

# Zeit, Länge und Geschwindigkeit

## **Grundlegendes zur Messung physikalischer Größen:**

1. Definition einer Einheit
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, etc.
2. Ablesefehler
3. statistische Schwankungen

# 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 =  $1/86400$  eines mittleren Sonnentages

Aber: Schwankungen der Erdrotation setzen der Definition Grenzen in ihrer Genauigkeit (Ursache z.B. Laub der Bäume)

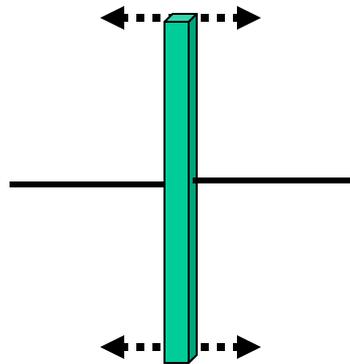
→ Versuch Drehschemel

Heute: 1 Sekunde = 9192631770-fache der Periodendauer der dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustandes von Atomen des Nuklides  $^{133}\text{Cs}$  entsprechenden Strahlung

Genauere Zeitmessung war im Altertum wichtig für Navigation der Seefahrer.  
Bestimmung der geografischen Länge: 40000 km entspr. 86400 Sekunden.  
Daher frühzeitig Entwicklung von genauen Uhren.

Uhren:

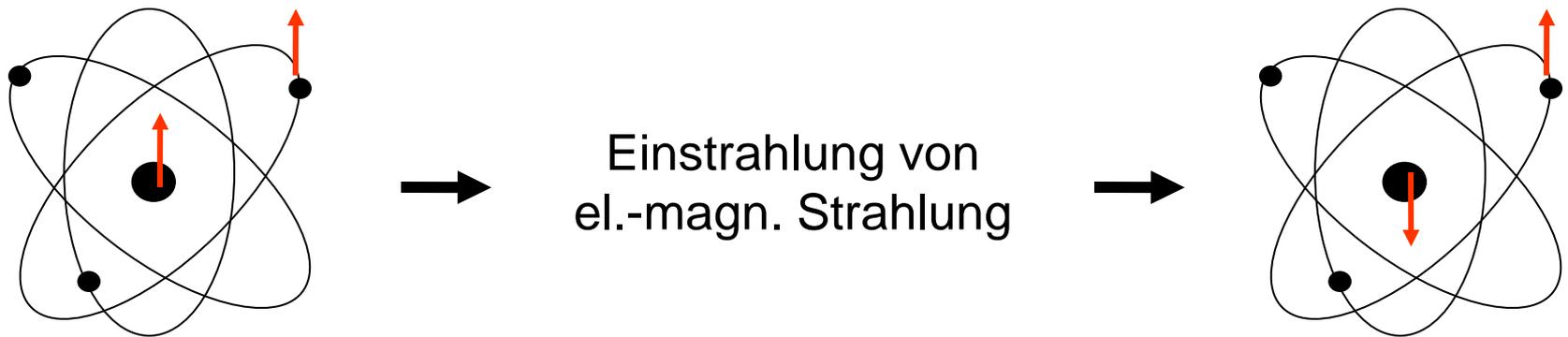
- Pendeluhren,
- Mechanische Uhren mit Unruhe aus Federgetriebenen Drehpendel
- Quarzuhren



Biegeschwingung eines  
Quarzstabes, elektrisch angeregt  
durch piezoelektrischen Effekt

