

1. Einleitung

1.1 Die Aufgaben der Physik

1.2 Methodik

1.3 Bedeutung des Messens, Messinstrumente

1.4. Messgenauigkeit und Messfehler

1.5 Maßeinheiten, Messinstrumente

1.1 Die Aufgaben der Physik

PHYSIK

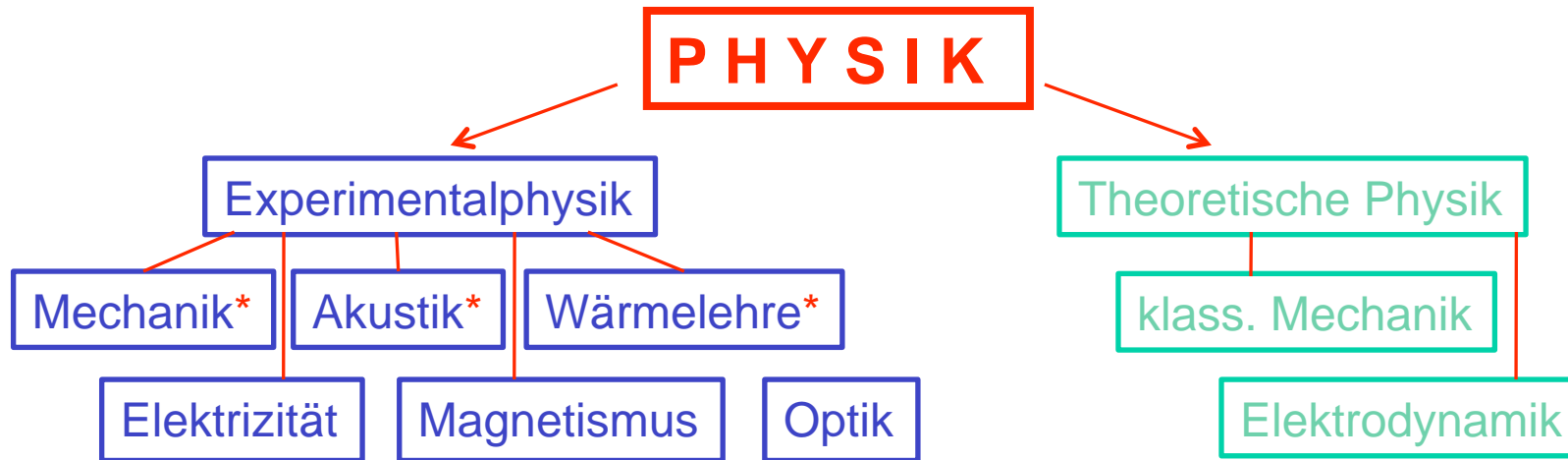
aus lat. *physica* = Naturlehre
von griech. *φυσικ* = Ursprung, Naturordnung, das Geschaffene

⇒ Naturwissenschaft

- erforscht experimentell (Experimentelle Physik) und
- beschreibt mathematisch (Theoretische Physik)

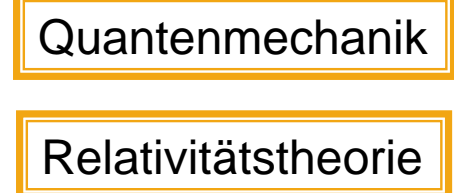
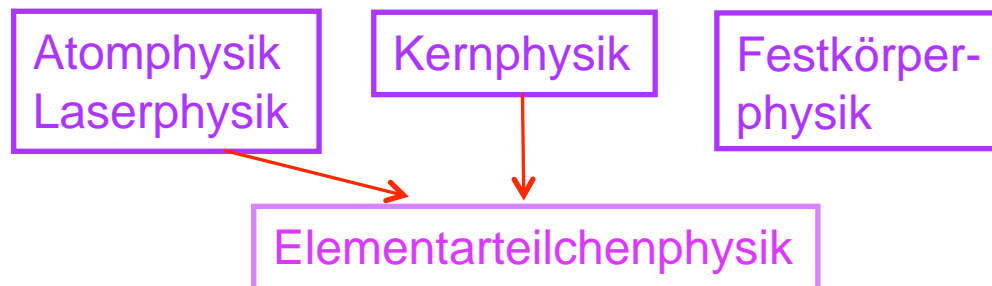
- Naturvorgänge (alle, von den kleinsten bis zu den größten Skalen)
- Erscheinungs- und Zustandsformen der Materie
- Kräfte u. Wechselwirkungen zwischen Materiebausteinen

- **Physik ist eine grundlegende Wissenschaft für alle Naturwissenschaften**



klassisch

Quanteneffekte



Quantenfeldtheorien

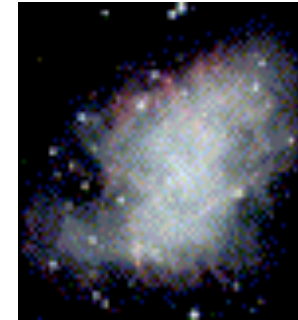
- Quantenelektrodynamik
- Quantenchromodynamik
→ Standardmodell der Physik
- (Quantengravitation)

*) in dieser Vorlesung behandelt

Motivation und Zielsetzung der Physik

Grundlegende Fragen:

- Woraus besteht die Materie, die uns umgibt ?
- Ist sie teilbar ? Wenn ja, wie weit ?
- Welche Kräfte wirken zwischen den Bausteinen?

