

**Integrierter Kurs P1a im WiSe 2009/10**

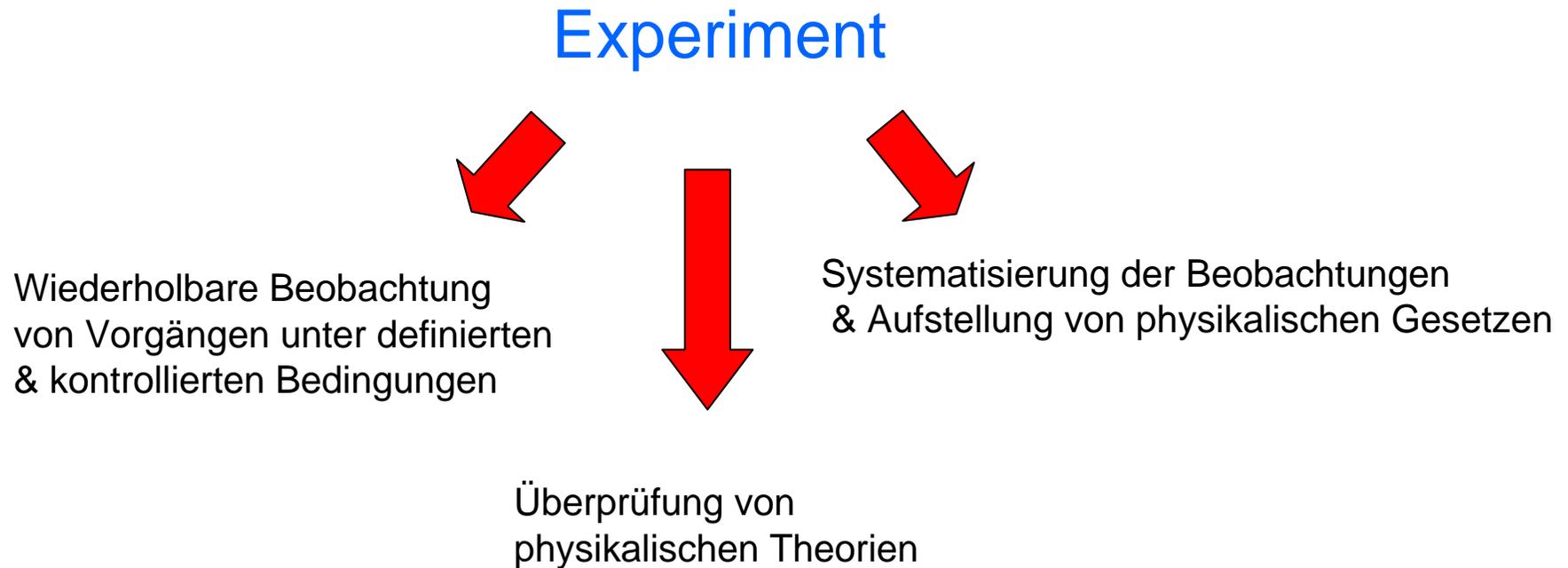
**Skript Experimentalphysik**

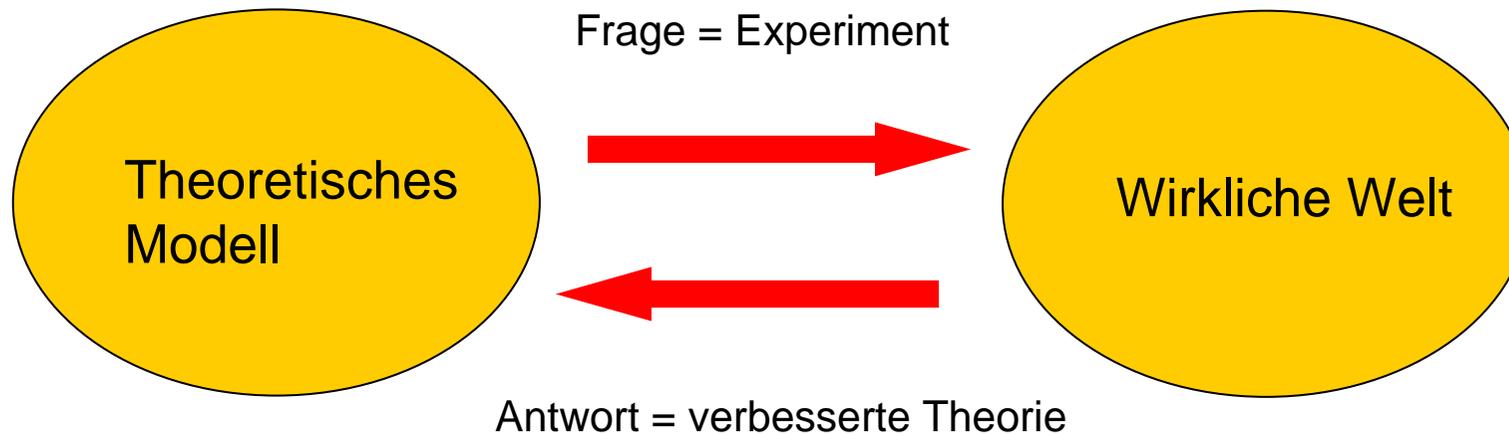
**Prof. Dr. Oliver Benson**

# I. Einleitung

## 1. Das physikalische Weltbild

- ➡ Die Physik beschäftigt sich mit den Grundbausteinen der wahrnehmbaren Welt und deren gegenseitigen Wechselwirkungen.
- ➡ Wesentliches Werkzeug dabei ist das Experiment.



