Sonderdruck aus „Chemie-Ingenieur-Technik", 31. Jahrg. 1959, Seite 268-271

Neuere Entwicklungen auf dem Gebiet der Maßsysteme

Von Dr.-Ing. U. GRIGULL, Farbenfabriken Bayer AG., Leverkusen

Die Beschlüsse der 10. Generalkonferenz für Maß und Gewicht (1954) haben auch den Verein Deutscher Ingenieure (VDI) veranlaßt, sich erneut mit Fragen der Maßsysteme und ihrer Handhabung im deutschen technischen Schrifttum zu befassen. Der Wissenschaftliche Beirat des VDI veröffentlichte kürzlich Empfehlungen, deren Folgerungen hier zusammen mit grundlegenden Betrachtungen behandelt werden.

Vorgeschichte

Die 10. Generalkonferenz für Maß und Gewicht, die oberste Autorität der Meterkonvention von 1875, hat erstmalig ein internationales praktisches Einheitensystem vorgeschlagen [1], das folgende 6 Grundeinheiten besitzt:

für die Länge	das Meter [m]
für die Masse	das Kilogramm [kg]
für die Zeit	die Sekunde [s][1])
für die elektrische Stromstärke	das Ampère [A]
für die thermodynamische Temperatur	den Grad Kelvin [°K]
für die Lichtstärke	die Candela [cd].

Obwohl die Generalkonferenz nur Empfehlungen geben kann, entspricht es doch dem Sinn der Meterkonvention, daß ihre Mitgliedstaaten diese Empfehlungen zur Grundlage der nationalen Einheitengesetze machen. Ein entsprechendes deutsches Einheitengesetz wird vorbereitet[2]).

Auch andere internationale Fachorganisationen verwenden inzwischen das Einheitensystem der Generalkonferenz, das im folgenden als „Internationales Einheitensystem" bezeichnet werden soll. Abkürzend spricht man auch vom MKS-System oder vom MKSA-System.

Bei dieser Sachlage hielt es auch der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) für angebracht, den bisherigen Einheitengebrauch im deutschen technischen Schrifttum zu überprüfen, um ihn gegebenenfalls der oben skizzierten Entwicklung anzupassen. Da die Ingenieurwissenschaften heute mehr Berührungspunkte mit anderen Disziplinen besitzen als früher, war insbesondere die Frage zu diskutieren, ob das sogenannte technische Einheitensystem eine gute gegenseitige Verständigung erschwert. Der Wissenschaftliche Beirat des VDI nahm nach längeren Verhandlungen schließlich Empfehlungen an, die eine hierzu eingesetzte Kommission ausgearbeitet hatte. Diese Empfehlungen sind kürzlich zusammen mit einem Kommentar von *Flegler* [2] veröffentlicht worden.

Parallel zu dieser Entwicklung, die vorwiegend die Einheiten und ihre Definition betrifft, ist in neuerer Zeit auch der Ausbau der Größenlehre zu bemerken [3 bis 6]. Die Auffassung der Formelzeichen als physikalische Größen und die Benutzung von Größengleichungen gibt die Möglichkeit, Naturgesetze unabhängig von irgendwelchen Einheiten und Einheitensystemen darzustellen und kann daher vorzüglich dazu dienen, die Formelsprache der Ingenieure, Physiker, Chemiker und Physikochemiker zu vereinheitlichen. Die VDI-Empfehlungen enthalten daher auch Bemerkungen über die Definition der Größen.

Im folgenden sollen einige praktische Konsequenzen behandelt werden, wie sie sich aus der Anwendung der VDI-Empfehlungen ergeben. Hinsichtlich des Wortlauts der Empfehlungen sei auf die Originalveröffentlichung [2] verwiesen. Vorausgeschickt seien allgemeine Bemerkungen über den Nutzen von Größengleichungen und über die Umrechnung von Einheiten.

