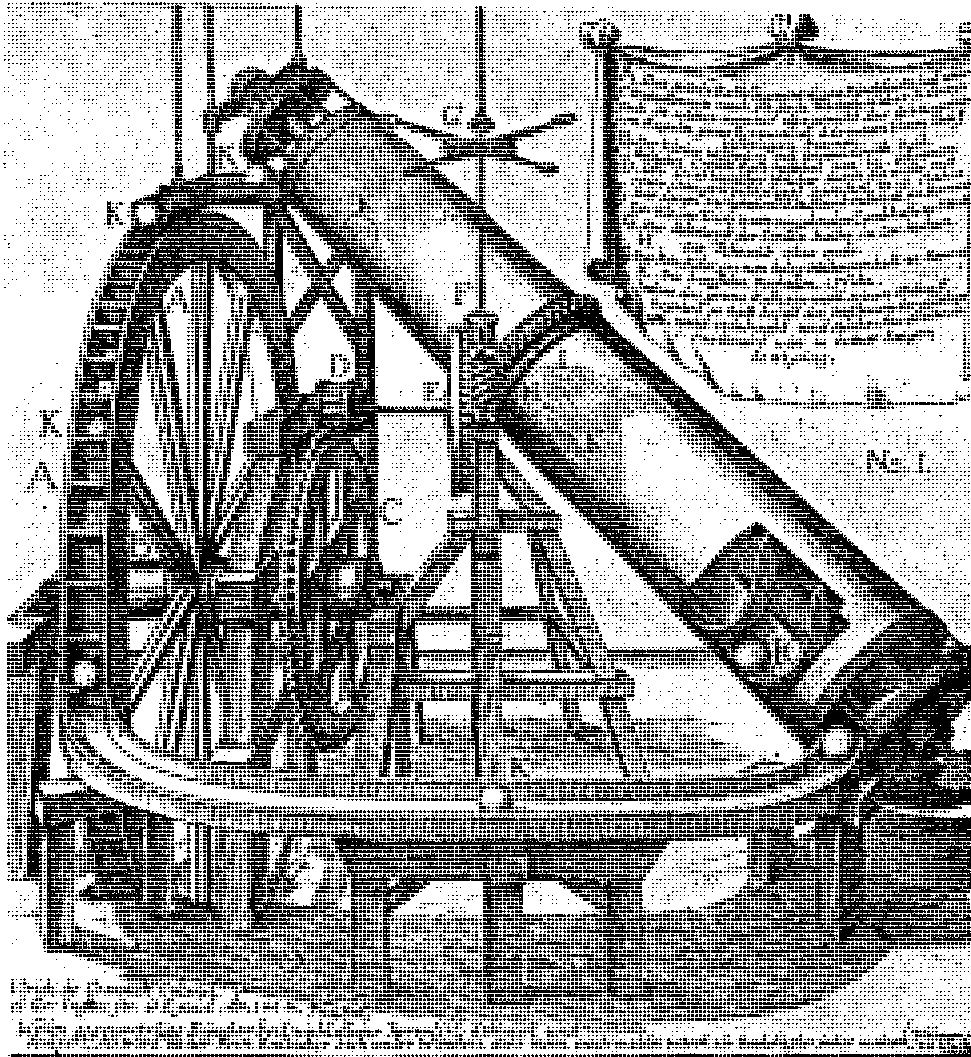
Erste Studien der Elektrizität durch
Blitze und zuckende Froschschenkel