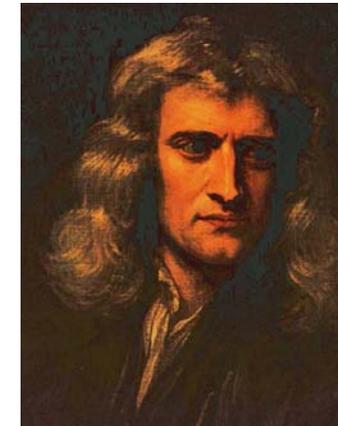


Erfinder des Experimentes, d.h. von gezielten Fragen an die Natur ist Galileo Galilei (1564 – 1642).

- Das Experiment ermöglichte die Entwicklung der klassischen (nicht philosophischen) Physik.
- Die Einführung der Mathematik in die Physik (I. Newton) ermöglichte eine objektive Sprache.



Galileo Galilei  
(1564-1642)



Isaac Newton  
(1643-1727)

## Historische Perioden der Physik:

- Antike Naturphilosophie  
(Aristoteles)

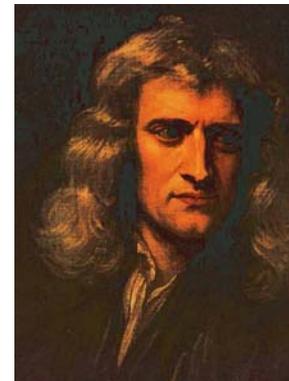
Aristoteles  
(384-322 BC)



- Klassische Physik  
(Galilei, Newton)



Galileo Galilei  
(1564-1642)

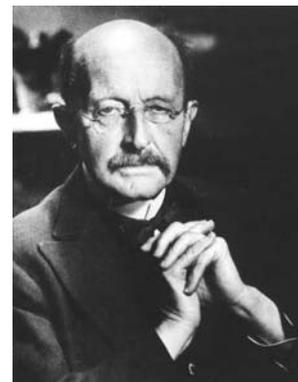


Isaac Newton  
(1643-1727)



James Clerk Maxwell  
(1831-1879)

- Moderne Physik  
(Planck, Bohr, Einstein)



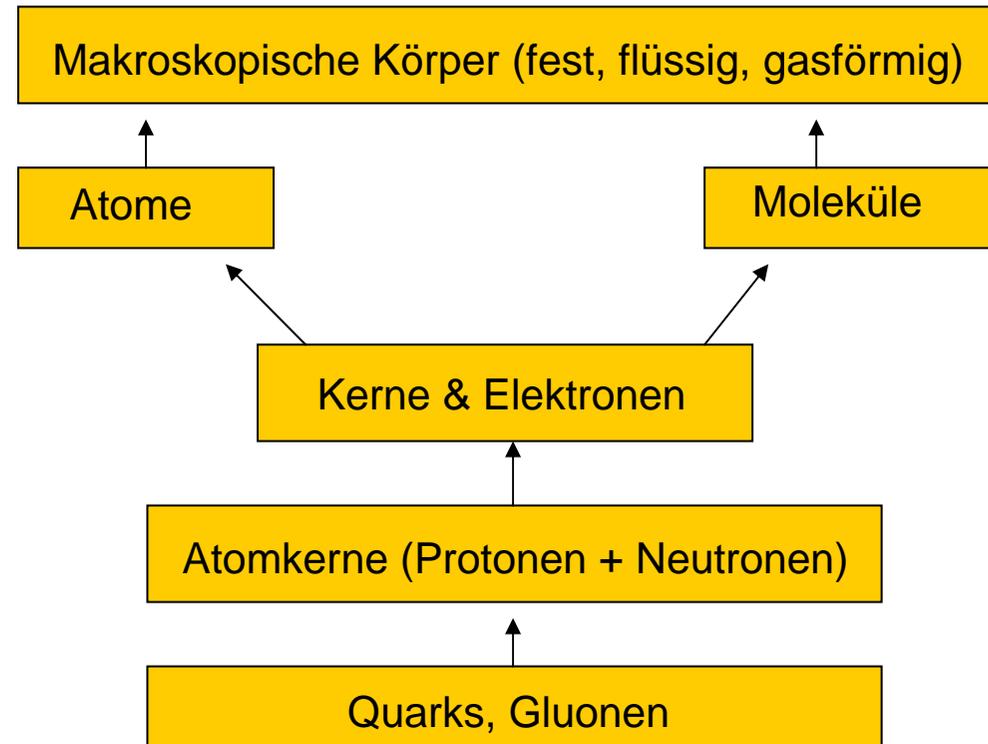
Max Planck  
(1858-1947)



Albert Einstein  
(1879-1955)

## Heutiges Weltbild:

Das heutige Weltbild erklärt die komplexen Phänomene durch Wechselwirkungen weniger Grundbausteine der Materie.

