150 Jahre
Wissen für die Zukunft
Oldenbourg Verlag

Physik verstehen

Eine Einführung in die Denkweise der Physik.
Homogene Systeme

von
Prof. Dr. Rolf Schloms

Oldenbourg Verlag München Wien

Prof. Dr. Rolf Schloms studierte Physik an der RWTH Aachen, an der er auch in Theoretischer Physik promovierte. Nach Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten am Fraunhofer-Institut für Lasertechnik, Aachen, lehrt er seit 1995 an der Hochschule Niederrhein in Krefeld und vertritt im Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik das Lehrgebiet Physik.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Rosenheimer Straße 145, D-81671 München
Telefon: (089) 45051-0
oldenbourg.de

Lektorat: Kathrin Mönch
Herstellung: Anna Grosser
Coverentwurf: Kochan & Partner, München
Gedruckt auf säure- und chlorfreiem Papier
Gesamtherstellung: Druckhaus „Thomas Müntzer“ GmbH, Bad Langensalza

ISBN 978-3-486-58582-7

Inhaltsverzeichnis

Vorwort

Das Thema dieses Buches ist vielfältig motiviert. In meiner Tätigkeit als Hochschullehrer bin ich, als verantwortlich für die physikalische Grundausbildung angehender Ingenieure, mit einer Fülle von Anforderungen an dieses Fach konfrontiert. Neben der klassischen Vermittlung physikalischer Phänomene soll auch systemisches Denken eingeübt werden. Zunehmend sollen auch moderne Maschinenelemente und -prinzipien wie Piezoelemente, Wirbelstrombremsen, Lasertechnik etc. in der Physikvorlesung vorgestellt werden. Diesen Anforderungen steht eine Änderung der Bildungsstruktur der Studienanfänger gegenüber. Die jungen Menschen beherrschen heute eine riesige Anzahl von Phänomenen an ihrer Oberfläche, demgegenüber steht eine verminderte Fähigkeit, unter diese Oberfläche zu schauen und Phänomene zu strukturieren. Diese hier nur holzschnittartig wiedergegebene Situation war für mich Anlass, die Physikausbildung zu überdenken. Dieses Buch gibt Rechenschaft über die neuen Aspekte dieser Vorlesung. Mit diesem Buch erfüllt sich aber auch ein von mir lang gehegtes Projekt. In meiner Studienzeit habe ich das Buch „Energie und Entropie" der Professoren Dr. Falk und Dr. Ruppel mit großem Gewinn gelesen und mir vorgenommen, mein erlerntes Wissen daran zu spiegeln. Da man nur versteht, was man aufgeschrieben hat, ist dieses Buch der verspätete Abschluss dieses Projektes.

Auch dieses Physikbuch kommt nicht ohne Mathematik, der Sprache, in der unsere Erfahrungen und Denkschemata besonders kompakt formuliert werden können, aus. Hier ist die mathematische Darstellung aber mehr als symbolische Schreibweise zu verstehen. Wenn ich es für nötig gehalten habe, habe ich kleine Einschübe zur Verdeutlichung der Symbolik eingeführt. Sie erheben keinen Anspruch auf mathematische Exaktheit und Vollständigkeit.

Ohne Unterstützung wäre ein solches Projekt nicht möglich gewesen. Mein Dank gilt den Studierenden meines Fachbereichs, die mir durch ihre Fragen eine Rückmeldung gegeben haben; meinen Kollegen für die vielen Diskussionen, die mich bestätigt haben, dieses sich über sechs Jahre erstreckende Projekt zu beenden. Dem Verlag danke ich für die vertrauensvolle Zusammenarbeit und die Aufnahme eines etwas „schrägen" Physikbuches in sein Programm. Herrn Dipl.-Ing. Thomas Liepin danke ich für die Erstellung der Abbildungen, die er als Student angefertigt hat. Mein besonderer Dank gilt jedoch meiner Familie, die mir die notwendigen Freiräume geschaffen hat.

Sicher finden Sie, lieber Leser, in diesem Buch Fehler. Diese sind trotz der Unterstützung der Genannten allein mir zuzuordnen. Dennoch hoffe ich, dass Sie genug Anregungen für Ihr Studium oder Ihre Vorlesungen finden. Für Anregungen und Kritik (an rolf.schloms@hsnr.de) bin ich sehr dankbar.

Krefeld Rolf Schloms

1 Einleitung

Die kulturelle Entwicklung des Menschen ist durch den Versuch, die Welt zu verstehen, geprägt. Die Welt als Ganzes ist vermutlich nicht zu verstehen, doch gibt es Phänomene in dieser Welt, die sich in der Geschichte oder an verschiedenen Orten wiederholen. Diese Phänomene kann man in natürliche und übernatürliche Phänomene unterteilen. Wir wollen bewusst nicht unnatürliche Phänomene sagen, da die übernatürlichen Phänomene stark mit der Religiosität einer Kultur verknüpft sind, die – wie die Vorsilbe „über“ andeutet – eine höher stehende Qualität besitzen. Sokrates (469–399 v. Chr.) setzte den natürlichen Phänomenen das Wesen des Menschen gegenüber. Natürliche Phänomene zeichnen sich dadurch aus, dass sie aus sich selbst heraus erklärt werden können und sind im weitesten Sinne Gegenstand der Physik. Der Begriff „Physik“ kommt aus dem Griechischen und kann mit „das Natürliche“ übersetzt werden. Die Erklärung eines Phänomens als natürlich ist an Vorstellungen, Methoden und Konventionen geknüpft, die es erst ermöglichen, ein Phänomen zu verstehen.

Die Physik wird heute grob in eine experimentelle und eine theoretische Physik unterteilt. Der experimentellen Physik fällt dabei die Aufgabe zu, Phänomene systematisch zu untersuchen und zu beschreiben, während die theoretische Physik sich der Interpretation – der Veranschaulichung – dieser Phänomene zuwendet. Der Unterschied lässt sich vielleicht an den Literaturgattungen Erzählung und Roman deutlich machen. Eine Erzählung beschreibt eine Geschichte, wie der Autor sie erlebt oder erfunden hat. In einem Roman versucht der Autor eine Geschichte aus der Innenwelt der handelnden Personen zu entwickeln. Er interpretiert die Geschichte als Folge der Charaktere der Handelnden. In diesem Buch legen wir das Schwergewicht auf die Interpretation. Der Autor geht davon aus, dass dem Leser die meisten der hier vorgestellten physikalischen Phänomene bekannt sind, und will eine Hilfestellung im Sinne einer Darstellung des Denkschemas der Physik geben, so dass bekannte und neue Phänomene in dieses Denkschema eingeordnet werden können. Darüber hinaus bemühen wir uns, die Grenzen dieses Denkschemas aufzuzeigen, so dass aktuelle Fragestellungen der Physik besser verstanden werden können. Der mit der Physik schon vertrautere Leser wird erkennen, dass der Leitfaden dieses Buches die Thermodynamik ist und die physikalischen Phänomene – auch die der Mechanik – unter einem thermodynamischen Gesichtspunkt beschrieben werden. Für diesen Leserkreis sind auch die mathematischen Vertiefungen gedacht, die für das Grundverständnis nicht unmittelbar nötig sind, jedoch dem mit Mathematik Vertrauten ein wenig mehr Boden unter den Füßen verschaffen.

1.1 Das Natürliche

Physik beschäftigt sich mit natürlichen Phänomenen. In diesem Kapitel werden wir versuchen, die Aufgabe der Physik weiter einzugrenzen und wesentliche Begriffe der Physik kennen zu lernen. Wir definieren:

Ein Phänomen heißt natürlich, wenn der dem Phänomen zugrunde liegende Prozess aus sich selbst heraus erklärt werden kann.

Um uns diesen Satz zu veranschaulichen, betrachten wir das Phänomen der Liebe zwischen zwei Menschen. Die Prozesse, die wir dem Phänomen Liebe zuordnen, sind z. B. ein Verhalten der Partner untereinander, das von Dritten kaum nachvollzogen werden kann – eben verrückte Dinge tun. Wäre dieses Herumalbern natürlich, so könnte man es aus Kenntnis der einzelnen Personen voraussagen. In dem Adjektiv „verrückt“ steckt schon die Unmöglichkeit dieser Voraussage. Liebe ist ein Phänomen, das in unserem Sinne übernatürlich ist oder noch nicht als natürlich identifiziert werden kann. In vielen Büchern wird Physik als die Lehre von der unbelebten Natur definiert, was darauf zurückzuführen ist, dass mit den heutigen Methoden der Physik lebenden Systemen nicht beizukommen ist. Ein Beispiel für ein natürliches Phänomen ist das Kühlen eines Getränkes durch einen Eiswürfel. Der Prozess wird durch die Zunahme bzw. Abnahme der Temperatur des Getränks bzw. des Eiswürfels beschrieben. Dieser Prozess ist eindeutig aus den Anfangstemperaturen bzw. Mengen des Eiswürfels und des Getränks bestimmt und vorhersagbar.

Die Beispiele machen den Unterschied zwischen physikalischen und unphysikalischen Phänomenen deutlich, doch bei genauerer Betrachtung sind an diese Definition Voraussetzungen geknüpft. Um dies einzusehen, stellen wir uns vor, es gäbe nur ein Liebespaar und ein Getränk mit Eiswürfeln auf der Welt. Die Einmaligkeit des Phänomens macht es uns jetzt unmöglich über die Natürlichkeit desselben zu entscheiden. Die Identifizierung eines Phänomens als natürlich setzt seine Wiederholbarkeit voraus. Erst wenn wir Getränk und Eiswürfel Hunderte von Male beobachtet haben, folgern wir, dass auch beim hundert und einten Mal das Phänomen beobachtbar ist. Die Identifizierung von natürlichen Phänomenen basiert auf Erfahrungen. Physik ist eine Erfahrungswissenschaft und physikalische Gesetze sind Erfahrungen, die sich immer und immer wieder bestätigt haben und deren Gültigkeit wir in die Zukunft extrapolieren. Es ist deswegen auch unmittelbar einsichtig, dass die Erklärung des Phänomens Liebe ungleich schwieriger sein wird.

Aus der Wiederholbarkeit ergibt sich als weitere Voraussetzung der Identifizierung eines natürlichen Prozesses die Möglichkeit der Zerlegung der Welt. Die Welt entwickelt sich im Lauf der Zeit ständig weiter. Um ein Phänomen zu reproduzieren, ist es notwendig, den Teil der Welt, der das an dem Phänomen Beteiligte enthält, von dem restlichen Teil der Welt zu trennen und in einen definierten Ausgangszustand zu versetzen. Erst wenn dies möglich ist, können wir davon ausgehen, dass das Phänomen reproduzierbar und aus sich heraus erklärbar ist.

Von der Voraussetzung der Zerlegbarkeit werden wir noch öfter Gebrauch machen. Wir weisen darauf hin, dass diese Voraussetzung operativ nicht beweisbar ist, also eine Vorraussetzung ist, die nur näherungsweise gilt. Es ist nicht möglich, irgendeinen Teil der Welt, und sei es nur ein Elektron, vom Rest der Welt zu trennen. Das überrascht vielleicht, da wir meistens ein mechanistisches Weltbild haben, das aus materiellen Körpern besteht, die im leeren Raum umherfliegen. Dieser Vorstellung liegt jedoch schon eine Zerlegung zugrunde. Die Welt zeigt sich aber vielschichtiger. Der Raum ist ein kompliziertes System, das alle diese umherfliegende Materie verbindet. Denken wir nur daran, dass das System Erde seine gesamte Vielfalt dem System Sonne verdankt, dass Ebbe und Flut Phänomene sind, die durch den Mond verursacht werden und über den Raum übertragen werden, oder dass es unmöglich ist, eine perfekte Thermoskanne, die ihren Inhalt vom Rest der Welt isoliert, zu bauen.

