

EXPERIMENTELLE MECHANIK

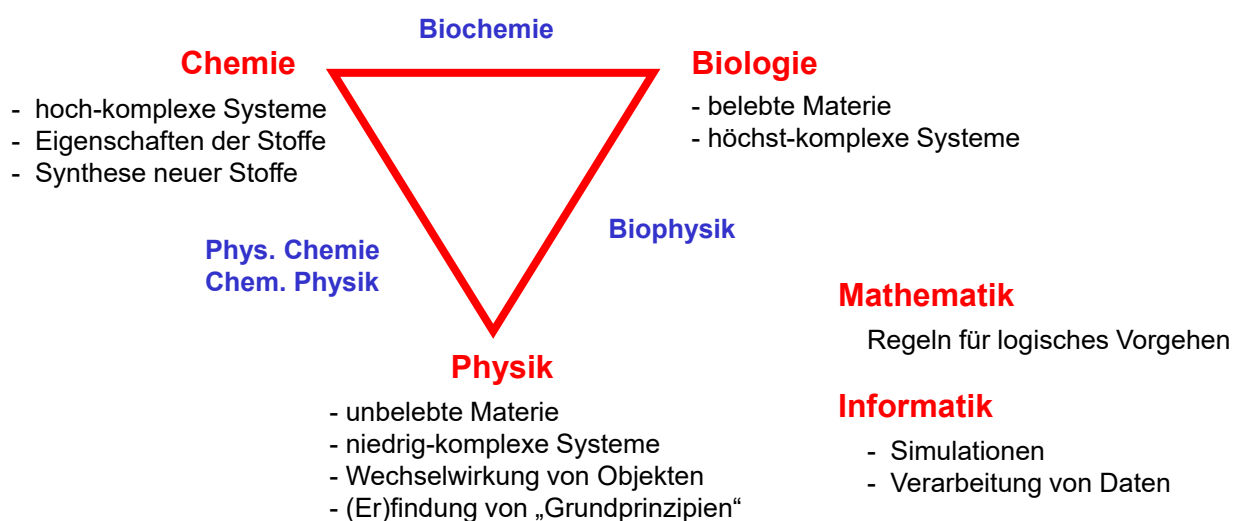
Kapitel 1 Einführung

1.1. Naturwissenschaften und Physik

1.2. Die naturwissenschaftliche Methode

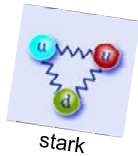
1.3. Physikalische Größen

1.1. Naturwissenschaften und Physik



1.1. Ziele der Physik

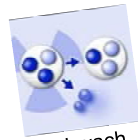
- Auffinden von Grundprinzipien („*basic principles*“) Beschreibung der Wechselwirkungen zwischen fundamentalen Bausteinen der Natur



stark



elmag.

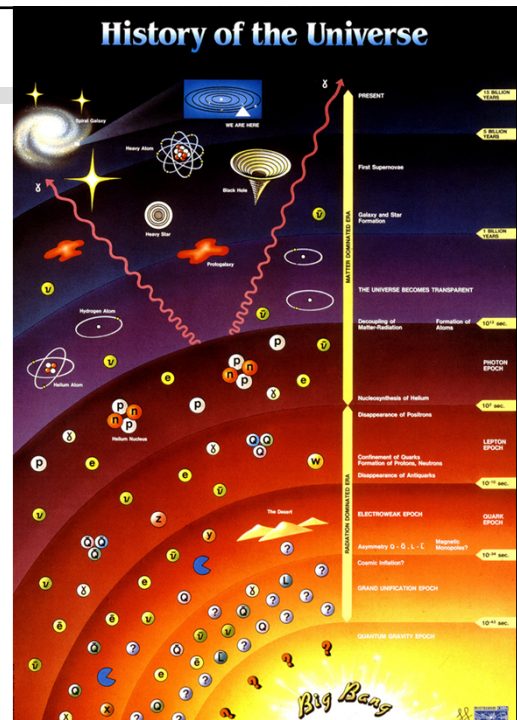


schwach



grav.