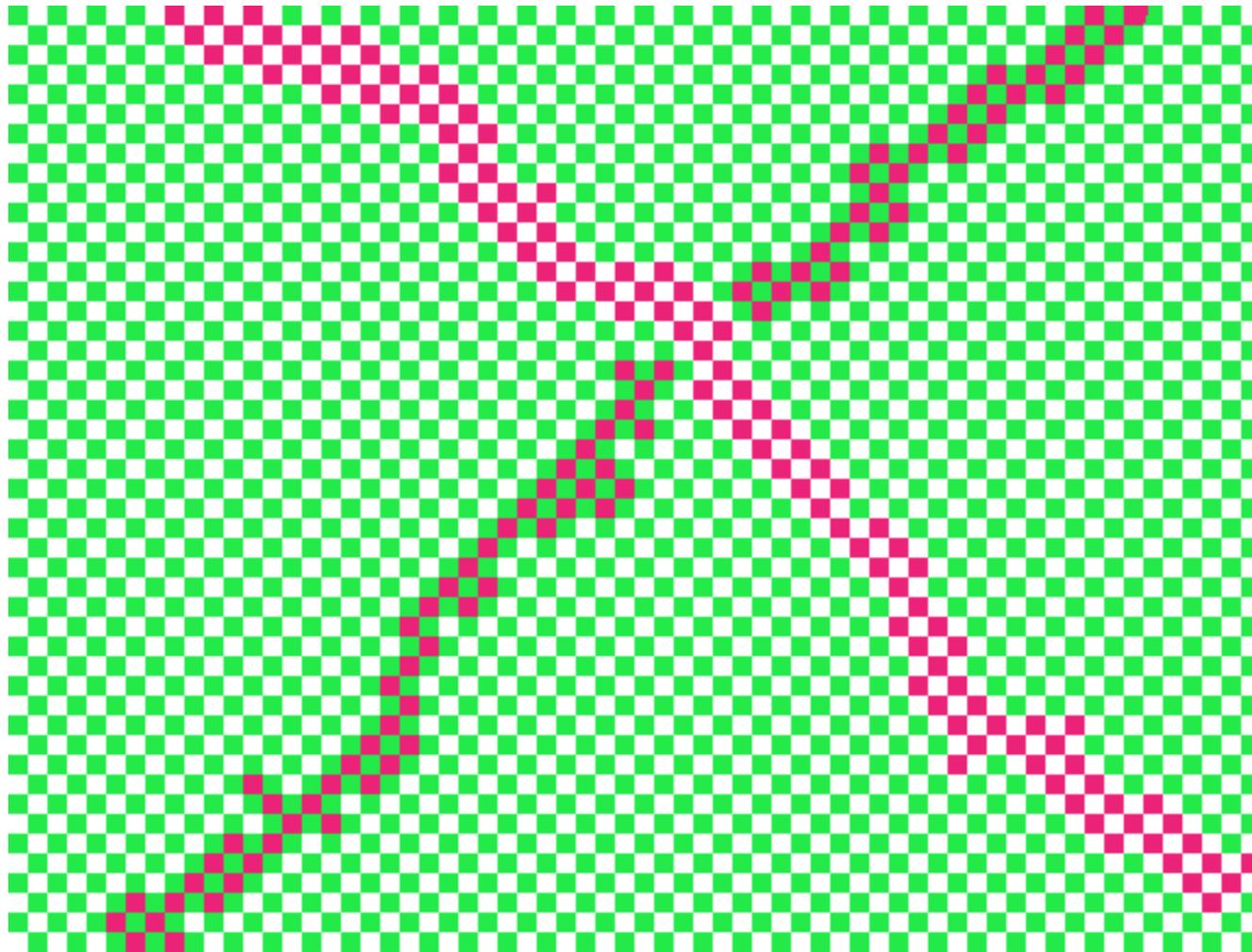


## Teilgebiete der Physik:

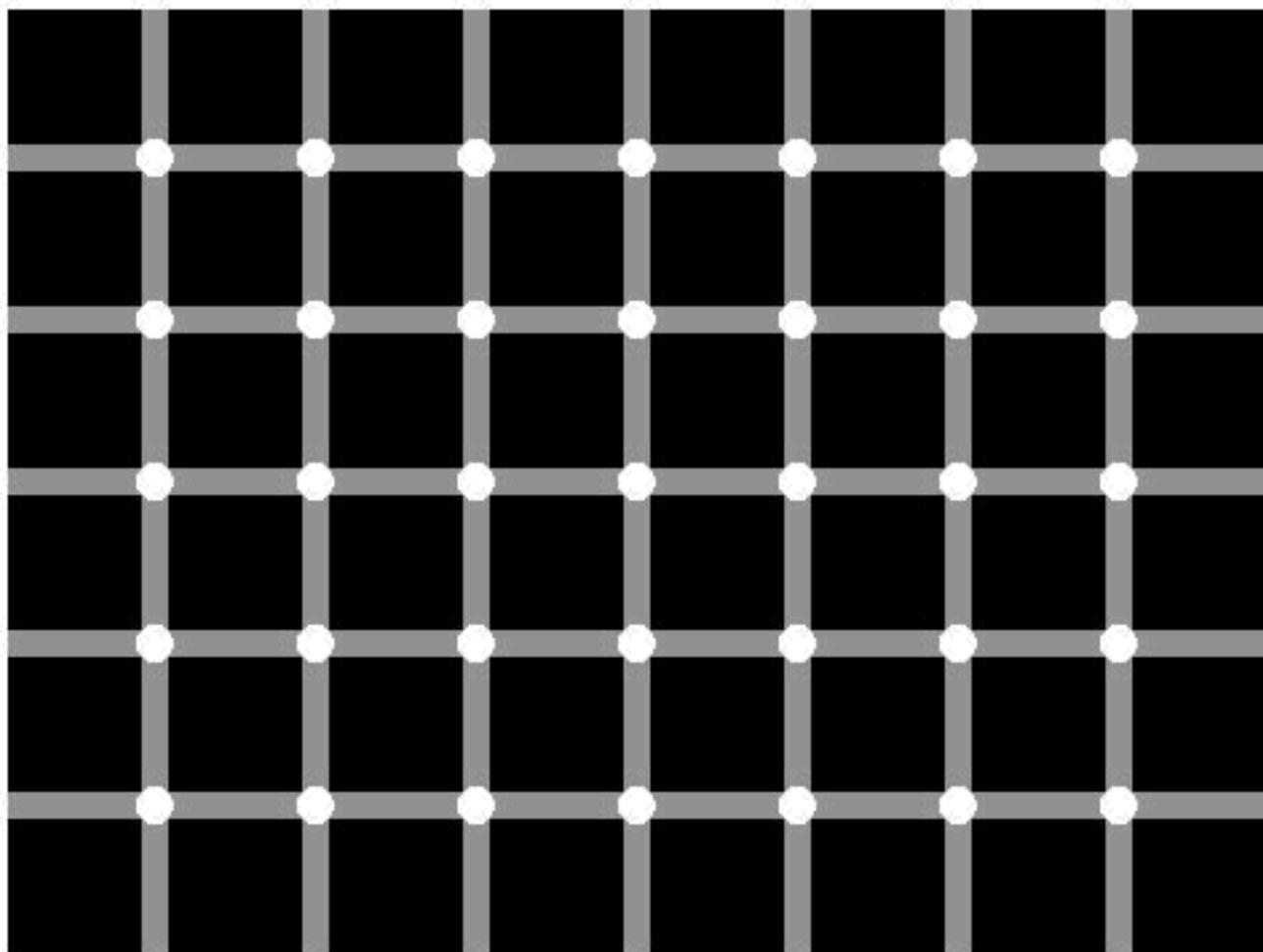
- Mechanik
- Thermodynamik, Wärmelehre
- Elektrodynamik, Optik
- Quantenphysik
- Statistische und Vielteilchenphysik