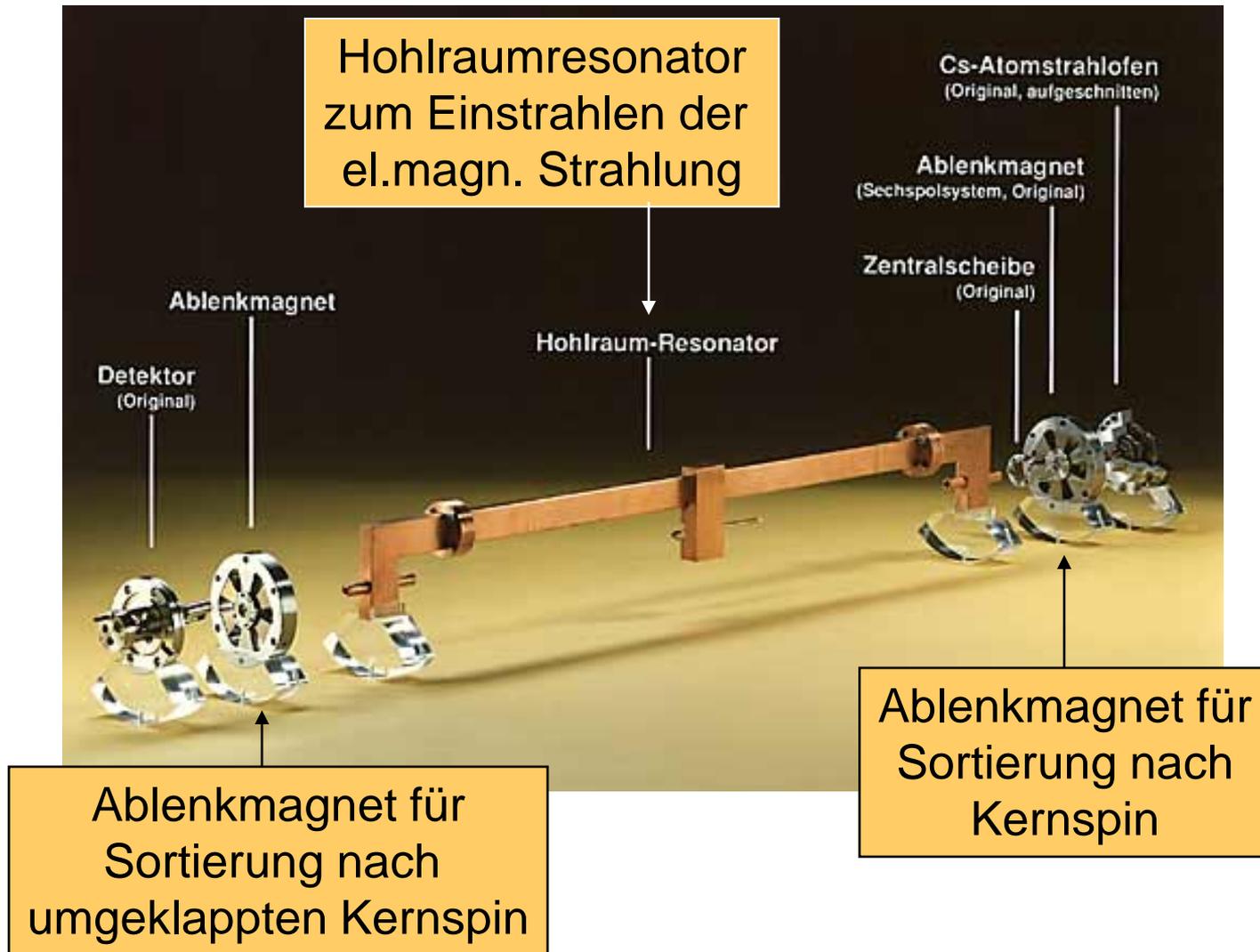
Atomare Vorgänge sind am besten zu messen und zu reproduzieren,  
sie unterliegen unter geeigneten Bedingungen nur wenig äußeren Einflüssen.  
Atome in Festkörpern beeinflussen sich gegenseitig zu stark.

# Zeitmessung mit einer Cäsium-Atomuhr



Unterschiedliche Bindungsenergie der Elektronen (Hyperfineinstruktur)

# Cäsium-Atomuhr



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

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

## Abkürzung für Zehnerpotenzen:

$10^{18}$	Exa	E
$10^{15}$	Peta	P
$10^{12}$	Tera	T
$10^9$	Giga	G
$10^6$	Mega	M
$10^3$	kilo	k
$10^2$	hekto	h
$10^{-1}$	dezi	d
$10^{-2}$	centi	c
$10^{-3}$	milli	m
$10^{-6}$	mikro	$\mu$
$10^{-9}$	nano	n
$10^{-12}$	pico	p
$10^{-15}$	femto	f
$10^{-18}$	atto	a

## Beispiele:

Terabyte

Gigawatt

Megawatt

Kilogramm

Hektopascal

Deziliter

Centimeter

Millimeter, Milliampère

Mikrometer, Mikrosekunde

Nanometer

Picosekunde

Femtosekunde

# 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  
- wenn eine auf dem Berg, die andere im Tal steht

Dieser Unterschied betrifft alle möglichen physikalischen Experimente in einem solchen 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.

