

Einführung in die Experimentalphysik I

(Mechanik, Wärmelehre)

Wintersemester 2003/2004

Präsentationsfolien von Prof. Dr. René Matzdorf

(jetzt: Univ. u. GH. Kassel)

Vortragender: Prof. Dr. Gerhard Schaack

(Physikalisches Institut, Univ. Würzburg)

Vorlesungstechnik: Roland Wenisch

Übungen: Wolfgang Reusch mit Thomas Wilhelm

**Präsentationsfolien unter:
www.physik.uni-wuerzburg.de/einfuehrung1/**

1

Was ist Physik?

Physik ist eine Erfahrungswissenschaft

Ihre Aufgabe ist die Erforschung der Struktur der unbelebten Materie und der Wechselwirkungen ihrer Bausteine. Physiker entwickeln Modelle der Naturphänomene, die in Form mathematischer Beziehungen als Naturgesetze angegeben werden können. Deren Vorhersagen werden an der Erfahrung (Experiment) geprüft und die Modelle werden verifiziert, erweitert oder verworfen;

oder:

Neue Phänomene oder Gesetzmäßigkeiten werden im Experiment entdeckt, erforscht und in bestehende Modelle theoretisch eingefügt oder sie zwingen zur Erweiterung oder Neuformulierung solcher Modelle.

2

Entwicklung des Weltmodells

**C. Ptolemäus; ~ 90-160 n. Chr.,
Alexandria**



Geozentrisches Weltbild. („Wahr ist, was man wahrnimmt“, (falsch!)). Bahnen der äußeren Planeten sind Epizykloiden.

**N. Kopernikus; 1473 – 1543
Frauenburg**

Heliozentrisches Weltbild. Bahnen aller Planeten sind Kreise mit der Sonne im Zentrum

**J. Kepler; 1571 – 1630,
Prag, Linz**

Heliozentrisches Weltbild, aber Bahnen aller Planeten sind Ellipsen mit der Sonne in einem Brennpunkt.

Heute:

Sonne ist ein Stern unter 10^{11} Sternen in der Milchstraße, diese ist eine Galaxie unter 10^{10} im Kosmos. Es existiert kein kosmisches Zentrum.

3

Begründung der Experimentalphysik



**Galileo Galilei, 1564-1642
Physiker und Astronom
(Pisa, Padua, Florenz)**



Dom zu Pisa, 11. – 14. Jahrhundert
(Galileis erste Experimente)

Grundlagen der Mechanik: Pendelgesetze, Fallgesetze, gleichförmige und gleichförmig beschleunigte Bewegung, Trägheitsgesetz. Astronomie: „Galileisches Fernrohr“, Jupiter-Monde, Mondgebirge, Phasen von Venus und Merkur, Zusammensetzung der Milchstraße, Beweis des kopernikanischen Weltsystems, Inquisitionsprozeß: formelle Rehabilitation erst 1992.

4

Physikalische Größen

Der Wert einer physikalischen Größe ist gleich dem Produkt ihres Zahlenwertes mit einer Einheit.

$$\text{Physikalische Größe} = \text{Zahlenwert} \times \text{Einheit}$$

Physikalische Größen, Zahlenwerte und Einheiten unterliegen alle den geläufigen Regeln der Algebra, Einheiten nur der Multiplikation und der Division.

Beispiel: Wellenlänge λ einer der gelben Natriumlinien:

$$\lambda = 5,896 \times 10^{-7} \text{ m} = 589,6 \text{ nm.}$$

Praktischer Hinweis: Dimensionskontrolle!

Beispiel: $E = M \times c^2$, Dimension der Energie E: $[\text{kg m}^2/\text{s}^2]$

Argumente von trigonometrischen, Logarithmus- und Exponential - Funktionen haben keine Dimension!

