

Experimentelle Physik I

WS 16/17

Veranstaltung 4010011

<https://campus.studium.kit.edu/event/H7Ke2neVDU6OCiWVculqYw>

PD Dr. Andreas B. Meyer (KIT und DESY)

1.1 Physikalische Größen, Maßeinheiten und Dimensionen

Organisatorisches

- **Webseiten:**
 - Webseite zu Vorlesung und Übungen: <http://ekpwww.physik.uni-karlsruhe.de/~rwoolf/teaching/ws16-17-mechanik.html>
 - Anmeldung zu den Übungen: <http://www.physik.kit.edu/Tutorium/WS1617/Physik1/>
 - Außerdem: <http://ekpwww.physik.uni-karlsruhe.de/~ameyer>
 - **Termine:**
 - Vorlesung: 18. Oktober 2016 - 9. Februar 2017
 - Dienstags 9:45 - 11:15
 - Donnerstags 9:45 - 11:15
 - Insgesamt 29 Vorlesungen, der 1.11. ist ein Feiertag
 - Übungen: 26. Oktober 2016 - 8. Februar 2017
 - Mittwoch 8:00 - 9:30 (5 Gruppen)
 - Mittwoch 9:45 - 11:15 (8 Gruppen)
 - Mittwoch 11:30 - 13:00 (7 Gruppen)
 - **1. Termin: nächste Woche Mittwoch: 26.10.2016**
-
- Klausur: 13.02.2017 15:30-17:00 Gerthsen Hörsaal und Hörsaal Neue Chemie

1 Einleitung

1.1. Physikalische Größen, Maßeinheiten u. Dimensionen

1.1.1. Maßeinheiten

a) Internationale Konvention (SI)

Länge	Meter	m
Zeit	Sekunde	s
Masse	Kilogramm	kg
Lichtstärke	Candela	Cd
Strom	Ampere	A
Temperatur	Kelvin	K
Substanzmenge	Mol	mol

Kohärente
Basis-Einheiten

b) Abgeleitete Einheiten

Fläche m^2

Beschleunigung ms^{-2}

Kraft $N = \frac{kg \cdot m}{s^2}$

Energie $J = \frac{kg \cdot m^2}{s^2}$

Leistung $W = Js^{-1} = \frac{kg \cdot m^2}{s^3}$

c) Audere Einheitensysteme

- Seemeilen, Knoten
- Elle, Fuß, Yard, Luch
- cgs (cm, gram, sekunde)
- $h \approx 1$, $c \approx 1$

$\sim 1,852$ km

"Körpermaße"

veraltet

z.B. Teilchenphysik

d) Konsistenz der Einheiten

Beispiel Kreis (Radius)

- \Rightarrow Umfang: $\propto r$
- Fläche: $\propto r^2$
- Volumen: $\propto r^3$

Allgemeines Bsp:

$$T \propto M^\alpha L^\beta \left(\frac{L}{T^2}\right)^\gamma$$

$$M^\alpha L^{\beta+\gamma} \cdot T^{-2\gamma}$$

$\alpha = 0$

$\beta + \gamma = 0$

$-2\gamma = 1$

Exponentenvergleich:
Übereinstimmung der
Einheiten

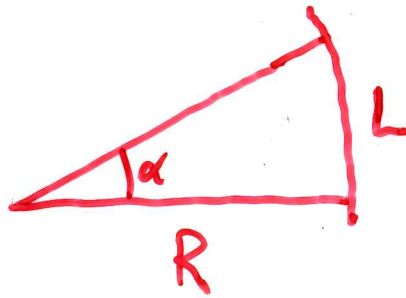
e) Winkereinheiten

- 1 Grad = 1° $\frac{1}{360}$ des Umfangswinkels des Kreises

- 1 Radian $\frac{360^\circ}{2\pi} = 57^\circ$

$$U = 2\pi R$$

$$L = \alpha [\text{Rad}] \cdot R$$



Winkel in Radian

Bogenlänge auf Einheitskreis

Für kleine L (oder α)

$$\sin \alpha \approx \alpha$$

f) Präfixe

10^{12}	Tera	T
10^9	Giga	G
10^6	Mega	M
10^3	Kilo	k
10^2	hekto	h
10^1	deka	da
10^{-1}	dezi	d
10^{-2}	centi	c
10^{-3}	milli	m
10^{-6}	mikro	μ
10^{-9}	nano	n
10^{-12}	piko	p
10^{-15}	femto	f
10^{-18}	atto	a