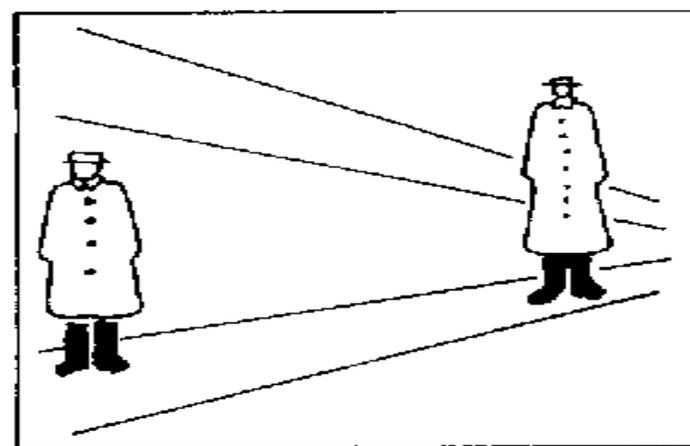
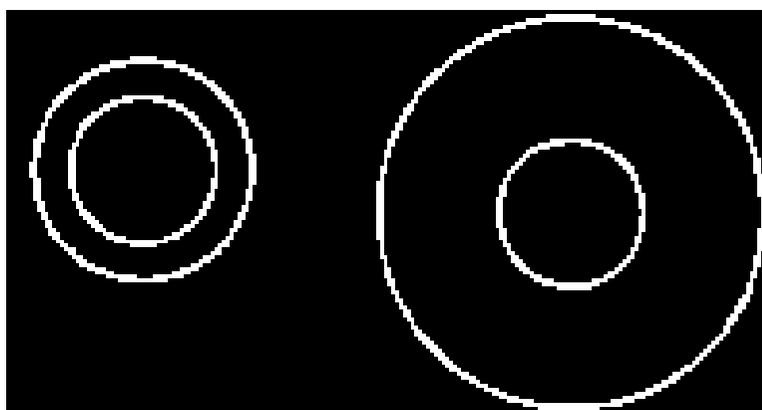
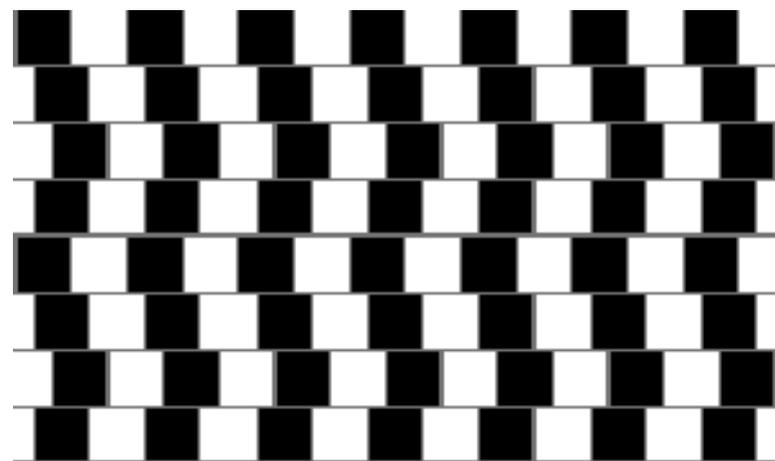
Die bloße Anschauung ist für das Experimentieren ungeeignet.

**→ Optische Täuschungen!**









## 2. Grundgrößen und ihre Messung

Eine physikalische Größe ist eine Messzahl zusammen mit einer Dimension:

Physik. Größe = Messzahl \* Dimension

Länge = 10 m

Schreibweise: [Länge] = m (d.h., die Einheit der Länge ist das Meter)

Alle physikalischen Größen lassen sich auf die drei Grundgrößen

**Länge, Zeit und Masse**

zurückführen.