Die Unmöglichkeit, die Welt vollständig zu zerlegen, ist das zentrale Problem bei der Grenzziehung zwischen natürlichen und übernatürlichen Phänomenen. Die Vertreter der Auffassung, dass sich letztendlich alle Phänomene als natürlich erweisen, haben eben ein Weltbild, das dem mechanistischen sehr nahe kommt. Ein direkter Beweis dieses Weltbildes ist aber nicht möglich, so dass man auf indirekte Schlüsse angewiesen ist. In diesem Weltbild ist z. B. das universelle Menschenrecht der Unantastbarkeit der Würde des Menschen entweder ableitbar aus grundlegenderen Gesetzen oder auf einer Vereinbarung basierend. Das erste ist kaum vorstellbar, das zweite eine Katastrophe. Religiöse Menschen haben es dagegen oft sehr schwer zu verstehen, dass es überhaupt Phänomene gibt, die sich aus sich selbst heraus erklären – also nicht das Interesse ihres Gottes finden, da dieser sich nicht einmischt. Die skizzierte Grenze wird dann in Bewegung kommen, wenn es gelingt, einen lebenden Organismus aus Bausteinen aufzubauen. Es gibt Molekularbiologen, die solche Organismen noch in diesem Jahrhundert sehen. Wir sind gespannt. In jedem Fall bleibt die Existenz einer solchen Grenze unverständlich.

Einen Teil der Welt, der für das untersuchte Phänomen charakteristisch ist, nennen wir Anordnung. Eine Anordnung hat, wie das Wort schon ausdrückt, eine Struktur bzw. Ordnung. Diese Struktur ist notwendig, um die meisten Phänomene zu erklären. In der Struktur müssen wir die Ursache für das untersuchte Phänomen suchen. Phänomene in strukturlosen Anordnungen sind zufällig, mit anderen Worten nicht „vernünftig" zu erklären. Eine Anordnung ist i. A. wieder zerlegbar in ihre Struktur bildenden Konstituenten. Diese nennen wir Systeme; gekoppelte Systeme bilden eine Anordnung.

Die Beschreibung eines Phänomens geschieht mit Hilfe von Eigenschaften der Systeme, die sich durch die Kopplung mit den anderen Systemen ändern. Diese Beschreibung hat den Vorteil, dass bei Kenntnis der Systeme und der Kopplungen diese in neuen Anordnungen zusammengefasst werden können und damit neue Phänomene vorhersagbar werden. Diese Interpretation ist spezifisch für unser rationales Denken, und so lernen wir durch die Auseinandersetzung mit einfachen physikalischen Problemen sehr viel über unser Denken und die Funktionsweise rationaler Anordnungen, wie z. B. Unternehmen etc.

In dieser Interpretation erkennen wir schon das wegweisende Prinzip von Ursache und Wirkung. Erfahrungen können nur bis zur Gegenwart gewonnen werden. Die Ursache eines Phänomens ist bei einem natürlichen Phänomen in der Vergangenheit zu suchen. Bei der Beschäftigung mit unnatürlichen Phänomenen interpretiert man diese oft aus dem Bestreben, ein (in der Zukunft liegendes) Ziel zu erreichen. Vor Gericht entspräche dies der Suche nach einem Motiv. Ein solches Motiv kann zur Interpretation physikalischer Phänomene prinzipiell nicht herangezogen werden.

1.2 Das Programm „Physik“

Das Programm „Physik“ besteht darin, die dem Menschen innewohnende Sehnsucht, die Welt zu verstehen, so weit als möglich zu erfüllen. Da das Verständnis von Anordnungen immer auf Erfahrungen aufbaut, ist das Programm „Physik“ eine Gemeinschaftsaufgabe, zu der jeder mit seinen Erfahrungen beiträgt. Jeder, der an diesem Programm teilnimmt, muss sich verpflichtet fühlen, die von ihm gemachten Erfahrungen so weiterzugeben, dass andere sie nutzbringend weiterverwenden können. Dazu hat man schon sehr früh Normen und Regeln entwickelt. Diese Erfahrungen werden von den theoretischen Physikern interpretiert, so dass diese mit wenigen Regeln bzw. Gesetzen erklärt werden. Diese Interpretation ist vermutlich nie vollständig richtig, da permanent neue Erfahrungen gesammelt werden, die neu interpretiert werden müssen, ja ganz neue Interpretationsschemata erfordern. Die Elektrodynamik, die statistische Physik, die Relativitätstheorie und die Quantentheorie waren solche Umbrüche. Während Interpretationen wie von selbst neue Fragestellungen gebären, die wieder neue Anordnungen und Phänomene nach sich ziehen, also Wissen geschaffen wird, baut der Ingenieur auf Grund der Kenntnisse über Systeme und deren Kopplung Anordnungen – Maschinen und Anlagen – auf, in denen Prozesse ablaufen, die dem Menschen dienen und ihm helfen, die Welt zu gestalten. Die Physik ist die Grundlage der Ingenieurwissenschaften.

Von der Struktur und der Begrifflichkeit der Physik können wir dieses Programm mit dem Aufbau einer Sprache vergleichen, die, da sie nur den natürlichen Teil der Welt zu beschreiben versucht, auf diese Beschreibung hin optimiert ist. Diese Sprache ist in der Definition der verwendeten Begriffe und der Grammatik viel präziser als unsere Umgangssprache, kann aber auch weniger beschreiben. Sich mit Physik beschäftigen, erfordert im Wesentlichen eine neue Sprache zu erlernen. Da diese aber so ähnlich klingt wie unsere Umgangssprache, erscheint diese neue Sprache oft sehr schwierig, da der Anfänger die beiden Sprachen oft vermischt.

1.3 Die Struktur des Buches

Die Struktur des Buches richtet sich an dem soeben skizzierten Programm der Physik aus. Dazu werden wir im Kapitel „Das Wesen physikalischer Größen“ aufzeigen, wie mit Hilfe von Messungen die Größen extrahiert werden, mit denen Phänomene beschrieben werden sollen. Auf spezielle Messtechniken werden wir dabei nicht eingehen, sondern nur das Prinzip herausarbeiten. In diesem Kapitel werden wir auch die wichtigsten Konventionen für ein Erfahrungsarchiv beschreiben. In dem Kapitel „Der Aufbau der Physik“ werden wir das wichtigste Interpretationsschema der Physik kennen lernen. Dabei werden wir schon allgemeine Erfahrungen, die für alle bisher untersuchten Anordnungen gelten, in Hauptsätzen formulieren.

Nach diesen Vorüberlegungen, die den Rahmen bilden, in dem alles weitere eingeordnet werden kann, werden wir uns die wichtigsten Phänomene der Bewegung und der Wärmelehre erarbeiten und das Interpretationsschema anwenden. In dem Kapitel statistische Physik werden wir versuchen, verschiedene scheinbar widersprechende Interpretationen eines Phänomens ineinander zu überführen, was uns zu neuen Erkenntnissen führt. Wir beschränken uns dabei auf homogene Systeme.

Homogene Systeme sind strukturlos, d. h., die Vorgänge im Inneren eines Systems werden näherungsweise ausgeblendet. Eine Berücksichtigung dieser Vorgänge erfordert die Werkzeuge der Feldtheorie, die notwendig sind, um Phänomene der Wärmeleitung, der Hydrodynamik, der Elektrodynamik und der Quantentheorie zu beschreiben. Diese riesigen Gebiete der Physik werden hier also nicht beschrieben. Das Verständnis der homogenen Systeme liefert aber den Schlüssel zum Verständnis der Feldtheorie, in der die Systeme durch eine immer größere Anzahl von immer kleineren Subsystemen beschrieben werden.

2 Das Wesen physikalischer Größen

2.1 Einführung

Physikalische Größen sind die Begriffe, mit denen wir die Phänomene dieser Welt beschreiben. Sie entsprechen den Wörtern unserer Sprache, deren Bedeutung in einem Duden hinterlegt ist. Phänomene beschreiben wir in Sätzen, die aus Substantiven, Verben etc. gebildet werden. Physikalische Größen unterscheiden sich von den in unserer Umgangssprache verwendeten Wörtern lediglich dadurch, dass ihre Bedeutung eindeutig ist. Die deutsche Sprache kennt z. B. hunderte Verben, das Phänomen der Bewegung zu beschreiben. Beispiele sind laufen, gehen, fahren, wandeln, hüpfen, etc. Die physikalische Beschreibung der Bewegung erfolgt durch den Begriff des Bewegungszustandes, der durch die Geschwindigkeit charakterisiert wird. Wir wollen in diesem Kapitel zunächst nur untersuchen, wie man zu den Definitionen dieser Größen gelangt. Der „Duden der physikalischen Größen“ sind die Normen, in denen Messvorschriften beschrieben werden. Um die Struktur dieser Normen zu erkennen, machen wir wieder von der Zerlegung Gebrauch.

In der Sprache wie auch in der Physik erfolgt die Definition der Begriffe durch einen Vergleich. Das Wort „wandeln“ erzeugt beim Autor eine Assoziation mit der Bewegung in einem Museum, die eine gewisse Ziellosigkeit enthält. Das Verb „wandeln“ enthält sowohl die Qualität „Bewegung“ als auch die Quantität „Schnelligkeit der Bewegung“, auf die der Zustand der Bewegung in der Physik reduziert wird. In die Sprache der Physik übertragen, wird die Geschwindigkeit des Gehens als Vergleichsnormal definiert und „wandeln“ als der Bewegungszustand, der z. B. halb so schnell ist wie der des Gehens. Die Definition eines Wortes oder einer physikalischen Größe erfolgt immer durch einen Vergleich. Ein solcher Vergleich setzt immer eine Zerlegung der Welt voraus. Bei den Substantiven bzw. den Systemen der Physik ist dies unmittelbar einsichtig.

Die Zerlegung der Welt erfolgt zweckmäßig in Gruppen von Systemen, die ähnlich sind. Ähnlich heißt in irgendeinem Sinne vergleichbar. Den Begriff System wollen wir hier in seinem naiven Sinne als von etwas Lokalisiertem mit einer scharfen Abgrenzung zu seiner Umgebung gebrauchen. Wir denken aber auch daran, dass auch eine weltweit operierende Firma – obwohl nicht lokalisiert – als ein sinnvoll abgegrenztes System dargestellt werden kann. Gruppen von lokalisierten Systemen, wie wir sie in unserer Sprache bilden, wie Tische, Menschen, Autos, etc., sind schon viel zu komplizierte Gebilde. Gemeinsames Merkmal der letztgenannten Systeme ist aber zum Beispiel die Längenausdehnung. Wir greifen nun ein System heraus und definieren es bezüglich der Längenausdehnung oder eines anderen Merkmals als Normal (früher war z. B. der Pariser Urmeter das Normal der Längenausdehnung). Das heißt, wir vergleichen alle Systeme mit dem Normal und geben an, wie oft das Normal an dem interessierenden System abgetragen werden kann. Das Ergebnis wird dann in der Art angegeben: Das untersuchte System ist n-mal so lang wie das Normal. Den geschilderten Vorgang nennt man Messung. Das Ergebnis der Messung ist eine physikalische Größe – hier die physikalische Länge eines Systems. Beschreiben wir ein System mit den Worten, es sei n Meter lang, so muss an irgendeiner Stelle hinterlegt sein, was das Normal ist und wie der Vergleich durchgeführt wurde. Damit ist die Beschreibung nahezu eindeutig. Für den Austausch von Erfahrungen mit Hilfe physikalischer Größen ist es aber auch notwendig anzugeben, wie genau die angegebene Größe ist, bzw. auf welche Weise die Messung durchgeführt wurde.