Größen und Größengleichungen

Die Eigenschaften einer physikalischen Größe, auch kurz Größe genannt, wollen wir uns an folgendem Beispiel klarmachen:

Ein Auto soll für eine Strecke $s = 200$ km die Zeit $t = 4$ h benötigen. Die mittlere Geschwindigkeit v, definiert durch den Quotienten

$$v = \frac{s}{t} \tag{1}$$

beträgt dann

$$v = \frac{200\ \mathrm{km}}{4\ \mathrm{h}} = 50\,\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}} = 13{,}9\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{sec}} = 27{,}0\,\frac{\mathrm{sm}}{\mathrm{h}} = 31{,}1\,\frac{\mathrm{miles}}{\mathrm{hour}} = \ldots \tag{2}$$

Die linke Seite dieser Gleichung, das Symbol v, bedeutet eine Größe, die durch die rechts stehenden Ausdrücke in verschiedener Weise in Zahlenwerte und Einheiten „aufgespalten" ist. Diese Ausdrücke lassen sich als Produkte auffassen. Eine Größe kann also in der Form

Größe = Zahlenwert × Einheit

dargestellt werden. Statt „Zahlenwert" wird häufig auch „Maßzahl" verwendet.

Offenbar fährt unser Auto nicht schneller oder langsamer, wenn wir seine Geschwindigkeit statt in km/h in m/s oder in irgendeiner anderen Einheit angeben. Wir können einen solchen Einheitenwechsel als einen Skalenwechsel am Tachometer deuten, wobei die (gleichbleibende) Geschwindigkeit der (gleichbleibenden) Stellung des Zeigers entspricht. Daraus ergibt sich als wichtige Eigenschaft einer Größe, daß ihr „Wert" unabhängig von der Einheit ist, obwohl der Zahlenwert (die Maßzahl) natürlich von der gewählten Einheit abhängt.

Eine Gleichung zwischen Größen ist eine Größengleichung, und zwar insbesondere eine allgemeine Größengleichung, wenn sie außer den Größen nur solche Zahlenwerte enthält, die durch mathematische Operationen, z. B. Integrationen, entstanden sind. Die allgemeine Größengleichung gilt völlig unabhängig von der Wahl irgendwelcher Einheiten und ist unempfindlich (invariant) gegen deren Wechsel. Sie gibt ein Naturgesetz in seiner reinsten Form ohne das störende Beiwerk von Umrechnungszahlen wieder und verpflichtet auch nicht zur Benutzung kohärenter Einheiten, wie es später noch gezeigt werden soll.

Die allgemeine Größengleichung ist also dort am Platze, wo ein Naturgesetz unmißverständlich und ohne Einschränkung mitgeteilt werden soll, also z. B. in wissenschaftlichen Abhandlungen oder in Lehrbüchern. Außerdem gibt die Benutzung des Größenbegriffs die Sicherheit, auch die kompliziertesten Einheitenfragen zu bewältigen. Eine typische allgemeine Größengleichung ist die obige Gl. (1), die zugleich die Definitionsgleichung der mittleren Geschwindigkeit v ist. Offensichtlich ist diese Definition nicht von der Einheitenwahl abhängig.

[1]) Auf Wunsch des Autors wird im Text an einigen Stellen die Einheit „Sekunde" mit sec abgekürzt, um eine Verwechslung mit dem Weg s zu vermeiden.

[2]) Für den Bereich der Deutschen Demokratischen Republik ist die „Verordnung über die physikalisch-technischen Einheiten" kürzlich erschienen (Gesetzblatt Teil I Nr. 56 vom 6. Sept. 1958). Hierzu gehört die „Tafel der gesetzlichen Einheiten" (Mitteilungsblatt Nr. 149 des Deutschen Amtes für Maß und Gewicht).

Zahlenwertgleichungen

Will man aber Gl. (1) zur Berechnung von v in der Weise verwenden, daß v immer in km/h herauskommen soll, s aber in m und t in sec gemessen wird, so benutzt man zweckmäßig die Gleichung

$$v_{\mathrm{km/h}} = 3{,}6 \frac{s_{\mathrm{m}}}{t_{\mathrm{sec}}} \quad (3),$$

in welcher die Symbole die Zahlenwerte bedeuten, die zu den als Index angeschriebenen Einheiten gehören. Gl. (3) ist also eine Zahlenwertgleichung. Beträgt die Meßstrecke in einem anderen Fall stets $s = 10$ m, so kann man zur Berechnung von v die Gleichung

$$v_{\mathrm{km/h}} = \frac{36}{t_{\mathrm{sec}}} \quad (4)$$

verwenden, die ebenfalls eine Zahlenwertgleichung ist, wenn auch von anderer Art als Gl. (3)[3].