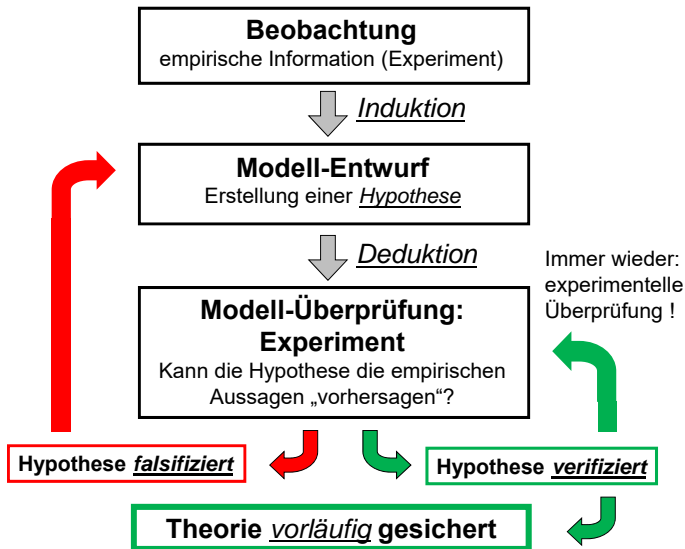
- Kosmologie
(Woher kommt die Welt, wohin geht sie...)



1.1. Ziele der Physik

- Auffinden von Grundprinzipien („*basic principles*“) Beschreibung der Wechselwirkungen zwischen fundamentalen Bausteinen der Natur
- Kosmologie
(Woher kommt die Welt, wohin geht sie...)
- Definition physikalischer Größen und ihrer Einheiten
Zeit, Leistung, Lichtstrom ..., mit Sekunde, Watt, Lumen, ...
- Entwicklung von Messmethoden,
Verständnis des Messprozesses allgemein (z.B. Quantenmechanik!)
- Grundlagen für technologische Entwicklung
- ... und Vieles mehr ...

1.2. Die naturwissenschaftliche Methode



Theoriebildung:

Theorien sind nur „richtig“
(= sinnvoll, anwendbar)

- wenn/solange das Ergebnis **jedes** Experiments im Gültigkeitsbereich korrekt vorhergesagt wird
- wenn sie in sich widerspruchsfrei sind.
- wenn sie von der großen Mehrheit der Wissenschaftler akzeptiert

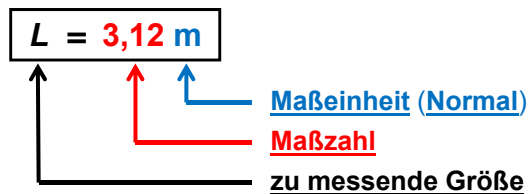
Theorien sind nur „interessant“

- wenn sie experimentell überprüfbar sind. (Sonst sind es Hypothesen oder Spekulationen.)

1.3.1. Messgrößen und Einheiten

Größe: Jedes physikalische Objekt wird durch quantitativ bestimmbare Eigenschaften definiert. Diese nennt man „physikalische Größen“.

Angabe: Jede physikalische Größe wird mit Maßzahl und Einheit angegeben:



Größenart: Ein Typ von Größen, die mit derselben Messvorschrift gemessen werden können.
Beispiel: Breite, Dicke, Höhe, Wellenlänge, ...
Größenart „Länge“ (messbar z.B. mit Zollstock)

Man kann zwei Größen nur dann
vergleichen, addieren etc.,
wenn sie dieselbe Größenart haben

1.3.1. Einheit

Eine Messung ist ein quantitativer Vergleich einer physikal. Größe mit einem Normal / einer Referenz

Der Begriff Einheit bezeichnet eine solche Referenz.

Beispiele für die Realisierung von Einheiten:



Ein „Urmeter“
(PTB Braunschweig)
veraltet!



„Standard-Kilogramm“
(Sevèrs, F) veraltet!

Modern: Präzise, reproduzierbare
Realisierungsvorschriften (später)

Für eine Größenart können verschiedene Einheiten in Gebrauch sein.

Beispiele:

Länge: m (Meter); ft (foot), inch, Seemeile

1 ft = 0,3048 m

1 inch = 0,0254 m

1 Naut. Meile = 1852 m

Temperatur: °C, F (Fahrenheit), K (Kelvin)

**In der Naturwissenschaft soll nur
eine Einheit pro Größenart
verwendet werden**

1.3.1. Das SI (Système International d'Unites)

Konvention: Verwendung von 7 Basiseinheiten

Größenart	SI-Einheit	Symbol
Masse	Kilogramm	kg
Länge	Meter	m
Zeit	Sekunde	s
Stromstärke	Ampere	A
Temperatur	Kelvin	K
Substanzmenge	Mol	mol
Lichtstärke	Candela	cd

Definition der Basiseinheiten:

Realisierungsvorschrift im SI
(Experiment)

Alle anderen Größenarten sind
abgeleitete Einheiten

Definition der abgeleiteten Einheiten:

Zusammenhang mit Basiseinheiten
(Formel)

Beispiele:

Geschwindigkeit v abgeleitet

von Länge und Zeit

$$[v] = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Energie E abgeleitet

von Masse, Länge und Zeit

$$[E] = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2} = 1 \text{ J} \quad (\text{Joule})$$

1.3.1. Schreibweisen für physikalische Größen



In der Physik kommen sehr große und sehr kleine Zahlen vor.