2.1.1 Die Messung

Wir wollen die Messung einer physikalischen Größe analysieren: Eine Messung ist immer ein Vergleich mit einem Normal, auch wenn dies im Alltag nicht immer augenfällig ist. Zur Durchführung der Messung benötigt man eine Messvorschrift, also eine Beschreibung des operativen Vorgehens. Die Genauigkeit der Messung hängt wesentlich von diesem operativen Vorgehen ab. Das Ergebnis der Messung ist eine Zahl, die das Vielfache des Systems bezüglich des Normals angibt. Da das Programm der Physik kein Projekt eines Einzelnen ist, sondern ein Menschheitsprojekt, und Anfangsbedingungen und Endresultate von natürlichen Phänomenen durch physikalische Größen beschrieben werden, hat man weltweite Standards eingeführt, die sich auf die Normale, die Messvorschriften und deren Darstellung beziehen.

Zu jeder physikalischen Größe existiert mindestens ein Normal. Das Normal ist ein System, das in idealer Weise vom Rest der Welt isoliert ist. Darüber hinaus sollte es bezüglich des Merkmals, anhand dessen es mit anderen Systemen verglichen wird, zeitlich unveränderlich sein. Dies gilt insbesondere für den Zeitraum der Messung. Beide Bedingungen sind nur näherungsweise zu erfüllen. Am Beispiel des Pariser Urmeters ist sehr schön zu sehen, was diese Anforderungen bedeuten.

Der Pariser Urmeter ist ein Stab aus Platiniridium, der im 19. Jahrhundert als Längennormal eingeführt wurde und viele lokale Längennormale wie die Elle, den Fuß etc. abgelöst hat.[1] Wie wir wissen, versucht jedes materielle System, die Temperatur seiner Umgebung anzunehmen. Mit dieser Zustandsänderung geht i. A. auch eine Längenänderung einher. Auch hier wollen wir die Sprache naiv gebrauchen und nicht auf die Frage eingehen, wie man diese Längenänderung misst, das Vergleichssystem ist ja der Urmeter. Dieses Problem kann

[1] Der Urmeter definiert sich historisch aus dem 40.000.000ten Bruchteil des Erdumfangs, so dass man ein Normal definiert hat, das allen Nationen zugänglich ist und das damit den universellen Charakter der Physik unterstreicht. Für die damalige Zeit war dies ein revolutionärer Schritt, der den Aufbruch in unsere aufgeklärte Zeit symbolisiert.

man reduzieren, indem man das System besser vom Rest der Welt isoliert, indem man es z. B. in ein Hochvakuum einschließt und vor Strahlung schützt. Je besser diese Isolierung ist, desto unpraktischer wird das Normal jedoch. Zur Vermessung eines Systems muss dieses in das Hochvakuum gebracht werden. Für die Messung selbst muss man das zu vermessende System in Kontakt mit dem Normal bringen, dabei findet wieder ein Temperaturausgleich statt, das Normal und das System „ändern" sich während der Messung.

Es ist eine große Kunst, die im Verborgenen gepflegt wird, geeignete Normale zu entwickeln. Heute können wir ein praktikables Längennormal vom Rest der Welt isolieren, so dass eine Länge überall auf der Welt mit einem Unterschied von 10^{-14} m genau bestimmt werden kann. Normale für alle physikalischen Messgrößen sind in Deutschland bei der physikalisch technischen Bundesanstalt in Braunschweig hinterlegt. Schon aus praktischen Erwägungen heraus, nicht für jede Messung nach Braunschweig fahren zu müssen, fertigt man Duplikate von den Normalen an. Man nennt diese Duplikate Maßverkörperungen. In der Regel werden an diese Duplikate viel geringere Anforderungen gestellt. Ein Zollstock, wie wir ihn im Haushalt verwenden, muss i. A. eine Genauigkeit von 1 mm aufweisen. Das meint, bei einer gleichartigen Messung mit dem Zollstock und mit dem Normal darf bei Einhaltung der Messvorschriften das Ergebnis der Messung nur um 1mm voneinander abweichen. Dieser (systematische) Fehler der Maßverkörperung ist auf der Maßverkörperung vermerkt. Die operative Tätigkeit des Abgleichs zwischen Normal und Maßverkörperung nennt man eichen. Die Tätigkeit des Eichens darf nur vom Eichamt durchgeführt werden. Das Vergleichen und Anpassen von Maßverkörperungen untereinander, wie wir es im Labor durchführen, nennt man kalibrieren und gehört zu den täglichen wissenschaftlichen Arbeiten.

Ohne näher auf den komplexen Zusammenhang zwischen dem Normal und der Herstellung der Maßverkörperung einzugehen, wird klar, dass ein großer Anteil der Kosten eines Messgerätes auf die Eichfähigkeit entfällt und dass diese Kosten überproportional mit der Genauigkeit des Messgerätes zunehmen. Es empfiehlt sich daher, vor jeder Messaufgabe die Frage nach der benötigten Genauigkeit des Messgerätes zu stellen. Eine gewöhnliche Armbanduhr hält diesen Kriterien an ein Messgerät nicht stand. Armbanduhren, die als Messgeräte zugelassen sind, heißen Chronometer (in der Umgangssprache verwischt dieser Unterschied oft) und zeichnen sich i. A. durch viel höhere Preise aus.

Aus dem Vorangestellten wird deutlich, dass auch die operative Nutzung des Normals oder der Maßverkörperung Einfluss auf das Messergebnis hat: Nehmen wir zum Beispiel die Messung der Länge einer Schreibtischplatte. Dazu nehmen wir einen Zollstock (die Maßverkörperung) und legen ihn auf die Platte. Um sicher zu gehen, dass wir ihn auch genau an der Tischkante abtragen, legen wir unsere Hand an die Kante und drücken den Zollstock dagegen. Dieses Vorgehen ist Teil einer Messvorschrift. Bei der Ausführung dieser Vorschrift drücken wir den Zollstock jedoch in unseren Handballen, der unter dem Druck etwas nachgibt. Es bleibt eine Unsicherheit (Ungenauigkeit) bei diesem Messverfahren. Diese kann verringert werden, indem wir die Messvorschrift modifizieren und vorschreiben, immer ein planes Stück Hartholz als Anschlag zu benutzen.

Der Fehler der Maßverkörperung ist also nicht mit dem Fehler der physikalischen Größe zu verwechseln. Der Fehler der physikalischen Größe wird durch die Güte der Messvorschrift und der Maßverkörperung bestimmt. Auch hier gilt in der Praxis, dass diese Fehler aufeinander abzustimmen sind. Es ist bei dem oben genannten Beispiel sinnlos, einen „Zollstock" zu verwenden, dessen Fehler 10^{-6} m ist, wenn der Eindruck in den Handballen in der Größenordnung von 1 mm liegt.

2.1.2 Standards

Aus der oben skizzierten Messung ergibt sich die Darstellung einer physikalischen Größe „G" in einer der folgenden Formen.

$$G = \{G\} \cdot [G] \pm \Delta G \text{ bzw. } G = \{G\} \cdot [G] \cdot \left(1 \pm \Delta G / G\right) \qquad (2.1)$$

Hierbei symbolisiert $\{G\}$ den Zahlenwert, das Vielfache im Vergleich zum Normal, $[G]$ die Einheit der physikalischen Größe, die aussagt welche Größe eines Systems gemessen wurde, bzw. welches Normal verwendet wurde, und ΔG die Abweichung (den Fehler), der durch Abweichung der Maßverkörperung, die Messvorschrift und weiteren in der Regel schlecht abschätzbaren Fehlerquellen verursacht wird. Der Fehler ist auch immer ein Produkt aus Zahlenwert und Einheit. Trivialerweise gilt: $[G] = [\Delta G]$. Oft ist es auch gebräuchlich den relativen Fehler $\Delta G/G$ in Prozent anzugeben. Die Bestimmung der Abweichung[2] beruht selbst wieder auf Konventionen. Wir kommen in Abschnitt 2.2 darauf zurück. In einer etwas laxeren Form lässt man die explizite Angabe des Fehlers weg, gibt dann beim Zahlenwert jedoch nur die im Rahmen des Fehlers sicheren Nachkommastellen an. Es empfiehlt sich, ein Messergebnis immer in einem ganzen Satz zu formulieren, so werden Ungereimtheiten am ehesten klar.

Ein Beispiel: Der Abstand zwischen Köln und Krefeld beträgt 60 km. Das Ergebnis einer Abstandsmessung zwischen zwei ausgewählten Punkten (Kölner Dom und Seidenweberhaus in Krefeld) beträgt 60 km. Der Fehler der Längenmessung beträgt 10 km. Verbesserte man die Längenmessung auf einen Fehler von 1 km und verwendet unsere Konvention, so würde man sagen: „Der Abstand zwischen Köln und Krefeld beträgt 63 km". Dies ist aber ein unsinniger Satz, da die Lage der Messpunkte (Köln, Krefeld) selbst auf 10 km ungenau ist.

Zu jeder physikalischen Größe gibt es mehrere Normale, die auch Verwendung finden. So ist die Zeit z. B. mit einem Umlauf der Erde um die Sonne, einem Umlauf des Mondes um die Sonne, einer Drehung der Erde um ihre Achse, oder der Periode einer Schwingung eines Pendels definiert. Die Einheiten sind die gebräuchlichen: Jahr, Monat, Tag, Stunde, Minute und Sekunde. Da die Messungen der Zeit mit diesen Normalen alle ineinander überführbar sind (es ist eine experimentelle Erfahrung, dass das Jahr in zwölf Monate unterteilt werden kann), gibt es zu jedem Merkmal ein Standardnormal mit einer Standardeinheit. Dieser Standard ist im so genannten SI- Einheitensystem festgelegt. Längen werden in Metern gemessen (Einheitensymbol: m), Zeiten in Sekunden (s), Massen in Kilogramm (kg), elektrische Strö-

---

[2] Aus Gründen, die später deutlich werden, ist der offizielle Terminus Abweichung und nicht Fehler. Das wertende Wort Fehler wird in der praktischen Laborarbeit jedoch überwiegend verwendet.

me in Ampere (A) usw. Dieser Standard erleichtert, wie jeder Standard, die Kommunikation enorm. Andererseits schränkt jeder Standard auch ein.

Es ist unmittelbar einsichtig, dass die Vermessung eines Abstandes zwischen zwei Atomen (ca. 10^{-9} m) eine ganz andere Qualität hat als die Vermessung des Abstandes zwischen Erde und Sonne (ca. 10^{11} m). Obwohl aufgrund der Standardeinheit das verwendete Normal in der physikalischen Größe explizit nicht mehr vorkommt, darf man nicht annehmen, dass das Pariser Urmeter im Falle des Abstandes Erde-Sonne 10^{11}-mal angelegt wurde. Um zu einer überschaubareren Vorstellung der physikalischen Größe zu kommen, verwendet man Voranstellungen an den Einheiten, die den Zahlenwert in eine Größenordnung bringen, der zwischen 1/100 und 100 liegt, einem Zahlenraum der sicher beherrscht wird. Man skaliert die Einheit in angepasster Weise.

Tabelle 2.1. *Bezeichnungen von dezimalen Vielfachen und Bruchteilen von Einheiten*

Zehnerpotenz	Vorsilbe	Kurzzeichen	Beispiel
10^{9}	Giga	G	GW
10^{6}	Mega	M	MW
10^{3}	Kilo	k	kW, km
10^{-1}	Dezi	d	dm
10^{-2}	Centi	c	cm
10^{-3}	Milli	m	mm, mW
10^{-6}	Micro	µ	µm
10^{-9}	Nano	n	nm

Ein weiteres Beispiel: Die Angabe, dass der Abstand zwischen Köln und Krefeld 60.000 m ist, ist nicht leicht verständlich. Wir haben z. B. eine Vorstellung von einem Meter (ein gedachtes Normal, z. B. die halbe Höhe einer Bürotür). Der Zahlenwert 60.000 besagt jetzt, dass wir 30.000 Bürotüren in einer Reihe zwischen Köln und Krefeld legen können. Wenn wir aber 60 km sagen, haben wir auch eine Vorstellung von einem km, z. B. der Abstand unserer Wohnung zum Bäcker. 35-mal zum Bäcker und zurück gehen ist eine Größe, die wir auf Anhieb weiterverarbeiten können.