Verwendet man kohärente Einheiten, so sind allgemeine Größengleichung und (vollständige) Zahlenwertgleichung äußerlich miteinander identisch, wenn auch die Symbole verschiedene Bedeutung haben.

Umrechnen von Einheiten

Die Anwendung des Größenbegriffes erleichtert das Umrechnen von Einheiten beträchtlich und trägt dazu bei, Fehler zu vermeiden. Beim Umrechnen von Einheiten kommen drei verschiedene Fragestellungen vor.

1. Fall. Umrechnen eines gegebenen Zahlenwertes

Für eine Größe liege ein Zahlenwert vor, der zu einer bestimmten Einheit gehört. Gesucht ist der zu einer anderen Einheit gehörige Zahlenwert. Dieser einfache Fall läßt sich mit Hilfe des „direkten Einsetzens" bewältigen, wie an folgendem, der Gl. (2) entnommenem Beispiel gezeigt werden soll.

Gegeben sei die Geschwindigkeit $v = 50$ km/h, gesucht sei der Zahlenwert für die Einheit m/sec. Es werden die beiden Einheitengleichungen

$$\mathrm{km} = 1000\ \mathrm{m} \quad \text{und} \quad \mathrm{h} = 3600\ \mathrm{sec}$$

herangezogen und in die Ausgangsgleichungen eingesetzt. So erhält man die Lösung

$$v = 50 \frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}} = 50 \cdot \frac{1000\ \mathrm{m}}{3600\ \mathrm{sec}} = 13{,}9 \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{sec}}.$$

2. Fall. Rechnen mit nichtkohärenten Einheiten

Gegeben sei eine allgemeine Größengleichung; gefragt ist nach dem Rechengang bei Benutzung nichtkohärenter Einheiten. Als Beispiel betrachten wir die Beziehung zwischen Drehmoment M, Winkelgeschwindigkeit ω und Leistung P, also die allgemeine Größengleichung

$$P = M\omega.$$

Würde man M in kp m und ω in sec^{-1} einsetzen, so erhielte man ohne weiteres P in der kohärenten Einheit kp m/s. Man will aber häufig nicht die Größe ω (Winkel, geteilt durch Zeit), sondern die Größe n (Umdrehung, geteilt durch Zeit) einsetzen, die durch die Größengleichung $\omega = 2\pi n$ gegeben ist. Man geht also von der Gleichung

$$P = 2\pi M n \quad (5)$$

aus. Ferner seien verlangt für n die Einheit min^{-1}, für P die Einheit PS, während M in kp m eingesetzt werden soll. Es werden dazu die Einheitengleichungen

$$\mathrm{PS} = 75\ \mathrm{kp\ m/sec} \quad \text{und} \quad \mathrm{min} = 60\ \mathrm{sec}$$

gebraucht. Die allgemeine Größengleichung (5) wird dann in aufgespaltener Form angeschrieben, wobei die gewünschten, in unserem Falle nichtkohärenten Einheiten verwendet werden:

$$P_{\mathrm{PS}} \cdot \mathrm{PS} = 2\pi\,(M_{\mathrm{kp\,m}} \cdot \mathrm{kp\,m}) \cdot (n_{\mathrm{min}^{-1}} \cdot \mathrm{min}^{-1}) \quad (6).$$

Gl. (6) wirkt auf den ersten Blick ungewöhnlich, entspricht aber völlig den Regeln der Größenlehre und ist zugleich ein Beweis dafür, daß eine allgemeine Größengleichung auch für nichtkohärente Einheiten gültig ist. Da sich in Gl. (6) die Einheiten nicht herauskürzen, kann mit ihr noch nicht unmittelbar gerechnet werden. Nach Einsetzen der obigen Einheitengleichungen erhalten wir:

$$P_{\mathrm{PS}} \cdot \mathrm{PS} = 2\pi \left(M_{\mathrm{kp\,m}} \frac{\mathrm{PS} \cdot \mathrm{sec}}{75}\right) \cdot \left(n_{\mathrm{min}^{-1}} \frac{\mathrm{sec}^{-1}}{60}\right).$$

Die jetzt kohärent gemachten Einheiten lassen sich kürzen, und wir erhalten die bekannte Zahlenwertgleichung

$$P_{\mathrm{PS}} = \frac{1}{716} M_{\mathrm{kp\,m}} \cdot n_{\mathrm{min}^{-1}} \quad (7).$$

Die Symbole bedeuten wieder die Zahlenwerte, bezogen auf die als Index angeschriebenen Einheiten.