## 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
Geschwindigkeit	( -184 ± 18 ) ns	( 96 ± 10 ) ns
Summe	( - 40 ± 23 ) ns	( 275 ± 21 ) ns
Experiment	( - 59 ± 10 ) ns	( 273 ± 7 ) ns

# 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  $^{86}\text{Krypton}$ .

1986 Definition über eine Naturkonstante: Die Lichtgeschwindigkeit.  
Definition:  $c = 299\,792\,485,00000 \text{ m/s}$



# Lichtgeschwindigkeit

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.

1 Meter ist die Länge, die das Licht im Vakuum in 1/299792485 Sekunden zurücklegt

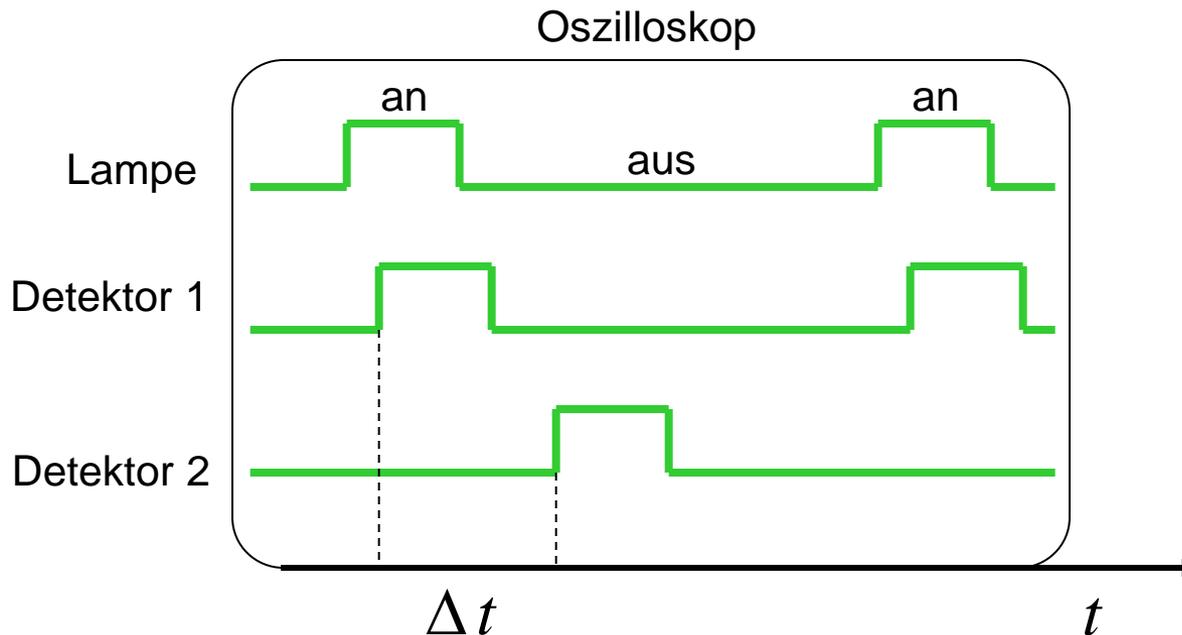
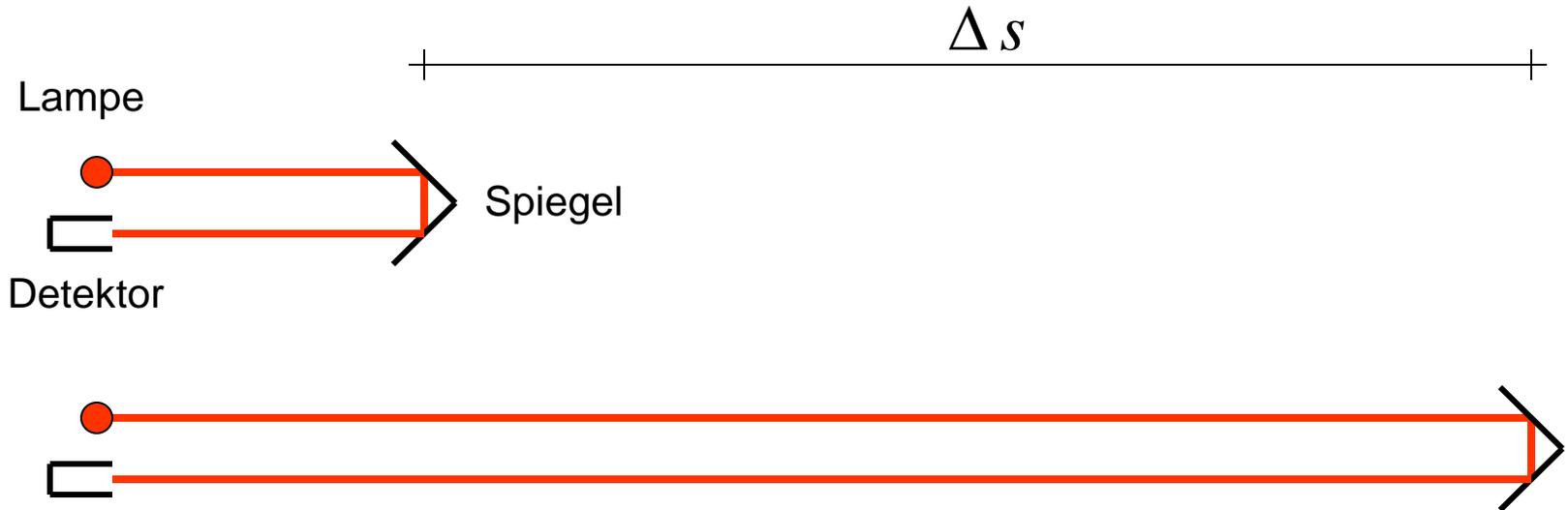
## **Geschwindigkeit allgemein (sofern konstant):**

