

1 Grundsätzliche Betrachtungen

In der Physik wird viel mit Formeln gearbeitet. Sie verknüpfen »physikalische Größen« und charakterisieren das Verhalten der Natur. Für explizite Aussagen ist es wichtig, die Bedeutung von Maßeinheiten zu verstehen, mit deren Hilfe man auch die Richtigkeit von Umrechnungen prüfen kann. Schließlich stellt sich bei einem physikalischen Problem, d. h. auch bei Bränden, der Schadstoff- und Rauchausbreitung, dem Wärmetransport und Ähnlichem, immer die Frage: Soll man das Verhalten berechnen oder sind Messungen am Realobjekt oder in einem speziell aufbereiteten Versuch aussagekräftiger?

1.1 Physikalische Größen und Einheiten

Die Physik befasst sich im engeren Sinne mit Erscheinungen, den sogenannten Phänomenen, in der unbelebten Natur. Sie beschreibt Sachverhalte durch Definition von häufig idealisierten Objekten und ihre Wechselwirkung in Raum und Zeit bzw. untereinander. Sie wird dabei auch als eine exakte Naturwissenschaft bezeichnet. Diese »Exaktheit« beginnt bereits bei der Beschreibung der Naturgesetze, wofür sich eine spezielle Art »Sprache« herausgebildet hat. In der Physik werden Begriffe der Umgangssprache (z. B. Kraft, Wärme usw.) benutzt, diese aber genau definiert. Vom Grundsatz her erfolgt dies stets über einen (häufig abstrakten) Messprozess bzw. über mathematische Operationen mit solchen Messgrößen.

Die »Buchstaben der physikalischen Sprache« sind derartige »physikalische Größen«, für die bei expliziten Aussagen das Produkt eines Zahlenwertes mit einer Maßeinheit einzusetzen ist. (Hinweis: Der Multiplikationspunkt wird hierbei niemals mitgeschrieben, z. B. 12 m , 17 m/s , $1,4 \cdot 10^{-3}\text{ g}$). Die Bildung von Worten und Sätzen erfolgt jetzt durch Formulierung von Formeln unter Anwendung der Gesetze der Mathematik. Eine physikalische Größe hat in einer gegebenen Situation einen ganz konkreten Wert. Zahlenwert und Maßeinheit bedingen einander. Wählt man eine andere, für diese Größe ebenfalls erlaubte Einheit (beispielsweise anstelle des Gramms das Kilogramm), so muss der Zahlenwert entsprechend umgerechnet werden.

Physikalische Formeln sind in der Regel »Größengleichungen«, d. h. alle Symbole S sind physikalische Größen der folgenden Struktur:

$$Symbol = \text{Zahlenwert mal Maßeinheit}$$

bzw. als Formel

$$S = \{S\}[S]. \quad (1.1)$$

Die Klammern kennzeichnen die Elemente »Zahlenwert« und »Maßeinheit« der Größen. Man beachte, dass die eckige Klammer in der Physik die Maßeinheit einer Größe beschreibt. Es ist deshalb nicht korrekt, die Maßeinheit selbst in Klammern zu setzen, was gelegentlich in grafischen Darstellungen zu finden ist.

Solche Größengleichungen sind unabhängig von der Wahl einer konkreten Maßeinheit, dies macht gerade den Wert dieser Art von Gleichungen aus. In der Praxis heißt das, dass in die Formel stets das Produkt aus Zahlenwert und Maßeinheit einzusetzen ist. Die Zahlenwerte und die Maßeinheiten sind dann getrennt zusammenzufassen.

An dieser Stelle sei ein Tipp für den Praktiker gegeben. Wenn man Formeln umstellt, besonders bei komplizierten Berechnungen, wo mehrere Gleichungen ineinander eingesetzt werden, ist man häufig unsicher, ob das Ergebnis wirklich fehlerfrei ist. Eine einfache Kontrollmöglichkeit besteht in der Zusammenfassung der Maßeinheiten auf der rechten Seite der Gleichung. Dies muss ein Ergebnis liefern, das sich auch auf der linken Seite ergibt. Dieses einfache Vorgehen ist als Dimensionskontrolle bekannt.