3. Fall. Zahlenwertgleichung für andere Einheiten umrechnen

Gegeben sei eine Zahlenwertgleichung für bestimmte, z. B. nichtkohärente Einheiten. Gesucht ist die Umrechnung für andere Einheiten. Als Beispiel betrachten wir Gl. (3)

$$v_{\mathrm{km/h}} = 3{,}6 \frac{s_{\mathrm{m}}}{t_{\mathrm{sec}}} \quad (3).$$

Wir wollen v in sm/h (Seemeilen je Stunde) erhalten, aber für s und t die bisherigen Einheiten m und sec beibehalten. Gl. (3) bedeutet offenbar, daß sie nur für die Zahlenwerte der angeschriebenen Einheiten richtig ist. Sollen andere Einheiten verwendet werden, so müssen die neuen Zahlenwerte in die alten umgerechnet werden. Es sind also Zahlenwerte und nicht Einheiten umzurechnen.

Aus Gl. (2) folgt, daß Zahlenwerte sich umgekehrt wie Einheiten verhalten. Es bestehen also nebeneinander die Einheitengleichung

$$1\ \mathrm{sm/h} = 1{,}852\ \mathrm{km/h}$$

und die Zahlenwertgleichung

$$1{,}852\ v_{\mathrm{sm/h}} = v_{\mathrm{km/h}} \quad (3a)$$

gemäß der Produktbeziehung

$$v = v_{\mathrm{sm/h}} \cdot \mathrm{sm/h} = v_{\mathrm{km/h}} \cdot \mathrm{km/h}.$$

Setzt man die obige Zahlenwertgleichung (3a) in Gl. (3) ein, so erhält man

$$v_{\mathrm{km/h}} = 1{,}852\, v_{\mathrm{sm/h}} = 3{,}6 \frac{s_{\mathrm{m}}}{t_{\mathrm{sec}}}$$

oder

$$v_{\mathrm{sm/h}} = 1{,}94 \frac{s_{\mathrm{m}}}{t_{\mathrm{sec}}}$$

Hieraus folgt auch, daß bei einer Beobachtungszeit von $t = 14$ sec, wie sie früher beim Handlogg üblich war, die Loggleine durch Knoten in Meßabstände von $s = 7{,}2$ m unterteilt sein mußte (wobei der Schlupf des Loggscheites nicht berücksichtigt ist). Das Schiff lief dann gerade soviel sm/h (= Knoten), wie dem Beobachter Knoten der Leine in 14 sec durch die Hand gingen.

Während bei der eben beschriebenen Methode Zahlenwerte umzurechnen sind, gibt es noch ein anderes Verfahren für den Fall 3, bei dem wie im Fall 1 Einheiten umgerechnet werden; es handelt sich um die Methode der zugeschnittenen Gleichung.

Da Größe = Zahlenwert × Einheit ist, kann man auch Zahlenwert = Größe geteilt durch Einheit schreiben. Mit dieser Umwandlung wird aus der Zahlenwertgleichung (3) die zugeschnittene Gleichung

$$\frac{v}{\mathrm{km/h}} = 3{,}6 \frac{s/\mathrm{m}}{t/\mathrm{sec}} \quad (8).$$

[3]) Eine anerkannte Benennung dieser beiden Typen von Zahlenwertgleichungen scheint es noch nicht zu geben. Es sei vorgeschlagen, Gl. (3) eine vollständige und Gl. (4) eine unvollständige Zahlenwertgleichung zu nennen.

Die Symbole bedeuten jetzt Größen, die Gleichung gilt in dieser Form aber nur für die angeschriebenen Einheiten. Will man mit anderen Einheiten rechnen, so müssen die neuen auf die alten Einheiten umgerechnet werden.

