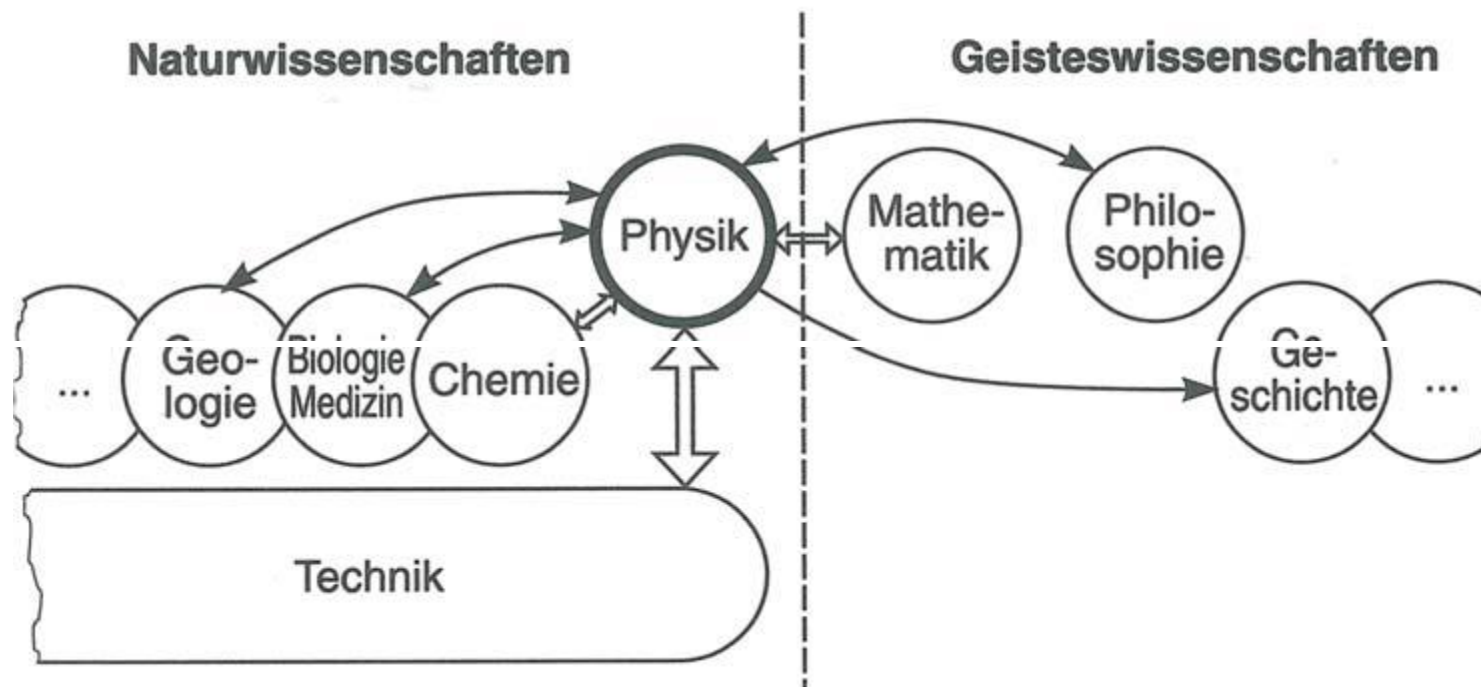


## 1.0 Wozu Physik? Warum brauchen die Ingenieurwissenschaften Physik?

Womit beschäftigt sich die Physik?