*Erste Erzeugung elektromagnetischer
Wellen durch Heinrich Hertz 1888*



*Vakuumpöhre zum erstmaligen Nachweis
der Elektronen durch J.J. Thompson 1897*

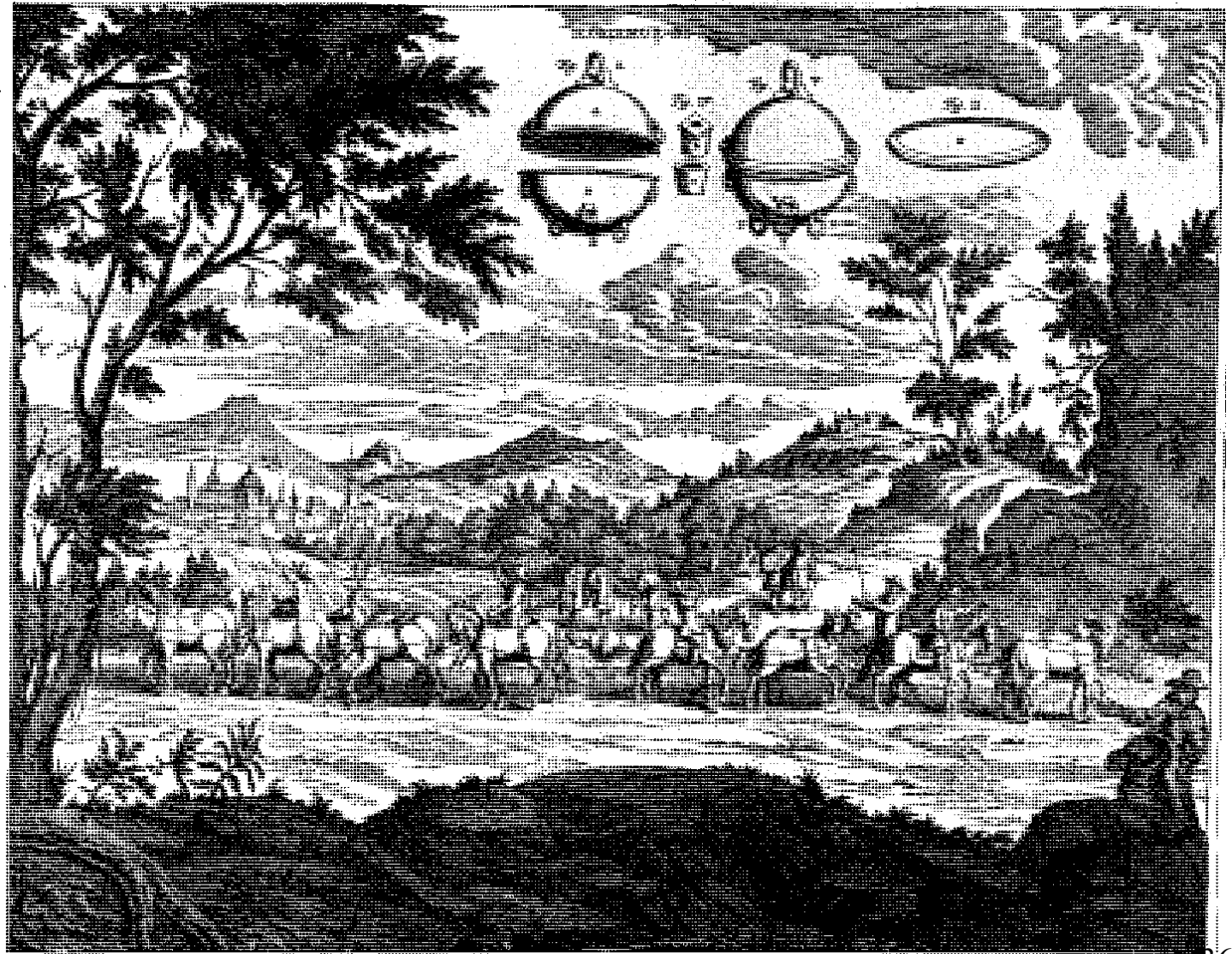




Irrwege:
das perpetuum mobile



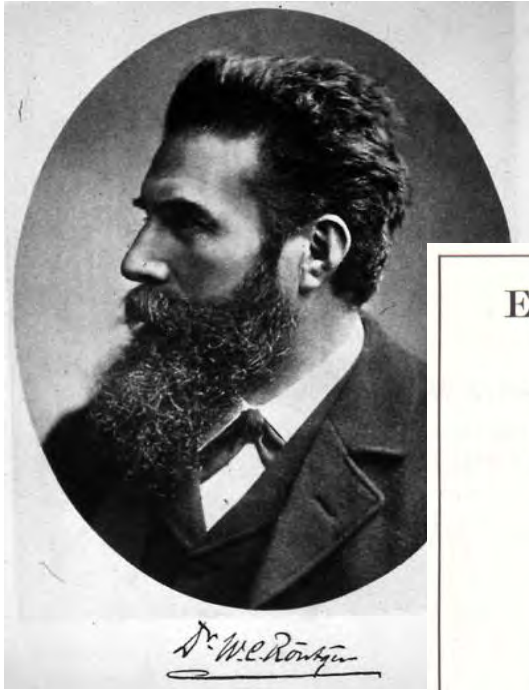
Erste Experimente mit Vakuum



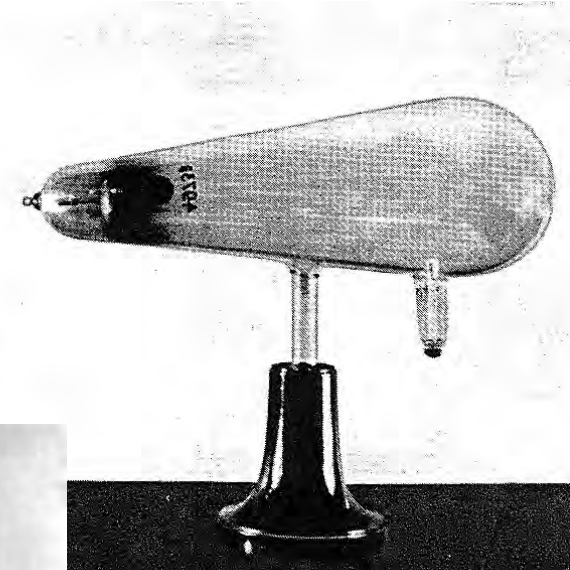
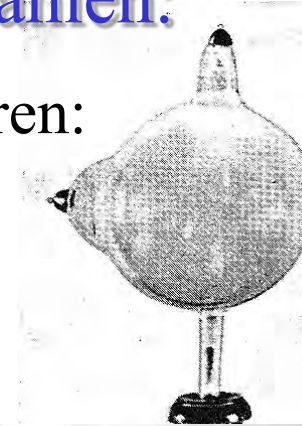
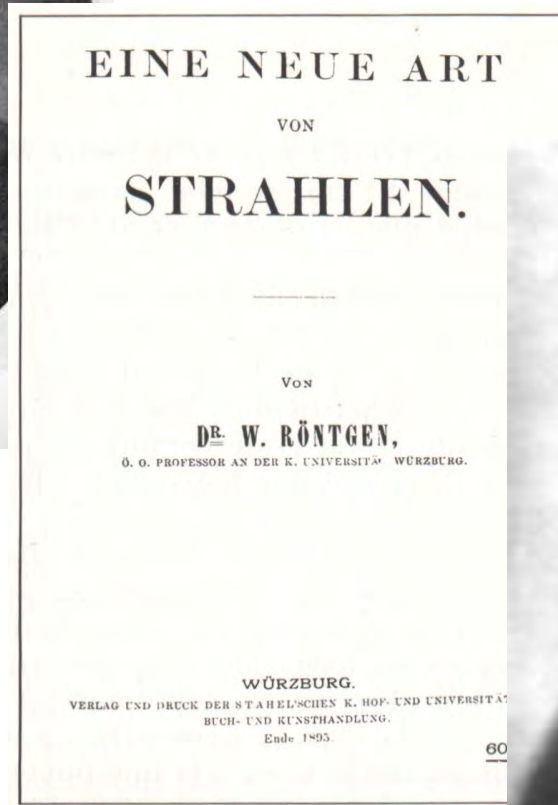
Tafel 11

Unsichtbare, durchdringende Strahlen:

Erste Röntgenröhren:



