

Motivation und Aufgabe der Messtechnik

SI-Basisgrößen und SI-Basiseinheiten sowie  
Einheitenvorsätze

Festlegungen: Messen, Messgrößen, Messwert,  
Messsignal und Messmethode

# Kapitel 1

## Motivation und Einführung – warum hilft messen?

**R**ichard Feynman, einer der großen Physiker des 20. Jahrhunderts, erhielt 1965 den Nobelpreis für seine Beiträge zur Quantenelektrodynamik, die unter anderem die Wechselwirkung von Licht und Materie beschreibt. Obwohl er theoretischer Physiker war, war ihm extrem bewusst, dass die Theorie zwar die Vorhersagen erlaubt, aber dass diese theoretischen Vorhersagen unbedingt mit dem Experiment übereinstimmen müssen. Je genauer ein Experiment das magnetische Moment des Elektrons gemessen hat, desto besser wurde dies auch mit der Quantenelektrodynamik berechnet. Theorie und Experiment passten immer besser zusammen – ein überzeugender Beleg für die Quantenelektrodynamik. Die Wichtigkeit des Experiments und des präzisen Messens war nicht nur Prof. Feynman bekannt. Schon die alten Griechen wussten vor über 2300 Jahren über die Wichtigkeit des präzisen Messens Bescheid. Der antike griechische Philosoph Platon, der von etwa 428 bis 348 vor Christus lebte, sagte sinngemäß: »Das beste Heilmittel gegen die Täuschung unseres Gesichtssinns ist das Messen«. Wenn Sie sich nicht täuschen oder in die Irre führen lassen wollen, sollten Sie messen – damit haben Sie ein gutes Mittel gegen Sinnestäuschung. Denn wir verschätzen uns oft auf den ersten Blick. Aber auch in der täglichen Arbeit benötigen Sie das Messen. Ein Datenblatt eines Produkts wird mit Produkteigenschaften beschrieben. Ein Kunde kauft das Produkt nach diesen Eigenschaften. Daher müssen diese Eigenschaften präzise bekannt sein – also beispielsweise gemessen worden sein. Erfüllt das Produkt nicht die garantierten Eigenschaften des Datenblatts, können Regressforderungen die Folge sein.

Neben den technischen Anforderungen hat der Mensch für viele physikalische Größen kein Sinnesorgan, wie beispielsweise für die elektrische Spannung. Zudem ist der Mensch auch

subjektiv: Die Temperatur ist für einen Menschen warm, für den anderen schon heiß. Aber was genau bedeutet in diesem Fall »warm« oder »heiß«? Damit spielt das Messen bis in die heutige Zeit eine wichtige Rolle. Sie sehen, es ist es Wert, sich mit dem präzisen Messen zu beschäftigen.

In Abbildung 1.1 sehen Sie das Richtmaß aus dem Jahr 1809 einer halben bayrischen Elle. Eine Elle war eine Längeneinheit, die Schneider zur Abmessung von Tüchern (Stoffen) benutzten. Aber auch andere Personen nutzten die Elle.



**Abbildung 1.1:** Eine halbe bayrische Elle (oberes Metallband) und ein bayrischer Fuß (unteres Metallband) aus dem Jahre 1809 am Rathaus in Schwabach. Im Vergleich dazu die Unterarmlänge des Autors.

Sie merken schon an der Bezeichnung, dass die Länge der Elle nicht einheitlich war und außerhalb Bayerns andere Längen benutzt wurden. Sie sehen weiterhin, dass auch die Verwendung des menschlichen Unterarms zur Längenmessung ungeschickt ist. Meine Unterarmlänge ist kürzer als die halbe bayrische Elle. Hinzu kommt, dass auch Ihre Unterarmlänge von meiner abweicht. Wir benötigen eine Übereinkunft, welche Länge wir verwenden und auch wie wir diese messen wollen. Denn schon 1809 wollten die Menschen gleiche Längen von Stoff haben. Auch heutzutage benötigen die rasant fortschreitende Naturwissenschaft und Technik klare Übereinkünfte (Normen) und eine immer präzisere Messtechnik. So kann auch der Fortschritt in Zukunft erhalten bleiben.