Neben den Größengleichungen kennt man auch noch die Zahlenwertgleichungen, die früher in den Ingenieurwissenschaften weit verbreitet waren. Äußeres Zeichen sind Zahlenfaktoren in solchen Beziehungen. Zahlenwertgleichungen sind Beziehungen zwischen den Zahlenwerten von Größen. Damit dieses Vorgehen eindeutig wird, muss jeweils gesondert festgelegt sein, in welchen Einheiten die einzelnen Größen zu verwenden sind. Der Vorteil für den Ingenieur liegt auf der Hand, wenn mit Arbeitsformeln immer wiederkehrende Berechnungen anzustellen sind. Der Nachteil ist der Verlust an Allgemeingültigkeit, so dass Formelumstellungen kompliziert werden können. (Hinweis: In den modernen Wissenschaften werden heutzutage fast ausschließlich Größengleichungen verwendet!)

Über die Definition der physikalischen Grundgrößen lassen sich unterschiedliche Einheitensysteme aufbauen. Durchgesetzt hat sich das Internationale Einheitensystem (SI), das 1960 von der 11. Generalkonferenz für Maß und Gewicht (CGPM) geschaffen wurde. Die einheitliche Kurzbezeichnung SI gilt in allen Sprachen und ist

1.1 Physikalische Größen und Einheiten

aus dem Französischen »Le Système International d'Unités« abgeleitet (Stroppe 2012). Es besitzt sieben Basiseinheiten, aus denen sich die weiteren »abgeleiteten Einheiten« berechnen lassen (vgl. ► Tabelle 1).

Tabelle 1: SI-Basiseinheiten

Größe	Name	Zeichen
Länge	Meter	<i>m</i>
Masse	Kilogramm	<i>kg</i>
Zeit	Sekunde	<i>s</i>
elektrische Stromstärke	Ampere	<i>A</i>
Temperatur	Kelvin	<i>K</i>
Stoffmenge	Mol	<i>mol</i>
Lichtstärke	Candela	<i>cd</i>

Für die Temperatur darf auch weiterhin Grad Celsius (°C) benutzt werden, da es eine feste Umrechnungsregel gibt:

$$\frac{T_{\text{Cels}}}{^{\circ}\text{C}} = \frac{T}{\text{K}} - 273,15. \quad (1.2)$$

INFO

Hinweis:

Eine derartige Gleichung wird als »zugeschnittene Größengleichung« bezeichnet, was jedoch im Rahmen dieses Buches ohne Belang ist und hier ohnehin nur bei der Temperaturumrechnung auftritt.

Aus den Basiseinheiten lassen sich abgeleitete SI-Einheiten bilden. Diese tragen zum Teil eigene Namen, wenn ihre Bedeutung herausragend in Physik und Technik ist. Einige wenige Beispiele sind in ► Tabelle 2 zusammengestellt. Daneben werden aus historischen Gründen auch weitere Einheiten verwendet, die jedoch nur in einem begrenzten Gebiet Bedeutung haben. Schließlich sei auch darauf hingewiesen, dass in den angelsächsischen Ländern auch andere Maßeinheiten gebräuchlich sind, die sich jedoch eindeutig in SI-Einheiten umrechnen lassen.

Als letzte Bemerkung sei darauf verwiesen, dass SI-Einheiten auch mit Vorsätzen benutzt werden dürfen (vgl. ► Tabelle 3). Dadurch werden sehr große oder sehr kleine Zahlenwerte vermieden. Die Vorsätze werden unmittelbar ohne Zwischenraum vor die Maßeinheit gesetzt und damit wie eine neue Einheit behandelt. Als Beispiel seien hier das Megawatt (*MW*) und das Mikrometer (μm) genannt. Beim Einsetzen in Größengleichungen lassen sich die Vorsätze auch wieder in Zehnerpotenzen auflösen. Für extrem große Werte wurden aufsteigend die Vorsätze Tera, Peta, Exa, Zetta und Yotta sowie für extrem kleine absteigend Piko, Femto, Atto, Zepto und Yocto festgelegt, wobei die Unterschiede jeweils Eintausend betragen. (Hinweis: Die extrem großen und die extrem kleinen Vorsätze haben bei den Problemen im Rahmen dieses Buches keine Bedeutung, sie sind nur der Vollständigkeit halber erwähnt.)