Das geschieht in unserem Beispiel durch die Einheitenbeziehung

$$\mathrm{km/h} = \frac{1}{1{,}852}\,\mathrm{sm/h},$$

die in Gl. (8) einzusetzen ist, so daß wir die Beziehung

$$\frac{v}{\mathrm{km/h}} = \frac{1{,}852\,v}{\mathrm{sm/h}} = 3{,}6\,\frac{s/\mathrm{m}}{t/\mathrm{sec}}$$

erhalten. Nach Aufspalten der Größen ($v = v_{\mathrm{sm/h}} \cdot \mathrm{sm/h}$ usw.) und Kürzen der Einheiten erhalten wir wieder die Zahlenwertgleichung

$$v_{\mathrm{sm/h}} = 1{,}94\,\frac{s_{\mathrm{m}}}{t_{\mathrm{sec}}},$$

die natürlich mit dem früheren Ergebnis identisch ist. Die Methode der zugeschnittenen Gleichung kann besonders bei kurzen Gleichungen von Nutzen sein.

Es sei zu diesem Abschnitt abschließend bemerkt, daß die hier mitgeteilten Methoden ohne den Begriff der Größe und ohne Kenntnis ihrer wichtigsten Eigenschaften völlig unverständlich bleiben würden. Andererseits erweist sich der Größenbegriff als unfehlbares Hilfsmittel bei allen Einheitenproblemen.

Empfehlungen des VDI

Die Empfehlungen des VDI [2] enthalten sowohl Vorschläge über die Benennung und Verwendung von Einheiten als auch über die Definition von Größen. Im folgenden seien einige wichtige Folgerungen aus diesen Empfehlungen besprochen, ohne daß dabei die Reihenfolge des Originals eingehalten werden soll.

Technische Krafteinheit

Im technischen Einheitensystem wurde bisher als Krafteinheit das Kilogramm verwendet, obwohl das Wort Kilogramm schon durch die 1. Generalkonferenz (1889) für die Masseneinheit in Anspruch genommen war und diese Festlegung durch die nationalen Einheitengesetze inzwischen vielfach wiederholt wurde. Diese Doppeldeutigkeit in der Benennung einer Grundeinheit mußte zu unerträglichen Schwierigkeiten führen, sobald Ingenieure in engere fachliche Berührung mit Physikern, Chemikern oder Physikochemikern kamen, wie es ja in der Verfahrenstechnik seit langem der Fall ist. Dem jahrzehntelangen Streit um die Neubenennung der technischen Krafteinheit, der bei uns zeitweise jede vernünftige Diskussion über Maßsysteme zu übertönen drohte, hat ein Beschluß des Technischen Komitees ISO/TC 12 ein Ende bereitet [7]. Es wurden die Bezeichnungen Kilopond (kp) und kilogramme-force (kgf) als gleichberechtigt anerkannt. Wenn es auch nicht gelang, nur eine einzige Bezeichnung einzuführen, sind damit doch die vielen bisherigen Symbole abgeschafft (z. B. kg, $\mathrm{kg_p}$, $\mathrm{kg_f}$, kg′, kg*, Kg, kG). Für Deutschland kommt nur die Bezeichnung Kilopond (kp) in Übereinstimmung mit dem künftigen Einheitengesetz und den DIN-Normen in Frage.

In Zukunft ist also die technische Krafteinheit statt mit kg mit kp zu bezeichnen. Das soll aber nicht bedeuten, daß im technischen Schrifttum jedes kg durch kp zu ersetzen wäre. Das Kilopond ist überall da einzuführen, wo es sich eindeutig um Kräfte handelt, also z. B. auch bei Drucken oder Spannungen ($\mathrm{kp/cm^2}$, $\mathrm{kp/mm^2}$). Sofern das kg bisher zur Mengenangabe benutzt wurde, soll es als kg stehen bleiben, bedeutet aber in Zukunft eine Masseneinheit. Diese wichtige Festlegung soll im folgenden näher erläutert werden.