Beispiele:

Leistung $P = 6450000000\text{ W}$
Wellenlänge $\lambda = 0,000000589\text{ m}$

(1) Potenzschreibweise

Leistung $P = 6,45 \cdot 10^9\text{ W}$
Wellenlänge $\lambda = 5,89 \cdot 10^{-7}\text{ m}$

(2) Mit Präfix vor der Einheit

Leistung $P = 6,45\text{ GW}$
Wellenlänge $\lambda = 0,589\text{ }\mu\text{m} = 589\text{ nm}$

Präfixe für SI-Einheiten

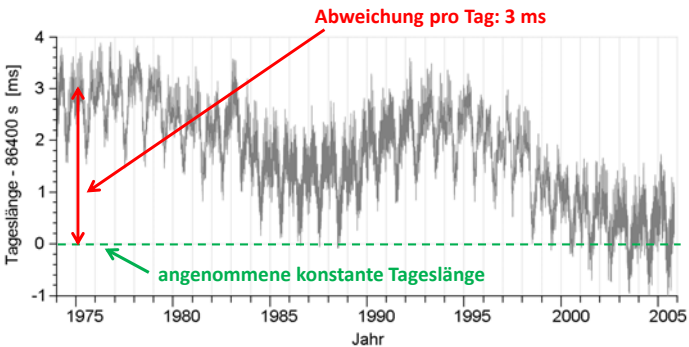
Faktor	Präfix	Symb.	Faktor	Präfix	Symb.
10^1	Deka	da	10^{-1}	Dezi	d
10^2	Hekto	h	10^{-2}	Zenti	c
10^3	Kilo	k	10^{-3}	Milli	m
10^6	Mega	M	10^{-6}	Mikro	μ
10^9	Giga	G	10^{-9}	Nano	n
10^{12}	Tera	T	10^{-12}	Piko	p
10^{15}	Peta	P	10^{-15}	Femto	f
10^{18}	Exa	E	10^{-18}	Atto	a
10^{21}	Zetta	Z	10^{-21}	Zepto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

1.3.2. Die Zeit t



Die Sekunde ist die SI-Basiseinheit der Zeit.
Die Abkürzung der Einheit Sekunde ist „s“.

Historische Definition (Weltzeit-Sekunde): „1 Sekunde entspricht der Dauer eines mittl. Sonnentags geteilt durch $(24 \times 60 \times 60) = 86400$ “

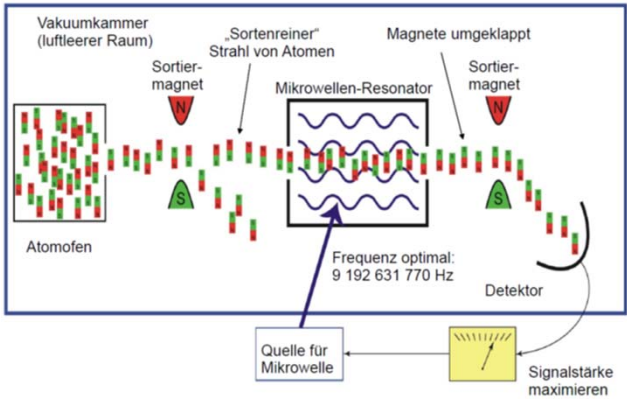


Die Drehung der Erde um ihre eigene Achse ist offensichtlich nicht sehr gleichmäßig (kein Präzisionsnormal).

1.3.2. Die Zeit t

Die Sekunde ist die SI-Basiseinheit der Zeit.
Die Abkürzung der Einheit Sekunde ist „s“.

Aktuelle Definition (Atomuhr-Sekunde, 1967): „1 Sekunde entspricht dem 9.192.631.770 - fachen der Periodendauer des Überganges zwischen den beiden Hyperfeinstrukturzuständen des Nuklids ¹³³Cs“



Prinzip einer Atomuhr

PTB Braunschweig
www.ptb.de

1.3.2. Die Zeit t

Weitere Einheiten der Zeit

Einheit Abk.