Praktischer Weise werden noch weitere Größen hinzugezogen, um Umrechnungen zwischen verschiedenen Größen zu erleichtern, z.B.:

**Temperatur und Stromstärke**

Die Dimension einer physikalischen Größe wird in physikalischen Einheiten gemessen.

Messen = Vergleichen !!!

Ein System von Einheiten, in denen man alle physikalischen Größen messen kann, heißt ein Maßsystem.

Ein internationaler Standard ist das **SI-System** (SI = Système International d'Unités)

Größe	Einheit	Definition
Länge	m (Meter)	1m = Länge der Strecke, die Licht im Vakuum während des Zeitintervalls 1/299792458 s durchläuft*.
Zeit	s (Sekunde)	1s = Zeit während der eine Cs-Atomuhr 9 192 631 770 Schwingungen macht.
Masse	kg (Kilogramm)	1kg = ist die Masse des Massennormals (Pt – Iridium – Zylinder in Paris)
Temperatur	K (Kelvin)	1K ist der 273,16te Teil der thermodynamischen Temperatur des Tripelpunktes von Wasser

\*  $c_0 = 299792458 \text{ m/s}$

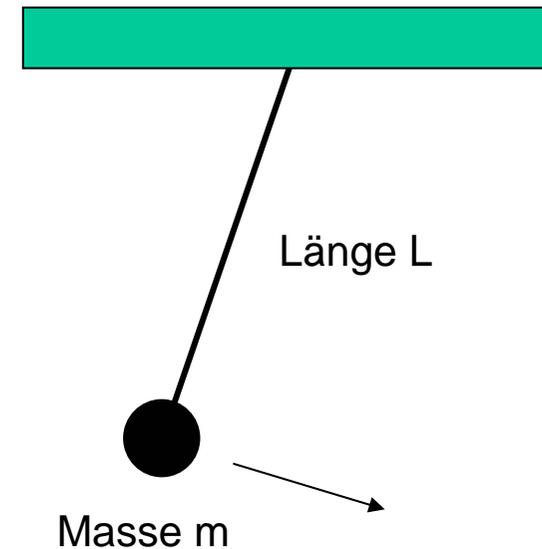
Größe	Einheit	Definition
Strom	A (Ampere)	Ein Ampere fließt in zwei unendlich langen parallelen Leitern mit vernachlässigbarem Querschnitt, wenn diese bei einem Abstand von 1 m eine Kraft von $2 \times 10^{-7}$ N pro Meter Länge erfahren.
Substanzmenge	mol (Mol)	Eine Substanzmenge von einem Mol entspricht der Anzahl von Atomen in 0,012 Kilogramm des Isotops Kohlenstoff $^{12}\text{C}$
Lichtstärke	Candela	Ein Candela ist die Lichtstärke (Lichtstromdichte) einer Strahlungsquelle, die monochromatische Strahlung der Frequenz $540 \cdot 10^{12}$ Hertz, entsprechend einer Wellenlänge $\lambda$ von ca. 555 nm, mit einer Leistung von 1/683 Watt pro Steradian (Raumeinheitswinkel) aussendet.

Bei der Überprüfung von Rechnungen oder Formeln ist die Prüfung der Einheiten hilfreich.

Bsp.: Schwingungsdauer T eines Fadenpendels:

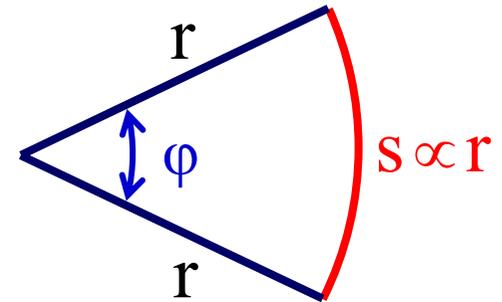
$$T = \sqrt{\frac{\text{Länge}}{\text{Erdbeschleunigung}}}$$

$$[T] = \sqrt{\frac{\text{m}}{\frac{\text{m}}{\text{s}^2}}} = \sqrt{\text{s}^2} = \text{s}$$



## Ergänzungen zur Winkelmessung:

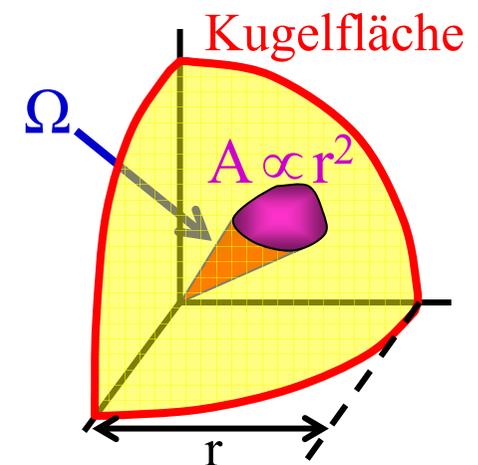
<u>Bogenmaß:</u>	$\varphi$ [ rad ]	= s / r
	1 rad	= 1 Radiant
<u>Gradmaß:</u>	1 Grad	= $1^\circ = 1 \text{ rad} * (360^\circ / 2\pi)$
	1 Minute	= $1' = 1^\circ / 60$
	1 Sekunde	= $1'' = 1' / 60$



Kreisumfang =  $2\pi r$   $\Rightarrow$  Der Vollkreis hat  $2\pi$  rad bzw.  $360^\circ$

<u>Raumwinkel:</u>	$\Omega$ [ Sterad ]	= A / r <sup>2</sup>
	1 Sterad	= 1 Steradian

Kugelfläche =  $4\pi r^2$   $\Rightarrow$  Vollkugel hat  $4\pi$  Sterad



Die Anschauung überdeckt nur einen winzigen Teil der Größenordnung von Längen, Zeiten, etc. in der Natur!