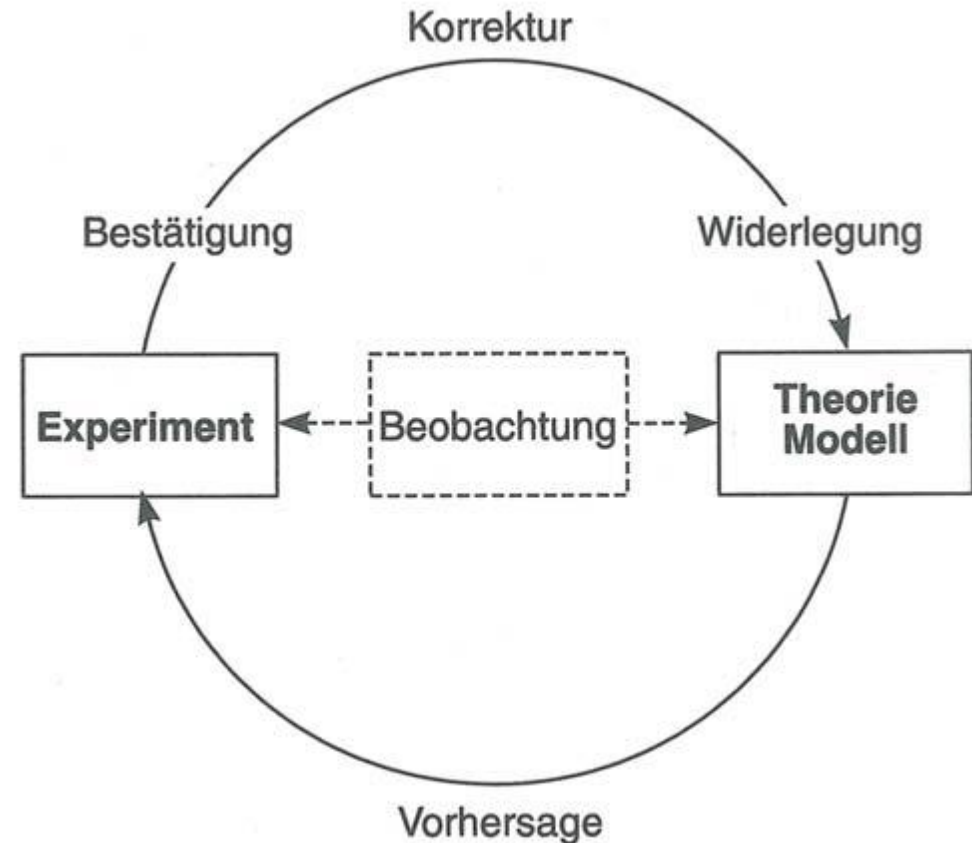
- Gesetzmäßigkeiten der „unbelebten“ Materie
- Aber: Medizin-Physik; Biophysik?
- Quantitative Beschreibung von Natur-Phänomenen
- Physik steht in enger Beziehung zu anderen Natur-, Technik- und Geisteswissenschaften



Bildquelle: Uli Leute; Physik

## Physik stellt bereit:

- Ein methodisches Konzept
- Theorien und Modelle zur Beschreibung von Beobachtungen
- Experimente mit quantifizierbaren Ergebnissen zur Bestätigung, Korrektur oder Widerlegung
- Experimente, um den bisherigen Kenntnisstand zu erweitern

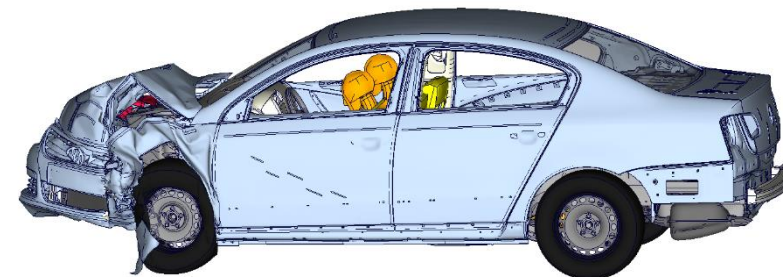
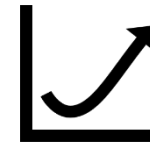


**Experiment ist dabei die höchste Instanz (z.B. „Experimentum crucis“)**

Bildquelle: Uli Leute; Physik

## Physik für Ingenieurinnen und Ingenieure

- Bereitstellung eines Instrumentariums zur modellhaften Beschreibung: „Modellbildung“
- Definition von Einfluss-/Mess-Größen: „Physikalische Größen“
- Verständnis grundlegender Wechselwirkungen
- Entwicklung neuer Anwendungen auf Grund theoretischer Erkenntnisse (z.B. Laser, Halbleitertechnik, Radar, ...)
- Ersatz von Experimenten durch Simulationen, falls Experimente zu teuer, nicht durchführbar oder nicht vertretbar sind. (Crash-Tests, Erdbebenwirkung, Schwingungsverhalten von Bauten, Ausfall medizinischer Geräte)



## Physik: Die zentrale Naturwissenschaft!

Die methodische Vorgehensweise der Physik  
ist die grundlegende Arbeitsweise aller  
Natur- und Technikwissenschaften

**Frage: Physik = Mathematik mit anderen Worten?**

Physik bedeutet nicht, Formeln auswendig lernen und Zahlen einsetzen!

Physik ist wie eine lebendige Sprache. Übung und häufiger Gebrauch sind wichtig.

**Physikalische Begriffe** sind dabei der **Grundwortschatz**.

Physik lehrt, im Experiment wichtige und unwichtige Einflussgrößen zu erkennen, sie zu separieren und die funktionalen Abhängigkeiten zu ermitteln.

## 1.1 Physikalische Größen, Maßsysteme, SI-Einheiten

Zentrale Instanz in der Physik: Messung, quantifizierte Aussage.