1 Minute	min
1 Stunde	h
1 Tag	d
1 Jahr	y

Umrechnung → SI-Basis Einheiten

1 min	=	60 s
1 h	=	60 min = 3600 s
1 d	=	24 h = 86400 s
1 y	≈	365,24 d = 31,6 · 10 ⁶ s ≈ π · 10 ⁷ s

Zeitskalen in der Physik

„Alter“ des Universums	13x10 ⁹ y	=	4x10 ¹⁷ s
Bestehen der Zivilisation	10.000 y	=	3x10 ¹¹ s
Menschliches Leben	100 y	=	3x10 ⁹ s
Umlauf Erde um Sonne	1 y	=	3x10 ⁷ s
Drehung der Erde um Achse	0.003 y	=	86400 s
Vorlesung	2x10 ⁻⁴ y	=	7200 s
Lichtlaufzeit Erde-Sonne	2x10 ⁻⁵ y	=	480 s
Lichtlaufzeit Erde-Mond	3x10 ⁻⁸ y	=	1 s
„Augenblick“	3x10 ⁻⁹ y	=	0,1 s
Periodendauer eines Tons	3x10 ⁻¹¹ y	=	0,001 s
Periodendauer von Licht	1x10 ⁻²² y	=	3x10 ⁻¹⁵ s

1.3.2. Die Zeit t

Vorsicht:

„Zeit“ hat zwei Bedeutungen:

- „Zeitpunkt“ (engl. „time“) und „Zeitpunkte“ werden als „Zeitdauer“ von einem Referenzpunkt weg gemessen
- „Zeitdauer“ (engl. „duration“)

Zeitmessung:

- "Referenzvorgang" wird benötigt
- Messung der Zeitdauer eines beliebigen Vorgangs durch Vergleich mit der Dauer des Referenzvorgangs
- Es gibt 2 Klassen von Referenzvorgängen:

(1) Periodische Vorgänge:

Periodendauer bekannt:

- Erdrotation (Sonnenuhr)
- Pendeluhr
- Quarzuhr
- Atomuhr

(2) Aperiodische Vorgänge:

Zeitlicher Verlauf bekannt:

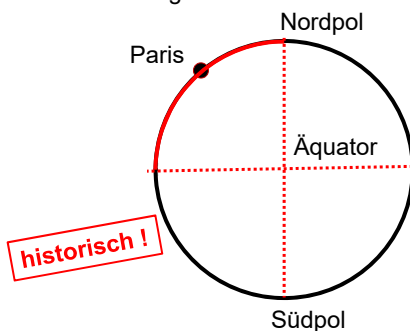
- Radionuklidmethode
- Sanduhr

1.3.2. Die Länge s

Die SI-Basiseinheit der Länge ist 1 Meter
Die Abkürzung der Einheit Meter ist „m“.

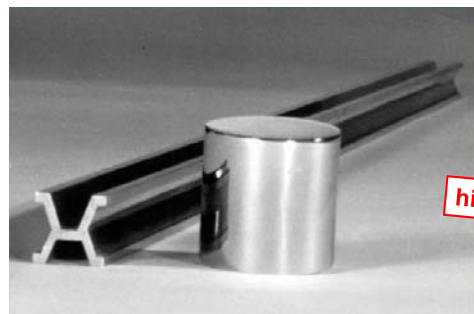
Ursprüngliche Definition (1795):

"1 Meter entspricht dem 10.000.000 Teil der Länge des Quadranten, auf dem Paris liegt."



Spätere Definition (1889):

„1 Meter entspricht der Länge des Archivmeters“. Das Archivmeter ist ein Platin-Iridium-Stab, der als Referenz dient („Ur-Meter“).



1.3.2. Die Länge s

Die SI-Basiseinheit der Länge ist 1 Meter
Die Abkürzung der Einheit Meter ist „m“.

Noch spätere Definition (1960):

„1 Meter entspricht dem 1 650 763,73-fachen der Wellenlänge der von ungestörten Atomen des Nuklids ^{86}Kr beim Übergang vom Zustand $5d_5$ zum Zustand $2p_{10}$ ausgesandten und sich im Vakuum ausbreitenden Strahlung.“

Realisierung:

Krypton-Laser mit der Wellenlänge $\lambda = 605,78 \text{ nm}$

historisch !



Heute werden Laser für hochgenaue Längenmessungen eingesetzt, aber nicht zur Definition für 1 Meter

1.3.2. Die Länge s

Die SI-Basiseinheit der Länge ist 1 Meter
Die Abkürzung der Einheit Meter ist „m“.

Heute gültige Definition (1983):

„1 Meter entspricht jener Strecke, die Licht im Vakuum im 1/299.792.458-ten Teil einer Sekunde zurück legt.“

aktuell gültig !

Grundlage:

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von elektromagnetischen Wellen (z.B. Licht) im Vakuum beträgt genau

$$c_0 = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$

Dieser Wert ist unabhängig davon, wie schnell sich ein Beobachter bezüglich der Lichtquelle bewegt (Relativitätstheorie).