5

Physikalische Grundgrößen und abgeleitete Größen

Gemäß internationalen Konventionen werden physikalische Größen angegeben in einem System von Dimensionen, aufgebaut auf sieben Grundgrößen, von denen jede eine eigene Dimension hat. Diese Grundgrößen und die Symbole für ihre Bezeichnung sind:

<u>Physikalische Größe:</u>	<u>Symbol für die Größe:</u>	<u>Basiseinheit</u>
1. Länge	l	Meter (m)
2. Masse	m	Kilogramm (kg)
3. Zeit	t	Sekunde (s)
4. Elektrischer Strom	I	Ampere (A)
5. Thermodynamische Temperatur	T	Kelvin (K)
6. Stoffmenge	n	Mol (mol)
7. Lichtstärke	I	Candela (cd)

Alle anderen physikalischen Größen werden „abgeleitete Größen“ genannt und haben Dimensionen, die algebraisch von den sieben Grundgrößen hergeleitet werden mittels Multiplikation und Division.

Beispiel: Dimension der Energie = Dimension von $(\text{Masse} \cdot \text{Länge}^2 / \text{Zeit}^2; \text{kg} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}.)$

6

Abkürzung für Zehnerpotenzen:			Beispiele:
10 ¹⁸	Exa	E	
10 ¹⁵	Peta	P	Petawatt
10 ¹²	Tera	T	Terabyte
10 ⁹	Giga	G	Gigawatt
10 ⁶	Mega	M	Megawatt
10 ³	kilo	k	Kilogramm
10 ²	hekto	h	Hektopascal
10 ¹	deca	da	Decapascal
10 ⁻¹	dezi	d	Deziliter
10 ⁻²	centi	c	Centimeter
10 ⁻³	milli	m	Millimeter, Milliampère
10 ⁻⁶	mikro	μ	Mikrometer, Mikrosekunde
10 ⁻⁹	nano	n	Nanometer
10 ⁻¹²	pico	p	Picosekunde
10 ⁻¹⁵	femto	f	Femtosekunde
10 ⁻¹⁸	atto	a	

7

Zeit, Länge und Geschwindigkeit

Grundsätzliches zur Messung physikalischer Größen:

1. Definition einer Einheit (durch eine Meßvorschrift).
2. Abzählen von Vielfachen dieser Einheit
oder Vielfache von Bruchteilen der Einheit.

Oder: Mittels physikalischem Gesetz zurückführen
auf das Messen anderer Größen.

Keine Messung kann exakt sein. Mögliche Fehlerquellen sind:

1. Meßvorschrift unterliegt äußeren Einflüssen
wie z.B. Umgebungstemperatur, Alterung, Materialermüdung, usw.
2. Ablesefehler
3. statistische Schwankungen

8

Zeit: Einheit und Zeitmessung

- Einheit der Zeit ist die Sekunde.
 - Messung der Zeit mit Hilfe von periodischen Vorgängen, wie z.B. astronomischen Vorgängen, Schwingungen, inneratomaren Vorgängen.
- Die Zeit ist die physikalische Größe, die am genauesten gemessen werden kann: Genauigkeit ca. 10^{-14} , d.h. 1 millionstel Sekunde pro Jahr.

Definition der Sekunde:

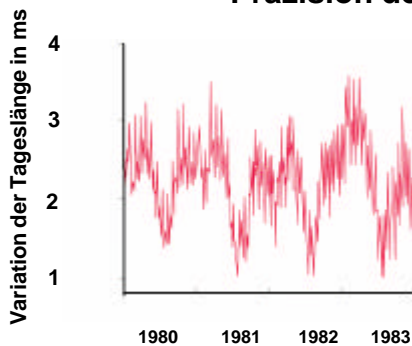
Früher: 1 Sekunde = $1/86\,400$ eines mittleren Sonnentages.

Aber: Schwankungen der Erdrotation setzen der Definition Grenzen in ihrer Genauigkeit (Ursache z.B. Tektonik, Gezeitenwirkung durch Mond und Sonne, u.a.; siehe nächste Folie, → Versuch: Drehschemel).