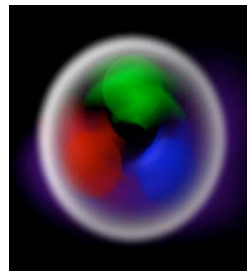


Zielsetzung:

Einheitliche und umfassende Beschreibung der Materie
und ihrer Wechselwirkungen

von kleinsten Abständen (10^{-18} m)

bis zu kosmischen Dimensionen (10^{25} m)



History of the Universe

BIG BANG

Inflation

t	10^{-44}	10^{-37} s
T	10^{32}	10^{28}
E	10^{19}	10^{15}

possible dark matter relicts

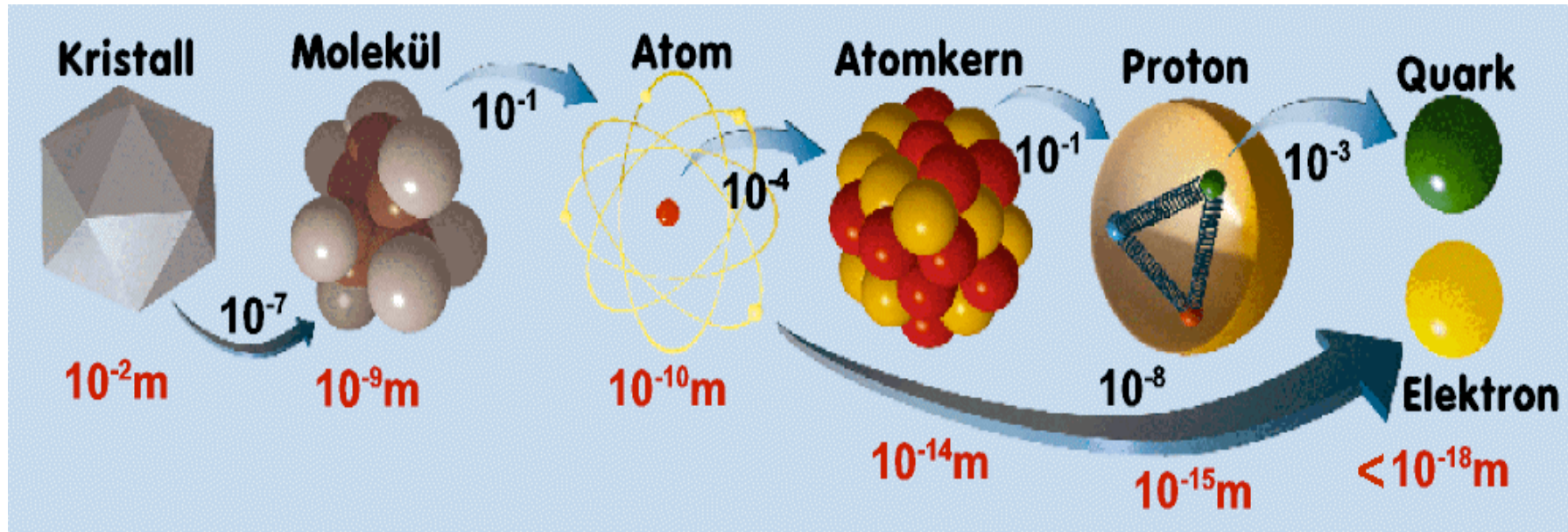
cosmic microwave radiation visible

Key:

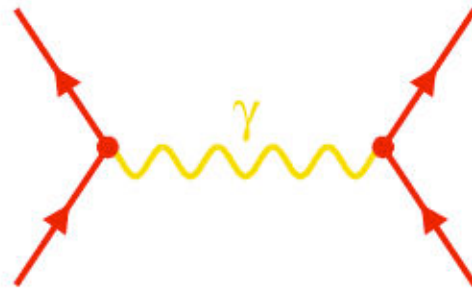
q quark	W,Z bosons	photon
g gluon	meson	star
e electron	baryon	galaxy
m muon	ion	black hole
n neutrino	atom	

10^{-10} s	10^{-5} s	10^2 s	3×10^5 y	Today
10^{15}	10^{12}	10^9	3000	12×10^9 y (sec,yrs)
10^2	10^{-1}	10^{-4}	3×10^{-10}	15 (Kelvin)
				2.3×10^{-13} (GeV)

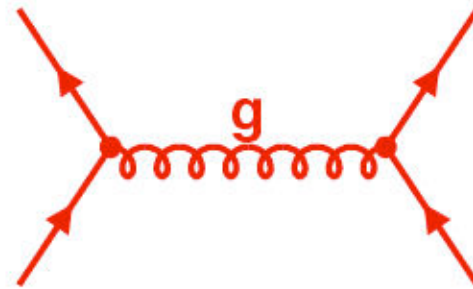
Auf dem Weg zu den kleinsten Bausteinen:



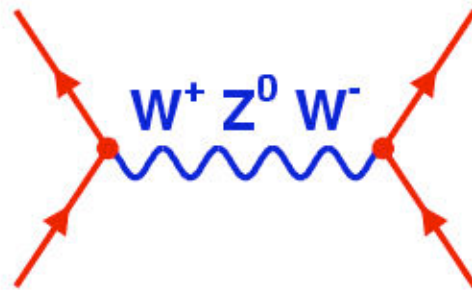
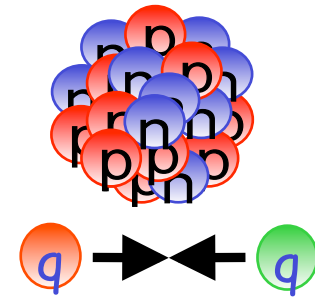
Kräfte und Austauschteilchen



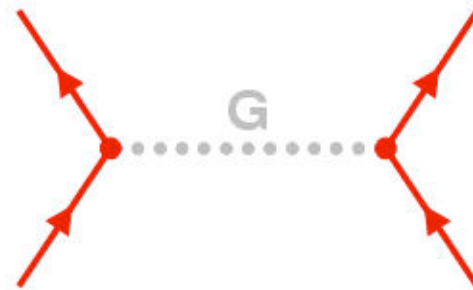
elektromagn. Kraft



starke Kraft

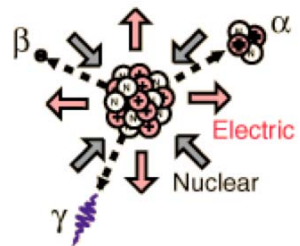


schwache Kraft



Gravitation

Schwächste 'Kraft',
im Mikrokosmos
unbedeutend



1.2 Die Methodik der Physik

Experimentelle Beobachtung

Gezielte Durchführung von Experimenten!

(z.T. unter **idealisierten** Bedingungen, Ausschalten von Störeffekten, z.B.: Reibung)

⇒ Versuchsaufbau in einem Labor

Experiment: = „Frage an die Natur“

Messung

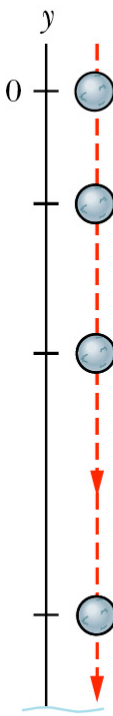
Vergleich mit einer Referenz (Einheit).

z.B.: Messung der Fallzeit einer Stahlkugel im Schwerfeld der Erde

Physikalische
Messgröße = Betrag + Einheit

T = {t} [t]

T = 3.13 sec



	t	y	v	a
	(s)	(m)	(m/s)	(m/s ²)
0	0	0	0	-9.8
1	1	-4.9	-9.8	-9.8
2	2	-19.6	-19.6	-9.8
3	3	-44.1	-29.4	-9.8
		-48.0		-9.8

Je nach Größenordnung der Messgröße entstehen in der Einheit sehr kleine oder sehr große Zahlenwerte

- ⇒ Benutzung von Vorsilben (Untereinheiten)
- int. definierte Vorsätze (SI = système international)
- i. Allg. Abstufungen von $10^3 = 1000$

Verkleinerungen			Vergrößerungen		
Faktor	Vorsätze	Vorsatzzeichen	Faktor	Vorsätze	Vorsatzzeichen
10^{-1}	Dezi	d	10^1	Deka	da
10^{-2}	Zenti	c	10^2	Hekto	h
10^{-3}	Milli	m	10^3	Kilo	k
10^{-6}	Mikro	μ	10^6	Mega	M
10^{-9}	Nano	n	10^9	Giga	G
10^{-12}	Pico	p	10^{12}	Tera	T
10^{-15}	Femto	f	10^{15}	Peta	P
10^{-18}	Atto	a	10^{18}	Exa	E
10^{-21}	Zepto	z	10^{21}	Zetta	Z
10^{-24}	Yokto	y	10^{24}	Yotta	Y

Beispiele: 1 nm (Nanometer) = 10^{-9} m, 1 MW (Megawatt) = 10^6 Watt

Ein weiterer wichtiger Punkt: Messgenauigkeit

			Messfehler	
Armbanduhr	:	3.1	\pm 0.4	sec
Stoppuhr	:	3.13	\pm 0.01	sec
elektr. Messuhr	:	3.128248	\pm 0.000021	sec

⇒ Jede physikalische Messung besteht aus:

- **Zahlenwert**
- **Einheit**
- **Fehlerangabe**

Beispiel:

$$t = 3.13 \text{ sec} \pm 0.01 \text{ sec}$$

$$t = (3.13 \pm 0.01) \text{ sec}$$

$$t = \{ t \pm \Delta t \} [t]$$

Auswertung:

Erkennen von Gesetzmäßigkeiten

z.B.: durch Variation der Versuchsbedingungen (Fallhöhe)

⇒ Erkenntnisse:

- (i) Eine Stahlkugel und eine Feder fallen gleich schnell (im Vakuum, unter Ausschaltung der Luftreibung)
- (ii) $t \sim \sqrt{y}$ (Fallstrecke)
- (iii) Die Geschwindigkeit der Kugel/Feder nimmt linear mit der Fallzeit zu
- (iv)

Wieso ??