Obwohl beide Darstellungen äquivalent sind, ist die zweite für eine Kommunikation besser geeignet. Da jede Messung Ausgangspunkt für weitere Tätigkeiten, die nicht unbedingt von uns durchgeführt werden müssen, sein sollte, bemüht sich jeder immer um eine Darstellung der Messergebnisse, die besonders leicht weiterverarbeitet werden kann. Darum hat man diese Standards getroffen, und die Einführungen dieser Standards waren nicht immer einfach.

Der Wert des Einheitensystems liegt nicht nur in einer Vereinfachung der Dokumentation und Kommunikation, sondern in der Beschränkung auf heute sieben Basiseinheiten. Unser physikalischer Sprachschatz umfasst derzeit ca. 1.000 verschiedene Größen, mit denen wir Systeme und deren Wechselwirkung beschreiben, z. B. Ladung, Impuls, Geschwindigkeit, Temperatur, Viskosität etc. Jede dieser Größen besitzt zunächst eine eigene Einheit. Eine genaue Analyse der zugehörigen Messprozesse zeigt jedoch, dass die verschiedenen Größen vergleichbar sind. Das heißt, dass zwischen den verschiedenen Messgrößen Beziehungen bestehen. Nach dem heutigen Stand reichen sieben verschiedene Größen, um alle im SI-Einheitensystem erfassten Größen auszudrücken. Man hat unter dem Gesichtspunkt der Zweckmäßigkeit sieben spezielle physikalische Größen als Basiseinheit bestimmt. Diese sieben Größen sind besonders einfach messbare Größen und die Maßverkörperungen dieser Größen sind Teil der Grundausstattung eines jeden Labors.

Tabelle 2.2. *Basisgrößen im SI-Maßsystem*

Größe	Formelzeichen	Einheit	Symbol
Länge	s, l	Meter	m
Zeit	t, T	Sekunde	s
Masse	m	Kilogramm	kg
Systemmenge	N, n	Mol	mol
el. Stromstärke	I	Ampere	A
Lichtstärke	I_v	Candela	Cd
Temperatur	T	Kelvin	K

Da – wie schon betont – das Programm der Physik eine Gemeinschaftsaufgabe ist, haben sich auch Standards für die Dokumentation von Messergebnissen, die ja unsere Erfahrung beschreiben, herausgebildet. Wie für fast alle Bereiche unseres Lebens gilt: „Was nicht in den Akten ist, ist nicht von dieser Welt“. Diese Standards sind nicht Physik-spezifisch, sondern gelten für fast alle Bereiche des Berufslebens.

Mit jeder Messung ist ein Informations- und Erkenntnisgewinn verbunden. Die Ergebnisse von Messungen sollten zumindest im betrieblichen Ablauf schon aus Kostengründen Konsequenzen haben. Aufgrund von Messungen werden Produktionsabläufe geändert, besondere Versuchsaufbauten führen zu Patentanmeldung etc. Mit anderen Worten: Messungen sind es wert, so dokumentiert zu werden, dass ein Dritter an die Ergebnisse der Messung anknüpfen kann oder diese mit demselben Ergebnis wiederholen kann. Der letztere Fall ist sogar unabdingbar für die Feststellung der Natürlichkeit eines Prozesses. Die Dokumentation von Ereignissen (hier Versuchsreihen, Messaufbauten) kann natürlich nicht so rigoros standardisiert sein und muss dem Einzelfall angepasst werden. Dennoch ist es sinnvoll, einige allgemeine Richtlinien zu beachten. Dazu schließen wir an unsere Alltagserfahrung an.

Dokumente sind z. B. Zeugnisse, Logbücher, Schichtbücher, Geschäftsberichte, Betriebsanleitungen etc. Zunächst ist es sinnvoll sich zu verdeutlichen, dass alle diese Dokumente in eine Informationshierarchie eingeordnet sind. Die Ebenen dieser Hierarchie unterscheiden sich durch den Grad der Informationsverdichtung. Ein Schulzeugnis ist ein Dokument mit einem sehr hohen Verdichtungsgrad. Die Leistung eines Schülers während eines Schuljahres in einem Fach, die ein Lehrer kontinuierlich bewertet, wird durch eine Note ausgedrückt. Eine noch höhere Informationsverdichtung stellt das Abitur dar. Da in immer höheren Hierarchiestufen kaum neue Information zugefügt wird, sondern lediglich zueinander gehörige Informationen gesammelt und bewertet werden – eine Tätigkeit, die in der Regel höher vergütet wird als das Sammeln von Information –, ist es unabdingbar, dass die Basisinformation klar und präzise formuliert wird und vor allem richtig ist. Im Anschluss an eine Schicht dokumentiert der Schichtleiter Besonderheiten der Schicht wie Produktionsausfälle, Arbeitsunfälle, etc. im Schichtbuch. Der Gruppenleiter benutzt die Daten mehrerer Schichten, um festzustellen, ob sich z. B. bestimmte Besonderheiten häufen. Er bewertet die verschiedenen Basisinformationen, um Änderungen oder Verbesserungen zu initiieren. Darüber hinaus verdichtet er seinerseits die Informationen, um seinem Abteilungsleiter die Produktivität seiner Abteilung zu dokumentieren. All diese Informationen werden in dem jährlichen Geschäftsbericht letztendlich auf die Kosten und Erträge eines Unternehmens verdichtet; umgekehrt muss der Geschäftsführer diese Daten auch wieder zurückverfolgen. Ihm muss klar sein, wo die Kosten entstehen. Die Informationshierarchie muss also in beide Richtungen transparent sein. In einem Unternehmen fallen täglich eine Fülle von Informationen an. Wir denken zum Beispiel an die Kennzeichnungspflicht von Bauteilen, oder die lückenlose Rückverfolgung eines Produktes. Diese Randbedingungen einer Fertigung stellen sehr hohe Anforderungen an die Informationsverarbeitung. Daher ist es oberstes Gebot, nur solche Information zu sammeln und zu verarbeiten, die einen Neuigkeitswert hat. Alle Information, die schon dokumentiert ist, braucht nicht wieder dokumentiert werden. Man verweist in der eigenen Dokumentation auf die schon dokumentierten Informationen durch Zitate.

Die Dokumentation einer einfachen Messaufgabe, also der Vergleich mit einem Normal, nennt man Protokoll. Ein Protokoll stellt wissenschaftlich die niedrigste Stufe der Informationshierarchie da. Es besteht im Wesentlichen aus zwei Teilen. Zum einen die von den Messgeräten abgelesenen Rohdaten und zum anderen deren Verdichtung, welche die Lösung der Messaufgabe in der Form Gl. 2.1 beschreibt. Dieser Verdichtung wenden wir uns im nächsten Abschnitt zu. Die formalen Anforderungen an ein solches Protokoll seien hier der Vollständigkeit halber aufgelistet:

1. Ein Deckblatt mit den Namen der an der Messaufgabe Beteiligten und das Datum der Versuchsdurchführung. Darüber hinaus sollte dieses Deckblatt auch die Fragestellung an den Versuch und die Antwort enthalten. Dadurch ist gewährleistet, dass ein Dritter das Messresultat sofort erkennt und weiterverarbeiten kann. Hat er Zweifel an der Richtigkeit der Antwort, muss er aus dem Inneren des Protokolls die von den Versuchsdurchführenden gegebene „Begründung“ nachvollziehen können. Für den Anfänger scheint es zunächst frustrierend, dass die gesamte Arbeit eines Labortages in einem Satz formuliert werden kann, doch mit der Zeit stellt man fest, dass Sätze, die es wert sind, dokumentiert zu werden, in der Regel nicht schnell formuliert werden können.

2. Im Inneren des Protokolls müssen die verwendeten Begriffe, Formeln und Formelzeichen definiert werden. Benutzt man standardisierte Größen – verwendet man z. B. das Formelzeichen t für die Zeit, so kann darauf verzichtet werden. Des Weiteren muss das Messverfahren und der Versuchsaufbau dokumentiert werden. Verwendet man schon dokumentierte Messverfahren, werden diese zitiert. Zu dem Messverfahren gehört auch die Angabe der verwendeten Messgeräte und ihrer Fehler.

3. Die verwendeten Rohdaten werden dem Protokoll beigefügt oder, falls sie in einem persönlichen Laborbuch niedergeschrieben wurden, zitiert. Beim Aufschrieb der Rohdaten ist darauf zu achten, dass diese vollständig sind, z. B. auch Einheiten etc. notiert werden. Da die Rohdaten die Quelle aller weiteren Arbeiten sind, sollten diese mit einem dokumentenechten Stift festgehalten werden. Treten beim Notieren Fehler auf, die direkt korrigiert werden können, so sind diese Korrekturen ebenfalls zu dokumentieren (durchstreichen, niemals mit Tippex o.Ä. arbeiten).

Es gibt natürlich noch viel mehr und oft auch firmenspezifische Formalien, die zu beachten sind, doch lassen diese sich meistens aus dem Wesen einer Dokumentation verstehen. Aus Sicht der grundlegenden Zusammenhänge interessiert uns jedoch die Verdichtung der Rohdaten zu der Darstellung einer physikalischen Größe (Gl. 2.1), der wir uns jetzt zuwenden wollen.

2.2 Die direkte Messung

Als direkt wollen wir eine Messung bezeichnen, die auf einem einfachen Vergleich mit einem Normal beruht, im Unterschied zur indirekten Messung, bei der die zu vermessende Größe über einen funktionalen Zusammenhang mit anderen direkt vermessenen Größen gewonnen wird. Ein Beispiel für eine direkte Messung ist Messung der Zeit, die eine Kugel benötigt, in Öl eine bestimmte Strecke abzusinken. Messen wir neben der Fallzeit auch Masse und Radius der Kugel und die Fallhöhe selbst, so können wir aus Kenntnis dieser Messwerte indirekt auf die Viskosität des Öls schließen, also die Viskosität indirekt messen.

Bei der direkten Messung gehen wir davon aus, dass ein wahrer Messwert existiert, d. h. der Vorgang des Fallens natürlich ist und die Fallzeit einen bestimmten Wert t_w besitzt. Symbolisch wollen wir den wahren Wert einer physikalischen Größe eines Systems mit μ (My) bezeichnen. Die direkte Messung hat die Aufgabe, den wahren Wert μ so gut wie möglich zu bestimmen. Dazu benötigen wir ein Vergleichsnormal. In unserem Beispiel ist dies eine Stoppuhr. Der Fehler des Vergleichsnormals ist auf der Stoppuhr vermerkt. Der Hersteller der Stoppuhr garantiert uns also unter gewissen Bedingungen, die in der Betriebsanleitung angegeben sind, dass die Stoppuhr die Zeit bis auf einen Fehler von z. B. $\pm 0{,}1$ s anzeigt. Messen wir die Fallzeit, so stellen wir fest, dass die Messwerte bei wiederholter Messung zwischen z. B. 37 s und 43 s schwanken. Diese Schwankungen sind dem Messverfahren zuzuordnen, das zunächst keine Aussage darüber macht, wie die Kugel geworfen werden soll oder wie die Start- und Stoppzeit definiert ist (die Kugel hat eine endliche Ausdehnung.). Darüber hinaus ist auch die Reaktionszeit des die Uhr Bedienenden und deren Nachlassen bei wiederholter Messung zu berücksichtigen. Es ist unmittelbar einsichtig[3], dass die Schwankungen der Messwerte ein Maß für die Güte des Messverfahrens ist, das sich neben dem Fehler der Maßverkörperung in dem Fehler der Messgröße niederschlägt. Zur Quantifizierung dieses Fehlers führen wir eine Größe ein, die wir durch σ (Sigma) symbolisieren und die wir Varianz nennen, welche die Güte des Messverfahrens beschreibt (es gilt: $[\mu] = [\sigma]$.).