Beispiel: Längen

Section	Range (m)		Unit	Example Items
	≥	<		
Subatomic	0	10 <sup>-15</sup>	am	electron, quark, string
Atomic to Cellular	10 <sup>-15</sup>	10 <sup>-12</sup>	fm	proton, neutron
	10 <sup>-12</sup>	10 <sup>-9</sup>	pm	wavelength of gamma rays and X-rays, hydrogen atom
	10 <sup>-9</sup>	10 <sup>-6</sup>	nm	DNA helix, virus, wavelength of optical spectrum
Human Scale	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-3</sup>	μm	bacterium, fog water droplet, human hair <sup>[1]</sup>
	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>0</sup>	mm	mosquito, golf ball, soccer ball,
	10 <sup>0</sup>	10 <sup>3</sup>	m	human being, American football field, Eiffel Tower
	10 <sup>3</sup>	10 <sup>6</sup>	km	Mount Everest, length of Panama Canal, asteroid
Astronomical	10 <sup>6</sup>	10 <sup>9</sup>	Mm	the Moon, Earth, one light-second
	10 <sup>9</sup>	10 <sup>12</sup>	Gm	Sun, one light-minute, Earth's orbit
	10 <sup>12</sup>	10 <sup>15</sup>	Tm	orbits of outer planets, Solar System,
	10 <sup>15</sup>	10 <sup>18</sup>	Pm	one light-year; distance to Proxima Centauri
	10 <sup>18</sup>	10 <sup>21</sup>	Em	galactic arm
	10 <sup>21</sup>	10 <sup>24</sup>	Zm	Milky Way, distance to Andromeda Galaxy
	10 <sup>24</sup>	∞	Ym	visible universe

Präfixe für SI-Einheiten

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

[wikipedia]

## Beispiel: Zeiten

Orders of magnitude (time)

Factor (s)	Multiple	Symbol	Definition	Comparative examples & common units	Orders of magnitude
$10^{-44}$		$t_p$	<b>Planck time</b> is the unit of time of the natural units system known as Planck units. <sup>[1]</sup>	The shortest or earliest meaningful interval of time that theoretical physics can describe and consequently the youngest the known universe can be measured, after the Big Bang went off. $\approx 5.4 \times 10^{-44}$ s.	$10^{-44}$ s
$10^{-24}$	1 yoctosecond	ys <sup>[2]</sup>	<b>Yoctosecond</b> , ( <i>yocto-</i> + <i>second</i> ), is one quadrillionth (in the long scale) or one septillionth (in the short scale) of a second.	<b>0.3 ys</b> : mean life of the W and Z bosons. <i>[citation needed]</i> <b>0.5 ys</b> : time for top quark decay, according to the Standard Model. <b>1 ys</b> : time taken for a quark to emit a gluon. <b>23 ys</b> : half-life of <sup>7</sup> H.	1 ys and less, 10 ys, 100 ys
$10^{-21}$	1 zeptosecond	zs	<b>Zeptosecond</b> , ( <i>zepto-</i> + <i>second</i> ), is one trillionth of one billionth of one second.	<b>7 zs</b> : half-life of helium-9's outer neutron in the second nuclear halo. <b>17 zs</b> : approximate period of electromagnetic radiation at the boundary between gamma rays and X-rays. <b>300 zs</b> : approximate typical cycle time of X-rays, on the boundary between hard and soft X-rays	1 zs, 10 zs, 100 zs
$10^{-18}$	1 attosecond	as		<b>100 attoseconds</b> : shortest measured period of time. <sup>[3][4]</sup>	1 as, 10 as, 100 as
$10^{-15}$	1 femtosecond	fs		cycle time for 390 nanometre light, transition from visible light to ultraviolet	1 fs, 10 fs, 100 fs
$10^{-12}$	1 picosecond	ps		<b>1 ps</b> : half-life of a bottom quark <b>4 ps</b> : Time to execute one machine cycle by an IBM Silicon-Germanium transistor	1 ps, 10 ps, 100 ps

$10^{-9}$	1 nanosecond	ns		<p><b>1 ns:</b> Time to execute one machine cycle by a 1GHz microprocessor</p> <p><b>1 ns:</b> Light travels 12 inches (30 cm)</p> <p><b>1,000,000,000 nanoseconds:</b> 1 second</p>	1 ns, 10 ns, 100 ns
$10^{-6}$	1 microsecond	$\mu$ s		<p>sometimes also abbreviated <math>\mu</math>sec</p> <p><b>1 <math>\mu</math>s:</b> Time to execute one machine cycle by an Intel 80186 microprocessor</p> <p><b>4-16 <math>\mu</math>s:</b> Time to execute one machine cycle by a 1960s minicomputer</p>	1 $\mu$ s, 10 $\mu$ s, 100 $\mu$ s
$10^{-3}$	1 millisecond	ms		<p><b>4-8 ms:</b> typical seek time for a computer hard disk</p> <p><b>50-80 ms:</b> Blink of an eye</p> <p><b>150-300 ms:</b> Human reflex response to visual stimuli</p>	1 ms, 10 ms, 100 ms
$10^{-2}$	1 centisecond	cs			
$10^0$	1 second	s		<p><b>1 s:</b> "One Mississippi" said aloud</p> <p><b>1 s:</b> 9,192,631,770 periods of the radiation corresponding to the transition between the two hyperfine levels of the ground state of the cesium-133 atom.<sup>[5]</sup></p> <p><b>60 s:</b> 1 minute</p>	1 s, 10 s, 100 s