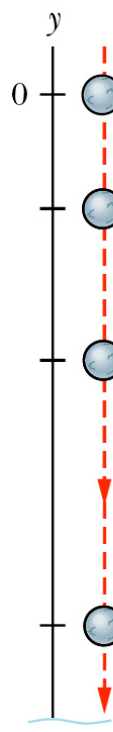


Theorie

Experiment



Theorie



t	y	v	a
(s)	(m)	(m/s)	(m/s ²)
0	0	0	-9.8
1	-4.9	-9.8	-9.8
2	-19.6	-19.6	-9.8
3	-44.1	-29.4	-9.8
	-48.0		-9.8

Interpretation / Theoretische Modelle:

Mathematik

Theoretisches Modell wird erstellt (nicht empirisch):

- abgeleitet aus tiefer liegender Erkenntnis einer fundamentalen Theorie
- besitzt Vorhersagekraft für viele Experimente
- → überprüfbar bzw. widerlegbar

Unser Beispiel:

Sir Isaac Newton (1643 – 1723), engl. Physiker, Mathematiker und Astronom

Zusammenhang zwischen Wegstrecke, und Zeit bei konstanter Beschleunigung:

$$y(t) = \frac{1}{2}at^2 + v_0t + y_0$$

wobei: y = Wegstrecke
 t = Zeit
 a = Beschleunigung
 y_0 = Anfangsstrecke
 v_0 = Anfangsgeschwindigkeit

Theoretiker arbeiten unabhängig \Rightarrow 2. Möglichkeit:

Die theoretische Vorhersage kommt zuerst, und wird im Experiment bestätigt!

Berühmte Beispiele:

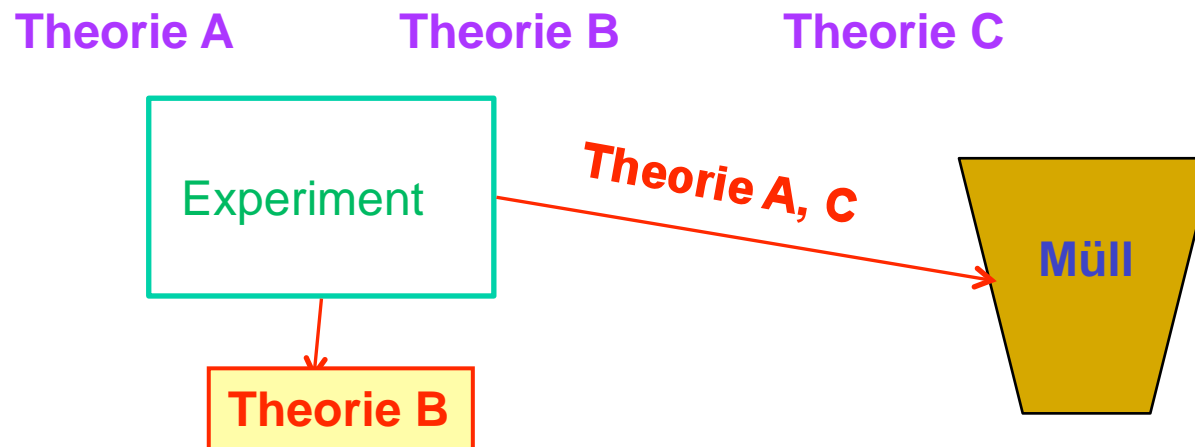
- ▶ **Elektromagnetische Wellen**
Vorhersage: 1864 durch J.C. Maxwell (schott. Physiker)
exp. Nachweis: 1887 durch H. Hertz (dt. Physiker)
- ▶ **Allgemeine Relativitätstheorie**
vollständige Theorie: 1916 durch A. Einstein
exp. Nachweis: seit 1920, bis heute
- ▶ **Existenz des Neutrinos**
Radioaktiver β -Zerfall: $n \rightarrow p + e^- + \nu$
Vorhersage: 1930 durch W. Pauli
exp. Nachweis: 1956 durch C. Cowan und F. Reines (USA)

3. Möglichkeit: Theoretiker sind zu fleißig

Es existieren verschiedene theoretische Modelle, die alle konsistent sind mit bislang durchgeführten Experimenten

⇒ Schlüsselexperiment

Die verschiedenen Theorien machen unterschiedliche Vorhersagen:



wichtig:

- experimentelle Beobachtung
- theoretische Interpretation, Modellbildung, Mathematik
- gegenseitige Befruchtung

1.3 Bedeutung des Messens, Messinstrumente

Ein wichtiges Kriterium einer phys. Aussage ist ihre **Reproduzierbarkeit**
d.h.: die Aussage gilt an allen Orten, zu allen Zeiten und ist unabhängig vom jeweiligen Beobachter

➡ **Objektivität** → es müssen Messinstrumente benutzt werden

Sinneswahrnehmung ist nicht geeignet !