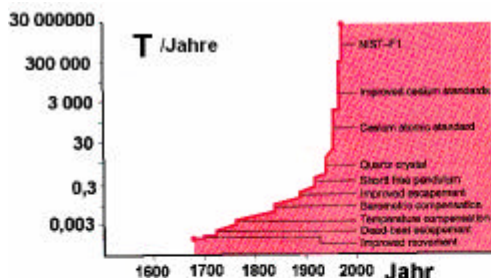
Heute: 1 Sekunde = $9\,192\,631\,770$ -fache der Periodendauer der dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustandes von Atomen des Nuklides ^{133}Cs entsprechenden Strahlung.

9

Präzision der Zeitmessung



Variation der Tageslänge (Erdrotation) in ms im Vergleich mit einer Cäsiumuhr über einen Zeitraum von vier Jahren.



Technischer Fortschritt bei der Entwicklung von Präzisionsuhren: Zeitspanne T (in Jahren) für einen Fehlgang von 1s; (vertikale Achse im logarithmischen Maßstab). Exponentieller Anstieg der technischen Perfektion: „Moore's Law“. Änderung der Zeitkonstanten t bei Technologiewechsel (ca. 1950).

13

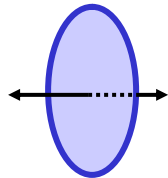
Genaue Zeitmessung war im Altertum wichtig für Navigation der Seefahrer.
Bestimmung der geografischen Länge: 40 000 km entspr. 86 400 Sekunden.
Daher frühzeitig Entwicklung von genauen Uhren.

Uhren:

Pendeluhrn,

Mechanische Uhren mit Unruhe aus federgetriebenem Drehpendel,

Quarzuhrn:

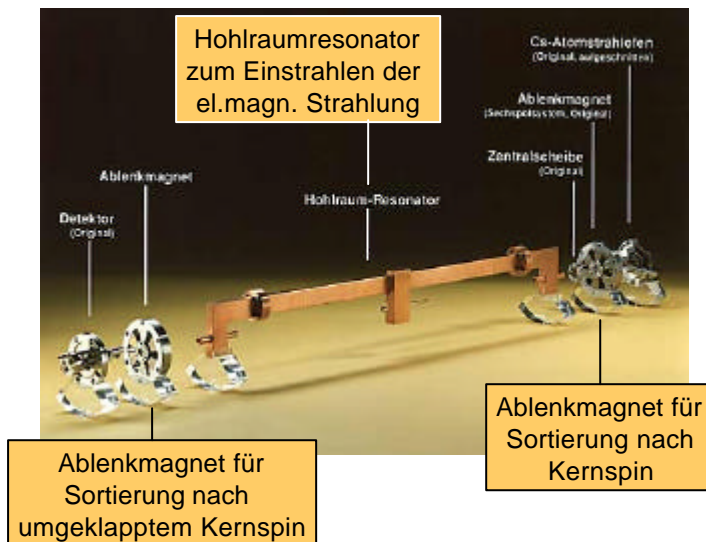


Biegeschwingung eines
Quarsplättchens, elektrisch angeregt
durch piezoelektrischen Effekt

Atomare Vorgänge sind am besten zu messen und zu reproduzieren,
sie unterliegen unter geeigneten Bedingungen nur wenig äußeren Einflüssen.
Atome in Festkörpern beeinflussen sich gegenseitig zu stark.

10

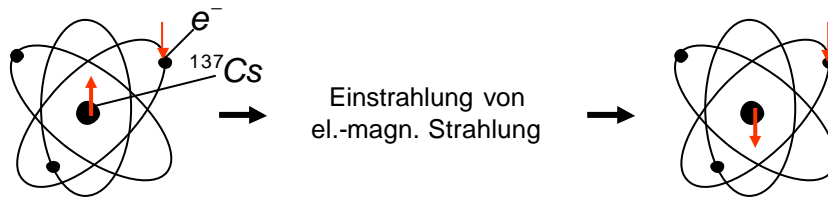
Cäsium-Atomuhr



Die Mikrowellenstrahlung (ca. 9 GHz) wird ständig auf optimale Ausbeute am Detektor geregelt und die Schwingungen gezählt.