1.3.2. Die Länge s

Astronomische Längeneinheiten:

1 **Lichtjahr** (ly, „light year“) entspricht der Strecke, die Licht (im Vakuum) innerhalb eines Jahres zurücklegt

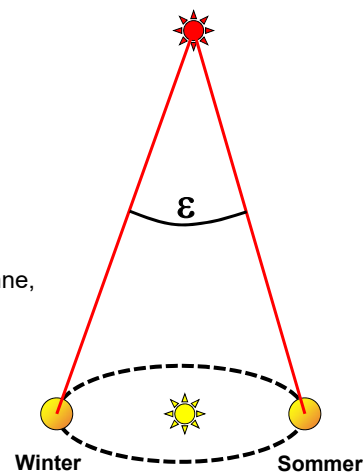
$$1 \text{ ly} \approx 9,46 \cdot 10^{15} \text{ m} = 9,46 \cdot 10^{12} \text{ km}$$

1 **Parallaxensekunde** (pc, sprich „parsec“)

entspricht dem Abstand eines Sternes von der Sonne, in dem die Erdbahn unter einem Winkel $\epsilon = 1$ Bogensekunde erscheint.

(1 Bogensekunde = $1/3600$ Grad)

$$1 \text{ pc} \approx 3,26 \text{ ly}$$



1.3.2. Die Länge s

Längenskalen in der Physik:

Größe des Universums	13×10^9	ly	=	1×10^{26}	m
Durchmesser Milchstraße	100.000	ly	=	1×10^{21}	m
Entfernung Erde – Sonne	$150 \cdot 10^6$	km	=	2×10^{11}	m
Durchmesser der Erde	6.380	km	=	6×10^7	m
Mensch	2	m			
Wellenlänge des Schalls	0,3	m			
Länge einer Kopflaus	3	mm	=	3×10^{-3}	m
Haardurchmesser	50	μm	=	5×10^{-5}	m
Wellenlänge des Lichts	0,5	μm	=	5×10^{-7}	m
Atomdurchmesser	0,1	nm	=	10^{-10}	m
empfindlichste Interferometer	0,01	am	=	10^{-20}	m

1.3.2. Die Länge s

Längenmessung mit Maßstäben:

Längenmessung mit Endmaßen:

Mikrometer-schraube

Nonius

Schieblehre

1.3.2. Die Länge s

Längenmessung mit Nonius-Skala:

Hauptskala

Noniusskala: kleinerer Strichabstand: 9 mm in 10 Teile geteilt

(1) Nonius verschieben, 0 abgleichen

(2) Übereinstimmung suchen (hier: bei Nonius-Strich „8“)

Ergebnis mit Hauptskala: „Zwischen 10 mm und 11 mm“

Genauer, bitte! → Benutze den **Nonius**

Ergebnis mit Noniusskala: „10,8 mm“

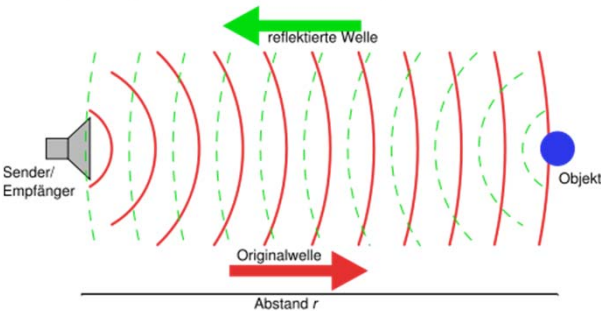
1.3.2. Die Länge s



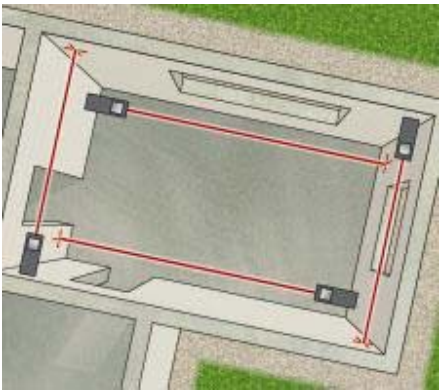
Optische Längenmessung:

Laser-Entfernungsmesser arbeiten nach zwei Prinzipien:

Laufzeitmessung: 10 m – 10 km
(analog zur Definition von 1 m)



Frequenzmodulation mit Phasenmessung:
10 cm – 100 m (Prinzip: Vorlesung OPTIK)