Dazu notwendig: - Messinstrumentarium

- einheitliches Vergleichssystem (Maß-System)

*Beispiel:* Messgerät Thermometer



\_\_20

Grad Celsius



\_\_293,15

Kelvin



\_\_68

Grad Fahrenheit



\_\_16

Grad Réaumur

Messen: In Beziehung zu einem „Vergleichsmaßstab“ setzen.



Historisch zahlreiche verschiedene Maßsysteme existent.

- Ende 18. Jh. in Baden beispielsweise 112 unterschiedliche Ellen
- Beispiel für regionale Eichung:

„Ulmer Kessel“ (Kepler-Kessel) von 1627:

- |                |                          |
|----------------|--------------------------|
| - Tiefe        | 2 Schuh                  |
| - Durchmesser  | 1 Elle                   |
| - Volumen      | 1 Eimer                  |
| - Gewicht leer | 4,5 Centner              |
| - Gewicht voll | 7 Centner (Donauwasser!) |
| - Hohlmaß      | 1 Ime                    |



Im Zuge der französischen Revolution:

Festlegung eines **einheitlichen Standards**, der universell gültig sein soll: **SI**

**SI: Système international d'unités**

Ziel: Reproduzierbarkeit und Verlässlichkeit. ABER: Nationale und fachspezifische Besonderheiten

Bildquelle: Uli Leute; Physik

## Maßsysteme, SI-Einheiten

Basisgröße	Basiseinheit	Symbol	Definition	rel. Unsicherheit
Zeit	Sekunde	s	1 Sekunde ist das 9 192 631 770 fache der Periodendauer der dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustands von Atomen des Nuklids $^{133}\text{Cs}$ entsprechenden Strahlung.	$10^{-14}$
Länge	Meter	m	1 Meter ist die Länge der Strecke, die Licht im Vakuum während der Dauer von 1/299 792 458 Sekunden durchläuft.	$10^{-14}$
Masse	Kilogramm	kg	1 Kilogramm ist die Masse des internationalen Kilogrammprototyps.	$10^{-9}$
elektrische Stromstärke	Ampere	A	1 Ampere ist die Stärke eines zeitlich unveränderlichen Stroms, der, durch 2 im Vakuum parallel im Abstand von 1 Meter voneinander angeordnete, geradlinige, unendlich lange Leiter von vernachlässigbar kleinem kreisförmigen Querschnitt fließend, zw. diesen Leitern je 1 Meter Leiterlänge die Kraft $2 \times 10^{-7}$ N hervorruft.	$10^{-6}$
Temperatur	Kelvin	K	1 Kelvin ist der 273,16 te Teil der Thermodynamischen Temperatur des Tripelpunktes von Wasser.	$10^{-6}$
Lichtstärke	Candela	cd	1 Candela ist die Lichtstärke in einer bestimmten Richtung einer Strahlungsquelle, die monochromatische Strahlung der Frequenz 540 THz aussendet und deren Strahlstärke in dieser Richtung 1/683 W/sr beträgt.	$5 \times 10^{-3}$
Stoffmenge	Mol	mol	1 Mol, ist die Stoffmenge eines Systems, das aus ebensovielen Einzelteilchen besteht, wie Atome in 12/1000 Kilogramm des Kohlenstoffnuklids $^{12}\text{C}$ enthalten sind.	$10^{-6}$

Basisgrößen und Basiseinheiten  
(aus Hering, Martin, Stohrer Physik für Ingenieure, VDI-Verlag)



## Neue Definition (seit 20.05.2019):

### Kilogramm (kg)

Das Kilogramm ist die Einheit der Masse; es ist über den Wert der Planckschen Konstante  $h = 6.626\,070\,15 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$  ( $\text{J} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$ ) und die Definitionen von Meter und Sekunde festgelegt.

### Kelvin (K)

Das Kelvin, Einheit der thermodynamischen Temperatur, ist über den Wert der Boltzmannkonstante  $k = 1.380\,649 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$  ( $\text{J} = \text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$ ) und die Definitionen von Kilogramm, Meter und Sekunde festgelegt.

### Mol (mol)

Das Mol ist die Stoffmenge eines Systems, das  $6.022\,140\,76 \cdot 10^{23}$  Elementareinheiten enthält. Dies können Atome, Moleküle, Ionen, Elektronen und andere Teilchen oder spezifizierte Gruppen solcher Teilchen sein.