Masse als Bezugsgröße

Die Definition von Größen braucht von der Wahl irgendwelcher Einheiten oder Grundeinheiten nicht abzuhängen. Trotzdem kann gelegentlich durch die Wahl einer Grundeinheit die Größendefinition beeinflußt werden, wie es beim bisherigen technischen Einheitensystem offenbar der Fall war. Weil die Krafteinheit Kilopond eine Grundeinheit war, bevorzugten die Ingenieure auch das Gewicht (im Sinne einer Kraft) als Maß für die Menge. Im technischen Schrifttum waren alle Mengenströme üblicherweise Gewichtsströme. Die spezifischen Größen der Wärmelehre wurden auf das Gewicht bezogen, der Kehrwert des spezifischen Volumens war die Wichte (auch spezifisches Gewicht genannt). Da das Gewicht ortsabhängig ist, benutzte man das sogenannte Normgewicht unter der verabredeten Normfallbeschleunigung $g_{\mathrm{n}} = 9{,}80665\ \mathrm{m/sec^2}$. Allerdings wurde meist zwischen Ortsgewicht und Normgewicht und zwischen g und g_{n} nicht unterschieden. Auch benutzte der Ingenieur für die auf das Gewicht bezogenen Größen die gleichen Symbole wie der Physiker für die entsprechenden auf die Masse bezogenen Größen.

Diese Gewohnheiten der Ingenieure hatten einige schwerwiegende Nachteile zur Folge [8], die sich um so störender bemerkbar machten, je enger der fachliche Kontakt zwischen den Fachrichtungen wurde:

a) Die allgemeinen Größengleichungen der Ingenieure lauteten anders als die der Physiker. Damit war ein wesentlicher Vorteil der Größengleichung, ihre universelle Verständlichkeit, aufgehoben.

b) Die Fallbeschleunigung g tauchte in Gleichungen auf, in die sie dem physikalischen Vorgang nach nicht hineingehörte. Sie fehlte oft bei reinen Schwerkraftproblemen. Der physikalische Inhalt mancher Gleichung blieb völlig unverständlich.

c) Der Leser fremder Literatur mußte häufig den Rechengang des Verfassers wiederholen, da der Schlußgleichung nicht anzusehen war, welche Größendefinition benutzt wurde. Referate blieben ohne ausführliche Erläuterungen nutzlos.

Um diese Nachteile zu vermeiden und um die Formelsprache zu vereinheitlichen, schlägt der VDI vor, nur noch die Masse als Mengenmaß und als Bezugsgröße für die spezifischen Größen der Wärmelehre zu verwenden. Das würde praktisch bedeuten, daß die örtliche Fallbeschleunigung g nur noch bei Schwerkraftproblemen auftritt, die Normfallbeschleunigung g_{n} aber ganz wegfällt. Die Wichte γ ist, soweit sie als Mengenmaß verwendet wurde, durch die Dichte ϱ zu ersetzen. In Schwerkraftproblemen sollte man statt γ besser ϱg schreiben. Die Normwichte fällt ebenfalls vollständig weg.

Für den Ersatz des kg durch kp, von dem am Ende des vorigen Abschnitts die Rede war, würde diese Regelung z. B. bedeuten, daß die Dampfleistung eines Kessels wie bisher 120 000 kg/h = 120 t/h beträgt, daß die Einheiten kg und t aber Masseneinheiten sind, da die in der Zeiteinheit erzeugte Dampfmasse als Maß benutzt wird und nicht mehr das Dampfgewicht (im Sinne einer Kraft).

Eine Angabe der spezifischen Wärmekapazität von Luft

$$c_{\mathrm{p}} = 0{,}240\,\frac{\mathrm{kcal}}{\mathrm{kg\,grd}} \tag{9}$$

sollte bisher im technischen Schrifttum bedeuten:

$$c'_{\mathrm{p}} = \frac{C}{G_{\mathrm{n}}} = 0{,}240\,\frac{\mathrm{kcal}}{\mathrm{kp\,grd}}.$$

Nunmehr soll es einheitlich für Ingenieure und Physiker heißen

$$c_p = \frac{C}{m} = 0{,}240 \frac{\text{kcal}}{\text{kg grd}},$$

d. h. die Wärmekapazität C soll in Zukunft auf die Masse m und nicht mehr auf das Normgewicht G_n bezogen werden. An der Schreibweise der Gl. (9), die bisher mehrdeutig war, braucht kurioserweise nichts geändert zu werden, obwohl links eine Größe und rechts eine Einheit ihre Bedeutung gewechselt haben. Der Zahlenwert bleibt derselbe, da 1 kp das Normgewicht der Masse 1 kg ist ($1 \text{ kp} = 1 \text{ kg} \cdot g_n$) und da andererseits die Größengleichung $G_n = m \cdot g_n$ besteht.