$10^3$	1 kilosecond (16.7 minutes)	ks		3.6 ks: 3600 s or 1 hour 86.4 ks: 86 400 s or 1 day 604.8 ks: 1 week	$10^3$ s, $10^4$ s, $10^5$ s
$10^6$	1 megasecond (11.6 days)	Ms		month = $2.6 \times 10^6$ s year = 31.6 Ms = $10^{7.50}$ s $\approx \pi \times 10^7$ s	$10^6$ s, $10^7$ s, $10^8$ s
$10^9$	1 gigasecond (32 years)	Gs		century = 3.16 Gs $\approx \pi \times 10^9$ s millennium = 31.6 Gs $\approx \pi \times 10^{10}$ s	$10^9$ s, $10^{10}$ s, $10^{11}$ s
$10^{12}$	1 terasecond (32 000 years)	Ts		eon = 31.6 Ts $\approx \pi \times 10^{13}$ s	$10^{12}$ s, $10^{13}$ s, $10^{14}$ s
$10^{15}$	1 petasecond (32 million years)	Ps		aeon = 31.6 Ps $\approx \pi \times 10^{16}$ s 430 Ps = $4.3 \times 10^{17}$ s $\approx$ 13.7 billion years, the approximate age of the Universe	$10^{15}$ s, $10^{16}$ s, $10^{17}$ s
$10^{18}$	1 exasecond (32 billion years)	Es		0.43 Es $\approx$ the approximate age of the Universe	$10^{18}$ s, $10^{19}$ s, $10^{20}$ s
$10^{21}$	1 zettasecond (32 trillion years)	Zs			$10^{21}$ s, $10^{22}$ s, $10^{23}$ s
$10^{24}$	1 yottasecond (32 quadrillion years)	Ys			$10^{24}$ s, $10^{25}$ s, $10^{26}$ s and more

[wikipedia]

Anmerkung: Abschätzung von physikalischen Größen

Es ist oft hilfreich, Größenordnungen abzuschätzen („back of the envelope calculations“).

Scheinbar schwer zu findende Fragen können durch eine Kette von Abschätzungen oft recht genau beantwortet werden, da sich Fehler herausmitteln.

➔ Fermi-Fragen (nach E. Fermi)

Bsp.: Wie viele Klavierstimmer gibt es in Chicago?



Enrico Fermi (1901-1954)

### 3. Messgenauigkeit und Messfehler

Jede Messung hat eine endliche Genauigkeit.

Es gibt statistische und systematische Fehler

statistische Fehler	→	reduziert sich durch Mittelung
systematische Fehler	→	reduziert sich <u>nicht</u> durch Mittelung

Der Mittelwert  $\bar{x}$  von  $n$  Messungen ist definiert als:

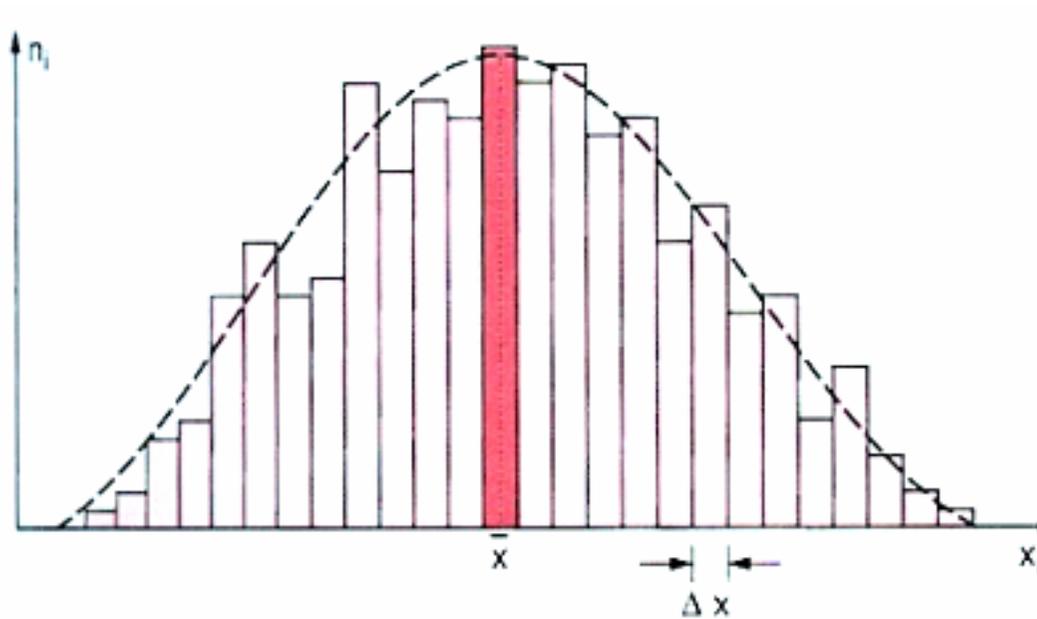
$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{arithmetisches Mittel}$$

Für ausschließlich statistische Fehler gilt

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i = x_w \quad \equiv \text{wahrer Wert}$$

Der Mittelwert nähert sich also immer mehr dem tatsächlichen Wert an.