Quelle: [https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/chab/physical-chemistry/ultrafast-spectroscopy-dam/documents/lectures/allgemeinechemieHS20/Folien/ACPCI\\_HS20\\_W1.pdf](https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/chab/physical-chemistry/ultrafast-spectroscopy-dam/documents/lectures/allgemeinechemieHS20/Folien/ACPCI_HS20_W1.pdf)



Seit Mai 2019 ist das SI über Naturkonstanten definiert:

Konstante		exakter Wert		seit
$\Delta\nu_{\text{Cs}}$	<u>Strahlungsfrequenz des Caesium-Atoms*</u>	9 192 631 770	$\frac{1}{\text{s}}$	1967
$c$	<u>Lichtgeschwindigkeit</u>	299 792 458	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$	1983
$h$	<u>PLANCKsches Wirkungsquantum</u>	$6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}$	$\frac{\text{kg m}^2}{\text{s}}$	2019
$e$	<u>Elementarladung</u>	$1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}$	A s	2019
$k_{\text{B}}$	<u>BOLTZMANN-Konstante</u>	$1,380\,649 \cdot 10^{-23}$	$\frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^2 \text{ K}}$	2019
$N_{\text{A}}$	<u>AVOGADRO-Konstante</u>	$6,022\,140\,76 \cdot 10^{23}$	$\frac{1}{\text{mol}}$	2019
$K_{\text{cd}}$	<u>Photometrisches Strahlungsäquivalent**</u>	683	$\frac{\text{cd sr s}^3}{\text{kg m}^2}$	1979
<p>* Hyperfeinstrukturübergang des Grundzustands des Caesium-133-Atoms</p> <p>** für monochromatische Strahlung der Frequenz <b>540 THz</b> (grünes Licht)</p>				



Damit ist kein Prototypenmaß mehr in Benutzung.

Bildquelle: <https://www.leifiphysik.de/uebergreifend/allgemeines-und-hilfsmittel/grundwissen/si-basisgroessen-und-einheiten>

## Vorsätze: Vergrößerung/Verkleinerung

### Multiples and Submultiples Prefixes Tables

Symbol	Name	Factor	Symbol	Name	Factor
Y	yotta	$10^{24}$	y	yokto	$10^{-24}$
Z	zetta	$10^{21}$	z	zepto	$10^{-21}$
E	exa	$10^{18}$	a	atto	$10^{-18}$
P	peta	$10^{15}$	f	femto	$10^{-15}$
T	tera	$10^{12}$	p	pico	$10^{-12}$
G	giga	$10^9$	n	nano	$10^{-9}$
M	mega	$10^6$	$\mu$	micro	$10^{-6}$
k	kilo	$10^3$	m	milli	$10^{-3}$
h	hecto	$10^2$	c	centi	$10^{-2}$
da	deka	$10^1$	d	deci	$10^{-1}$

Quelle: [https://de.123rf.com/photo\\_14491208\\_vielfache-oder-teile-pr%C3%A4fixe-tabellen.html](https://de.123rf.com/photo_14491208_vielfache-oder-teile-pr%C3%A4fixe-tabellen.html)

## 1.2 Mess-Vorgang, Mess-Fehler

**„Wer misst, misst Mist!“**

Physikalische Größen werden i.A. gemessen. (→ **Messverfahren, Messgerät**)

Messunsicherheit durch „Messfehler“:

- **Zufällige bzw. statistische Fehler**
- **Systematische Fehler**

Bei der Angabe des Messergebnisses begrenzt man die Anzahl der Dezimalstellen:

☞ Nur die **letzte Ziffer ist unsicher**. Endergebnisse von Rechnungen werden entsprechend **gerundet**.

Beispiele: • Spannungsmessung  $U = 24,1$  Volt ist etwas anderes als  $24,100$  Volt!

• Sie haben mit einem Meterstab (Teilung 1 mm) 10 Messungen der Länge  $x$  gemacht:

Der Taschenrechner liefert Ihnen einen Mittelwert:  $x = 87,54738290$  cm. Was geben Sie an?

Mehrere Messgrößen in einem physikalischen Zusammenhang: **Fehlerfortpflanzung** berücksichtigen.