- subjektiv
- nicht immer reproduzierbar
- teilweise nicht linear, sondern logarithmisch
- z.T. falsch, z.B. optische Täuschungen
-

Fazit:

Messgeräte sind wichtig, um eine objektive Beobachtung zu machen und somit unabhängig von subjektiven Sinneseindrücken zu werden.

→ **Messungen werden quantifizierbar und reproduzierbar**

1.4 Messgenauigkeit und Messfehler

Jede Messung ist mit einem Messfehler behaftet (Apparatur, Auflösungsvermögen, Ablesegenauigkeit,.....)

Man unterscheidet zwischen **zufälligen (statistischen)** und **systematischen** Fehlern.

$$t \pm \Delta t (\text{stat.}) \pm \Delta t (\text{syst.})$$

Systematische Fehler: treten bei wiederholten Messungen unter gleichen Bedingungen in gleicher Weise auf.

Beispiel:

falsch geeichter Maßstab

wahre Länge: z.B. 20.0 cm

Maßstab verzerrt, 20 cm entspricht 19.9 cm auf dem Maßstab

Messreihe: {19.9, 19.8, 20.0, 20.1, 19.9, 19.9,}

{20.0, 19.9, 19.8,}

Mittelwert: $l = 19.92 \pm 0.03$ (stat.)* ± 0.10 (syst.)

Systematische Fehler können durch wiederholte Messungen nicht verringert werden!

Ursachen: vielfältig, z.B.:

- unvollkommenes Messgerät
- mangelhafte Kalibrierung
- äußere Störeinflüsse

*)Berechnung folgt

-

Beispiel: systematischer Messfehler
(beim Ablesen eines Messgerätes)

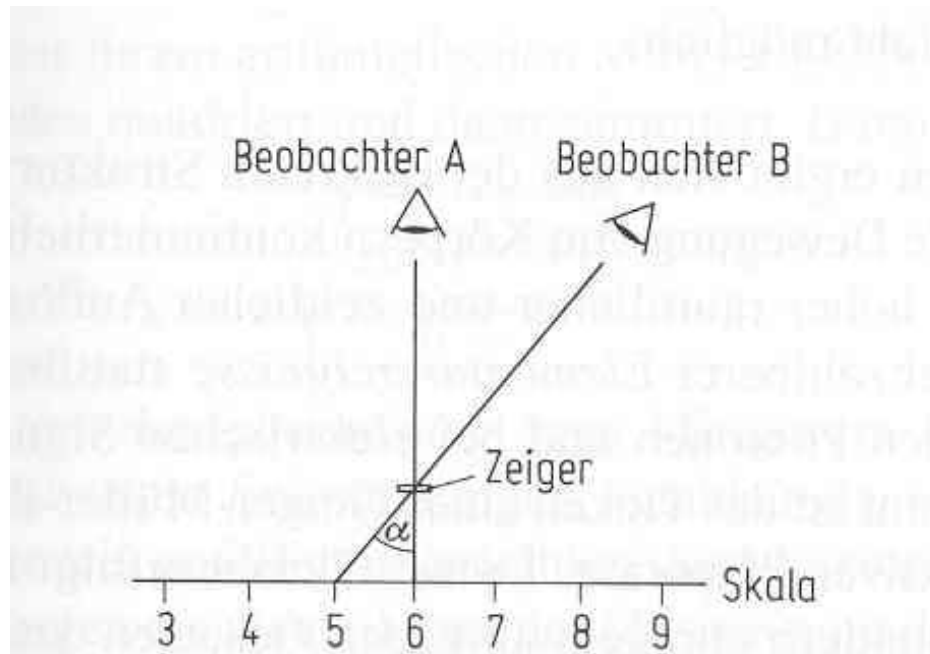


Abb.: Parallaxenfehler; er entsteht durch falsches Ablesen (Beobachter B)
(aus Ref. [4])

Statistische Fehler: zufällig, treten bei jeder Wiederholung der Messung in unterschiedlicher Weise auf

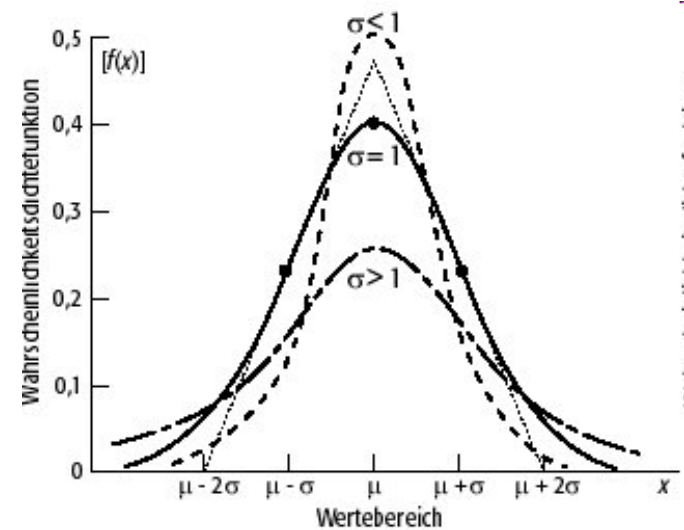
Die Messwerte verteilen sich i. Allg. um den wahren Wert (keine syst. Verzerrung)

i. Allg. **Gauß'sche Normalverteilung** (Verteilungsfunktion, Wahrscheinlichkeitsdichte)

Die Gaußverteilung hat zwei Parameter:

Mittelwert μ
Standardabweichung σ (bzw. Varianz σ^2)

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$



Ursachen: Ablesefehler (nicht syst.),
Rundungen (Digitalanzeige),
Auflösung,....