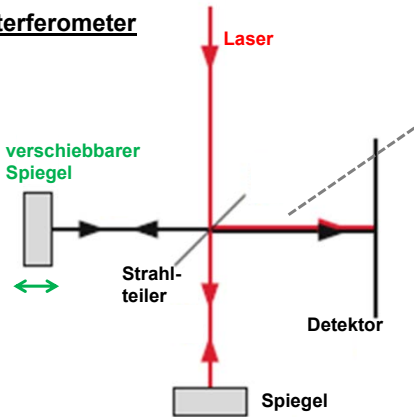


1.3.2. Die Länge s



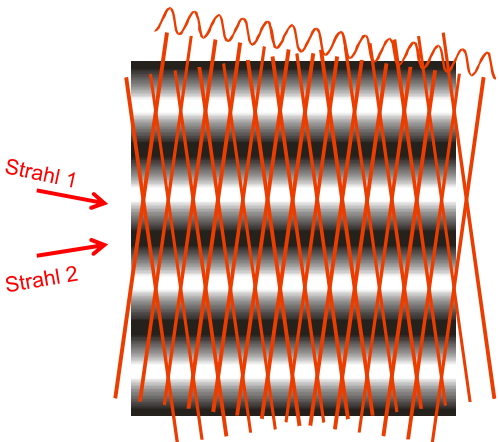
Optische Längenmessung:

Laser-Interferometer



Anordnung (z.B. Michelson-Interferometer)

Strahlen unter kleinem Winkel:



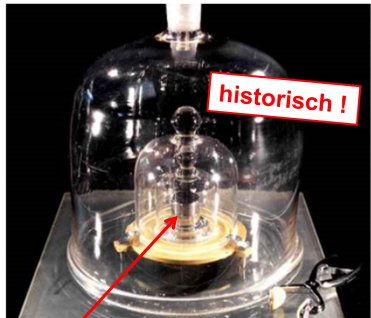
1.3.2. Die Masse m

Die SI-Basiseinheit der Masse ist 1 Kilogramm

Die Abkürzung der Einheit Kilogramm ist „kg“.

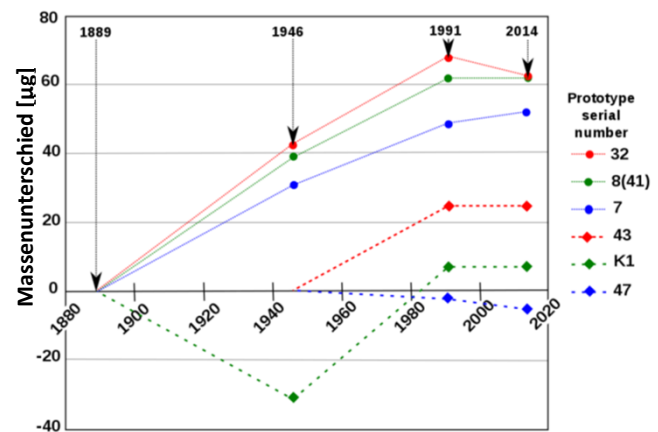
Definition bis Mai 2019:

„1 Kilogramm entspricht der Masse des Kilogramm-Prototyps ("Ur-Kilogramm").“



Das „Ur-Kilogramm“ in Sèvres bei Paris (Platin-Iridium-Legierung)

Problem: Konstanz fraglich und nicht überprüfbar



1.3.2. Die Masse m

Die SI-Basiseinheit der Masse ist 1 Kilogramm

Die Abkürzung der Einheit Kilogramm ist „kg“.

Heute gültige Definition (2019):

„1 Kilogramm beruht darauf, dass die Naturkonstante ‚Plancksches Wirkungsquantum‘ genau den Wert

$$h = 6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34} \text{ Js hat.}$$

Dabei ist die Einheit $1 \text{ Js} = 1 \text{ kg} \cdot 1 \text{ m}^2 / 1 \text{ s}$, wobei Meter und Sekunde nach den SI-Definitionen realisiert werden müssen.“

aktuell gültig !

Plancksches Wirkungsquantum h :

Basiskonstante der Quantenmechanik. Verknüpft z.B. die Frequenz ν und die Mindestenergie E jeder Schwingung:

$$E = h \cdot \nu$$

Der Wert von h ist als konstant definiert.

Die Definition legt nicht fest, mit welchem Experiment die Realisierung der Basiseinheit gemacht werden muss.

Es gibt verschiedene mögliche Experimente für diese Realisierung:

1.3.2. Die Masse m

Die SI-Basiseinheit der Masse ist 1 Kilogramm
Die Abkürzung der Einheit Kilogramm ist „kg“.