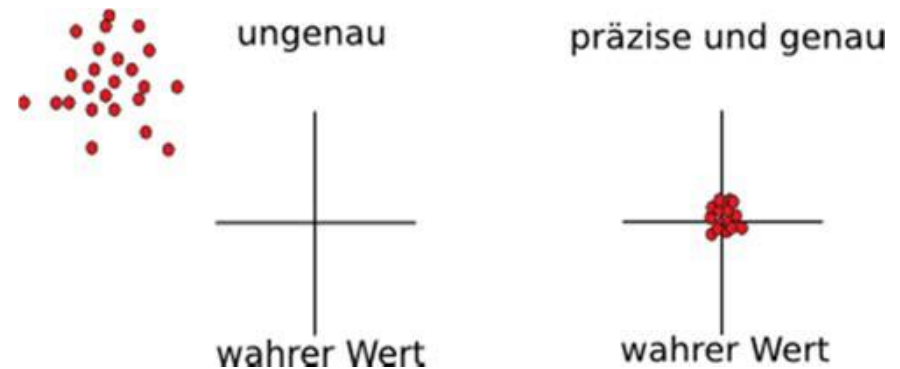
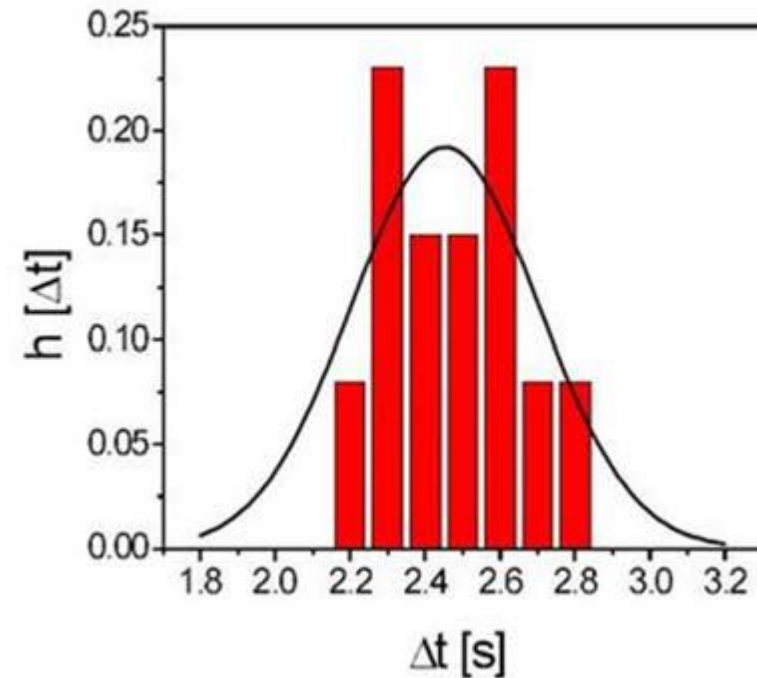
Besonders kritisch: Geringe Differenzen und Quotienten bei großen Meßergebnissen.  
Direkte Messung von Differenz oder Quotient oftmals günstiger.

## Mess-Vorgänge

- $n$  Messungen liefern  $n$  Messwerte
- Einzelmesswerte sind fehlerbehaftet, sie weisen eine „Streuung“ auf.
- Natur der Mess-Fehler:

### Zufällige Fehler

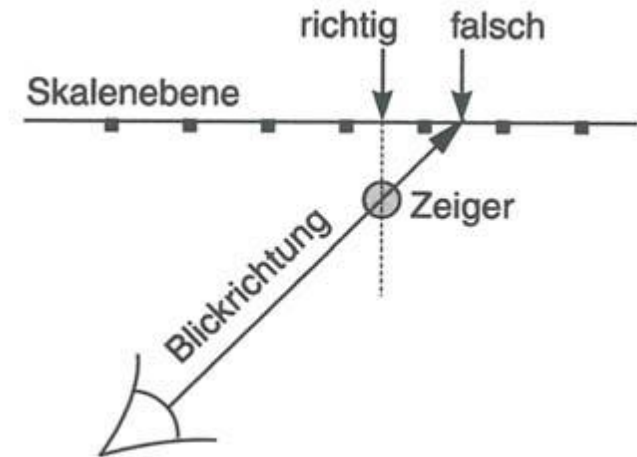
- Streuung der Einzelwerte um den wahren Wert
- Heben sich im Mittel auf
- Statistisch verteilt
- Nicht vermeidbar
- Berechenbar mit Mehrfachmessung



Bildquelle: [lp.uni-goettingen.de](http://lp.uni-goettingen.de)

## Systematische Fehler

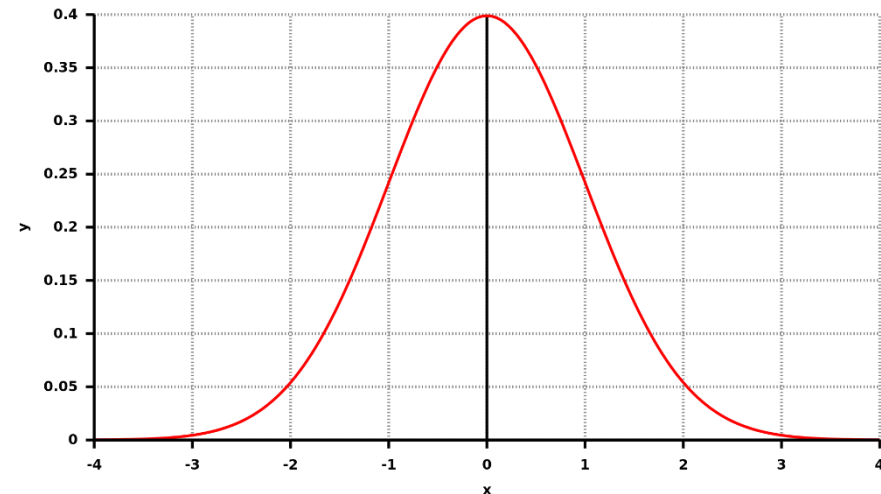
- Umwelteinflüsse (Störfelder,...)
- Instabilität der Messgröße
- Durch Messverfahren oder Messgerät bedingt (Kalibrierung, Wärmeausdehnung, Reaktionszeit, Schrägablesung)
- Unter gleichen Bedingungen konstant, Abweichung in die selbe Richtung.
- Einzelne Einflüsse heben sich im Mittel nicht auf.
- Fehler lässt sich oftmals angeben.
- Fehler ist durch Maßnahmen minimierbar.
- Vergleichsmessung mit anderem Aufbau oder in anderen Laboren.