Darstellung der Verteilung von Messwerten bei einer Messung in einem Histogramm:



[Demtröder]

Ein Maß für die Streuung der Messwerte (Breite des Histogramms) ist die Standardabweichung:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n - 1}} \stackrel{n \gg 1}{\approx} \sqrt{\frac{\sum (\bar{x} - x_i)^2}{n}}$$

Bei sehr viele Messungen: Histogramm → kontinuierliche Verteilung

Analog gilt für den Mittelwert:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \int x \cdot F(x) dx = \int x \cdot \frac{F(x)}{n} dx = \int x \cdot f(x) dx$$

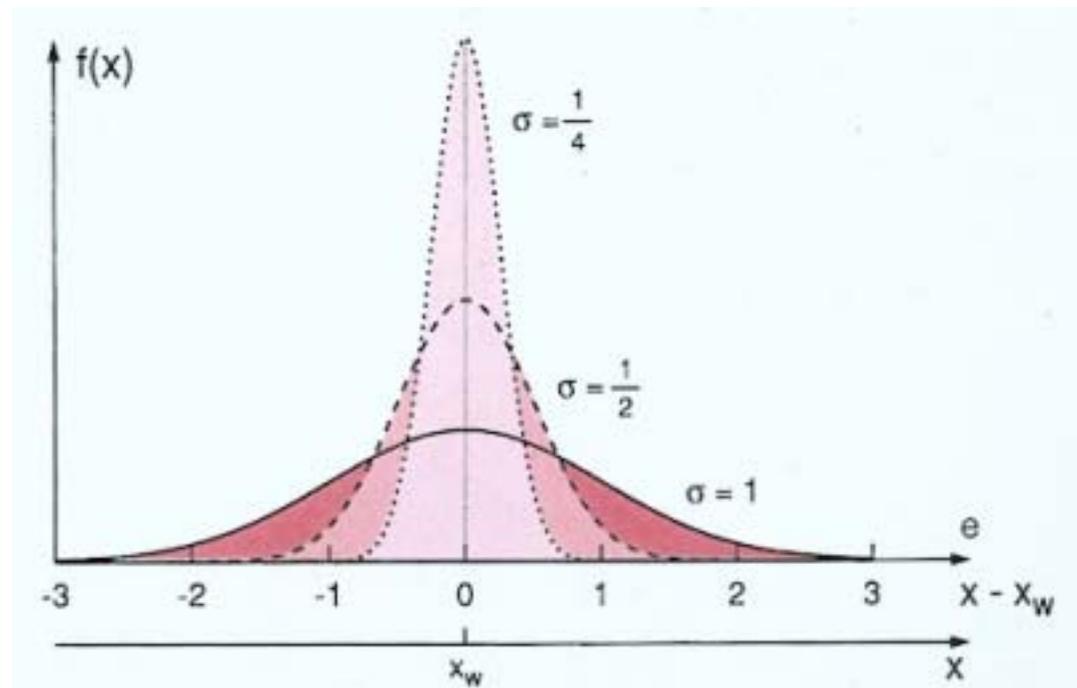
und die Standardabweichung:

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (\bar{x} - x)^2 f(x) dx$$

Für rein statistische Fehler  
ist  $f(x)$  eine Gauß-Verteilung

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

[Demtröder]



Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Messwert  $x_i$  zwischen  $x_w - \sigma$  und  $x_w + \sigma$  liegt ist

$$P(|x_w - x_i| < \sigma) = \int_{x_w - \sigma}^{x_w + \sigma} f(x) dx$$

Für die Wahrscheinlichkeiten, daß der Messwert in der Nähe des Mittelwertes liegt gilt:

$$P(|x_w - x_i| < \sigma) = 68 \%$$

$$P(|x_w - x_i| < 2\sigma) = 95 \%$$

$$P(|x_w - x_i| < 3\sigma) = 99,7 \%$$

Für den Mittelwert eines Funktionswertes, der aus den fehlerbehafteten Größen  $\bar{x}$  und  $\bar{y}$  berechnet wurde gilt:

$$\bar{f}(x, y) = f(\bar{x}, \bar{y})$$

Die Konzepte der Fehlerfortpflanzung werden im Anfängerpraktikum diskutiert.



Für die Standardabweichung  $\sigma_f$  von  $f(\bar{x}, \bar{y})$  kann gezeigt werden:

$$\sigma_f = \sqrt{\sigma_x^2 \left( \frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \sigma_y^2 \left( \frac{\partial f}{\partial y} \right)^2}$$

1. Triviales Beispiel:

$$f(x, y) = a \cdot x + b \cdot y \quad ; \quad \frac{\partial f}{\partial x} = a, \quad \frac{\partial f}{\partial y} = b$$

und 
$$\sigma_f = \sqrt{(a \cdot \sigma_x)^2 + (b \cdot \sigma_y)^2}$$

2. Triviales Beispiel (Flächenmessung):

$$f(x, y) = x \cdot y \quad ; \quad \frac{\partial f}{\partial x}(\bar{x}, \bar{y}) = \bar{y} \quad \frac{\partial f}{\partial y}(\bar{x}, \bar{y}) = \bar{x}$$

somit 
$$\sigma_f = \sqrt{(\bar{y} \cdot \sigma_x)^2 + (\bar{x} \cdot \sigma_y)^2}$$