12

Zeitmessung mit einer Cäsium-Atomuhr



Unterschiedliche Bindungsenergie der Elektronen (Hyperfinestruktur)

11

Messung von Zeitintervallen:

periodischer Vorgang, z.B. Quarz, gibt Zählimpulse

Beginn des Zeitintervalls → Start des Zählers

Ende des Zeitintervalls → Stoppen des Zählers

Versuch: Reaktionszeit

Konsequenz: Starten und Stoppen des Zählers automatisieren

Versuch: Schwingungsdauer eines Pendels

Versuch: Stoßzeit von zwei Stahlkugeln

Angabe des Meßergebnisses

Zahlenwert · Einheit ± Meßfehler

z.B. $2,35 \text{ s} \pm 0,05 \text{ s}$ oder $(2,35 \pm 0,05) \text{ s}$

Abkürzung bei Zehnerpotenzen in Tausenderschritten:

z.B. $(4,0 \pm 0,5) \cdot 10^{-3} \text{ s} = (4,0 \pm 0,5) \text{ ms}$

14

Relativität der Zeit

Einsteins Relativitätstheorie sagt voraus, daß die Zeit in gegeneinander bewegten und beschleunigten Systemen und unter dem Einfluß der Gravitation unterschiedlich verläuft.

Experimente bestätigen, daß Uhren unterschiedliche Zeit anzeigen,
 -wenn sie mit dem Flugzeug mit hoher Geschwindigkeit transportiert werden
 -(? „Spezielle Relativitätstheorie“)
 - wenn eine auf dem Berg, die andere im Tal steht, (Wirkung der unterschiedlichen Gravitation, ? „Allgemeine Relativitätstheorie“).

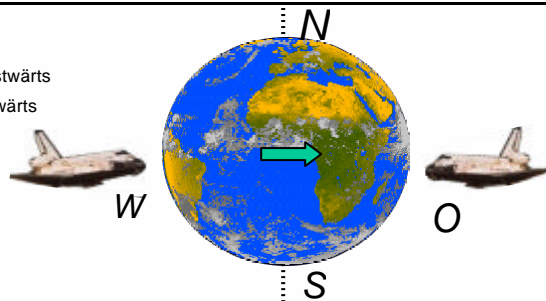
Dieser Unterschied betrifft alle möglichen physikalischen Experimente in einem ruhenden oder bewegten System.

Es gibt keine absolute Zeit, sie ist abhängig davon, wo man sie mißt bzw. von wo aus man die Messung beobachtet.

15

Experiment mit 5 Atomuhren

2 Uhren im Flugzeug umrunden die Erde westwärts
 2 Uhren im Flugzeug umrunden die Erde ostwärts
 1 Uhr bleibt am Boden ortsfest



Ostflug: Erddrehung + Fluggeschwindigkeit → Zeit läuft langsamer,
 Westflug: Erddrehung - Fluggeschwindigkeit → Zeit läuft schneller,
 Flughöhe: geringere Gravitation → Zeit läuft schneller,
 jeweils verglichen mit der Uhr am Boden

Uhrenvergleich nach den Flügen ergibt folgende Zeitdifferenzen:

	Ostflug	Westflug	
Gravitation	(144 ± 14) ns	(179 ± 18) ns	} Theorie
Geschwindigkeit	(-184 ± 18) ns	(96 ± 10) ns	
Summe	(- 40 ± 23) ns	(275 ± 21) ns	
Experiment	(- 59 ± 10) ns	(273 ± 7) ns	

16

Einheit der Länge



Die Einheit der Länge ist das Meter

Definition des Meters:

- Ursprünglich: 1 Meter = 1/10 000 000 des Meridians vom Nordpol zum Äquator durch Paris.
- 1874 Erstes angefertigte Meterstück war 0.2mm zu kurz wegen Fehlkalkulation der Erdabplattung.
- 1889 Urmeter aus Platin-Iridium. Beibehaltung der „kurzen“ Länge. Urmeter unterliegt Wärmeausdehnung, Durchbiegung, etc.
- 1927 Festlegung der Meßvorschrift: Temperatur, Luftdruck, etc.
- 1960 Definition über atomare Größe: die Wellenlänge der Strahlung eines Übergangs im ⁸⁶Krypton.
- 1983 Definition über eine Naturkonstante, die Lichtgeschwindigkeit.
Definition: $c_0 = 299\,792\,458$ m/s (exakt!)