Internationales Einheitensystem

Der VDI schlägt vor, das Internationale Einheitensystem zu bevorzugen, d. h. jenes Einheitensystem, das durch die einleitend aufgeführten 6 Grundeinheiten bestimmt ist. Selbstverständlich ist nicht daran gedacht, nur noch mit den kohärenten Einheiten dieses Systems zu rechnen, da man damit oft sehr unpraktische Zahlenwerte erhalten würde. Vielmehr stehen für 10^{-12} bis 10^{12} die bekannten Vorsatzsilben zur Bildung von dezimalen Teilen oder Vielfachen zur Verfügung. Für die Zeiteinheiten min, h und Tag werden noch die Umrechnungszahlen 60 und 24, für den Winkelgrad die Umrechnungszahl 90 gebraucht.

Die Bevorzugung des Internationalen Einheitensystems kann aber nur dann einen Sinn haben, wenn man nichtkohärente und nicht dezimal abgeleitete Einheiten nach und nach fallen läßt, sofern nicht besondere Gründe dafür bestehen, sie weiter zu verwenden. Für den Bereich der Verfahrenstechnik handelt es sich vorzugsweise um die Druckeinheiten at und atm und um die Energieeinheit kcal.

Die im Internationalen Einheitensystem kohärente Krafteinheit ist das Newton (N) mit der Definitionsgleichung

$$1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/sec}^2.$$

Das Kilopond ist eine nichtkohärente Krafteinheit geworden ($1 \text{ kp} = 9{,}80665 \text{ N}$) und ist keine Grundeinheit mehr.

Aus der Krafteinheit Newton wird die kohärente Druckeinheit N/m^2 gebildet, die aber für praktische Zwecke zu klein ist. Man verwendet daher die Einheit Bar (bar):

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ N/m}^2.$$

Zu den bisherigen Druckeinheiten at $= \text{kp/cm}^2$ und atm bestehen folgende Beziehungen:

$$\text{technische Atmosphäre at} = 0{,}980665 \text{ bar (genau)},$$
$$\text{physikalische Atmosphäre atm} = 1{,}01325 \text{ bar (genau)}.$$

Das bedeutet, daß bei der Benutzung des bar die gewohnten Zahlenwerte sich um weniger als 2% ändern würden. Da ohnehin kein vernünftiger Grund dafür besteht, zwei so nahe beieinanderliegende Druckeinheiten wie at und atm beizubehalten, ist der baldige Übergang zum bar nur zu empfehlen.

Die kohärente Energieeinheit des Internationalen Einheitensystems ist die Wattsekunde (W s) oder das Joule (J). Es besteht die Einheitengleichung

$$\text{N m} = \text{kg m}^2/\text{s}^2 = \text{J} = \text{W s}.$$

Zur Kalorie besteht die Beziehung

$$1 \text{ cal}_{IT} = 4{,}1868 \text{ J (genau)} \tag{10}$$

wobei unter cal_{IT} die von der 5. Internationalen Dampftafelkonferenz (London 1956) angenommene Internationale Tafelkalorie zu verstehen ist. Die cal_{IT} ist eine im Internationalen Einheitensystem nichtkohärente Energieeinheit und ist nicht mehr durch die Stoffeigenschaften des Wassers definiert. Sie soll zugleich die vielen bisherigen Kalorien ersetzen, so die 4°-Kalorie, die 15°-Kalorie, die mittlere Kalorie, die thermochemische Kalorie, die Kalorie der Gaskonstante, für deren Fortbestehen keine triftigen Gründe zu erkennen sind.

Das frühere „mechanische Wärmeäquivalent" hat ebenfalls seine Daseinsberechtigung verloren, da es eine von vielen Umrechnungszahlen zwischen Einheiten darstellt, die keinen eigenen Namen verdient. Es ist zu betonen, daß der Zahlenwert in Gl. (10) durch Definition und nicht durch Präzisionsmessung festgelegt wurde.