# Aufgabe der Messtechnik

Anhand der Einführung soll nun die Aufgabe der Messtechnik präzisiert werden. Dazu sollten Sie sich zuerst einmal bewusst machen, was eine physikalische Größe ist. Eine physikalische Größe ist eine messbare physikalische Eigenschaft von physikalischen Objekten oder Vorgängen. Diese besteht aus dem Produkt aus Zahlenwert und einer Maßeinheit. Die Aufgabe der Messtechnik ist es, eine physikalische Größe

- ✓ objektiv,
- ✓ reproduzierbar und
- ✓ quantitativ

zu erfassen.

Eine objektive Messtechnik stellt sicher, dass Sie beispielsweise für ein Objekt wie meinen Unterarm immer dieselbe Länge messen – egal was Ihr persönliches Gefühl sagt. Deshalb ist eine objektive Messtechnik unabhängig von den menschlichen Sinneseindrücken. Mit dem Begriff reproduzierbar ist gemeint, dass Sie das gleiche Ergebnis erhalten, egal ob Sie es heute oder morgen messen oder auch egal an welchem Ort. Wiederholte Messungen ergeben immer das gleiche Ergebnis, und daher ist die reproduzierbare Messung kontrollierbar. Hierbei bedeutet das gleiche Ergebnis, dass natürlich kleine Schwankungen möglich sind. Die Ursachen dafür werden Sie noch kennenlernen. Die letztgenannte Aufgabe der Messtechnik, eine physikalische Größe quantitativ zu erfassen, bedeutet, das Messergebnis mit einer Zahl und einer Einheit zu versehen. Sie messen vielleicht meinen Unterarm zu 41,5 cm – mit einer Zahl und Einheit.

Sie merken sicherlich schon an den benutzten Begriffen, wie »cm« als Einheit oder Festlegung der Länge, dass es dazu einiger Festlegungen bedarf. Es wurde nicht bayrische Elle, sondern Meter verwendet, da dieser als Längeneinheit festgelegt ist. Diese Festlegungen sind in Normen teils weltweit definiert. Sie werden zuerst das SI-Einheitensystem kennenlernen, in dem unter anderem die Längeneinheit weltweit festgelegt wurde (in einer Übereinkunft der beteiligten Länder). Die dann wichtigen Begriffe der Messtechnik sind einer Norm vom DIN (Deutsches Institut für Normung) entnommen.

Nun noch ein weiteres einführendes Beispiel zu dem Thema Messmethoden, das in Abbildung 1.2 gezeigt ist.

Die Länge der bayrischen Elle wird einmal mit der »Seil-Messmethode« und das andere Mal mit der »Gliedermaßstab-Messmethode« gemessen. Umgangssprachlich ist ein Gliedermaßstab ein Zollstock. Sie sehen dabei schon auf den ersten Blick, dass die Gliedermaßstab-Messmethode genauer, also präziser, ist als die Seil-Messmethode. Sie müssen sich also auch mit verschiedenen Messmethoden beschäftigen, die unterschiedliche Genauigkeiten liefern. Einige Messmethoden sind auch genormt und werden vorgestellt.



**Abbildung 1.2:** Zwei verschiedenen Messmethoden zur Längenmessung der bayrischen Elle am Schwabacher Rathaus: links die »Seil-Messmethode«, rechts die »Gliedermaßstab-Messmethode«



Bei der »Gliedermaßstab-Messmethode« wird die Länge der bayrischen Elle direkt gemessen. Später werden Sie dies daher direkte Messmethode nennen. Die »Seil-Messmethode« setzt sich aus zwei Schritten zusammen: Sie vergleichen die bayrische Elle mit einer speziellen Seillänge, die Sie dazu vielleicht markieren. Dann müssen Sie die Länge der markierten Seillänge noch messen. Die »Seil-Messmethode« misst die Länge nicht direkt, sondern indirekt, weshalb diese Methode auch indirekte Messmethode genannt wird.