Tabelle 2: Abgeleitete SI-Einheiten mit eigenem Namen (Auswahl)

Größe	Maßeinheit		Umrechnung	
	Name	Symbol	übliche SI-Einheiten	SI-Basis-einheiten
Frequenz	Hertz	<i>Hz</i>		s^{-1}
Kraft	Newton	<i>N</i>		$kg \cdot m \cdot s^{-2}$
Druck, Spannung	Pascal	<i>Pa</i>	N/m^2	$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$
Energie, Arbeit, Wärmemenge	Joule	<i>J</i>	$N \cdot m$	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$
Leistung, Energiestrom	Watt	<i>W</i>	J/s	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-3}$
elektrische Spannung	Volt	<i>V</i>	W/A	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$

Tabelle 3: SI-Vorsätze

Vergrößerung			Verkleinerung		
Faktor	Vorsatz		Faktor	Vorsatz	
	Name	Symbol		Name	Symbol
10^9	Giga	G	10^{-1}	Dezi	d
10^6	Mega	M	10^{-2}	Zenti	c
10^3	Kilo	k	10^{-3}	Milli	m
10^2	Hekto	h	10^{-6}	Mikro	μ
10	Deka	da	10^{-9}	Nano	n

1.2 Messen oder Rechnen

In der Physik kennt man zwei grundsätzlich verschiedene Arbeitsmethoden, um zu Erkenntnissen über einen Sachverhalt oder ein Phänomen zu gelangen, die in der Forschung eigentlich stets eng verzahnt sein sollten. In der Praxis wird man sich meist unter Berücksichtigung von Aufwand und Nutzen entscheiden, wie man am besten zu ausreichenden Aussagen gelangt und welche Methode dafür am geeignetsten ist.

Bei der experimentellen Methode werden im Detail möglichst exakt festgelegte Versuchsanordnungen für reproduzierbare Messungen aufgebaut, die die Betrachtung eines Sachverhaltes ermöglichen. Das Verhalten wird durch geeignete Instrumente in den Versuchen erfasst und quantitativ, d. h. zahlenmäßig, gemessen, wobei Trends durch genau definierte variierende äußere Bedingungen in die Betrachtung einbezogen werden können. Wichtig ist es dabei, Fehlerquellen möglichst zu beseitigen bzw. zumindest deren Einfluss auf die Ergebnisse zu analysieren (Fehlerbetrachtung, vgl. auch ► Kapitel 2.3). Häufig werden die Ergebnisse grafisch oder mathematisch als Funktionsverläufe zusammengefasst.

Bei der theoretischen Methode stellt man Grundbeziehungen für den zu untersuchenden Sachverhalt auf bzw. wählt diese aus dem Wissensschatz der Physik für das konkrete Problem aus. Diese Gleichungen sind meist sehr kompliziert aufgebaut. Anschließend löst man diese Gleichungen, bis das gewünschte Resultat als Formel oder Zahlenergebnis (z. B. als grafischer Zusammenhang) vorliegt. Dazu werden immer häufiger Computer herangezogen, die eine anschauliche Lösung mit sogenannten »Codes« unter Verwendung numerischer Lösungsverfahren auch in komplizierten Fällen ermöglichen. Dass diese Lösung stets nur näherungsweise

erfolgt, ist nicht von Belang, da die Genauigkeit prinzipiell beliebig erhöht werden kann. Solche Berechnungen werden auch als Computersimulationen bezeichnet. Die Ergebnisse sollten im Normalfall einer anschließenden experimentellen Überprüfung unterzogen werden, was natürlich nur partiell möglich sein wird. Ansonsten könnte man sich ja gleich für das Experiment entscheiden.