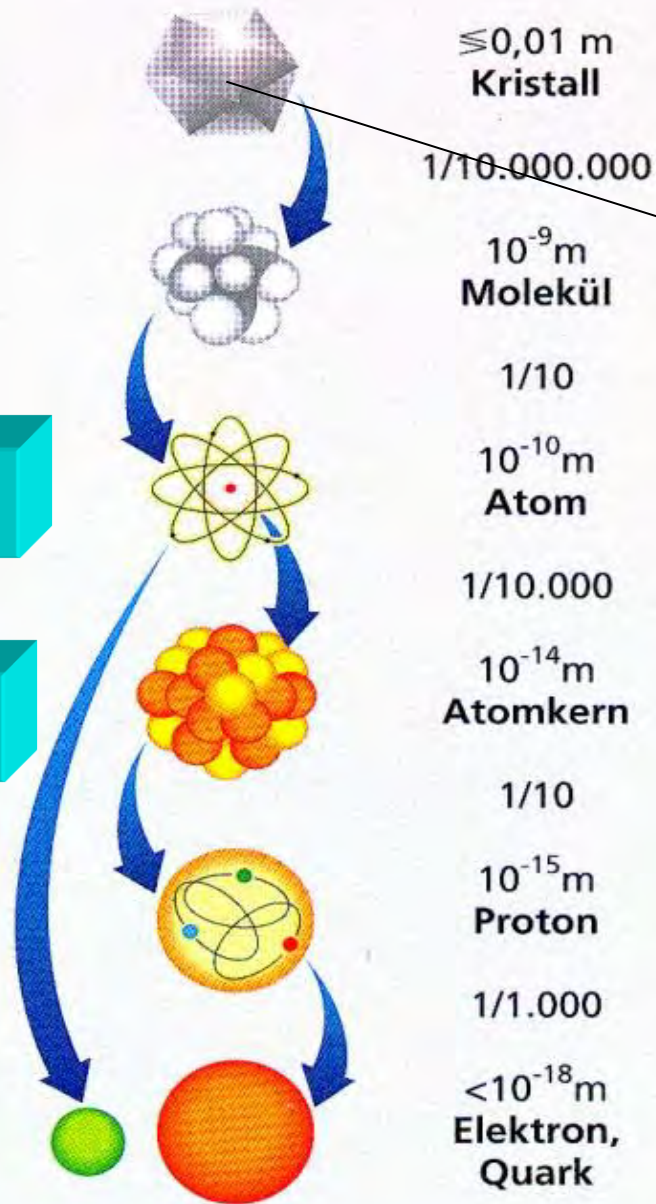
1895



Eindringen
in die
Struktur
der
Materie

Atomphysik

Kernphysik



DÖRIS III/HASYLAB

Synchrotronstrahlung

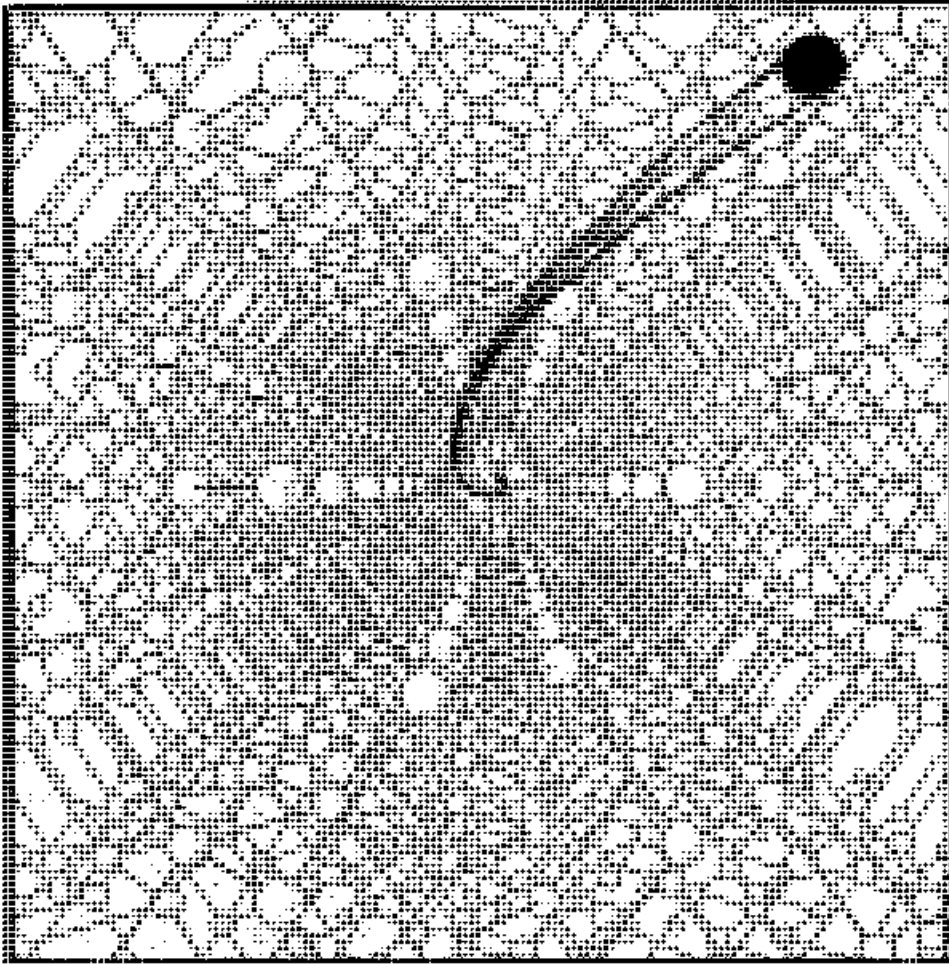
HERA

Teilchenphysik

Festkörperphysik
Chemie



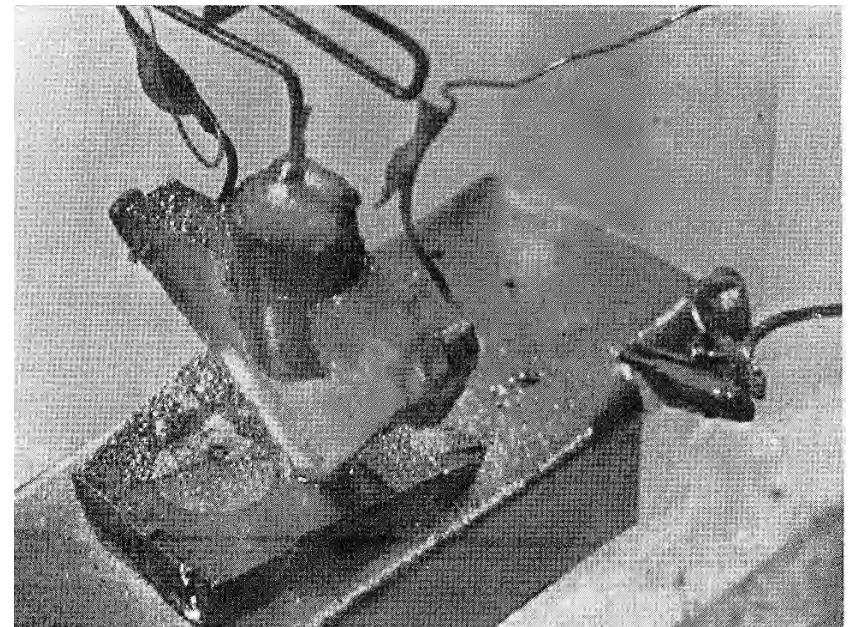
Elementarteilchen-