Zufällige (statistische) Fehler lassen sich durch Wiederholung der Messung reduzieren (Einzelmessungen x_i)

→ **Mittelwertbildung:**
$$\bar{x} := \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{n} (x_1 + x_2 + \dots + x_n)$$

- Der **Fehler des Mittelwertes** ist kleiner als der Fehler der Einzelmessungen;

(i) Wenn die Messfehler alle gleich groß sind und den Wert Δx haben, so beträgt der Fehler des Mittelwertes:

$$\Delta \bar{x} = \frac{\Delta x}{\sqrt{n}}$$

(beachte: Δx entspricht der **Standardabweichung der Gaußverteilung !!**)

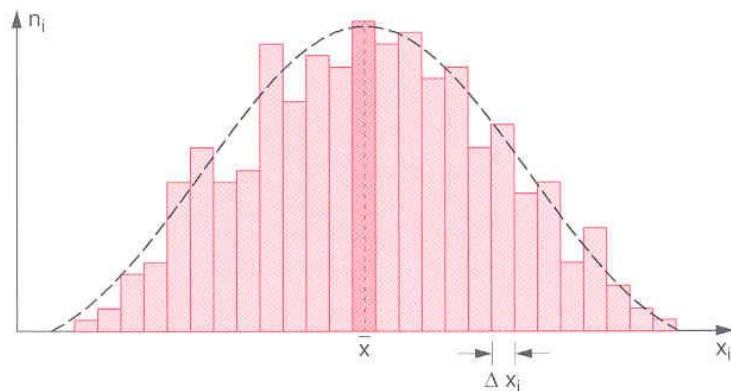


Abb.: Typische Häufigkeitsverteilung von Messwerten x_i um den Mittelwert \bar{x} bei statistischer Fehlerverteilung (aus Ref. [1])

- Der Fehler der Einzelmessungen kann aus der Streuung der Messergebnisse abgeschätzt werden

$$\Delta x = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Empirische Varianz

$\hat{=}$ Schätzwert für die Standardabweichung der Gaußverteilung

(ii) Bei ungleichen Messfehlern, wird der gewichtete Mittelwert \bar{x}_G gebildet:

$$\bar{x}_G := \frac{\sum x_i / \sigma_i^2}{\sum 1 / \sigma_i^2}$$

$$\Delta \bar{x}_G = \sqrt{\frac{1}{\sum 1 / \sigma_i^2}}$$

(Beweis: Statistik-Vorlesung, Fehlerfortpflanzung, Zentraler Grenzwertsatz)

(iii) Fehlerfortpflanzung

Gegeben seien unabhängige Messgrößen

y_1, y_2, \dots, y_n mit den Messfehlern $\Delta y_1, \Delta y_2, \dots, \Delta y_n$

Wie groß ist dann die Fehler einer abgeleiteten Größe $f(y_1, y_2, \dots, y_n)$

Gaußsche Fehlerfortpflanzung:

$$\Delta f(y_1, y_2, \dots, y_n) = \sqrt{\sum_j \left(\frac{\partial f}{\partial y_j} \right)^2 \cdot (\Delta y_j)^2}$$

Können mit Hilfe von \bar{x} und $\Delta\bar{x}$ Aussagen über den wahren Wert gemacht werden?

Ja! Für Gaußsche Fehler gilt:

(i) Das Intervall $[\bar{x} - \Delta\bar{x}, \bar{x} + \Delta\bar{x}]$ (1- σ Intervall) enthält den wahren Wert mit einer Wahrscheinlichkeit von **68.34%**

Konfidenzintervall

Konfidenzniveau von 68.34%

(ii) Das Intervall $I = [\bar{x} - 2\Delta\bar{x}, \bar{x} + 2\Delta\bar{x}]$ (2- σ Intervall) enthält den wahren Wert mit einer Wahrscheinlichkeit von 95.4%

$$P(x_{\text{wahr}} \in I) = 95.4\%$$

(iii) (3- σ Intervall): $I = [\bar{x} - 3\Delta\bar{x}, \bar{x} + 3\Delta\bar{x}]$

$$P(x_{\text{wahr}} \in I) = 99.7\%$$

1.5 Maßeinheiten, Messinstrumente

Jeder Zweig der Physik braucht seine eigenen Maßeinheiten

Mechanik: Teilgebiet der Physik, das sich mit Bewegung von Körpern und mit den sie verursachenden Kräften befasst

				Einheit
Bewegung	↔	Lage in einem Koordinatensystem	→	Länge m
		Lageveränderung	→	Zeit s
Körper	↔	Stoffmenge	→	Masse kg

Basisgrößen der Mechanik: Länge, Masse, Zeit

Basisgröße: Grundgröße, die nicht auf andere physikalische Größen zurückgeführt werden kann