-5-

1.1.2 Definitionen und Standards

⇒ Folie

1.1.3. Größenordnungen

⇒ Film "Zehn Hoch"

a) Länge m

$$10^{-15} \text{ m} = 1 \text{ fm} \quad \text{Protonradius}$$

$$10^{-10} \text{ m} = 1 \text{ \AA} \quad \text{Atomradius}$$

$$10^{-6} \text{ m} = 1 \mu\text{m} \quad \text{Bakterien}$$

1 AU

Astronom. Einheit

$$150 \cdot 10^9 \text{ m}$$

1 Ly

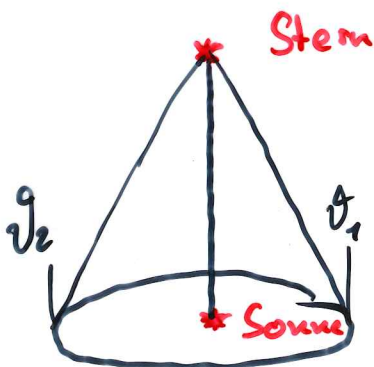
Lichtjahr

$$9,5 \cdot 10^{12} \text{ m}$$

1 Parsec

Parallaxensekunde

$$3,1 \text{ Ly}$$



$$\text{wenn } |\vartheta_2 - \vartheta_1| = 1''$$

$$\text{dann } d = 1 \text{ Ps}$$

Bureau International des Poids et Mesures (BIPM)

<http://www.bipm.org/en/measurement-units/>

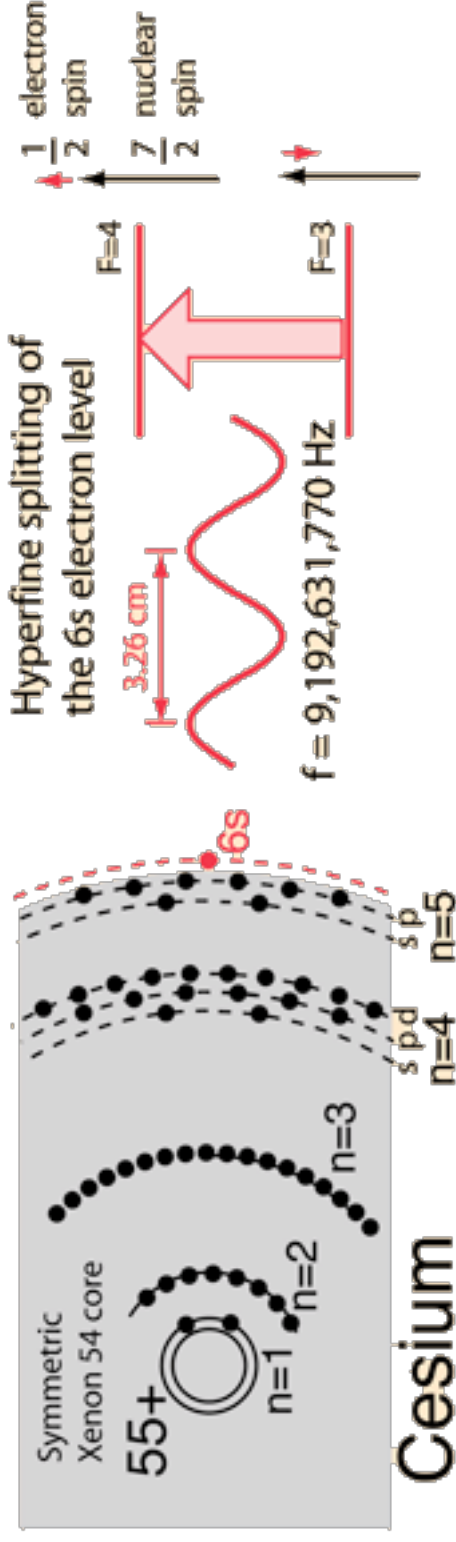
The SI base units are a choice of seven well-defined units which by convention are regarded as dimensionally independent