physik

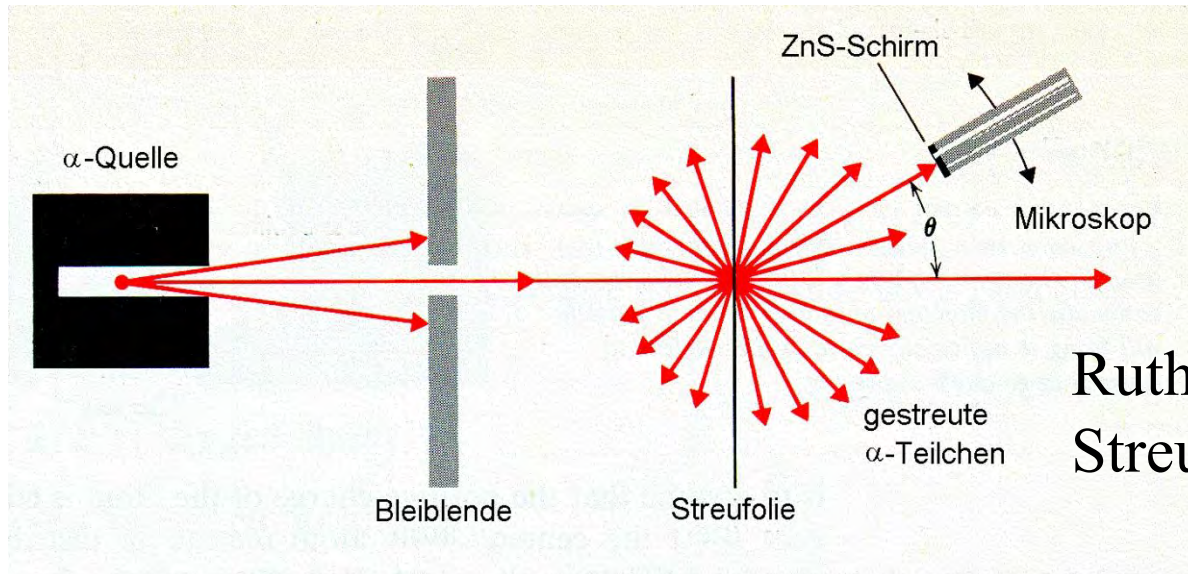


Blick in ein Kristallgitter

Technische Anwendungen

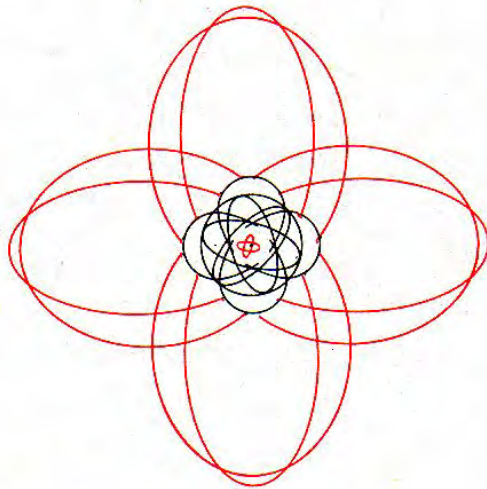
Der erste Transistor



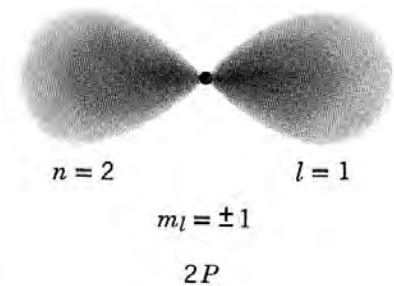
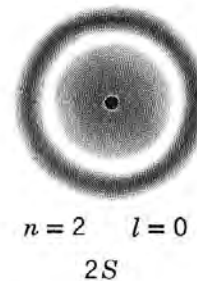
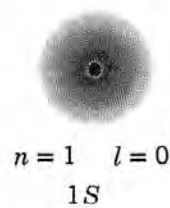