## Das SI-Basissystem der Einheiten und einige Vorsätze vor Einheiten

Sie haben in Abbildung 1.1 schon gesehen, dass die Verwendung der bayrischen Elle als Längenmaß nicht unbedingt die beste Wahl ist. In einem anderen Land oder sogar schon in einer anderen deutschen Gegend kennt man diese Länge wahrscheinlich nicht oder man versteht etwas ganz anders darunter. Dies ist natürlich ein sehr unbefriedigender Zustand und führte zu viel Missstand. Daher hat man grundlegende Einheiten definiert, die durch ein Experiment bestimmt werden können. Neben der Länge gibt es eine Vielzahl von weiteren physikalischen Größen und Einheiten. Es genügen sieben sogenannte Basisgrößen und Basiseinheiten, aus denen alle anderen physikalischen Größen abgeleitet werden können. Die Generalkonferenz für Maß und Gewicht hat im Jahr 1960 das Internationale Einheitensystem vorgeschlagen (französisch: système international d'unités), kurz **SI-Einheitensystem**. Dieses Einheitensystem ist mittlerweile auf der ganzen Welt verbreitet, und ganz viele Länder benutzen es.

Das SI-Einheitensystem beruht auf sieben **Basisgrößen** mit den entsprechenden Basiseinheiten. Die SI-Einheiten wurden neu definiert und am 20. Mai 2019 von der PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt in Braunschweig) veröffentlicht. Damit wurden sie für die Bundesrepublik Deutschland gültig. Die große Neuerung dieser Neudefinition



ist die Definition der SI-Einheiten über Naturkonstanten. Nach jetzigem Wissen sind die Naturkonstanten im Wert immer und überall gleich, und damit ermöglichen die Neudefinitionen der Wissenschaft und Technik ein physikalisch präziseres Messen. Das frühere Ur-Kilogramm für die Masse ist beispielsweise über die Jahre leichter geworden (um einen winzigen Teil). Diese Problematik besteht bei der Neudefinition nun nicht mehr. Anstelle von **SI-Einheiten** spricht man auch von **Basiseinheiten** (die zu den Basisgrößen gehören). Tabelle 1.1 listet alle sieben Basisgrößen und deren Einheit auf.

Physikalische Größe	Einheit	Zeichen der Einheit
Länge	Meter	m
Masse	Kilogramm	kg
Zeit	Sekunde	s
Elektr. Stromstärke	Ampere	A
Temperatur	Kelvin	K
Stoffmenge	Mol	mol
Lichtstärke	Candela	cd

**Tabelle 1.1:** Die SI-Basisgrößen und Si-Basiseinheiten im Überblick

Sie sehen, dass beispielsweise die Länge nicht in »Ellen« oder in Inch (= Zoll) gemessen wird, sondern in Metern (m). Die Länge hat die PTB am 20.05.2019 auf Ihrer Internet-Homepage wie folgt definiert:

»Der Meter (Symbol m) ist die SI-Einheit der Länge. Er wird definiert, indem man den konstanten Zahlenwert der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum  $c$  auf 299 792 458 festlegt, wenn diese in der Einheit  $\text{m s}^{-1}$  ausgedrückt wird, wobei die Sekunde durch die Frequenz von Cäsium  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$  definiert ist:  $1 \text{ m} = c / 299792458 \text{ s}$ «. Wenn Sie nun noch wissen, dass die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum gemessen wurde zu  $c = 299\,792\,458 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ , dann sehen Sie sofort, dass bei Division der Lichtgeschwindigkeit durch den Term »299792458 s« der Zahlenwert 1 herauskommt. Auch die Einheiten kürzen sich weg, sodass die Einheit »m« herauskommt. Damit ist die Länge festgelegt und kann einheitlich benutzt und gemessen werden – wir verstehen alle das Gleiche darunter.

Alle sieben Basisgrößen und Einheiten sind hier nochmals in der Definition zusammengestellt.



- ✓ Der **Meter** (Einheitenzeichen m) ist die SI-Einheit der Länge. Er wird definiert mit

$$1 \text{ m} = \frac{c}{299792458 \text{ s}}, \text{ wobei } c = 299\,792\,458 \frac{\text{m}}{\text{s}} \text{ die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ist.}$$

- ✓ Das **Kilogramm**, Einheitenzeichen kg, ist die SI-Basiseinheit der Masse. Es ist definiert mit

$$1 \text{ kg} = \frac{h}{6,62607015 \cdot 10^{-19} \frac{\text{s}}{\text{m}^2}}, \text{ wobei } h = 6,62607015 \cdot 10^{-34} \text{ Js das plancksche Wirkungsquantum ist.}$$