Beide Methoden ergänzen sich in ihren Aussagen. Allerdings sind die erforderlichen Fertigkeiten und die notwendigen Instrumente und Geräte sehr unterschiedlich. Gelegentlich wird deshalb, abhängig von den bestehenden Voraussetzungen, die eine oder die andere Seite stärker betont. Dabei wird als Argument für die benutzte Methode gern die Aussagekraft der Ergebnisse herangezogen. Dies ist jedoch problematisch, denn häufig wird dabei die Notwendigkeit einer gründlichen Analyse einfach ignoriert. Aus diesem Grund soll das Problem hier aus der Sicht der Feuerwehrpraxis etwas ausführlicher erläutert werden.

Jede Untersuchung eines Sachverhaltes liefert niemals das vollständig exakte Verhalten. Vielmehr handelt es sich stets um ein Abbild der Wirklichkeit, das mehr oder minder gut ist. Mit einer wissenschaftlichen Untersuchung ist man zufrieden, wenn die erreichte Genauigkeit genügt, um eine ausreichend sichere Bewertung vornehmen zu können. Der Praktiker ist jetzt vielleicht enttäuscht über die Leistungsfähigkeit der Wissenschaft, aber dies ist nun einmal Ausdruck des Modellcharakters in der Erkenntnis. Es ist einfach eine Frage der Ehrlichkeit darauf zu verweisen, dass es eine absolute Wahrheit auch in der Wissenschaft nicht gibt.

Alle Untersuchungen, und dies gilt natürlich auch für die Physik, sind durch Abweichungen von der Realität gekennzeichnet. Diese werden häufig auch als Fehler bezeichnet. Wenn man hier von Fehlern spricht, sind damit nicht Mängel gemeint, die durch unsachgemäßes Vorgehen hervorgerufen werden (z. B. defektes oder falsch benutztes Messgerät, Ablese- oder Übertragungsfehler von Daten u. ä.). Die hier betrachteten Fehler sind die Abweichungen bei den Untersuchungen von der realen Welt, sie sind damit prinzipieller Natur. Diese Überlegungen zur Genauigkeit sind typisch für das physikalische Denken, gelten darüber hinaus natürlich für alle Wissenschaften. Es wird dabei stets vorausgesetzt, dass wissenschaftlich solide gearbeitet wird und Mängel als Folge von Nachlässigkeiten oder gar Unvermögen vermieden werden. Welches sind nun die prinzipiellen Überlegungen im Hinblick auf Fehler bei den beiden Grundmethoden in der Physik?

Die experimentelle Methode ist unter Praktikern sehr beliebt und historisch in der Physik seit mehreren Jahrhunderten bewährt. Persönlichkeiten wie Newton und von Guericke haben diese Methode ausgearbeitet. So ist man heute häufig geneigt, gemessenen Ergebnissen am ehesten zu glauben. Hier sind aber durchaus kritische

Fragen zu formulieren, mit denen auch der Praktiker Messergebnisse hinterfragen sollte. Einige wichtige Überlegungen sind:

- Entspricht die Messung im Hinblick auf Reproduzierbarkeit und statistischer Absicherung wissenschaftlichen Anforderungen?
- Sind alle entscheidenden Randbedingungen bekannt und können diese beim Versuch konstant gehalten werden?
- Wie ist die Genauigkeit der eingesetzten Messgeräte zu bewerten und wie ist die Kalibrierung erfolgt?
- Läuft der zu untersuchende Vorgang bei einer Veränderung der Abmessungen (meist: Reduzierung) wirklich wie im Original ab, d. h. sind die erhaltenen Ergebnisse übertragbar?
- Wie sind die (unvermeidbaren) Messfehler zu bewerten?

(Hinweis: Es muss hier auf die detaillierte Erläuterung der Fachbegriffe zunächst verzichtet werden. Einige Probleme werden im weiteren Verlauf nochmals aufgegriffen und vertieft, vgl. ► Kapitel 2.3, 2.4 und 3).

Messungen sind also durchaus nicht immer ein problemloses Mittel zur Aufklärung von Sachverhalten. Dazu kommt, dass Versuche meist teuer sind. Will man nicht nur einen Einzelwert, so muss man die einzelnen Parameter variieren, was zu einer Vervielfachung der Versuchsanzahl führt. Die Parametervielfalt treibt also den Aufwand (Zeit, Kosten) in die Höhe. Es ist daher stets zu prüfen, wie umfassend man Aussagen benötigt und wie viele Versuche dafür notwendig sind.