Das Meter ist die Länge der Strecke, die das Licht im Vakuum zurücklegt in einem Zeitintervall von 1/299 792 458 einer Sekunde.

17

Lichtgeschwindigkeit (Olaf Römer, 1675)

Römer beobachtete, daß die Jupitermonde zur Zeit der größten Entfernung der Erde vom Jupiter 16 Minuten später untergingen als zur Zeit der geringsten Entfernung Erde-Jupiter. In 16 Minuten legt das Licht eine Strecke von der Größe des Bahndurchmessers der Erde um die Sonne zurück.

Vakuum-Lichtgeschwindigkeit als Grundlage zur Definition des Meters ist ideal, denn sie ist gemäß der Relativitätstheorie in allen (Inertial-)Systemen gleich.

Mit der Definition einer Geschwindigkeit wird die Längenmessung auf eine Zeitmessung zurückgeführt.

Geschwindigkeit allgemein (sofern konstant):

Geschwindigkeit $v =$ zurückgelegter Weg s / verstrichene Zeit t

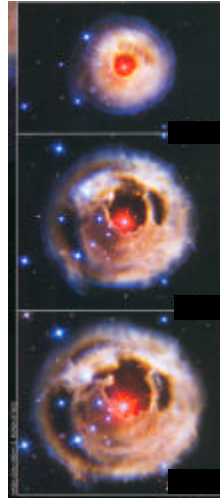
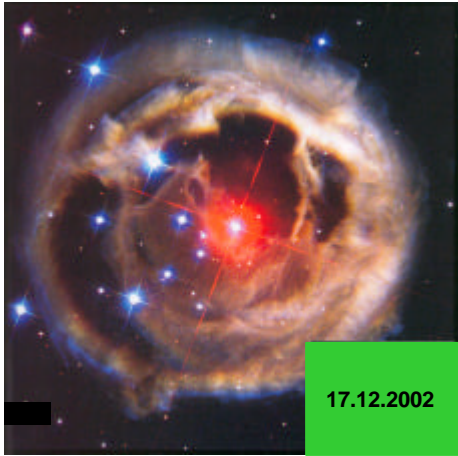
$$v = \frac{s}{t}$$

Einheit der Geschwindigkeit: m/s

18

Beobachtung der endlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes im Weltraum

(Aufnahmen des Hubble-Weltraumteleskopes)



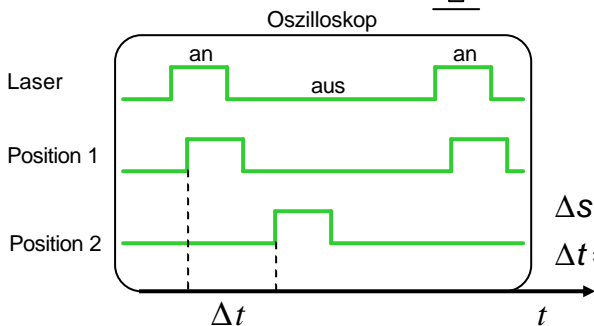
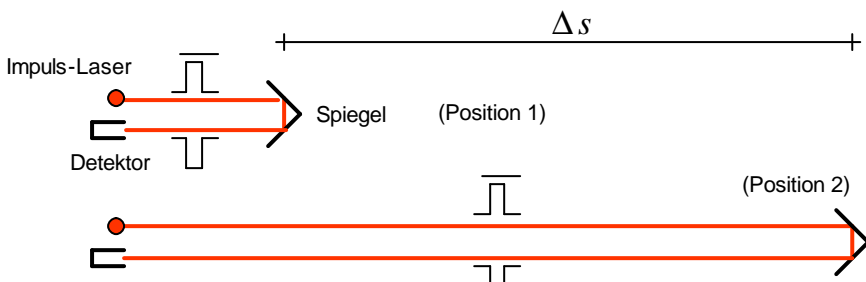
20. 05. 2002

02. 09. 2002

28. 10. 2002

19

Experiment: Messung der Lichtgeschwindigkeit



$$c = \frac{2 \cdot \Delta s}{\Delta t}$$

Im Experiment:

$$\left. \begin{array}{l} \Delta s = 15m; \\ \Delta t = 100ns; \end{array} \right\} c = 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$$

20

Längenmessung

Große Längen:

Laufzeitmessung von kurzen Impulsen.