- The **metre** is the length of the path travelled by light in vacuum during a time interval of $1/299\,792\,458$ of a second.
- The **kilogram** is the unit of mass; it is equal to the mass of the international prototype of the kilogram.
- The **second** is the duration of $9\,192\,631\,770$ periods of the radiation corresponding to the transition between the two hyperfine levels of the ground state of the caesium ^{133}Cs atom.
- The **ampere** is that constant current which, if maintained in two straight parallel conductors of infinite length, of negligible circular cross-section, and placed 1 m apart in vacuum, would produce between these conductors a force equal to 2×10^{-7} newton per metre of length.
- The **kelvin**, unit of thermodynamic temperature, is the fraction $1/273.16$ of the thermodynamic temperature of the triple point of water.
- The **mole** is the amount of substance of a system which contains as many elementary entities as there are atoms in 0.012 kilogram of carbon ^{12}C . When the mole is used, the elementary entities must be specified and may be atoms, molecules, ions, electrons, other particles, or specified groups of such particles.
- The **candela** is the luminous intensity, in a given direction, of a source that emits monochromatic radiation of frequency 540×10^{12} hertz and that has a radiant intensity in that direction of $1/683$ watt per steradian.

All other SI units can be derived from these, by multiplying together different powers of the base units.

Sekunde

- **Vor 1960:**
 - Sonnensekunde: $1/(24 \times 60 \times 60)$ eines mittleren Sonnentages (Mittelwert über alle Tage)
- **1960-1967:**
 - Ephemeridensekunde: $1/31556925,9747$ des tropischen Jahres
- **Seit 1967:**
 - Definition: $\nu(\text{hfs Cs}) := 9192631770 \text{ Hz}$.
 - d.h. 1 Sekunde entspricht Dauer von 9192631770 Schwingungen des ^{133}Cs Atoms
 - Genauigkeit $\Delta t/t \sim 10^{-14}$



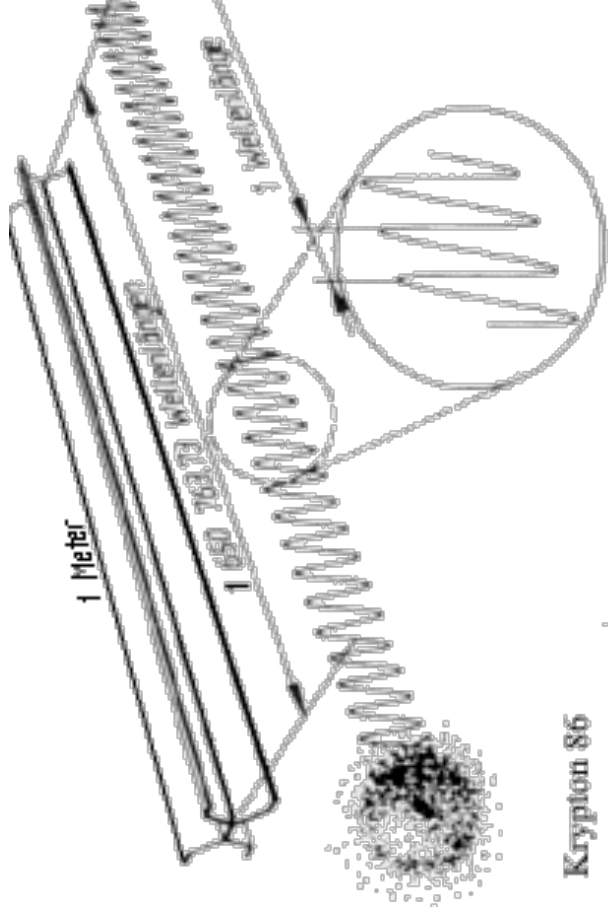
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/acloc.html>