Die theoretische Methode war zunächst mehr für die Wissenschaft selbst von Bedeutung, weil damit das Gerüst der Erkenntnisse konstruiert werden konnte. Die Fülle der Einzelergebnisse konnte darüber in einen logischen Zusammenhang gebracht werden. Mit mathematischen Algorithmen baut man ein Gedankengebäude auf, so dass auf der Grundlage weniger Gleichungen eine größere Gruppe von Phänomenen erfasst werden kann. Allerdings hatten früher solche Berechnungen aus Gründen der Lösbarkeit der Gleichungen häufig wenig mit wirklich praktischen Fragestellungen zu tun. Erst in den letzten Jahrzehnten wurde es durch die rasante technologische Entwicklung bei den Computern und durch die Erstellung von ganzen Programmpaketen, den Codes, möglich, stärker mit numerischen Lösungsmethoden zu arbeiten und so auch praktische Fragestellungen ausreichend umfassend zu berechnen. So gehören die komplexen Phänomene turbulenter Strömungen beim Brand, die Rauch- und Schadstoffausbreitung oder das reaktionskinetische Verhalten beim Brennen und Löschen bereits gegenwärtig zu den aus praktischer Sicht hinreichend behandelbaren Problemen. Es ist folglich nicht verwunderlich, dass diese Methoden im Brandschutz gegenwärtig eine rasante Verbreitung finden.

Der große Vorteil besteht darin, dass mit vergleichsweise geringem Aufwand ein breites Spektrum von Parametereinflüssen untersucht werden kann. Dabei können selbst solche Situationen betrachtet werden, die in der Realität noch gar nicht vorliegen. Es darf aber der »vergleichsweise geringe Aufwand« nicht missverstanden werden. Der Aufwand ist, insbesondere im Vorfeld bis zur Erlangung der erforderlichen Erfahrungen, hoch. Rechenzeiten von Tagen oder Wochen für ein tatsächliches »Minutenereignis« sind durchaus normal! Gering ist aber der Aufwand im Vergleich zum Experiment, wenn man vergleichbar komplexe Aussagen erhalten will.

Es kommt nun das große »Aber«, denn auch hier existieren Probleme, die nur zu gern übersehen werden. In der Welt der technikgläubigen Computerfreaks erfreut man sich häufig zu schnell an farbig gedruckten bunten Bildern. Dabei kann der Computer doch nur rechnerisch umsetzen, womit er vorher gefüttert wurde. Es bleibt also zu überprüfen, ob die getroffenen Annahmen und die zum Teil schwer beschaffbaren Eingangsdaten vernünftig sind und ob der mathematische Lösungsalgorithmus auch tatsächlich ein ausreichend genaues Ergebnis liefert. Dies ist natürlich sicher jedem einleuchtend, in der Praxis sind solche Überprüfungen aber sehr schwierig (vgl. ► Kapitel 2.1).

1.3 Materialparameter und Konstanten

Die Gleichungen in der Physik enthalten neben den Variablen, die den Zustand eines Systems charakterisieren, stets auch konstante Parameter. Diese lassen sich prinzipiell in zwei Gruppen einteilen:

- Naturkonstanten,
- Materialparameter.

Die Naturkonstanten tragen universellen Charakter. Beispiele dafür sind die Gravitationskonstante, die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum, die Gaskonstante und andere. Sie hängen mit den Grundannahmen der einzelnen physikalischen Theorien zusammen. In der Grundlagenforschung geht es um die äußerst präzise Bestimmung dieser Werte, da Widersprüche auf notwendige Veränderungen in den Grundvorstellungen hindeuten.