Unabhängig von der Art der physikalischen Größe erhalten wir bei der n-fachen Wiederholung der Messung n Messwerte $x_1, x_2,..., x_n$ (kurz: $\{x\}_n$). Diese Messwerte müssen in irgendeinem Zusammenhang mit den Größen μ und σ stehen. Die Herstellung dieses Zusammenhangs ist der Gegenstand des Nachfolgenden.

Zunächst halten wir fest, dass aufgrund des Fehlers der Maßverkörperung Δx (hier: $\Delta t = 0{,}1\text{s}$) der wahre Wert nicht genauer als Δx bestimmt werden kann. Demzufolge ist auch die Angabe der x_i in Bruchteilen von Δx sinnlos und hat zu unterbleiben (auch wenn die digitale Stoppuhr 1/100 s anzeigt). Mit dieser Konvention können wir schon zwei bedeutsame Fälle unterscheiden:

1. Innerhalb des Fehlers der Maßverkörperung sind alle Messwerte gleich. D. h., die Messwerte schwanken nicht: $x_i = x$. Wir definieren: Der wahre Wert ist $\mu \in (x - \mathrm{D}x, x + \mathrm{D}x)$. Oft schreibt man auch: $\mu = x \pm \Delta x$. Der wahre Wert liegt in einem Intervall $x - \Delta x,\ x + \Delta x$. Das bedeutet, dass der Fehler des Messverfahrens kleiner ist als der Fehler der Maßverkörperung. Mehr Information enthält die Messung nicht. Diese Art Fehler heißt systematischer Fehler, er kann durch Verwendung einer genaueren Maßver-

[3] Bemerkung zum wahren Wert: Der Appell an die unmittelbare Einsicht sollte hinterfragt werden. Die Unmittelbarkeit bezieht sich bei genauerer Betrachtung auf die Voraussetzung der Existenz eines wahren Wertes einer physikalischen Größe. Dessen Existenz bedingt zwangsläufig, dass die Schwankungen dem Messprozess zugeordnet werden, da die zu messende Größe einen wahren Wert hat. Nun kann man die Schwankung auch der zu messenden Anordnung zuordnen. Wir können uns z. B. vorstellen, dass das Absinken der Kugel im Öl bei jedem Versuch zu einer anderen Fallzeit führt. Dazu können wir uns das Öl aus Molekülen bestehend vorstellen, die mit der Kugel stoßen. Da diese Stöße bei jedem Fall aus unterschiedlichen Richtungen kommen und die Moleküle unterschiedliche Geschwindigkeiten haben, ist die Schwankung der Fallzeit nicht im Messprozess begründet, sondern in der Anordnung selber. Es könnte auch sein, dass die Anordnung von einem zufälligen Moment bestimmt wird, das zur Schwankung der Fallzeit führt. Im Grunde werden beide Interpretationen einen Teil der „Wahrheit" enthalten: Die Schwankungen der Messwerte beschreiben die Beziehung zwischen Messgerät und Anordnung und die Beschreibung einer Anordnung ist „zerlegt" von der Messapparatur nicht möglich. Durch viele Messungen mit derselben Apparatur an verschiedenen Systemen und verschiedenen Apparaturen an demselben System kann man jedoch zeigen, dass bei den meisten Messungen die Ursachen der Schwankungen getrennt werden können und wir in guter Näherung von einem wahren Wert sprechen können. Wir machen diese Bemerkung an dieser Stelle aus drei Gründen.

1. Wir wollen von Anfang an deutlich machen, dass prinzipiell alles zu hinterfragen ist. Zweifel scheint dem Autor der geeignete Antrieb, um ein Verständnis zu erlangen.
2. Durch dieses Beispiel wird das Wesen einer Interpretation deutlich, die immer einer Zuordnung bedarf, die aus sich heraus zunächst willkürlich ist.
3. Die statistische Physik und die Quantenmechanik setzen bei dieser Interpretation an und erweitern damit das Feld der Phänomene, die mit der klassischen Physik beschrieben werden, um solche, deren Schwankungen ihre Ursache in mikroskopischen, aber klassischen Phänomenen haben, oder aber ein zufälliges Moment haben.

körperung systematisch verkleinert werden, bis der systematische Fehler in die Größenordnung des zufälligen[4] Fehlers kommt, der durch den Messprozess verursacht wird. Dieser auftretende Fehler heißt zufällig, weil er aus der Struktur des Messprozesses nicht erklärbar ist.

2. Unter Berücksichtigung des Fehlers der Maßverkörperung sind die Messwerte verschieden. Der Fehler des Messverfahrens ist größer als der Fehler der Maßverkörperung. Der Zusammenhang zwischen Messwerten und wahrem Wert bedarf der Erklärung.

Bevor wir den letztgenannten Fall weiter diskutieren, wollen wir die Bedeutung dieser beiden Fälle diskutieren. Der erste Fall ist der, der uns im Alltag begegnet, wenn wir mit dem Zollstock einen Raum ausmessen, um Möbel aufzustellen, und der in der betrieblichen Praxis anzustreben ist. Er lässt sich wie folgt beschreiben:

1. Der Anlass für eine Messung ist der Bedarf an einer Information mit einer gewissen Genauigkeit.

2. Dies empfiehlt die Auswahl einer Maßverkörperung mit einem Fehler, der der geforderten Genauigkeit entspricht. Diese Auswahl liegt schon aus Kostengründen nahe, da eine Verdoppelung der Genauigkeit mit ca. einem Faktor 10 in den Kosten für das Normal einhergeht.

3. Auswahl eines Messverfahrens, dessen Schwankungen kleiner sind als der Fehler der Maßverkörperung. Das Messverfahren sollte aber nicht viel genauer sein als der Fehler der Maßverkörperung, da die Komplexität und die Kosten der Realisierung der Messvorschrift mit der Genauigkeit ebenfalls stark zunehmen.

Bei diesem Vorgehen muss zur Erlangung der Information nur einmal gemessen werden. Die Information muss nicht, wie im Weiteren beschrieben, aus den Messwerten extrahiert werden. Andererseits hängt der Fehler des Messverfahrens auch von dem Messobjekt und der Umgebung ab. Es leuchtet unmittelbar ein, dass die Längenmessung der Kantenlänge eines Zimmers ein anderes Verfahren erfordert als die Vermessung der Länge einer glühenden Stahlbramme, so dass der Fehler des Messverfahrens oft vom verantwortlichen Ingenieur ermittelt werden muss.

2.2.1 Mittelwert und Standardabweichung

Im Weiteren werden wir davon ausgehen, dass der Fehler der Maßverkörperung im Verhältnis zu den Schwankungen des Mittelwertes zu vernachlässigen ist. Wir haben also die Situation, dass wir n Messwerte $\{x\}_n$ ermittelt haben, die i. A. verschieden sind. Als Beispiel

[4] Der Zufall ist eines der am schwierigsten zu verstehenden Phänomene der Physik. Wir werden den Begriff des Zufalls umgangssprachlich benutzen und erst zu einem späteren Zeitpunkt tiefer in seine Bedeutung eindringen.

nehmen wir die Fallzeit einer Kugel in Öl, so wie sie vielleicht in einem physikalischen Praktikum ermittelt wurde. Abb. 2.1 stellt das Ergebnis eines Versuches dar, bei dem die fallende Kugel 49-mal gestoppt wurde.

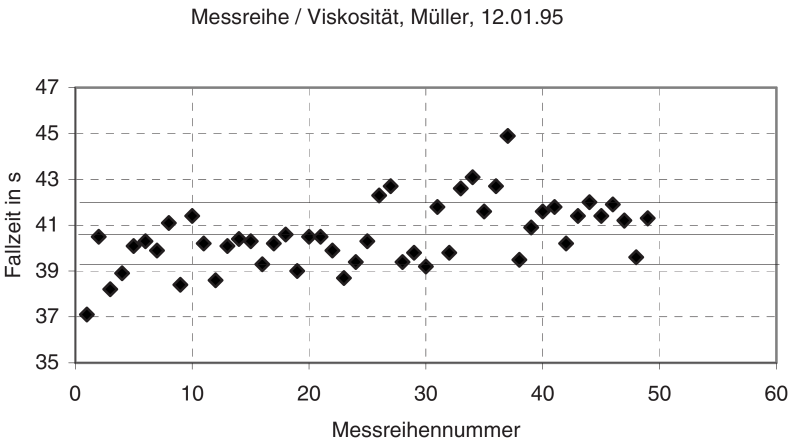

Abb. 2.1. *Messreihe Viskosität*

Das Bild verdeutlicht die Informationsvielfalt der Rohdaten, die verdichtet werden müssen, um weiter verarbeitet werden zu können. Darüber hinaus sieht man auch, dass die Fallzeit mit steigender Versuchsnummer „im Durchschnitt" zuzunehmen scheint. Dieser Effekt kann zufällig sein, so wie wir beim „Mensch ärgere dich nicht" auch zufällig dreimal hintereinander eine Sechs würfeln können. Es kann aber auch eine systematische Tendenz sein, die z. B. mit dem Nachlassen der Aufmerksamkeit des Studenten, der die Kugel beobachtet, zusammenhängt. Ähnlich wie beim „Mensch ärgere dich nicht" ist diese Frage schwierig bzw. nur durch eine größere Messreihe, mit wechselnden Studierenden, zu entscheiden. Auf jeden Fall wäre eine solche Ursache ein systematischer Fehler. Wir gehen hier davon aus, dass diese Tendenz einen zufälligen Charakter hat. Anderenfalls müssten wir von einem systematischen Fehler bei der Versuchsdurchführung sprechen, den auszuschalten oder abzuschätzen immer schwierig ist.

Die erste Informationsverdichtung ist die Mittelwertbildung. Aus allen Messwerten bilden wir das arithmetische Mittel $\bar{x}$:

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\left(x_1 + x_2 + \ldots + x_n\right) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \tag{2.2}$$

Der Mittelwert des Beispiels ist in Abb. 2.1. als mittlere Linie bei 40,5 s eingezeichnet.

Der Zusammenhang zwischen dem wahren Wert und dem Mittelwert ist durch eine Grenzwertbetrachtung gegeben, deren Logik wie folgt nachvollzogen werden kann: Der Mittelwert nach obiger Definition hängt von der individuellen Messreihe ab. Hätte man im obigen Beispiel nur 30-mal gemessen, wäre das Ergebnis der Mittelwertbildung verschieden. Könnte man jedoch die Messreihe bis ins Unendliche fortsetzen, so dürfen wir erwarten, dass zwei beliebige Messreihen mit unendlichen vielen Messwerten den identischen Messwert liefern, den wir den wahren Wert nennen:

$$\mu = \lim_{n \to \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{\infty} x_i \tag{2.3}$$

Der Mittelwert einer Messreihe mit n Messwerten ist eine Schätzung auf den wahren Wert, die umso genauer wird, je länger die Messreihe ist.

Zu Gl. (2.3) sei eine Warnung ausgesprochen: Die Gleichung enthält einen Grenzwert, d. h., es ist operativ unmöglich, diese Gleichung zu verifizieren. Diese Gleichung ist die Definition des wahren Wertes, den man operativ durch Ausweitung der Messreihe zwar immer besser schätzen kann, dessen wahren Wert auf eine beliebige Nachkommastelle man jedoch prinzipiell nicht ermitteln kann. Solche Grenzwertbetrachtungen nimmt der Physiker sehr oft vor und sie sind sehr hilfreich, wiewohl eine kritische Hinterfragung auch zu neuen Einsichten führen kann. Da wir den wahren Wert nur schätzen können, müssen wir uns um die Güte der Schätzung Gedanken machen, die sicherlich auch mit den Schwankungen der Messwerte zusammenhängen wird.