- ✓ Die **Sekunde**, Einheitenzeichen s, ist die SI-Einheit der Zeit. Sie ist definiert mit
 
$$1\text{ s} = 9192631770 \frac{1}{\Delta\nu_{\text{Cs}}}, \text{ wobei } \Delta\nu_{\text{Cs}} \text{ die Cäsiumfrequenz des ungestörten Hyperfeinübergangs des Grundzustands des Cäsiumatoms 133 ist } (\Delta\nu_{\text{Cs}} = 9192631770 \frac{1}{\text{s}}).$$
  - ✓ Das **Ampere** (Einheitenzeichen A) ist die SI-Einheit der elektrischen Stromstärke. Es wird definiert mit  $1\text{ A} = \frac{e}{1,602176634 \cdot 10^{-19} \text{ s}}$ , wobei  $e = 1,602176634 \cdot 10^{-19} \text{ As}$  die Elementarladung ist.
  - ✓ Das **Kelvin** (Symbol K) ist die SI-Einheit der thermodynamischen Temperatur. Es wird definiert mit  $1\text{ K} = \frac{1,380649 \cdot 10^{-23} \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2}}{k_B}$ , wobei  $k_B = 1,380649 \cdot 10^{-23} \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2 \text{ K}}$  die Boltzmann-Konstante ist.
  - ✓ Das **Mol** (Einheitenzeichen mol) ist die SI-Einheit der Stoffmenge. Ein Mol enthält genau  $6,02214076 \cdot 10^{23}$  Einzelteilchen, was genau dem Zahlenwert der Avogadro-Konstanten  $N_A$  entspricht. Damit ist das Mol definiert zu  $1\text{ mol} = 6,02214076 \cdot 10^{23} \frac{1}{N_A}$  mit der Avogadro-Konstanten  $N_A = 6,02214076 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}}$ .
  - ✓ Die **Candela** (Einheitenzeichen cd) ist die SI-Einheit der Lichtstärke in einer bestimmten Richtung bei der Frequenz  $540 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$ . Sie ist definiert mit  $1\text{ cd} = \frac{K_{\text{cd}}}{683} \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^3 \text{ sr}}$  mit dem photometrischen Strahlungsäquivalent  $K_{\text{cd}} = 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$  (beachten Sie hierbei die Einheiten:  $1\text{ W} = 1 \frac{\text{s}^3}{\text{kg} \cdot \text{m}^2}$  und  $1\text{ lm} = 1\text{ cd} \cdot \text{sr}$ ).
- Mit der Frequenz  $f = 540 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$  und mit  $c = \lambda \cdot f$  und  $c = 2,9979 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  der Lichtgeschwindigkeit ergibt sich eine Wellenlänge von  $\lambda = 555 \text{ nm}$ , also grünes Licht. Kurz: Die Frequenz  $540 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$  entspricht der Wellenlänge von 555 nm. Das Candela »misst die Stärke der im menschlichen Auge von der empfangenen Strahlung hervorgerufenen Lichtempfindung aus einer bestimmten Richtung (Raumwinkel)«.

Typischerweise messen Sie nicht immer in Metern (m), sondern in kleineren Teilen oder Vielfachen davon. Beispielsweise sind auf dem Gliedermaßstab (Zollstock) Zentimeter (cm) angegeben. Sie wissen, es gibt auch Millimeter (mm) für noch kleinere Abmessungen. Diese Vorsätze vor der Einheit Meter sind in unserem Beispiel Zenti (c) und Milli (m). Auch solche Vorsätze sind festgelegt und vereinheitlicht. Die wichtigsten Vorsätze vor Einheiten zeigt Tabelle 1.2.

Einen Millimeter können Sie schreiben als  $1\text{ mm}$ , und dies bedeutet  $1 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ , oder die Frequenz von  $f = 540 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$  können Sie schreiben als  $f = 540 \cdot \text{THz}$ , da Tera (abgekürzt mit T) dem Faktor  $10^{+12}$  entspricht.