Meter

- **1799 - 1960:**
 - Urmeter (Paris)
 - Abgeleitet vom Umfang der Erde (10^{-7} eines Viertels des Erdumfangs (Meridian))
 - Bestimmt über Triangulation
 - Genauigkeit $\Delta l/l \sim 10^{-4}$
 - 30 Kopien (verteilt an verschiedene Länder)

- **1960 - 1983:**
 - Definition über Wellenlänge λ von $^{86}\text{Krypton}$ beim Übergang $5d^5 \rightarrow 2p^{10}$
 - $1\text{m} = 1650763,73 \times \lambda$
 - Genauigkeit $\Delta l/l \sim 10^{-8}$

- **Seit 1983:**
 - Definition: Strecke, die Licht in $1/299792458$ s zurücklegt.
 - Genauigkeit: $\Delta l/l \sim 10^{-11} \dots 10^{-13}$ (je nach Methode)



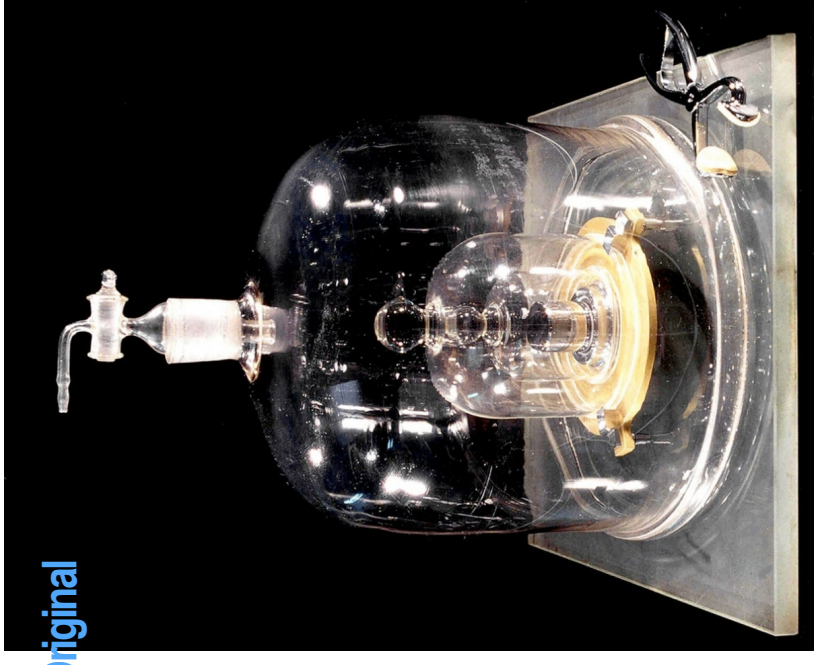
Kilogramm

- **Seit 1799**
 - Kilogramm-Prototypen (Paris)
 - Abgeleitet von der Dichte von Wasser (4 °C)
- **Seit 1889**
 - Aktueller Kilogramm-Prototyp (Paris)
 - Platin-Iridium (39,17 mm Höhe und Durchmesser)
 - 84 Kopien, geeicht auf etwa $\Delta m/m \sim 5 \times 10^{-9}$
 - Original: Unerklärter Verlust von Masse $50 \mu\text{g} / 100\text{a}$, also 5×10^{-8}

- **Gegenwärtig: Vorbereitungen für die Neu-Definition des Kilogramm aus Naturkonstanten**

- Mehrere Projekte
- Hier: Avogadro-Projekt, an dem auch die Physikalisch-technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig, beteiligt ist

Original



Kopie
(fotografiert 1915)