Wichtig: Wenn Sie einen systematischen Fehler erkennen, sollten Sie immer versuchen, ihn abzustellen.  
Falls das nicht gelingen sollte, dann beschreiben Sie ihn möglichst genau in seinen Auswirkungen.  
Niemals einen solchen Fehler verschweigen oder vertuschen.  
Wenn es herauskommt, sind Sie blamiert; im schlimmsten Fall kann es Menschenleben kosten!

## Streuung von Messwerten

- Verteilung der zufälligen Fehler symmetrisch um einen Mittelwert
- Annahme: „Normal-Verteilung“ Gauß-Verteilung.
- Höchster Wert zeigt Mittelwert; dies ist wahrscheinlichster Wert
- Standard-Abweichung gibt die Breite der Verteilung an.  
Große Standardabweichung bedeutet:  
Messwerte streuen breit.



Berechnung Mittelwert:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

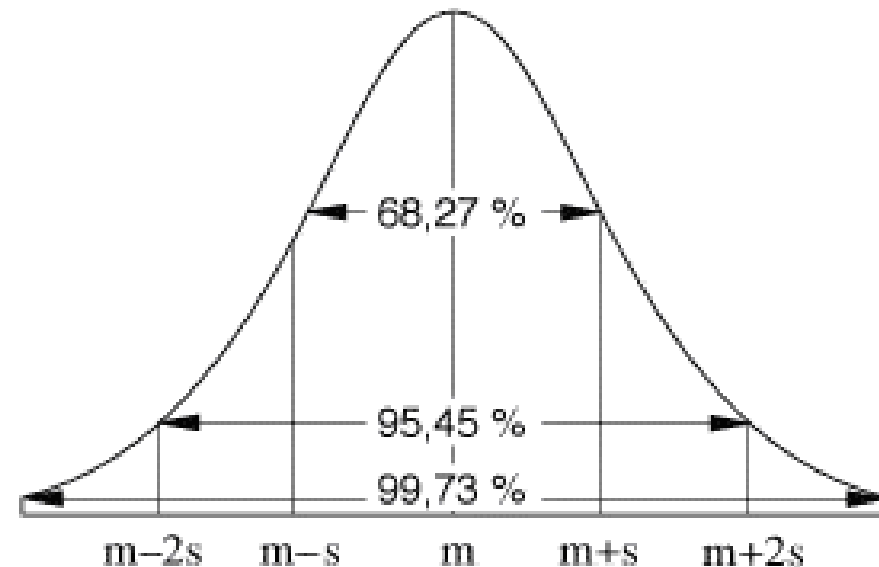
Berechnung Standard-Abweichung:

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

Bildquelle: Von StefanPohl - Eigenes Werk, CC0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=31516368>

## Nutzen der Gauß-Verteilung

- Erwartungswert für Messwerte
  - Messwerte liegen mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit in einem bestimmten Wertebereich.
- Ist die Verteilung bekannt, kann man den Bereich angeben, innerhalb dessen die Werte zu liegen kommen.



- Beispiel: Industrieproduktion

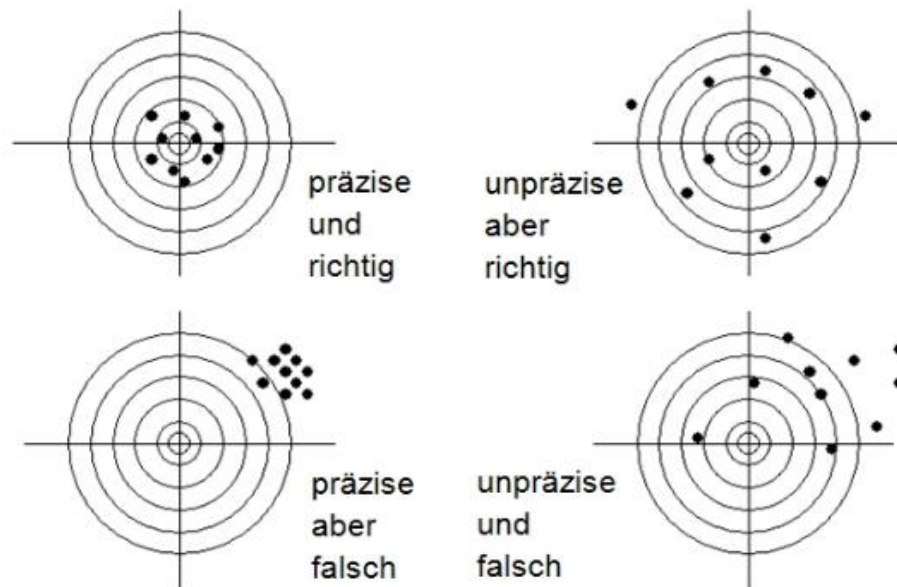
Design for 6 Sigma: Toleranzgrenze  $\pm 6\sigma$