Als nächste, die Messreihe charakterisierende und die Information verdichtende Größe führen wir die Standardabweichung s ein. Die Standardabweichung ist ein Maß für die Stärke der mittleren Abweichung:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2} \tag{2.4}$$

In unserem Beispiel ist die Streubreite $2s$ in Abb. 2.1. eingezeichnet. 63% aller Messwerte liegen in unserem Beispiel innerhalb der Streubreite. Wie der Mittelwert im Vergleich zum wahren Wert ist die Standardabweichung spezifische Größe der Messreihe. Um zu einem von Messreihen unabhängigen Maß für die Güte eines Messverfahrens zu kommen, führen wir wieder eine Grenzwertbetrachtung durch. Den derart bestimmten Grenzwert identifizieren wir mit der Varianz (des Messverfahrens) σ.

$$\sigma^2 = \lim_{n \to \infty} \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2 \tag{2.5}$$

Der Mittelwert und die Standardabweichung als Schätzwerte für den wahren Wert und die Varianz sind die zentralen Größen der Messauswertung. Obwohl sie eine extreme Informationsverdichtung der Messwerte darstellen, sind sie die einzigen Informationen, die aus einer

Messreihe weiterverarbeitet werden. Um das einzusehen, machen wir uns klar, dass so wie wir die direkte Messung definiert haben – mit vernachlässigbarem systematischen Fehler – wir nur zwei einfache Fragen gestellt haben: a) Wie groß ist der zu messende Wert und b) wie genau können wir ihn mit dem gewählten Messverfahren bestimmen. Die Antwort auf beide Fragen wird durch μ und σ gegeben, die ihrerseits durch Mittelwert und Standardabweichung geschätzt werden können. Um den Zusammenhang zwischen der Genauigkeit und σ herzustellen bedarf es noch der Spezifikation der Genauigkeit. Dies gestaltet sich nicht so einfach und wir müssen auf Begriffe der Wahrscheinlichkeitsrechnung zurückgreifen bzw. genauer sagen, welche Auswirkungen der Zufall hat.

2.2.2 Die Wahrscheinlichkeit

Bisher haben wir nur Messwerte aufgezeichnet und die in den Messwerten steckende Information verdichtet. Wir haben also unser Erfahrungsarchiv gefüllt. Wir wollen nun deutlich machen, wie wir aus diesen Erfahrungen auf zukünftige Messungen schließen wollen. Dazu verdichten wir die Messwerte in einer anderen Form.

Die Auftragung der Messwerte in Abb. 2.1. beinhaltet durch die Nummerierung der einzelnen Versuche die zeitliche Reihenfolge der Messung. Diese Auftragung ließ uns einen systematischen Fehler vermuten. Denken wir uns aber alle systematischen Fehler eliminiert, so gehört es zu den Eigenschaften des Zufalls, dass jeder Messwert unabhängig von den anderen – eben zufällig – entstanden ist. Deswegen können wir bei einer rein zufälligen Messreihe diese in einer Häufigkeitsverteilung anordnen. Dazu bilden wir Zeitklassen – hier der Breite 1 s – und tragen die Anzahl der Messwerte, die innerhalb einer Klasse liegen, in diese Klassen ein. Das Ergebnis ist eine Häufigkeitsverteilung wie in Abb. 2.2. für unser Beispiel dargestellt.

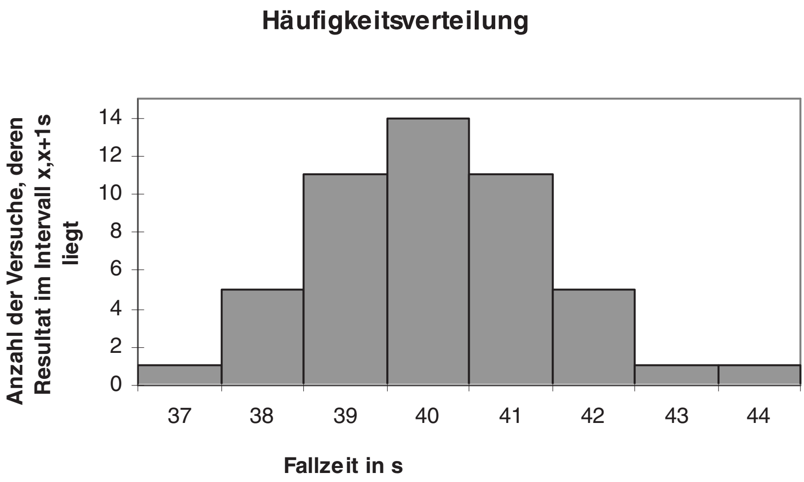

Abb. 2.2. Beispiel einer Häufigkeitsverteilung

Um bei einer endlichen Anzahl von Versuchen ein solches Bild zu erhalten, darf man die Klassenbreite nicht zu klein, bzw. die Anzahl der Klassen nicht zu groß wählen, da wir sonst eine wilde Zick-Zack-Linie erhalten, die dadurch bestimmt ist, dass die meisten Klassen leer sind und die wenigen gefüllten Klassen nur einen Messwert enthalten. Eine Faustformel besagt, dass bei n Messwerten eine Einteilung zwischen dem höchsten und niedrigsten Messwert in $\sqrt{n}$ Klassen ein „vernünftiges" Bild ergibt. Für die weiteren Überlegungen, die ja unabhängig von der Anzahl der Versuche sein sollen, ist es sinnvoll, eine relative Häufigkeitsverteilung einzuführen. In die Klassen dieser Verteilung trägt man nicht die Anzahl der Messwerte ein, sondern den Bruchteil dieser Messwerte bezogen auf die gesamte Zahl der Messwerte. Die Gestalt der Häufigkeitsverteilung Abb. 2.2 ändert sich dabei nicht. Lediglich die Ordinate muss um einen Faktor n skaliert werden. Geht die Anzahl der Versuche gegen unendlich, kann man natürlich die Klassen beliebig klein wählen und erhält als Häufigkeitsverteilung eine glatte Kurve (Abb. 2.3.). Diese Kurve heißt relative Häufigkeitsdichte. Denken wir uns eine solche Kurve aus dem Experiment bestimmt, was zumindest näherungsweise möglich ist, wie Abb. 2.2. verdeutlicht (wenn dx eine beliebig klein gedachte Klassenbreite ist, dann ist $h(x)$dx die relative Häufigkeit, Messwerte in einem Intervall, das durch x und x+dx gebildet wird, zu finden.), dann enthält diese Funktion alle Informationen über die Zufälligkeit des Messprozesses. Wird das Spezifische der Messaufgabe durch die Lage der Kurve auf der Abszisse und die Breite der Kurve bestimmt, so wird die Form der Kurve durch die Zufälligkeit festgelegt.

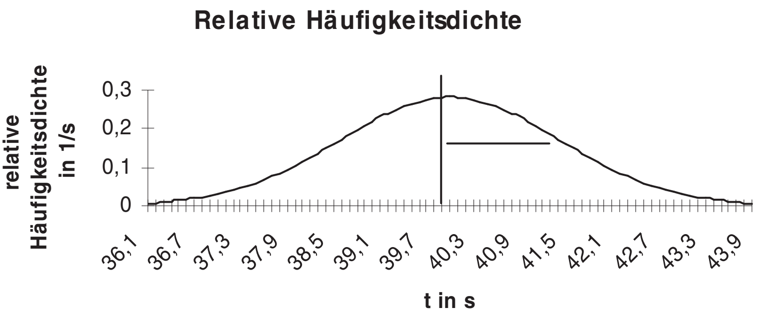

Abb. 2.3. *Relative Häufigkeitsverteilung*

Da wir die Zufälligkeit als weitgehend unabhängig von der Messaufgabe sehen können, sollte die Form der Kurve einen universellen Charakter haben. Diese Vorstellung ist beweisbar und das Ergebnis dieses Beweises ist der zentrale Grenzwertsatz der Statistik. Dessen Inhalt lautet: Kann eine Messgröße jeden beliebigen Wert annehmen, so ist die relative Häufigkeitsverteilung im Grenzfall unendlich vieler Messungen eine Gauß'sche Glockenkurve.

$$h(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \tag{2.6}$$

Diese Kurve wird durch den wahren Wert μ und die Varianz σ parametrisiert. Wir haben also das überraschende Ergebnis, dass die Messaufgabe, bei Elimination der systematischen Fehler, wirklich nur durch zwei Parameter beschrieben wird und mit wenigen Einschränkungen zu einer universellen Häufigkeitsverteilung führt. Andere Einschränkungen führen zu anderen funktionalen Abhängigkeiten, die jedoch auch analytisch darstellbar sind.

Die Häufigkeitsverteilung ist der Ausgangspunkt, um unsere Erfahrung in die Zukunft zu extrapolieren. Haben wir eine relative Häufigkeitsverteilung ermittelt, so behaupten wir, dass die Wahrscheinlichkeit, dass bei einem erneuten Versuch das Messergebnis in einer bestimmten Klasse liegt, der gemessenen relativen Häufigkeit dieser Klasse entspricht. In unserem Beispiel ist es also extrem unwahrscheinlich, dass wir eine Zeit von 60 s und 61 s messen, aber sehr wahrscheinlich, dass eine erneute Fallzeit ein Ergebnis zwischen 40 s und 41 s liefert. Die Behauptung ist nicht beweisbar. Aber wenn viele Messungen, die jetzt noch zukünftig sind, durchgeführt sind, in die Berechnung der relativen Häufigkeitsverteilung aufgenommen werden, und diese sich nicht ändert, ist die Behauptung zumindest nicht widerlegt. Es ist nachvollziehbar, dass auf Grund dieses Gedankens der Begriff des Fehlers vernünftig definiert werden kann, da die Angabe des Fehlers einer Aussage beinhaltet, dass bei einer erneuten Nachprüfung des dem Sachverhalt zugrunde liegenden Tatbestandes im Rahmen des Fehlers dieselbe Aussage getroffen werden kann.

Die überaus plausible Extrapolation unserer Erfahrung offenbart bemerkenswerte Züge physikalischer Gesetzmäßigkeiten. Zum einen können physikalische Gesetze nicht bewiesen werden. Sie haben Gültigkeit für vergangene Phänomene und können sich in der Zukunft als falsch erweisen. Zum anderen können über zukünftige Phänomene nur Wahrscheinlichkeitsaussagen getroffen werden, was die Formulierung außerordentlich erschwert und einen faden Beigeschmack bei der Verwendung des Begriffs Gesetz hinterlässt. In der klassischen Physik interpretiert man dieses Problem weg, wie wir bei der Interpretation des Fehlers sehen werden. Es zeigt sich jedoch, dass dieses Problem auch durch eine noch so geschickte Argumentation nur kaschiert werden kann.

Mit Hilfe des Wahrscheinlichkeitsbegriffs können wir jetzt einer Definition des zufälligen Fehlers nachspüren. Wenn wir den Wert einer physikalischen Größe mit einem Fehler angeben, dann verstehen wir darunter in idealer Weise, dass der wahre Wert der Messgröße innerhalb des durch diese Angabe definierten Intervalls liegt. Das heißt, dass die Wahrscheinlichkeit bei einer erneuten genaueren Messung, deren Ergebnis wieder durch Mittelwert und Fehler angegeben wird, mit hundertprozentiger Wahrscheinlichkeit innerhalb des Fehlerintervalls der ersten Messung liegt. Aufgrund des Wahrscheinlichkeitscharakters und der Endlichkeit einer Messreihe ist dieses nicht erreichbar.