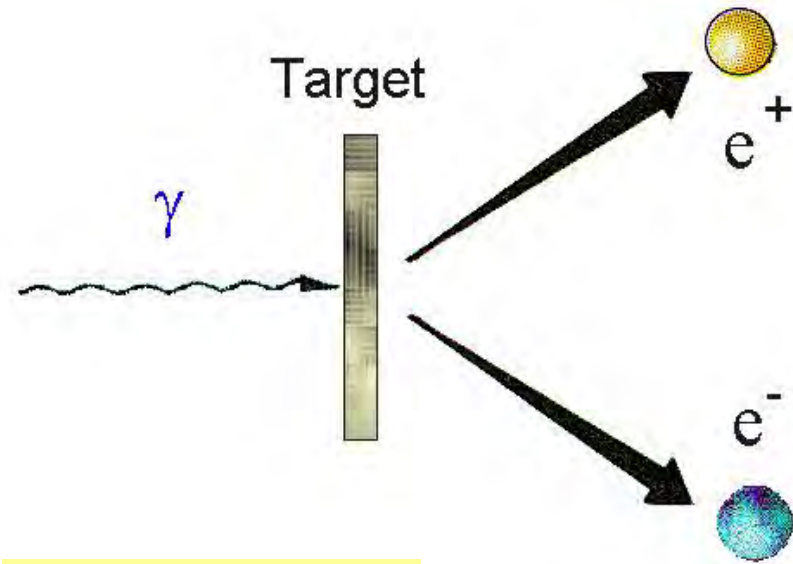
Entdeckung der Struktur der Atome

Rutherford'sches Streu-Experiment ab 1912



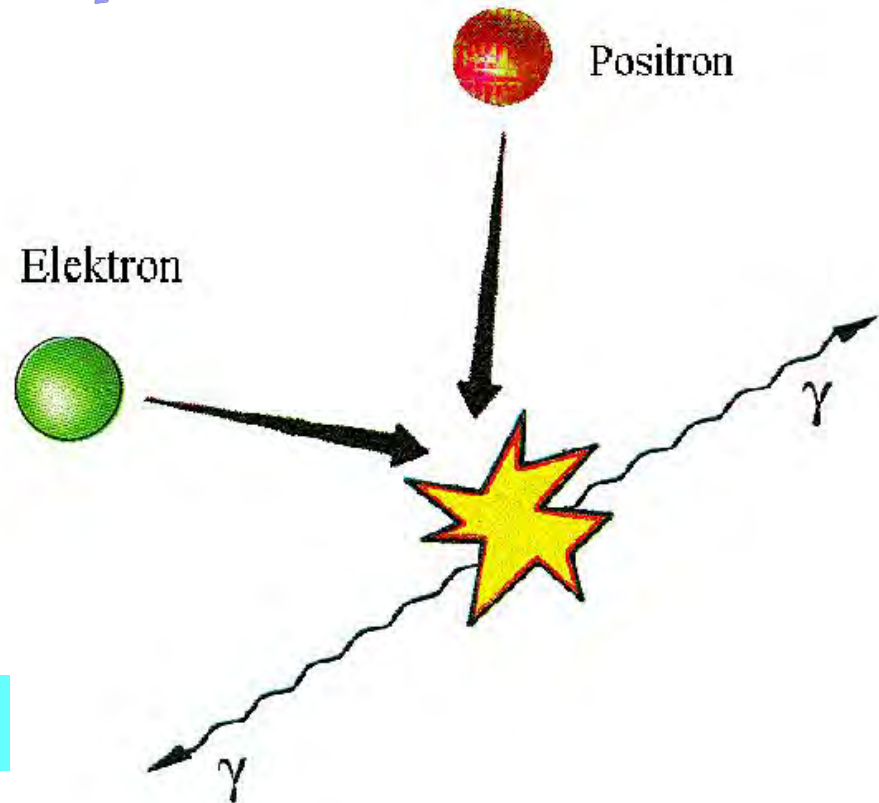
Argon





Paarerzeugung

Antiteilchen


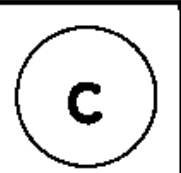
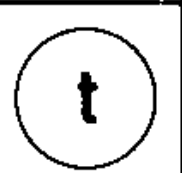

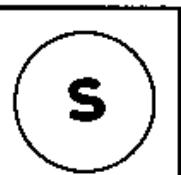
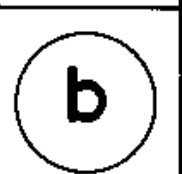


Zerstrahlung

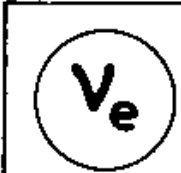
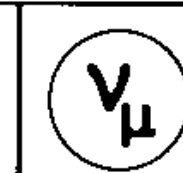
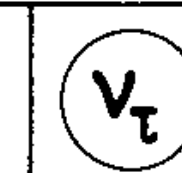
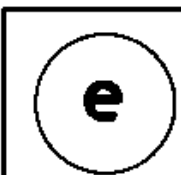
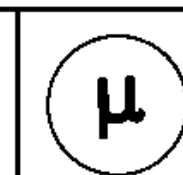
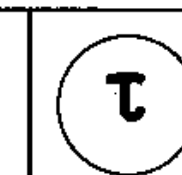
Die elementaren Bausteine der Materie