Beim Übergang von der Kalorie auf das Joule werden die Zahlenwerte rund 4mal so groß, was naturgemäß ungewohnt ist. Der Übergang wird dadurch erleichtert, daß Wärmemengen häufig als Differenzen gegen willkürliche Bezugspunkte erscheinen, so daß die geänderten Zahlenwerte dem Benutzer nicht so stark bewußt werden (Enthalpien, Entropien usw.). Nebenbei entsteht der Vorteil, daß die spezifische Wärmekapazität von Luft nahezu den Zahlenwert Eins bekommt, was für viele Industriezweige von Nutzen sein dürfte:

$$c_p = 0{,}240 \frac{\text{kcal}_{IT}}{\text{kg grd}} = 1{,}00_5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg grd}}.$$

Für die auf die Zeit bezogene Wärmemenge (Wärmestrom) und die davon abgeleiteten Größen ergeben sich beim Übergang auf das Internationale Einheitensystem besonders günstige Verhältnisse. Es gilt die Umrechnung

$$1 \text{ kcal}_{IT}/\text{h} = 1{,}163 \text{ J/s} = 1{,}163 \text{ W (genau)}.$$

Bei der Umstellung würden sich die Zahlenwerte der Wärmestromdichte (Heizflächenbelastung), Wärmeleitfähigkeit, Wärmeübergangszahl und Wärmedurchgangszahl nur wenig ändern. Damit wäre zugleich die unbequeme Zeiteinheit Stunde beseitigt.

Besondere Erwähnung verdient die Einheit der dynamischen Viscosität η. Die im Internationalen Einheitensystem kohärente Viscositätseinheit ist

$$\frac{\text{N s}}{\text{m}^2} = \frac{\text{kg}}{\text{m s}} = 10 \text{ Poise} = 1 \text{ daP} = 10^3 \text{ cP}.$$

Da heute in der Viscosimetrie überwiegend das Zentipoise (cP) üblich ist und diese Einheit auch in vielen Tabellenwerken benutzt wird, läßt sich beim Rechnen der Übergang zum Dekapoise (daP) leicht erreichen. Die bisherige technische Viscositätseinheit, $\text{kp s/m}^2 = 9{,}80665$ daP, wäre dann entbehrlich.

Schlußbemerkung

Um eine einheitliche Formelsprache im gesamten Bereich der Naturwissenschaften und der Technik zu erzielen und um die Vielzahl von Einheiten auf ein vernünftiges Maß zu reduzieren, stehen heute zwei Hilfsmittel zur Verfügung: die Größengleichung und das Internationale Einheitensystem. Beides im Sinne einer Rationalisierung geistiger Arbeit nutzbar zu machen, ist unsere Aufgabe. Die vorstehenden Betrachtungen sollten hierzu auf einige Möglichkeiten hinweisen.

Daß bei einer Umstellung auch alte Gewohnheiten aufzugeben sind, ist selbstverständlich. Man sollte sich aber vor Augen halten, daß es ein kostspieliger Luxus ist, veraltete Schreibweisen und überflüssige Einheiten beizubehalten. Jedes unnötige Umrechnen und jedes Nachschlagen kostet Arbeitskraft und -zeit. Je rascher wir uns umstellen, desto kürzer ist die Übergangszeit und desto früher wird die vorübergehende Unbequemlichkeit belohnt.

Eingeg. 28. Jan. 1959 [B 1024]

Literatur

[1] Comptes Rendus des Séances de la Dixième Conférence Générale des Poids et Mesures. Paris 1955.

[2] *E. Flegler*, VDI-Z. *100*, 1100/02 [1958].

[3] *U. Stille:* Messen und Rechnen in der Physik, Braunschweig 1955.

[4] *J. Wallot:* Größengleichungen, Einheiten und Dimensionen, 2. Aufl. Leipzig 1957.

[5] *G. Oberdorfer:* Die Maßsysteme, Wien 1956.

[6] *E. Flegler*, VDI-Z. *94*, 920/34, 1009/12 [1952].

[7] *U. Stille*, DIN-Mitt. *77*, 58/60 [1958].

[8] *U. Grigull*, Brennstoff, Wärme, Kraft *9*, 219/26 [1957].