Abgeleitete Größe: wird mit Hilfe von Definitionsgleichungen auf die Basisgröße zurückgeführt

Beispiel: $\text{Geschwindigkeit} := \frac{\text{Strecke}}{\text{Zeit}}$ Definitionsgleichung

→ Einheit: $\frac{\text{m}}{\text{s}} \rightarrow \frac{\text{km}}{\text{h}}$

- Es existiert ein international vereinbartes Einheitensystem, das sog. **SI-System** (système international d'unités)
- Seit 1970 in Deutschland gesetzlich eingeführt

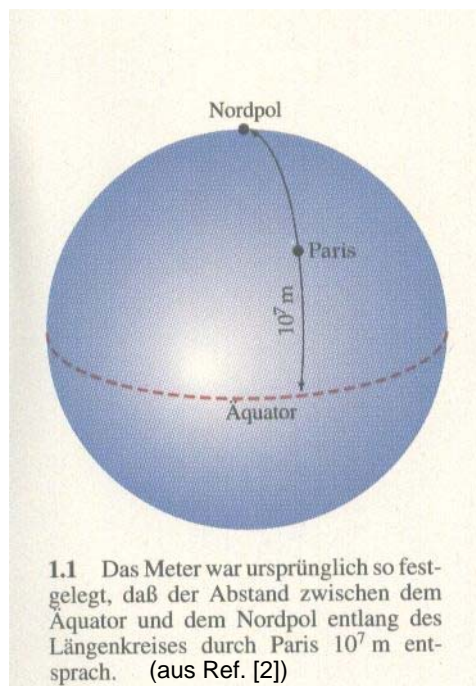
Basisgröße	SI-Einheit	Abkürzung
Länge	Meter	m
Masse	Kilogramm	kg
Zeit	Sekunde	s
elektrische Stromstärke	Ampere	A
thermodynamische Temperatur	Kelvin	K
Stoffmenge	Mol	mol
Lichtstärke	Candela	cd

Tab.: *Basiseinheiten im SI-System*

Basiseinheit der Länge: Meter

ursprüngliche Definition:

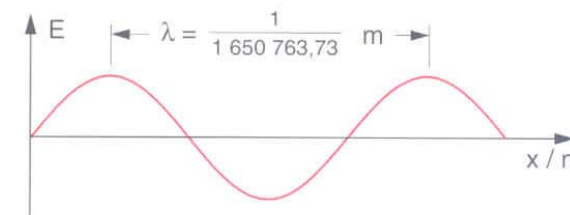
*1 m entspricht dem Abstand der beiden Marken auf dem sog. **Urmeter***
(Stab aus einer Platin-Iridium Legierung, die in Sèvres bei Paris aufbewahrt wird)



Zur Erhöhung der Genauigkeit: Neue Definitionen

1960: **Kopplung an Atomspektroskopie**

*1 m ist das 1 650 763,73-fache der im Vakuum gemessenen **Wellenlänge** der orange-roten Spektrallinie des Kryptonisotops ^{86}Kr*



1983: Kopplung an die Lichtgeschwindigkeit

1 m ist die Länge der Strecke, die Licht im Vakuum während der Zeitspanne von $1 / 299\,792\,458$ s durchläuft

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}

Tab.: Größenordnungen verschiedener Strecken (aus Ref. [3])

Basiseinheit der Zeit: **Sekunde**

Die Sekunde ist heute auch über die Eigenschaften von Atomen /
elektromagnetischen Wellen definiert

- Atome strahlen Energie ab oder absorbieren Energie in Form von
el. magn. Wellen („Lichtwellen“)
- Mit jedem Übergang zwischen zwei Zuständen im Atom ist Strahlung einer
charakteristischen Frequenz verbunden

Frequenz: Zahl der Schwingungen / Sekunde

⇒ Frequenz kann zur Definition der Basiseinheit der Zeit benutzt werden

Sekunde: *Zeitintervall in dem die vom Atom Cäsium-133 beim Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstruktur-niveaus des Grundzustands ausgesandte Strahlung 9 192 631 770 Schwingungen ausführt.*

Definition der Sekunde ist zurückgeführt auf Eigenschaft eines bestimmten Atoms;