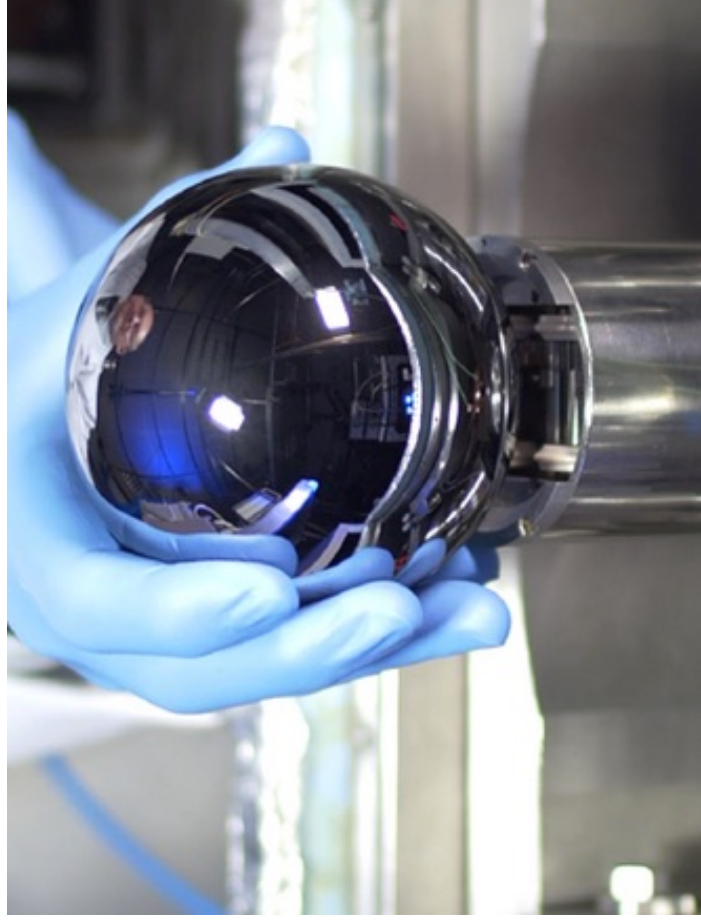


Das Avogadro-Projekt

Veröffentlichung: [PRL 106, 030801 \(2011\)](#)

- Bestimmung der Avogadro-Zahl N_A
- Ableitung des Kilogramm als Masse einer bestimmten Anzahl von Atomen von ^{28}Si

Kugel aus hochreinem ^{28}Si



$$m = \frac{M}{N_A} \cdot N$$

M = Molare Masse [kg/mol]

N_A = Avogadro-Zahl [1/mol]

N = Gesamtzahl der Teilchen

$$m = \frac{M}{N_A} \cdot n \cdot V$$

n = Teilchenzahl / Volumen [m^{-3}]

V = Volumen [m^3]

Quelle: www.ptb.de

Das Avogadro-Projekt

Veröffentlichungen u.a.: [PRL 106, 030801 \(2011\)](#),
[Metrologia 52, 360 \(2015\)](#)

- Produktion zweier Kugeln aus hochreinem ^{28}Si (gleiches Sample)
- V und n : komplexe interferometrische Verfahren (Bestimmung von Abständen)
- M : Massenspektrometrie (Bestimmung des Anteils von Verunreinigungen durch ^{29}Si und ^{30}Si)
- m : Aus Vergleich mit Kilogramm-Prototyp
- N_A : Berechnung aus MnV/m

■ Ergebnis (2015)

- $N_A = 6.02214076(12) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
- Unsicherheit: $\Delta m/m = 2 \times 10^{-8}$