Mit Hilfe der als Gauß'sch angenommenen Häufigkeitsdichte lässt sich jedoch ein Intervall angeben, innerhalb dessen der wahre Wert mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit von p Prozent liegt. Dazu muss man aber nach der Wahrscheinlichkeit fragen, mit der eine Messreihe eintritt, wenn die Wahrscheinlichkeit einer Einzelmessung Gauß'sch verteilt ist. Diese Wahrscheinlichkeitsverteilung ist die so genannte Student-Verteilung, die aus Überlegungen, denen wir hier nicht nachgehen wollen, aus der Gauß-Verteilung ableitbar ist. Man kann sagen: Bei einer Messung mit n Messwerten, Mittelwert $\bar{x}$ und Standardabweichung σ liegt der wahre Wert μ mit einer p-prozentigen Wahrscheinlichkeit im Vertrauensbereich.

$$\bar{x} - \frac{\tau(p,n) \cdot s}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{x} + \frac{\tau(p,n) \cdot s}{\sqrt{n}} \tag{2.7}$$

Die Funktion $\tau\,(p,\ n)$ ist eine Funktion, die in tabellarischer Form vorliegt und die aus der Student-Verteilung hervorgeht. Dieses Intervall erschließt sich, wenn man nach der Häufigkeitsdichte der Größe $\frac{\bar{x}-\mu}{s/\sqrt{n}}$ fragt, wenn die dieser Größe zugrunde liegenden Messwerte Gauß'sch verteilt sind. Für große n ist die Student-Verteilung selbst wieder eine Gauß-Verteilung, so dass wir uns wenigstens für diese Fälle eine Vorstellung machen können. Die Funktion τ hängt empfindlich von p ab. Für $p = 99$, also die Frage nach der 99%igen Wahrscheinlichkeit, dass der wahre Wert innerhalb des Vertrauensbereichs liegt, ist τ für $n > 2$ kleiner als zehn. Für noch größere p geht τ dann sehr schnell gegen unendlich.

Definieren wir den zufälligen Fehler durch den Vertrauensbereich $p = 99$, so bedeutet der so definierte Fehler, dass die Wahrscheinlichkeit, den wahren Wert im Vertrauensbereich zu finden, 99% beträgt, was im Alltag de facto 100% heißt.

$$\Delta_{zufällig} = \frac{\tau \cdot S}{\sqrt{n}} \tag{2.8}$$

Damit sind wir auch zu einer Definition des Fehlers gekommen und können die Genauigkeit unserer Schätzung angeben. Bei dieser Definition ist nur die Höhe der vorgegebenen Wahrscheinlichkeit p zu beachten, die je nach Industrie- oder Wissenschaftszweig unterschiedlich ausfallen kann.

Wir haben zwei Fehlerarten, den systematischen und den zufälligen, getrennt betrachtet. Wie immer, wenn zwei Größen verschiedene Größenordnungen haben, lassen sich diese Größen leicht getrennt voneinander behandeln. Wenn diese Größen jedoch in derselben Größenordnung sind, ist es schwer zu unterscheiden, von welcher Qualität der Fehler ist. Bei unserem Beispiel haben wir schon vermutet, dass vielleicht ein systematischer Fehler durch Ermüdung des Beobachters vorliegt. Die praktische Bestimmung eines Fehlers ist also gar nicht so einfach, dabei sind vor allem die systematischen Fehler nicht von vorneherein bekannt und nur durch viele Messungen unter variierenden Bedingungen bestimmbar. Aus diesem Grund sollte ein Protokoll auch Informationen erhalten, deren Wert nicht direkt einsehbar ist.

Den Gesamtfehler einer Größe können wir also nur nach besten Wissen und Gewissen definieren. Dies tun wir, indem wir den zufälligen Fehler und den vermuteten systematischen Fehler addieren.

$$\Delta = \Delta_{zufällig} + \Delta_{systematisch} \tag{2.9}$$

Der Fehler einer Größe ist nicht ein Beiwerk, das man notgedrungen angeben muss, weil man sich nicht die Zeit genommen hat, es besser zu machen. Der Fehler ist eine zentrale Größe, die unser Handeln bestimmt. Dazu wollen wir zwei praktische Beispiele geben, die dies verdeutlichen und uns auch eine Interpretation des Zufalls geben.

Das erste Beispiel ist der Weg eines Studierenden zu seiner Vorlesung. Misst er die Zeit, die er morgendlich für den Weg zur Hochschule benötigt, können diese Zeiten gemäß Abb. 2.2. aufgetragen werden und wir erhalten ein ähnliches Bild. Der Mittelwert betrage 20 min und der Vertrauensbereich für $n = 1$ betrage 15 min. Dann bedeutet dies, dass der Studierende, wenn er 25 min vor Vorlesungsbeginn losfährt, mit einer 99%-igen Wahrscheinlichkeit pünktlich ankommt. Fährt er 20 min vor Vorlesungsbeginn los, wird er jedes zweite Mal unpünktlich sein. Da wir höfliche Menschen sind, fährt er also 25 min vor Vorlesungsbeginn los. Kommt er dann wirklich einmal zu spät, ist entweder der sehr unwahrscheinliche Fall eingetreten oder es liegt ein systematischer Fehler vor. Beispielsweise könnte ein ganzer Stadtteil wegen eines Minenfundes gesperrt sein und ihn zu einem großen Umweg zwingen. Eine solche Verspätung wird sicher entschuldigt. Obwohl der Autor vermutlich der einzige ist, der seinen Weg zur Hochschule auf diese Weise analysiert, basiert Pünktlichkeit und Entschuldbarkeit auf demselben Gedankengang, nur wird er meistens intuitiv durchgeführt.

Dieses Beispiel zeigt aber auch, wie der Zufall interpretiert werden kann.[5] In völliger Analogie zur Vorstellung des aus Molekülen bestehenden Öls, entsteht in unserem Beispiel die Schwankung durch andere Verkehrsteilnehmer oder rote Ampeln und dergleichen. Begibt man sich auf diese Beschreibungsebene, so fällt es schwer, von Zufall zu sprechen. Die Ampel wechselt ihre Farbe ja nicht zufällig, sondern wird durch ein Programm gesteuert. Offenbar ist es so, dass sich sehr viele auf einer tieferen Beschreibungsebene determinierte Prozesse auf einer höheren Beschreibungsebene in einer Weise auswirken, die einem zufälligen Prozess entsprechen. In der klassischen Mechanik und der statistischen Physik glaubte man, Schwankungserscheinungen auf solche tiefer liegenden Prozesse zurückführen zu können, dadurch wurden diese Erscheinungen zu Fehlern im wahrsten Sinne des Wortes und der Zufall nur eine Beschreibung für pauschal unberücksichtigte Fehler. Ein wirklicher Zufall wurde sogar als gottlos aufgefasst, da Gott als letztes Steuerelement immer noch vorhanden war. Diese Interpretation des Zufalls, von der in der klassischen statistischen Physik Gebrauch gemacht wird und die heute noch zum Repertoire unseres gesunden Menschenverstandes gehört, erwies sich aber als Vorurteil. Es gibt zufällige Prozesse, die nicht auf tiefer liegende Prozesse, deren Beschreibung durch so genannte verborgene Variablen erfolgt, zurückgeführt werden können. Es liegt in der Natur der Dinge, dass ein solcher Zufall bei der Beschäftigung mit den elementaren Bausteinen der Materie besonders deutlich wird. Solche Prozesse werden mit Hilfe der Quantentheorie beschrieben.

---

[5] Dieses Beispiel ist natürlich auch gewählt, um deutlich zu machen, warum der vortragende Professor unwirsch auf permanente Störungen durch verspätete Hörer reagiert. Als Desinteresse kann er diese Verspätung nicht interpretieren, da das Kommen der Studenten überhaupt sonst unverständlich ist. Ist es die Unfähigkeit, den „Fehler“ intuitiv abzuschätzen? Das wollen wir bei einem Studenten nicht annehmen. Wir interpretieren das Verhalten als bewusste Unhöflichkeit, die nicht entschuldbar ist. Zu einer Persönlichkeit kann man sich nur entwickeln, wenn man versucht, seine Wirkung auf andere zu verstehen.

Ein zweites Beispiel soll aus der Qualitätssicherung eines Fertigungsprozesses entstammen. Gemessen wird z. B. der Durchmesser einer Laufbuchse. Misst man jede Laufbuchse in einer Fertigung, so erhält man wieder eine Häufigkeitsverteilung vom Gauß'schen Typ. Das Messverfahren wird man so auswählen, dass sein Fehler kleiner ist als der Fehler, der dann offensichtlich durch den Fertigungsprozess bestimmt ist. Wird jetzt dreimal hintereinander ein Wert gemessen, der außerhalb des Vertrauensbereichs liegt, so kann entweder der sehr unwahrscheinliche Fall vorliegen, dass diese Tatsache zufällig ist, oder ein systematischer Fehler vorliegen, der natürlich ein sofortiges Einschreiten erfordert. In der Industrie werden Vertrauensbereiche vorgegeben, um den Verantwortlichen Handlungsanweisungen an die Hand zu geben. Darüber hinaus ist plausibel, dass die Kenntnis des Fehlers eines Fertigungsschrittes unabdingbar ist, um mehrere Fertigungsschritte zu verzahnen. Wären die Fehler der einzelnen Fertigungsschritte nicht aufeinander abgestimmt, müssten die Einzelteile individuell angepasst werden. Ein solches Vorgehen ist typisch für ein Handwerk. Eine Fließbandproduktion ist ohne Fehlerbetrachtung überhaupt nicht möglich. Die Leistung Henry Fords besteht nicht darin, das Fließband erfunden zu haben, sondern die Fertigungsschritte eines Automobils so abgestimmt zu haben, dass ein Fließband genutzt werden kann. Die Qualitätssicherung eines Unternehmens beschäftigt sich im Wesentlichen mit solchen Fehlerbetrachtungen. Die damit beauftragten Mitarbeiter haben oft kein hohes Ansehen in der Produktion, aber bei Lichte betrachtet, sind sie es, die das Geld verdienen.

2.3 Ausblick und weiterführende Literatur

Das Kapitel „Die direkte Messung" sollte uns mit dem Wesen von physikalischen Größen vertraut machen. Für die praktische Anwendung sind natürlich noch viele Fragen zu beantworten, die wir hier kurz anreißen werden. Zunächst wollen wir den wichtigen Fall der indirekten Messung besprechen. In der Praxis ist es oft sehr schwierig, physikalische Größen mit Maßverkörperungen zu vergleichen. Dieses Problem umgeht man, indem man ausnutzt, dass oft funktionale Abhängigkeiten zwischen verschiedenen physikalischen Größen existieren, von denen einzelne sehr gut messbar sind.

In unserem Beispiel der fallenden Kugel sind wir gar nicht primär an der Fallzeit T der Kugel in der Flüssigkeit interessiert, sondern an der Viskosität η (Eta) der Flüssigkeit. Im Idealfall, den wir hier nicht genauer beschreiben, gilt: je länger die Fallzeit, desto viskoser ist die Flüssigkeit.

$$\eta \approx \frac{1}{T} \tag{2.10}$$

Es stellt sich die Frage, wie sich der Fehler der Fallzeitmessung auf den Fehler der Bestimmung der Viskosität auswirkt. Dabei gehen wir davon aus, dass der Fehler des funktionalen Zusammenhangs Gl. (2.10) vernachlässigbar klein ist, die Proportionalitätskonstante sehr genau bestimmt ist. Abb. 2.4. stellt einen solchen Zusammenhang zweier Größen x und y graphisch dar. Ist $\overline{T}$ unsere Schätzung auf den wahren Wert der Fallzeit, der Mittelwert un-

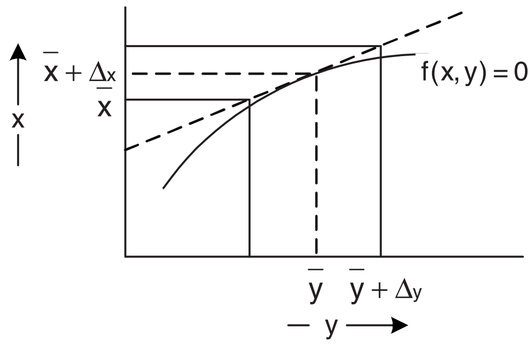

Abb. 2.4. Graphische Darstellung des funktionalen Zusammenhangs der indirekten Messung

serer Messung, dann definieren wir $\bar{\eta} = \eta(\bar{T})$ als Schätzung unserer Messung auf den wahren Wert der Viskosität der Flüssigkeit. Es liegt nahe, den Fehler der indirekten Messung $\Delta\eta$ durch $\Delta\eta = \left|\eta(\bar{T} \pm \Delta T) - \eta(\bar{T})\right|$ zu beschreiben.