Geschwindigkeit = zurückgelegter Weg / verstrichene Zeit

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

Einheit der Geschwindigkeit: m/s

# Experiment: Messung der Lichtgeschwindigkeit



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

# Längenmessung

## Große Längen:

Laufzeitmessung von kurzen Impulsen.

GPS (Global Positioning System) arbeitet mit Laufzeitmessungen

## Kleine Längen:

Wellenlänge und Frequenz elektro-magnetischer Strahlung sind über die Lichtgeschwindigkeit miteinander verknüpft.

$$c = \frac{\lambda}{\tau} = \lambda \cdot \nu$$

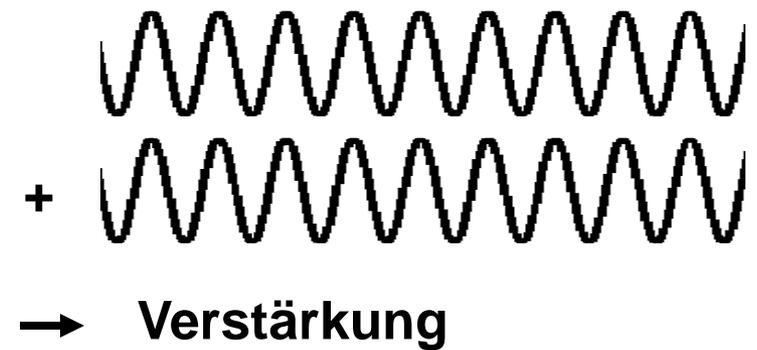
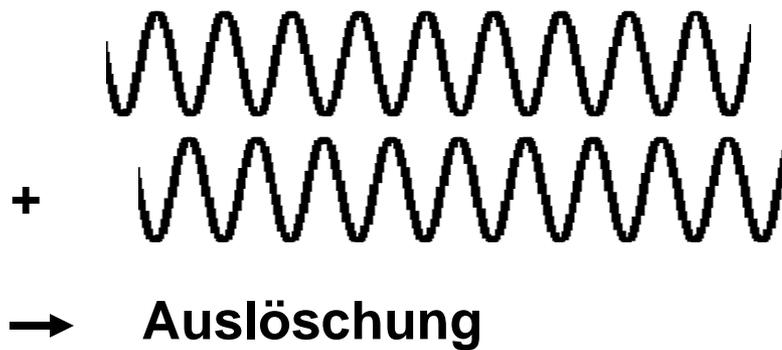