Quelle: PTB Braunschweig



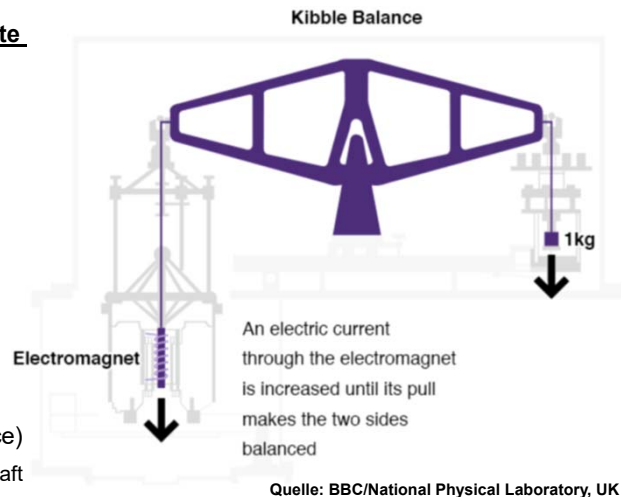
„Avogadro-Projekt“:

Bestimme die Anzahl von Atomen in einer Kugel
Aus hochreinem Silizium

„Watt-Waage“ (engl.: Kibble balance)

Kompensiere Schwerkraft mit elektromagn. Kraft

**Mögliche Experimente
zur Realisierung der
Masse 1 kg:**



1.3.2. Die Masse m

Die atomare Masseneinheit: Auf mikroskopischer Ebene benutzt man die
Masse einzelnen Atomen als Einheit:

1 atomare Masseneinheit amu (atomic mass unity)
entspricht 1/12 der Masse eines C^{12} - Kohlenstoffatoms.

$$1 \text{ u} = 1,66054 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Die atomare Masseneinheit eignet sich hervorragend
zum genauen Vergleich der Masse atomarer Teilchen.
Der Vergleich mit makroskopischen Objekten ist viel ungenauer.

**Das ist NICHT
die SI-Definition !**

Eigenschaften der Masse: Träge Masse: Die Masse ist ein Maß für die Trägheit eines Körpers,
also für seinen „Widerstand“ gegenüber Änderungen
des Bewegungszustands.

Schwere Masse: Die Masse ist außerdem eine der Ursachen
von Gravitation.

Warum „schwere Masse“ = „träge Masse“ ist unklar!

1.3.2. Die Masse *m*

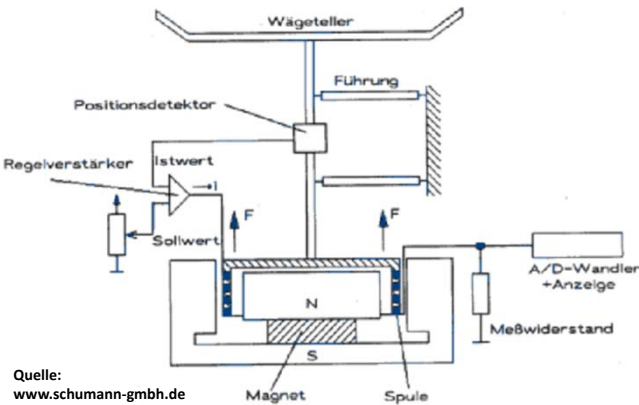


Massenskalen in der Physik:	Masse des Universums	ca. 10^{53}	kg
	Masse der Sonne	$1,99 \cdot 10^{30}$	kg
	Masse der Erde	$5,97 \cdot 10^{24}$	kg
	Großer Lastkraftwagen	$35 \cdot 10^3$	kg
	Mensch	75	kg
	Maus	0,02	kg
	Ameise	$5 \cdot 10^{-6}$	kg
	Menschliche DNA	$3,5 \cdot 10^{-12}$	kg
	Gold-Atom	$6,97 \cdot 10^{-23}$	kg
	Masse eines Elektrons	$9,1 \cdot 10^{-31}$	kg

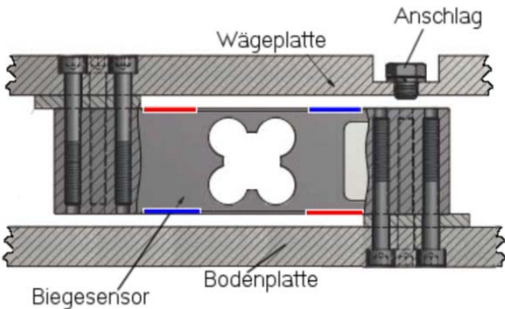
1.3.2. Die Masse *m*



Massebestimmung: Beispiele



Elektrische Waage: Kompensation der Gewichtskraft durch elektromagnetische Kraft, Messung des nötigen Stroms



Elektronische Waage:
Z-förmige Anordnung mit 4 Biegesensoren.
Bei Belastung:
Dehnung und Stauchung verändert den Elektr. Widerstand der Sensoren.