„Nullfehlerproduktion“ (6 Sigma: Ein Wert von 506.797.346 Fällen liegt ausserhalb)

Im Intervall	$m \pm s$	liegen 68,3 % aller Messwerte
Im Intervall	$m \pm 2s$	liegen 95,5 % aller Messwerte
Im Intervall	$m \pm 3s$	liegen 99,7 % aller Messwerte
Im Intervall	$m \pm 6s$	liegen 99,999 999 8027 % der Messwerte

Bildquelle: <https://www.metrologie.at/grundlagen-des-messwesens/messunsicherheiten/>



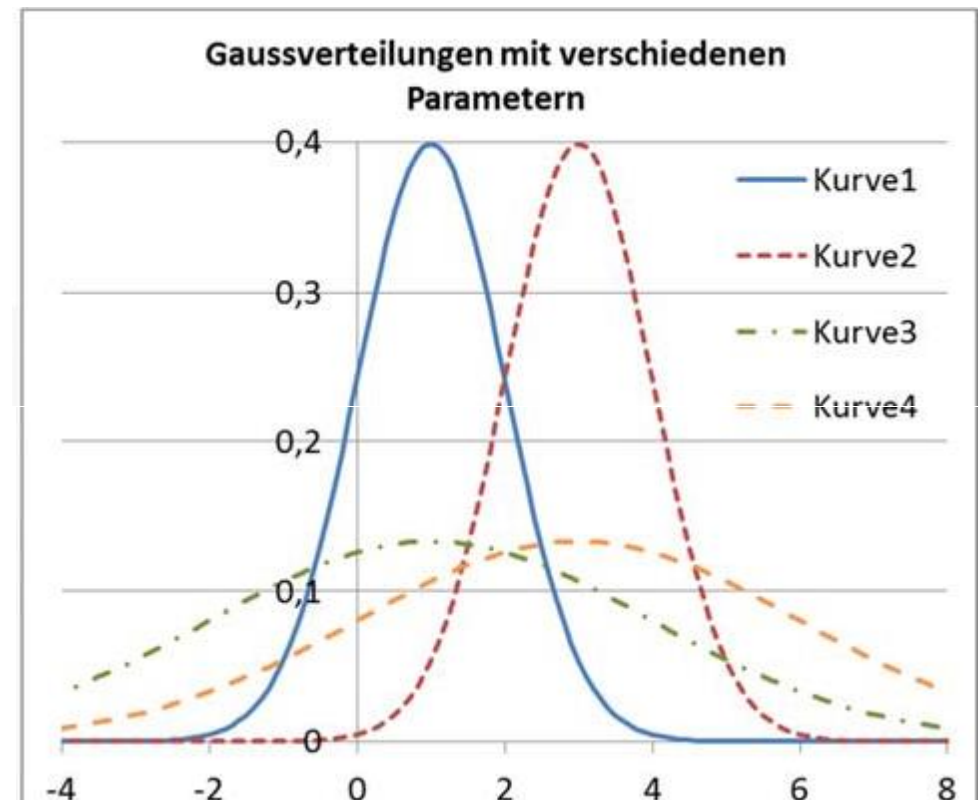


Präzise/Richtig:

Zielwert im Zentrum der Scheibe

präzise: geringe Streuung der Werte

richtig: Wert liegt beim Zielwert



Darstellung in der Gaußverteilung: Parameter

Bildquelle: <https://www.bauwerksdiagnose2018.de/Portals/bauwerksdiagnose2018/BB/20.pdf> ; Manuela Boin: Skript zu Physik1

## Fehlerfortpflanzung

- Oft ist eine gesuchte Größe nicht direkt messbar.
- Ist sie Funktion anderer messbarer Größen, dann aus diesen anderen Größen berechenbar.
- Aus fehlerbehafteten Größen errechneter Funktionswert ist ebenfalls wieder fehlerbehaftet.
- Fehler pflanzen sich fort.