Die elementaren Bausteine der Materie

Elektrische
Ladung**Quarks**

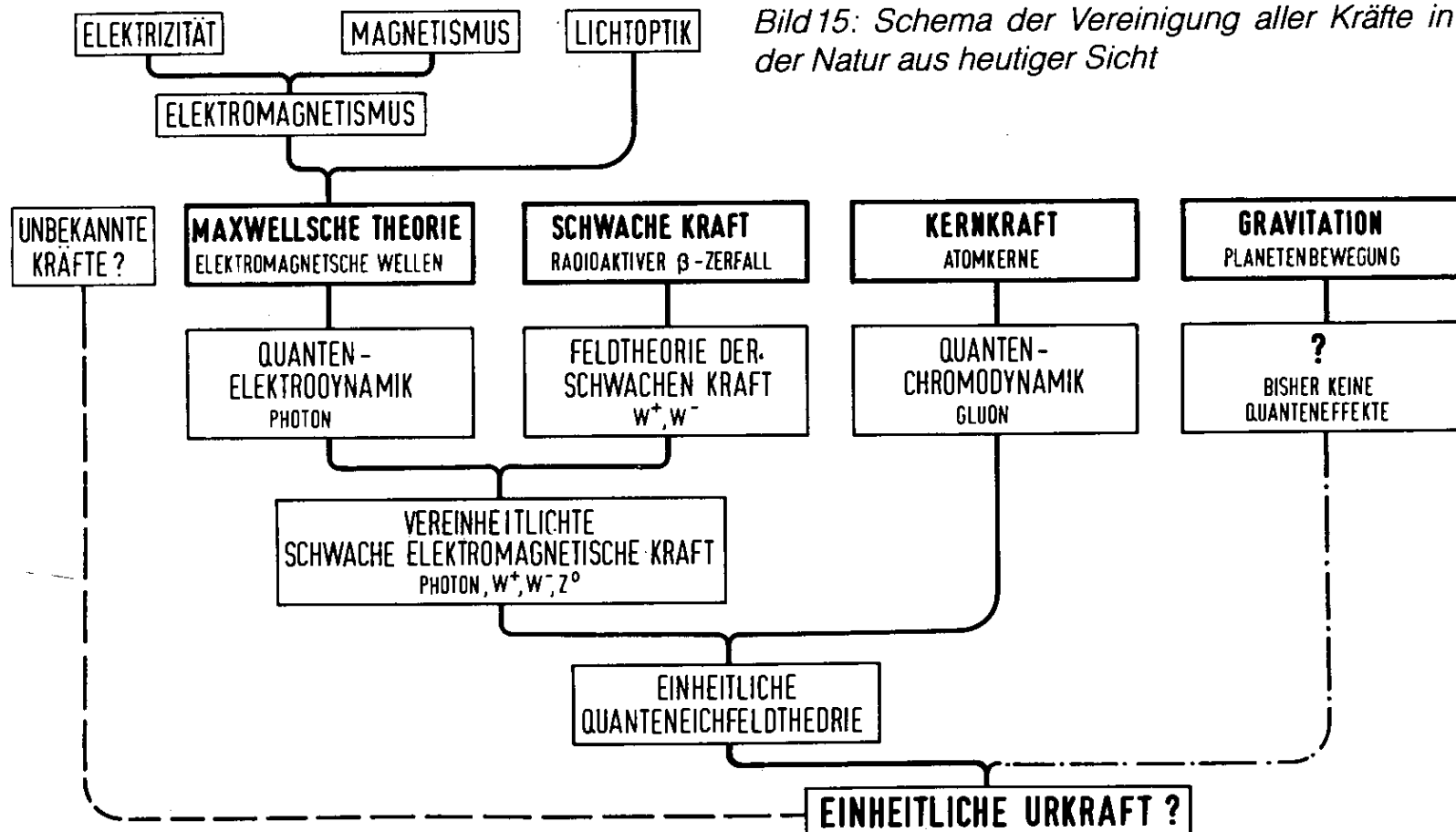
2/3			
	up	charm	truth
-1/3			
	down	strange	beauty

Elektrische
Ladung**Leptonen**

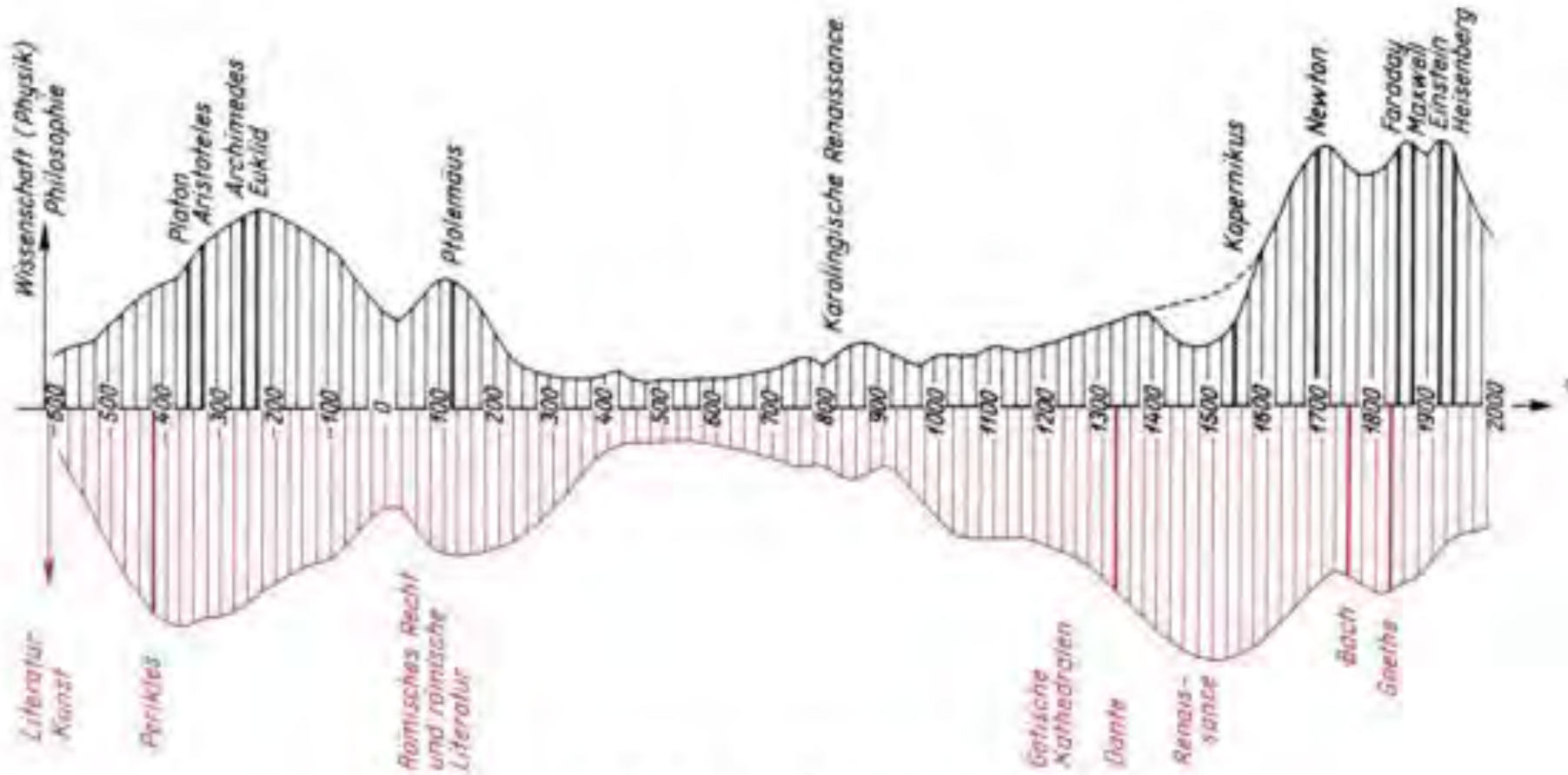
0			
	Elektron- Neutrino	Myon- Neutrino	Tau- Neutrino
-1			
	Elektron	Myon	Tau

$$l_{\text{Distanz}} \approx 10^{-17} \text{ m} \quad t \approx 10^{-24} \text{ s}$$