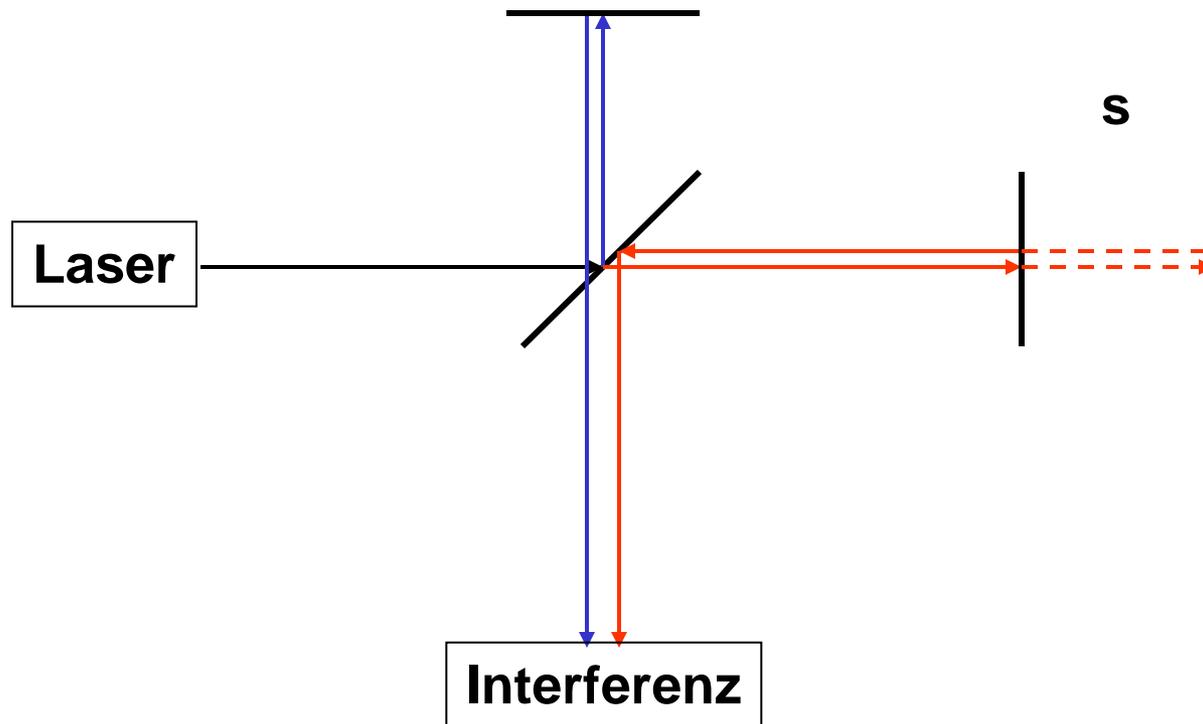
Es ist heute möglich die Frequenz von Laserstrahlung mit einer Atomuhr zu messen.

Mit der definierten Lichtgeschwindigkeit ist die Wellenlänge damit bekannt

Genauigkeit:  $10^{-14}$

Messung einer Länge wird dann mit Laserinterferometer durchgeführt.

# Längenmessung mit Laserinterferometer



# Praktische Längenmessung



Zentimetermaß

$\pm 1 \text{ mm}$



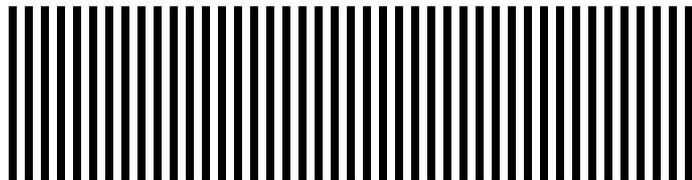
Messschieber

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



Mikrometerschraube

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



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