## Fehlerfortpflanzungsgesetz nach Gauß

$$\Delta \bar{F} = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x} \cdot \Delta x\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y} \cdot \Delta y\right)^2 + (\dots)}$$

Dabei bedeuten:

$\Delta \bar{F}$  = mittlerer Fehler des Funktionswertes

$\Delta x$ ,  $\Delta y$ , usw. = Vertrauensbereich des Mittelwertes der Einzelmeßgrößen

$\frac{\partial F}{\partial x}$ ,  $\frac{\partial F}{\partial y}$  = partielle Ableitungen der Funktion  $F = F(x, y, \dots)$

## Maximalfehler des Funktionswertes

In der Praxis häufig: Keine Messreihen zur Bestimmung, keine Angabe zum Vertrauensbereich möglich.  
(Anm.: Vertrauensbereich wird kleiner mit steigender Zahl der Messungen)

Ausweg:

- Geschätzte Fehler der Messgrößen
- Fehlergrenzen der Messgeräte (oftmals genormt)

Damit erhält man den Maximalfehler des Funktionswertes  $\Delta F$ :

$$\Delta F = \pm \left( \left| \frac{\partial F}{\partial x} \cdot \Delta x \right| + \left| \frac{\partial F}{\partial y} \cdot \Delta y \right| + \left| \frac{\partial F}{\partial z} \cdot \Delta z \right| + \dots \right)$$

Dabei bedeuten:

$\Delta F$  = Maximalfehler des Funktionswertes, „Größtfehler“

$\Delta x$ ,  $\Delta y$ , usw. = geschätzter Fehler der Einzelmeßgrößen oder Fehlergrenze des Messgerätes

$\frac{\partial F}{\partial x}$ ,  $\frac{\partial F}{\partial y}$  = partielle Ableitungen der Funktion  $F = F(x, y, \dots)$

## Beispiel: Ermittlung der Fallhöhe $h$ durch Zeitmessung

Funktion F :  $h = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2$

Messgrößen:  $t = (2 \pm 0,2) \text{ s}$        $\Delta t = 0,2 \text{ s}$   
 $g = (10 \pm 0,3) \text{ m/s}^2$        $\Delta g = 0,3 \text{ m/s}^2$

Mittelwert:  $\bar{h} = 1/2 \cdot 10 \text{ m/s}^2 \cdot (2 \text{ s})^2 = 20,0 \text{ m}$

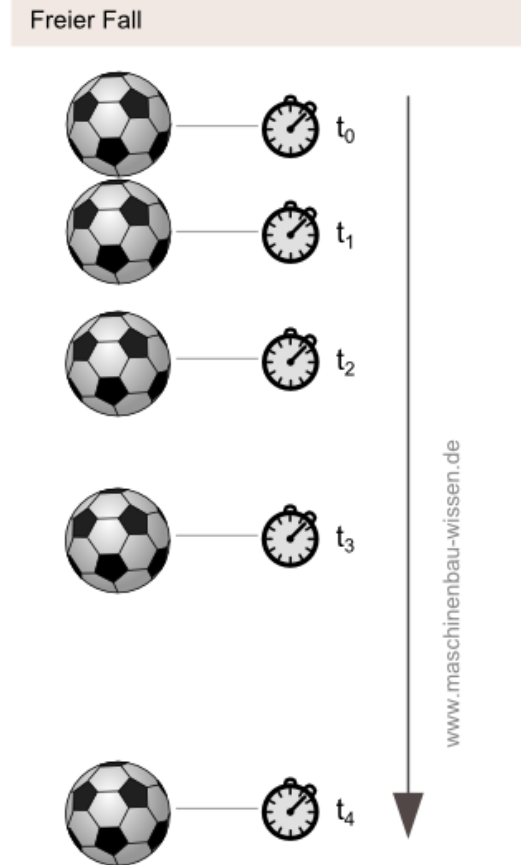
Maximalfehler:

$$\Delta h = \pm \left( \left| \frac{1}{2} t^2 \cdot \Delta g \right| + \left| \frac{2}{2} g t \cdot \Delta t \right| \right)$$

$$\Delta h = \pm \left( \frac{1}{2} 4 \text{ s}^2 \cdot 0,3 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) + \left( 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 2 \text{ s} \cdot 0,2 \text{ s} \right)$$

$$\Delta h = \pm (0,6 \text{ m} + 4,0 \text{ m}) = \pm 4,6 \text{ m}$$

Ergebnis:  $h = (20,0 \pm 4,6) \text{ m}$



**Fazit:** Der Fehler der Zeitmessung macht hier den größten Teil des Fehlers aus!

Es lohnt sich hier mehr, die Zeitmessung zu optimieren, als über den Wert von  $g$  nachzudenken.

Bildquelle: <https://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/mechanik/kinematik/330-freier-fall>