■ Erwartet: Neudefinition im Jahr 2018

$$m = \frac{M}{N_A} \cdot n \cdot V$$

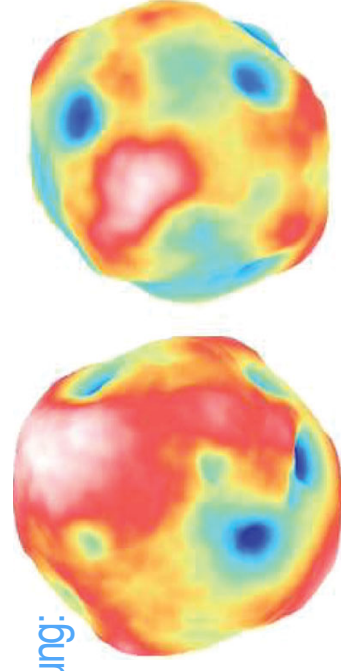
M = Molare Masse [kg/mol]

V = Volumen [m³]

n = Teilchenzahl / Volumen [m⁻³]

N_A = Avogadro-Zahl [1/mol]

■ m : Aus Vergleich mit Kilogramm-Prototyp



Beispiel

Volumenmessung:

FIG. 3 (color). Diameter topographies of the silicon spheres. The rainbow colors range from -63 nm (blue) to 37 nm (red). Peak-to-valley distances are 97 nm (AVO28-S5, left) and 89 nm (AVO28-S8, right).

The General Conference on Weights and Measures (CGPM), at its 24th meeting takes note of *the intention of the International Committee for Weights and Measures to propose a revision of the SI* as follows:

- **the International System of Units, the SI, will be the system of units in which:**
 - the ground state hyperfine splitting frequency of the Caesium 133 atom $\Delta\nu(^{133}\text{Cs})_{\text{hfs}}$ is exactly 9 192 631 770 Hz,
 - the speed of light in vacuum c is exactly 299 792 458 metre per second,
 - the Planck constant h is exactly $6.626\ 06\text{X} \times 10^{-34}$ joule second,
 - the elementary charge e is exactly $1.602\ 17\text{X} \times 10^{-19}$ coulomb,
 - the Boltzmann constant k is exactly $1.380\ 6\text{X} \times 10^{-23}$ joule per kelvin,
 - the Avogadro constant N_A is exactly $6.022\ 14\text{X} \times 10^{23}$ reciprocal mole,
 - the luminous efficacy K_{cd} of monochromatic radiation of frequency 540×10^{12} Hz is exactly 683 lumen per watt,

■ **The kilogram will continue to be the unit of mass, but its magnitude will be set by fixing the numerical value of the Planck constant to be equal to exactly $6.626\ 06\text{X} \times 10^{-34}$ when it is expressed in the SI unit $\text{m}^2 \text{kg s}^{-1}$, which is equal to Js**

■ ...

■ **the definition of the kilogram in force since 1889 based upon the mass of the international prototype of the kilogram (1st meeting of the CGPM, 1889, 3rd meeting of the CGPM, 1901) will be abrogated**

b) Zeit

1 Jahr $3,16 \cdot 10^7$ s $\approx \pi \cdot 10^7$ s

Alter Universum $13,8 \cdot 10^9$ Jahre

Lebensdauer Top-Quark $\approx 5 \cdot 10^{-25}$ s

Neutronen ≈ 10 min

Protonen $> 10^{35}$ s

c) Masse

Galaxie: $2 \cdot 10^{12} M_{\odot}$

Sonne: $2 \cdot 10^{30}$ kg

Erde: $6 \cdot 10^{24}$ kg

Proton: $1,7 \cdot 10^{-27}$ kg

Elektron: $9 \cdot 10^{-31}$ kg

Photon: $< 2 \cdot 10^{-54}$ kg

1.2. Messungen und Unsicherheiten

1.2.1 Signifikante Stellen

Beispiele:

a) 2,50 → 3 signifikante Stellen

⇒ "0 mitgemessen"

b) 0,0010 → 2 signifikante Stelle

$$= 1,0 \cdot 10^{-3}$$

Exponential
"Gleitkomma" Darstellung

⇒ Anzahl der Stellen in Gleitkomma-Darst.

Angabe von Unsicherheiten:

z.B. $2,50 \pm 0,02$

⇒ Gleiche Anzahl signifikante Stellen