Technische Anwendung: „Atomuhr“

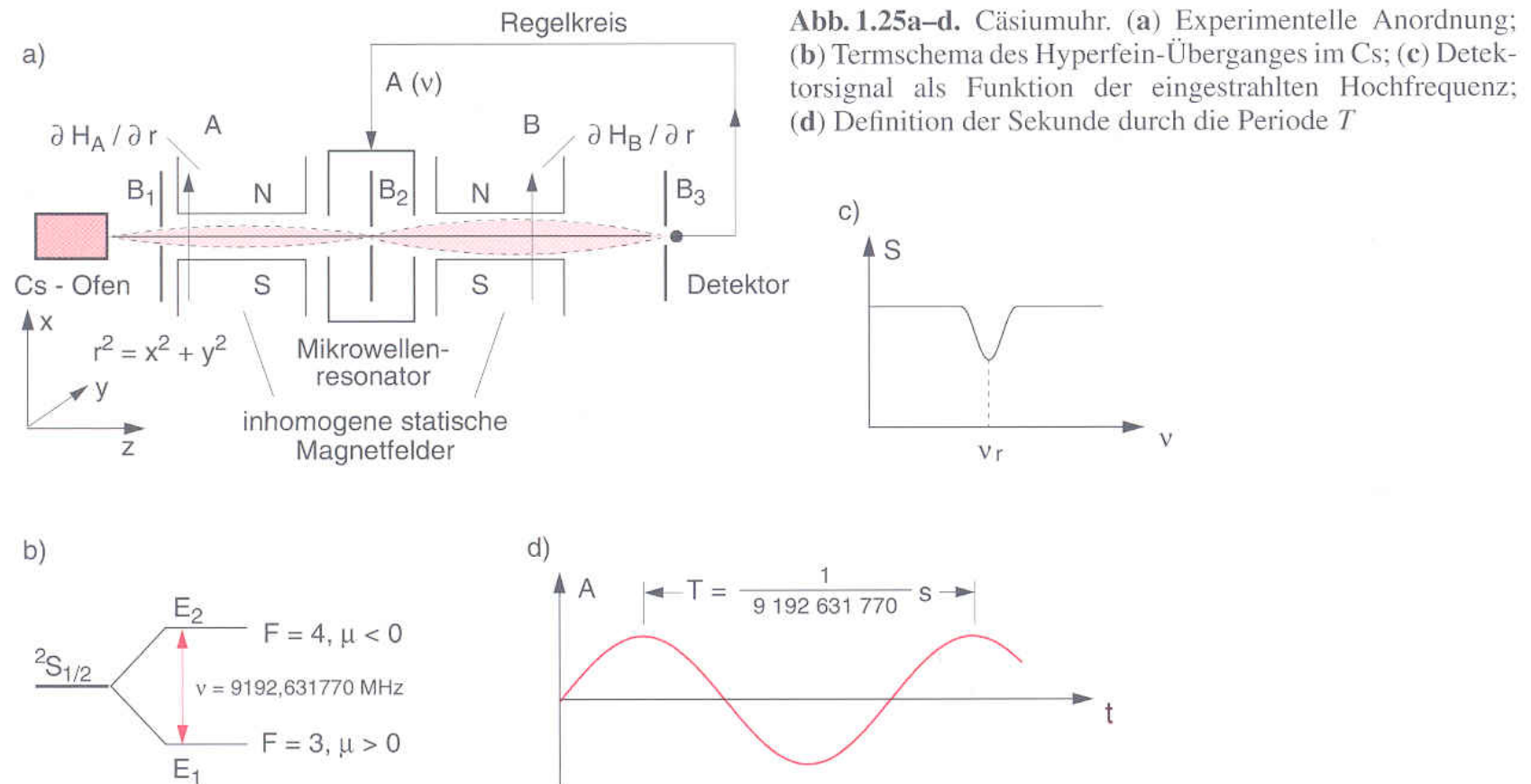
Zeitreferenz an der **Physikalisch Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig**

praktische relative Reproduzierbarkeit: 10^{-12} - 10^{-14}

(entspricht einer Unsicherheit/Zeitabweichung von einer Sekunde in fünf Millionen Jahren)

(zum Vergleich: Ganggenauigkeit einer Quarzuhr: ~ 1 Sekunde pro Tag)

Prinzip der Cäsium-Atomuhr (aus Ref. [1])



beachte:

im Prinzip kann zur Definition eines Zeitmaßes **jeder periodische** Vorgang benutzt werden

Beispiele:

- Hin- und Her-Schwingen eines Pendels
- Spiralfeder (Unruhe)
- Drehung der Erde um ihre Achse (Sterntag)
- Schwingender Kristall (Quarz)
- Angeregte Schwingungen (Übergänge) von Atomen

Höchste Genauigkeit mit Atom-Uhren:

Nach heutigem Stand der Forschung zeigen alle gleichartigen Atome dasselbe Verhalten, völlig **unabhängig von Ort und Zeit**

Tab.: Größenordnungen verschiedener Zeitintervalle (aus Ref. [3])

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}

Basiseinheit der Masse: **Kilogramm**

(1kg = 1000 g)

festgelegt durch die Masse eines Einheitskörpers (Urkilogramm) das sich ebenfalls in Sèvres befindet (Platin-Iridium-Zylinder).

Duplikat in der PTB (*Physikalisch Technische Bundesanstalt*) in Braunschweig

Bislang ist die Definition der Masse noch nicht auf einen atomaren Standard zurückgeführt; Bestrebungen existieren, die Masse von Referenzatomen (z.B. Silizium) zu benutzen; Erreichbare Genauigkeit noch unklar: $1 \text{ kg} \sim 2 \cdot 10^{25}$ Si-Atome



Tab.: Größenordnungen verschiedener Massen (aus Ref. [3])

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^{-2}
Mensch	10^2
Saturn-5-Rakete	10^6
Pyramide	10^{10}
Erde	10^{24}
Sonne	10^{30}
Milchstraße	10^{41}
Universum	10^{52}