1.3.3. Messfehler und Genauigkeit

- Messfehler:**
- Jedes Messergebnis hat eine gewisse Unsicherheit → „Messfehler“
 - Messfehler zeigen nicht, dass fehlerhaft gearbeitet wurde! → systembedingte Unsicherheit
 - Die Angabe der Fehler ist ein wesentlicher Bestandteil jedes experimentellen Ergebnisses!
 - Experimentelle Ergebnisse, die ohne Fehler angegeben werden, sind (oft) nur sehr eingeschränkt verwendbar.

Fehlerabschätzung:



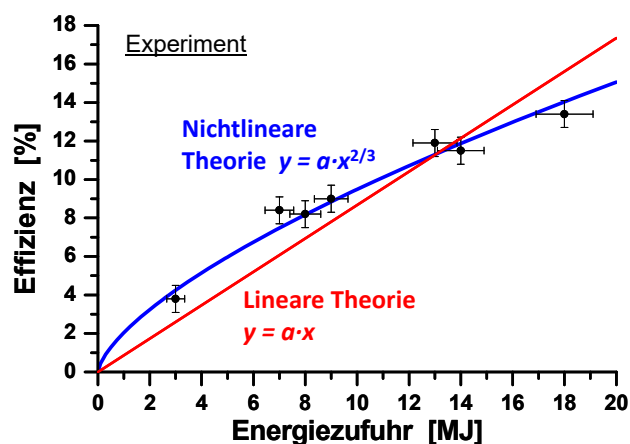
Beispiel: Breite $b = 8,82 \pm 0,02$ cm?
oder $b = 8,8 \pm 0,1$ cm ?
oder $b = 9,0 \pm 0,5$ cm ?

Abschätzung:

Die Genauigkeit beträgt ± 1 mm.
Daher hier: $b = 8,8 \pm 0,1$ cm

1.3.3. Messfehler und Genauigkeit

Wenn Experimente mit Theorien verglichen werden,
sind präzise Fehlerangaben entscheidend!



Wenn die Theorie nicht innerhalb der Fehlerbalken des Experiments liegt, gilt sie als falsifiziert.

Eine neue Theorie ist notwendig, die alle Daten innerhalb der Fehler gut beschreibt.

1.3.3. Messfehler und Genauigkeit

Angabe von experimentellen Fehlern:

Angabe als absoluter Fehler

Bsp: Geschwindigkeit $v = 80 \pm 4 \text{ m/s}$

Angabe als relativer Fehler

Geschwindigkeit $v = 80 \text{ m/s} \pm 5\%$

Angabe mit individuellem Fehler (selten):

Geschwindigkeit $v = 80 \begin{matrix} +10 \\ -2 \end{matrix} \text{ m/s}$

Signifikante Stellen:

Regel:

Geben Sie jedes Messergebnis mit Fehler so genau an, dass der Fehler 1 oder 2 signifikante Ziffern enthält

Beispiele: $3,058\,295\,004 \pm 0,015\,784\,934$ **NEIN !**

→ $3,058 \pm 0,016$

$3,058\,295\,004 \pm 0,000\,000\,138$ **NEIN !**

$3,058 \pm 0,000\,000\,13$ **NEIN !**

→ $3,058\,295\,00 \pm 0,000\,000\,13$

Gleiche Einheit:

(3,058 ± 0,016) m, **nicht:** $3,058 \text{ m} \pm 0,016$ oder $3,058 \text{ m} \pm 1,6 \text{ cm}$

1.3.3. Messfehler und Genauigkeit

Schreibweise mit „signifikanten Stellen“

Regel:

Wenn kein Fehler explizit angegeben ist: Angabe einer Zahl bedeutet immer, dass die letzte Stelle noch sinnvoll ist.

Beispiele: $L = 245 \text{ m} \rightarrow \text{Fehler } \Delta L \approx 0,5 \text{ m}$

$H = 1,82 \text{ m} \rightarrow \text{Fehler } \Delta H \approx 0,005 \text{ m}$

$t = 2 \text{ min} \rightarrow \text{Fehler } \Delta t \approx 0,5 \text{ min} = 30 \text{ s}$

Angabe berechneter Werte:

Regel:

Ein errechnetes Resultat kann höchstens so genau sein wie die Eingangszahlen!

Beispiele: $4,14 / 1,27 = 3,259\,842\,52$ **NEIN !**
 $= 3,26$

$7,178\,057\,835 / 2,62 = 2,739\,716\,731$ **NEIN !**
 $= 2,74$