GPS (Global Positioning System) arbeitet mit Laufzeitmessungen.

Laufzeitmessungen zur Entfernungsbestimmung, Verkehrsüberwachung.

Kleine Längen:

Wellenlänge λ und Frequenz n der el.-magn. Strahlung sind über die Lichtgeschwindigkeit miteinander verknüpft. T : Schwingungsdauer.

$$c = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot n; \quad n = \frac{1}{T}.$$

Es ist heute möglich, die Frequenz von Laserstrahlung mit einer Atomuhr zu messen.

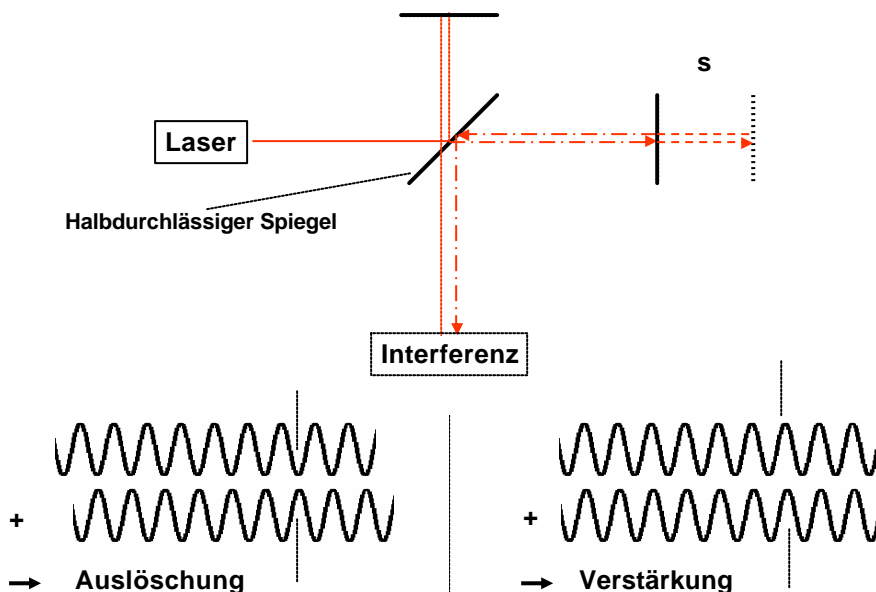
Mit der definierten Lichtgeschwindigkeit ist die Wellenlänge damit bekannt

Genauigkeit: 10^{-14}

Messung einer Länge wird dann mit Laserinterferometer durchgeführt.

21

Längenmessung mit Laserinterferometer (nach A. Michelson)



22

Praktische Längenmessung



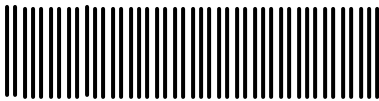
Zentimetermaß $\pm 1 \text{ mm}$



Schieblehre
(Nonius) $\pm 0,1 \text{ mm}$



Mikrometerschraube $\pm 10 \mu\text{m}$



Elektronische Messung $\pm 0.1 \mu\text{m}$

23

Praktische Längenmessung



Zentimetermaß $\pm 1 \text{ mm}$

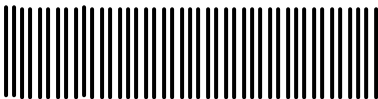


Schieblehre $\pm 0,1 \text{ mm}$



Mikrometerschraube $\pm 10 \mu\text{m}$

Moiré-Muster:



23