Die elementaren Kräfte



Historische Entwicklung



aus K. Simonyi: Kulturgeschichte der Physik

Historische Übersicht

	- 600	+ 529	1543	1687	1900
Epoche	DAS ANTIKE ERBE	DIE HÜTER DES ERBES	ENDE UND NEUBEGINN	DIE ENTFALTUNG DER KLASSISCHEN PHYSIK	PHYSIK DES 20. JAHRHUNDERTS
Verhältnis der Wissenschaft zur Religion	unabhängig	„Magd der Theologie“	unabhängig		
Verhältnis zwischen Idee und Realität	DER MENSCHLICHE VERSTAND IST FAHIG, DIE WELT ZU ERKENNEN				
	auch die Grundprinzipien	mit Hilfe des Glaubens	mit Hilfe der Empirie		
Wichtige Ergebnisse	Geometrie, Statik, beschreibende Astronomie	Qualität → Quantität Impetus-Theorie	Vereinigung irdischer und himmlischer Gesetze, Klärung der Methode	klassische Mechanik, Elektrodynamik	Relativitätstheorie, Quantenmechanik
Zentrale Persönlichkeiten	ARISTOTELES	THOMAS VON AQUINO	GALILEI DESCARTES	NEWTON MAXWELL	PLANCK EINSTEIN HEISENBERG
Charakter der Naturgesetze	EWIGE WAHRHEITEN deterministisch			APPROXIMATIONEN statistisch	

Tabelle 0.4 – 1

Charakteristika der Epochen in stark vereinfachter Darstellung

Die Bedeutung der (willkürlich gewählten) Epochengrenzen:

– 600 Beginn der Lehrtätigkeit ionischer Philosophen

+ 529 Kaiser *Justinian* lässt die letzten Philosophenschulen in Athen schließen.

Im selben Jahre gründet der heilige *Benedikt* seinen Mönchsorden

1543 Erscheinen des Buches *De revolutionibus...* von *Kopernikus*

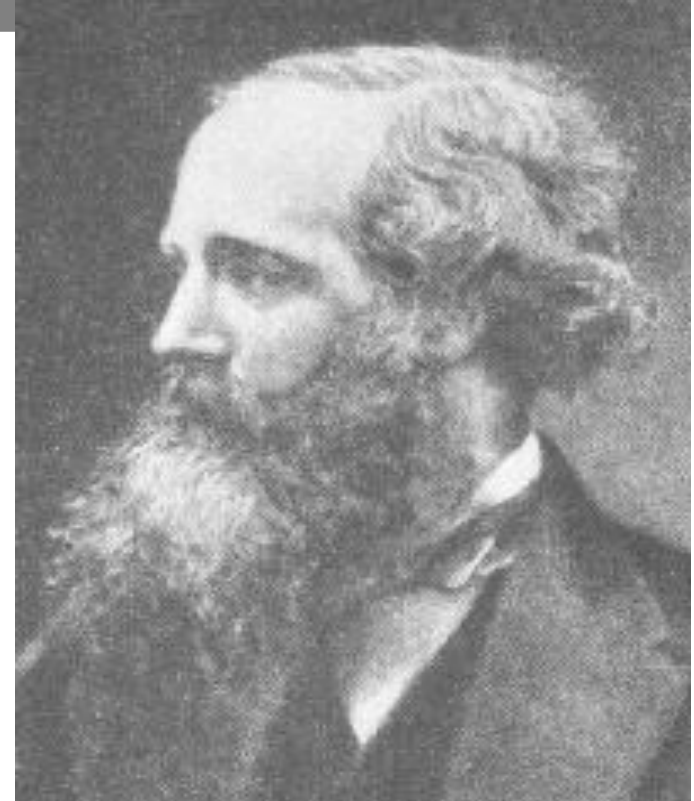
1687 Erscheinen der *Principia Newtons*

1900 Geburt der Planckschen Quantentheorie

Personen



für die Mechanik
Newton (1643-1727)



für die Elektrodynamik
Maxwell (1831-1879)

1.2 Messung physikalischer Größen / 1.21 Basiseinheiten

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

Basiseinheiten:

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

Physikalische Größe =
Maßzahl · Maßeinheit

Das gebräuchlichste Maßsystem ist
das SI-System:
„Standard International Units“

Zusammengesetzte Größen:

$$\begin{aligned}\text{Kraft} &= \text{Masse} \cdot \text{Beschl.} [\text{kg m/s}^2] \\ &= \text{Newton [N]}\end{aligned}$$

Raum-Zeit-Dimensionen

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 1.5 Größenordnungen verschiedener Zeitintervalle

Zeitintervall	s
Licht durchquert einen Atomkern	10^{-23}
Schwingungsperiode von sichtbarem Licht	10^{-15}
Schwingungsperiode von Mikrowellen	10^{-10}
Halbwertszeit eines Myons	10^{-6}
Schwingungsperiode der höchsten hörbaren Töne	10^{-4}
Zeit zwischen zwei Herzschlägen beim Menschen	10^0
Halbwertszeit eines freien Neutrons	10^3
Dauer einer Erdumdrehung (Tag)	10^5
Dauer einer Drehung der Erde um die Sonne (Jahr)	10^7
Lebensdauer eines Menschen	10^9
Halbwertszeit von Plutonium-239	10^{12}
Lebensdauer einer Gebirgskette	10^{15}
Alter der Erde	10^{17}
Alter des Universums	10^{18}

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}

atto, a	10^{-18}
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}
exa, E	10^{18}

Definition der Basiseinheiten

SI-
Einheiten

Meter

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

Kilogramm

1 kg ist die Masse des internationalen Kilogrammtyps (Fehler: $\Delta m/m \approx 2 \cdot 10^{-8}$)

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

$$F = 2 \cdot 10^{-7} \text{ N}$$

erzeugt (Fehler: $\Delta F/F \approx 2 \cdot 10^{-8}$)

SI-Einheiten

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	Ω = 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

Viele physikalische Größen hängen auf wohldefinierte Weise von anderen Größen ab. Die Verknüpfung wird in der Regel durch eine **Formel** angegeben.