Wie man sofort sieht (Abb. 2.4.), führt dies jedoch zu einem unsymmetrischen Fehlerintervall. Konzentrieren wir uns auf den Fall, dass der Fehler klein gegen den Mittelwert ist, so können wir den funktionalen Zusammenhang linearisieren und erhalten für den Zusammenhang zwischen dem Fehler der Fallzeit und dem Fehler der Viskosität:

$$\Delta\eta = \left|\frac{\mathrm{d}\eta}{\mathrm{d}T}_{T=\bar{T}}\right| \cdot \Delta T \tag{2.11}$$

Eine gesonderte Überlegung erfordert der Fall, dass die indirekte Messung durch zwei oder mehrere einfache Messungen erfolgt. In unserem Beispiel hängt die Information der Viskosität der Flüssigkeit auch von unserer Kenntnis der Dichte ρ (Rho) ab. Im wiederum angenommenen Idealfall gilt:

$$\eta \approx \frac{\rho}{T} \tag{2.12}$$

In diesem Fall definieren wir als Schätzwert:

$$\bar{\eta} = \eta(\bar{\rho}, \bar{T}) \tag{2.13}$$

Zur Bestimmung des Fehlers linearisieren wir wieder den gegebenen funktionalen Zusammenhang, was in diesem Fall bedeutet, dass wir die Tangentialebene bestimmen, die wie im Fall der Tangente (Abb. 2.4.) wieder durch die Ableitungen der Funktion $\eta(\rho, T)$ an der Stelle der Schätzwerte bestimmt wird. Bei der Bestimmung der Fehlerfortpflanzung haben wir jedoch mehrere Möglichkeiten. Zwei davon sind in Abb. 2.5. eingezeichnet. Wir können den

„Fehlerraum“ als Quadrat mit den Kantenlängen $\Delta\rho$ und ΔT auffassen, was den größtmöglichen Fehler, den so genannten Größtfehler definiert:

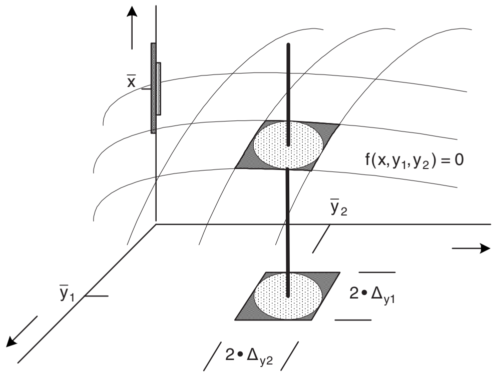

Abb. 2.5. Graphische Darstellung der Zusammenhänge der indirekten Messung bei zwei Eingangsgrößen

$$\Delta\eta = \left|\frac{\mathrm{d}\eta}{\mathrm{d}T}_{\substack{T=\bar{T},\\ \rho=\bar{\rho}}}\right| \cdot \Delta T + \left|\frac{\mathrm{d}\eta}{\mathrm{d}\rho}_{\substack{T=\bar{T},\\ \rho=\bar{\rho}}}\right| \cdot \Delta\rho \tag{2.14}$$

Die Ableitungen sind dabei so zu bilden, dass die jeweils andere Variable als konstant behandelt wird. Ist der Fehler jedoch rein zufälliger Natur, wird ein Fehlerraum, bei dem die Fehler der gemessenen Größen die Halbachsen einer Ellipse bilden, sinnvoller sein, da Messwerte, die in den „Schmutzecken“ liegen, extrem unwahrscheinlich sind. In diesem Fall verwendet man das so genannte Gauß‘sche Fehlerfortpflanzungsgesetz:

$$\Delta\eta = \sqrt{\left|\frac{\mathrm{d}\eta}{\mathrm{d}T}_{\substack{T=\bar{T},\\ \rho=\bar{\rho}}}\right|^2 \cdot \Delta T^2 + \left|\frac{\mathrm{d}\eta}{\mathrm{d}\rho}_{\substack{T=\bar{T},\\ \rho=\bar{\rho}}}\right|^2 \cdot \Delta\rho^2} \tag{2.15}$$

Beide Gesetze sind gebräuchlich. In der Praxis verwendet man eher den Größtfehler, in der Theorie eher das Gauß’sche Fehlerfortpflanzungsgesetz, da es sich mathematisch einfacher handhaben lässt.

Als Letztes wollen wir noch die Bestimmung von funktionalen Zusammenhängen diskutieren. Wollen wir einen Zusammenhang $y = f(x)$ zwischen zwei physikalischen x und y feststellen, so müssen wir die betrachtete Anordnung in verschiedene Zustände bringen und jedes Mal x und y messen. Das Ergebnis einer solchen Vielzahl von Messungen ist in Abb. 2.6. dargestellt.

Sind die Messwertpaare $(\bar{x} \pm \Delta x, \bar{y} \pm \Delta y)$ nach der Messung nicht homogen über die Abbildung verteilt, so vermuten wir einen funktionalen Zusammenhang. Ohne jegliche mathematische Kenntnisse könnten wir diesen Zusammenhang qualitativ in die Abbildung einzeichnen.

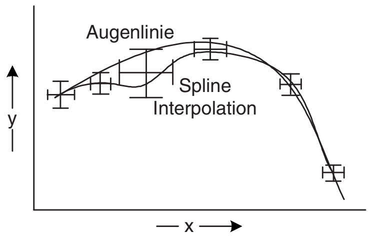

Abb. 2.6. *Ausgleichskurven*

Diese Linie muss natürlich immer innerhalb der Fehlerbalken verlaufen. Eine Linie, die von Anfängern überraschenderweise oft gewählt wird, ist die Linie, die alle Messpunkte miteinander verbindet. Durch die Möglichkeiten der Datenverarbeitung ist es auch möglich, diese Linie dahingehend zu modifizieren, dass sie knickfrei ist (Spline-Interpolation). Beide Möglichkeiten sind aber nicht besonders tragfähig, da es doch ein sehr großer Zufall wäre, wenn bei Hinzufügung eines Messwertpaares, dieses genau auf der Linie läge. Hätte man diese Möglichkeiten nicht, würde man eher eine Linie wählen, die möglichst einfach ist und von der man erwartet, dass sie bei Hinzufügen eines weiteren Messwertpaares nicht geändert werden muss. Diese Linie nennt man Augenlinie, da das Auge eine solche Linie quasi automatisch auswählt.

Dieses intuitive Verfahren wird aus Gründen der Standardisierung formalisiert. Man wählt einen Funktionentyp, der das Verhalten der Messpunkte (z. B. ein Maximum zu besitzen) enthält. Ein solcher Funktionentyp wird durch Koeffizienten parametrisiert (bei der Anpassung der Gauß-Funktion nutzten wir die beiden Parameter μ und σ). Diese Koeffizienten werden jetzt so lange variiert, bis die Summe der Abstände der Messpunkte von dieser Funktion möglichst klein (minimal) ist. Dieses Verfahren nennt man lineare Regression. Dieses hier grob skizzierte Verfahren überführt unser intuitives Handeln in einen verbindlichen nachvollziehbaren Algorithmus. Die derart ausgewählte Funktion wird erst dann unbrauchbar, wenn wir durch einen Wechsel des Messverfahrens die Fehler der Messwerte verkleinern können, so dass die ausgewählte Funktion durch keine Wahl der Koeffizienten die oben gestellten Bedingungen erfüllen kann. Umgekehrt erwartet man, dass bei einem idealen Messverfahren ($\Delta \to 0$) die wahre Funktion ermittelt wird. Mit diesem Verfahren sollte man sich insbesondere dann auseinandersetzen, wenn man aus den Messwerten die Ableitung der gesuchten Funktion bestimmen will.

Wir wollen mit diesem kleinen Exkurs über das Wesen physikalischer Größen enden. Wie immer, wenn wir einen vernünftigen Satz bilden wollen, müssen wir uns über die Bedeutung der Worte, die wir verwenden, Klarheit verschaffen. Was in unserer Sprache der Duden, ist in der Physik die Messvorschrift – dokumentiert im „Kohlrausch“. Vor jeder neuen Messaufgabe empfiehlt es sich, in diesem Buch oder in den entsprechenden DIN-Normen nachzuschlagen. Mit den gewonnen Einsichten wenden wir uns jetzt der Grammatik unserer neuen Sprache zu.

3 Der Aufbau der Physik

3.1 Einführung zum Aufbau der Physik

Die Darstellung des Gedankengebäudes der Physik unabhängig von speziellen Phänomenen ist zwangsläufig eine sehr abstrakte Aufgabe, weswegen wir uns dem Problem zunächst in einer groben Form annähern und die dazu notwendigen Begriffe vorstellen. Dabei werden wir auch das „Eimermodell“ einführen, das uns beim Verständnis dieses Gedankengebäudes und des Aufbaus dieses Buches sehr hilfreich sein wird. Den Abschluss der Einführung bilden Beispiele aus dem nicht unbedingt physikalischen Alltag, die uns verdeutlichen, dass dieses Gedankengebäude nicht zu den Geheimnissen der Physik zählt, sondern, ohne dass wir uns dem meist bewusst sind, unseren Alltag bewältigen hilft. In der Physik tritt diese Art zu denken lediglich in einer kristallenen Klarheit hervor, weshalb die Physik auch einen Vorbildcharakter für alle Wissenschaften hat. In den Kapiteln Kinematik und Dynamik werden wir dann den Aufbau der Physik genauer beschreiben. Philosophisch interessant sind natürlich die Phänomene, die sich heute nicht in diesen Aufbau pressen lassen. Zu diesen Phänomenen zählt ganz allgemein das „Leben“ mit den dazugehörigen Phänomenen „Bewusstsein, Liebe etc.“, deren Beschreibung von der Physik und der Wissenschaft i. A. heute nicht geleistet werden kann. Die Ursache dafür liegt in einigen Voraussetzungen, die wir an die Beschreibung von Phänomenen machen müssen und die nur in der unbelebten Natur hinreichend gut erfüllt sind.

3.1.1 Voraussetzungen an physikalisch zu nennende Phänomene

Zur Beschreibung von Phänomenen hat die Physik einen Begriffsapparat entwickelt, den wir hier vorstellen. Dazu setzen wir die Zerlegung der Welt voraus. Wir gehen davon aus, dass die Welt in eine Anordnung, Beobachter dieser Anordnung, Normale und den Rest der Welt zerlegbar ist. Ein Phänomen ist dadurch definiert, dass die Anordnung in irgendeiner Weise einer Änderung unterliegt, sie durchläuft einen Prozess. Die Voraussetzung der Zerlegbarkeit impliziert, dass dieser Prozess faktisch unabhängig von dem Rest der Welt existiert. Koppeln wir den Beobachter mit seinen Normalen an diese Anordnung an, so kann durch den Vergleich mit den Normalen dieser Prozess durch physikalische Größen beschrieben werden.