Demgegenüber sind Materialparameter Konstanten von praktischer Bedeutung. Sie charakterisieren die stofflichen Eigenschaften der Materie und unterscheiden sich von Substanz zu Substanz. Solche Größen mit Bedeutung für den Brandschutz sind beispielsweise die Wärmeleitfähigkeit, die Diffusionskoeffizienten, die Abbrandgeschwindigkeit, Verbrennungswärme und vieles andere. Die Physik hält ein breites

Spektrum von Messmethoden bereit, um solche Werte zu bestimmen und damit die verschiedenen Substanzen vergleichend charakterisieren zu können. Zugleich werden sie aber benötigt, um über Formeln jeglicher Art Berechnungen oder Abschätzungen durchführen zu können. Viele Werte findet man in Tabellenbüchern (Kohlrausch 2005). Sie sind also bereits in früheren Messungen genau untersucht worden. Häufig sind die Substanzen jedoch derart, dass ein Wert beispielsweise die Wärmeleitfähigkeit sehr stark von verschiedenen physikalischen Eigenschaften (Porosität, Dichte, Verunreinigungen u. a.) abhängt. In der Regel ist es deshalb günstig, den genauen Wert in einer vorliegenden Situation selbst zu bestimmen.

Schließlich sei darauf hingewiesen, dass die Bezeichnung »Konstante« für die Materialparameter etwas irreführend ist. Sie sind nämlich im eigentlichen Wortsinn nicht konstant. Viele dieser Größen hängen beispielsweise von der Temperatur oder dem Druck ab. Nahezu konstant sind sie aber meist, wenn man sie in einem relativ engen Intervall der Einflussfaktoren betrachtet. So ändern sich die Werte häufig kaum, wenn man die Temperaturen um 100 °C oder 200 °C verändert. Betrachtet man jedoch den Übergang zu mehr als 1 000 °C, so ist eine Änderung der Parameterwerte möglicherweise spürbar. Es ist also unter bestimmten Voraussetzungen durchaus angemessen, von Konstanten zu sprechen, man sollte jedoch entsprechende Vorsicht walten lassen.

1.4 Physik und andere Wissenschaften

Wie ordnet sich die Physik in den Brandschutz ein? Das Feuerwehrwesen sowie der Brandschutz im Allgemeinen sind primär ingenieurwissenschaftlich-technisch geprägt. Für solche Disziplinen wird heute gern der aus dem Englischen stammende Begriff des Engineering benutzt. Jedoch gibt es hierbei eine Reihe rein physikalischer Fragestellungen, die besonders auch das Grundverständnis zahlreicher Probleme betreffen. Andererseits haben Feuer und Flamme auch eine starke chemische Komponente, denn schließlich handelt es sich dabei ja um exotherme chemische Reaktionen. Aber sich auf diesen Aspekt allein zu beschränken, wäre viel zu einseitig (vgl. ► Kapitel 4). Es ist folglich für solche Fragestellungen eine interdisziplinäre Betrachtungsweise erforderlich.

Darüber hinaus spielt die Physik schon eine besondere Rolle, die sich auch im Brandschutz und Feuerwehrwesen zeigt. Physikalische Methoden und die charakteristische Denkweise sind sehr alt und erfolgreich erprobt. Sie wurden quasi bei den Untersuchungen der Naturerscheinungen mit entwickelt. Vieles ist deshalb in andere Fachdisziplinen eingeflossen. Es sei als Beispiel nur das Verhältnis zur Mathematik

genannt. Die Physik ist aber auch eine Grundlagenwissenschaft. Hier werden die grundsätzlichen Verhaltensweisen in der unbelebten Natur untersucht. Geht es stark ins Detail, so verselbständigen sich die Gebiete. Es entstanden auf diese Art und Weise verschiedene eigenständige Ingenieurwissenschaften, wie die Elektrotechnik, die Technische Wärmelehre u. a.

Physikalische Kenntnisse erleichtern das Verständnis vieler technischer Probleme, was insbesondere auch für das Feuerwehrwesen und den Brandschutz gilt. So ist auch hilfreich, die physikalischen Grundlagen für zahlreiche Messmethoden zu kennen, wie sie bei chemischen Fragestellungen eingesetzt werden. Schließlich erschließen sich über die physikalische Chemie viele Grundlagen des Brennens und Löschens, so dass Physik und Chemie Hand in Hand arbeiten sollten. Dabei gilt es, die Spezifik jeder Fachdisziplin einzubringen.