Bezeichnung	Abkürzung	Faktor
Atto	a	$10^{-18}$
Femto	f	$10^{-15}$
Piko	p	$10^{-12}$
Nano	n	$10^{-9}$
Mikro	$\mu$	$10^{-6}$
Milli	m	$10^{-3}$
Zenti	c	$10^{-2}$
Dezi	d	$10^{-1}$
Deka	da	$10^{+1}$
Hekto	h	$10^{+2}$
Kilo	k	$10^{+3}$
Mega	M	$10^{+6}$
Giga	G	$10^{+9}$
Tera	T	$10^{+12}$
Peta	P	$10^{+15}$
Exa	E	$10^{+18}$

**Tabelle 1.2:** Die wichtigsten Vorsätze vor Einheiten

## Begriffsdefinitionen: Was ist denn messen?

Nachdem Sie nun alle sieben Basisgrößen und Basiseinheiten sowie die wichtigsten Vorsätze der Einheiten kennen, können nun die wichtigsten Begriffe der Messtechnik vorgestellt werden. Diese sind einer Norm vom DIN (Deutsches Institut für Normung) entnommen und zwar DIN 1319-1 und DIN 1319-2. In diesen Normen werden die nun folgenden Begriffe (in den drei Sprachen Deutsch, Englisch und Französisch) definiert.

### 1. Messen

**Messen** ist definiert als Vergleichen einer unbekannten Größe (das ist die zu messende Größe) mit einer festgelegten Größe, die als Einheit dient. Dies bedeutet, Sie stellen fest, wie oft die unbekannte Größe in die festgelegte Größe geht.

Genau das habe ich in Abbildung 1.1 auch gemacht: Ich habe meine Unterarmlänge mit der halben bayrischen Elle verglichen und festgestellt, wie oft mein Unterarm in die halbe bayrische Elle passt. Es war ungefähr 1,01-mal (mein Unterarm mit geballter Faust ist etwas kleiner als die halbe bayrische Elle).

## 2. Messgröße

Die **Messgröße** ist nach DIN 1319-1 definiert als die physikalische Größe, die gemessen werden soll. Beispielsweise wollen Sie die physikalische Größe »elektrische Spannung  $U$ « messen. Im Beispiel nach Abbildung 1.1 war die Messgröße die Länge  $l$ .

## 3. Messwert

Der **Messwert** ist der Wert, der zur Messgröße gehört. Dabei gilt:

Messwert = Maßzahl · Einheit oder häufig geschrieben in der Schreibweise:  $x = \{x\} \cdot [x]$ .

Hierbei bedeutet die geschweifte Klammer ( $\{ \}$ ) die Maßzahl (Zahlenwert) und die eckige Klammer ( $[ ]$ ) die Einheit. Sie haben neben dem Zahlenwert (der Maßzahl) immer noch eine Einheit anzugeben. Im Fall der elektrischen Spannung wäre der Messwert beispielsweise »5 V«, dabei ist die 5 die Maßzahl und V die Einheit. In der Schreibweise  $x = \{x\} \cdot [x]$  bedeutet dann  $\{5 \text{ V}\} = 5$  und  $[5 \text{ V}] = \text{V}$ . Sie sehen schon, die Einheit ist wichtig, denn 5 V sind etwas ganz anderes als 5 mV. Daher vergessen Sie nicht die korrekte Einheit und die korrekten Vorsätze beim Messwert. Im Beispiel nach Abbildung 1.1 war der Messwert 1,01. »halbe bayrische Elle« für die Messgröße Länge  $l$ .

## 4. Messsignal

Das **Messsignal** ist die Größe in einem Messgerät, die der Messgröße zugeordnet werden kann. Bei einer sogenannten direkten Messung, wie Sie diese in Abbildung 1.1 gesehen haben, ist das Messsignal gleich der Messgröße (meiner Unterarmlänge). Dies ist jedoch meistens nicht der Fall. Wenn Sie beispielsweise die Frequenz eines akustischen Tons (einer akustischen Schwingung) messen wollen, messen Sie oft eine elektrische Wechselspannung. Ihr Messsignal ist dann die elektrische Wechselspannung, aus der Sie die Frequenz Ihres Tons (die Messgröße Ihrer akustischen Schwingung) bestimmen.

## 5. Messmethode

Eine **Messmethode** ist definiert als ein spezielles Vorgehen zur Messung. Sie haben schon in Abbildung 1.2 gesehen, dass es oft verschiedene Möglichkeiten gibt, eine Messgröße zu bestimmen – in diesem Beispiel die Gliedermaßstab-Messmethode und die Seil-Messmethode. Es war Ihnen sofort klar, dass die Gliedermaßstab-Messmethode wohl die genauere Messmethode ist – dies war in dem Beispiel der Fall und muss nicht immer so sein. Es gibt also verschiedene Messmethoden, und auch diese sind definiert.