Beispiel:

$$\text{Geschwindigkeit} = \frac{\text{Weg}}{\text{Zeit}}$$

Oder in symbolischer Schreibweise:

$$v = \frac{s}{t}$$

Die von der Wahl des speziellen Maßsystems unabhängige Relation „Weg durch Zeit“ bestimmt die Dimension der Geschwindigkeit, beispielsweise im SI-System zu m/s. Alle zusammengesetzten Größen können so auf die Basisgrößen zurückgeführt werden.

1.2.2 Statistische Meßfehler und Fehlerrechnung

Alle Messungen in der Physik sind mit Fehlern behaftet.

1. Systematische Fehler:

- keine Methode der Behandlung
 - werden oft nicht erkannt
 - sind schwer abzuschätzen
- Ursachen: Fehler der Meßinstrumente, nicht optimale Auslegung des Experiments in Bezug auf die Fragestellung.

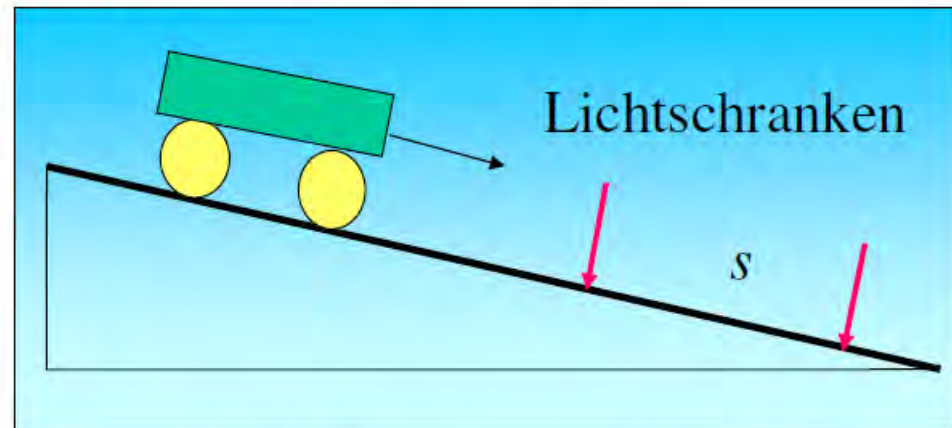
2. Statistische Fehler:

Schwankungen der Meßwerte bei Meßreihen.

Angabe eines Wertes:

$$x \pm \Delta x_{\text{sys}} \pm \Delta x_{\text{stat}}$$

Beispiel: Statistischer Fehler



Es werden n Messungen der Durchlaufzeit vorgenommen:

$$t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$$

Wahrscheinlichster Wert (Mittelwert):

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

Damit ist noch nichts über die Güte einer Messung ausgesagt.

1. Versuch: Maß für den Meßfehler

~~$$\begin{aligned}\langle \Delta t \rangle &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta t_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - \langle t \rangle) \\ &= \frac{1}{n} \underbrace{\sum_{i=1}^n t_i}_{=\langle t \rangle} - \frac{1}{n} \underbrace{\sum_{i=1}^n \langle t \rangle}_{=\langle t \rangle} = 0\end{aligned}$$~~

2. Versuch:

$$\begin{aligned}\sigma^2 &= \langle (\Delta t)^2 \rangle = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta t_i)^2 \\ &= \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_i - \langle t \rangle)^2\end{aligned}$$

Ein Meßwert hat also immer die Form

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

Wert = Mittelwert \pm Standardabweichung

Ideale Messung: $t = \langle t \rangle$ und $\sigma = 0$

Die Güte der Messung, d.h. der relative Fehler, ist durch $\sigma/\langle t \rangle$ gegeben.

Beispiel:

Meßergebnisse:

Nr.	Zeit t [s]
1	1.34
2	1.29
3	1.31
4	1.33
5	1.28

Für das Beispiel ergibt sich:

$$\sum_{i=1}^5 t_i = 1.34s + 1.29s + 1.31s + 1.33s + 1.28s = 6.55s \quad \Rightarrow \quad \langle t \rangle = \frac{6.55s}{5} = 1.31s$$

$$\sum_{i=1}^5 (t_i - \langle t \rangle)^2 = (0.03s)^2 + (-0.02s)^2 + 0^2 + (0.02s)^2 + (-0.03s)^2 = 0.0026s^2$$

Daraus folgt für die Standardabweichung:

$$\sigma = \sqrt{\langle (\Delta t)^2 \rangle} = \sqrt{\frac{0.0026s^2}{4}} = 0.0255s \approx 0.03s$$

$$\text{Meßwert:} \quad t = (1.31 \pm 0.03)s$$

$$\text{Relativer Fehler:} \quad \frac{\Delta t}{t} = \frac{\sigma}{\langle t \rangle} = 0.02 = 2 \cdot 10^{-2}$$

Generell gilt für Meßwerte:

Meßwert: $t = (1.31 \pm 0.03) \text{ s}$

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

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

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

Ein Meßwert befindet sich mit 68.3% iger Wahrscheinlichkeit im Intervall einer Standardabweichung und mit 94.4% iger Wahrscheinlichkeit im Intervall von zwei Standardabweichungen um den Mittelwert.