DK 389.6 (43)

Sollen wir beim technischen Maßsystem bleiben?

Von Dr.-Ing. **U. Grigull** VDI, Leverkusen*)

Es wird dafür eingetreten, daß auch im deutschen technischen Schrifttum das international anerkannte MKS-System eingeführt wird. Die Umstellung kann in zwei Schritten geschehen: Das MKS-Größensystem, d. h. die Anerkennung der Masse als Grundgröße und zugleich als Maß für die Stoffmenge, sollte baldmöglichst eingeführt werden. Vor der konsequenten Anwendung des MKS-Einheitensystems können für eine Übergangszeit nichtkohärente Einheiten, die dem Ingenieur vertraut sind (Kilopond, Atmosphäre, Kilokalorie) weiterbenutzt werden. Diese Vorschläge werden an Beispielen aus der Wärmetechnik verdeutlicht.

Die Diskussion über Fragen der Maßsysteme und Einheiten ist in den letzten Jahren im deutschen wie im ausländischen Schrifttum kaum zur Ruhe gekommen. Wir beobachten eine Entwicklung im Sinne einer schärferen Fassung der Grundlagen unserer Maßsysteme und einer Vereinheitlichung der Einheiten. Ein besonders bedeutsamer Schritt aus jüngster Zeit ist eine Verlautbarung der 10. Generalkonferenz für Maß und Gewicht, des obersten Organs der Internationalen Meterkonvention von 1875, die im Jahre 1954 beschloß, die Grundeinheiten des MKS-Systems: Meter, Kilogramm-Masse und Sekunde zur Verwendung zu empfehlen. Dazu treten als weitere Grundeinheiten Kelvingrad, Ampere und Candela[1]). Diese Grundeinheiten sind auch von anderen internationalen Gremien, insbesondere der ISO, empfohlen und in einigen Ländern bereits gesetzlich vorgeschrieben worden.

Bei dieser Sachlage muß sich der Ingenieur ernstlich die Frage vorlegen, ob ein weiteres Festhalten am technischen Maßsystem vernünftig und zweckmäßig ist, oder ob nicht die Gefahr besteht, daß die internationale Entwicklung Tatbestände schafft, die unsere bisherigen Gewohnheiten als überholt erscheinen lassen.

Die Kritik am technischen Maßsystem richtete sich schon lange, auch von seiten der Ingenieure, gegen die Erscheinung, daß durch laxe Handhabung der Fallbeschleunigung g manche Gleichungen in mißverständlicher oder völlig sinnwidriger Form geschrieben wurden, wie wir es weiter unten an Beispielen noch kennenlernen werden. Wenn wir uns auch an diese Inkonsequenzen gewöhnt haben, sind sie doch für den Lernenden — und nicht nur für diesen — immer wieder eine Quelle von Irrtümern.

Die Frage, ob das technische Maßsystem beibehalten werden soll, ist noch aus einem dritten Grunde besonders aktuell. Solange die Ingenieure wirklich „unter sich" waren, blieb es ziemlich gleichgültig, mit welchem Maßsystem sie arbeiteten, sofern dieses in sich widerspruchsfrei war, was man dem technischen Maßsystem, wenn es richtig gehandhabt wird, keinesfalls absprechen kann. Heute ist der Ingenieur jedoch stärker als bisher gezwungen, sich mit den physikalischen Grundlagen der Ingenieur-Wissenschaften zu beschäftigen und dabei Literatur zu benutzen, die von Physikern geschrieben ist. Auch die berufliche Zusammenarbeit mit dem Physiker ist in vielen Industriezweigen heute ausgeprägter als früher. In besonderem Maße gilt dies für die Kerntechnik, den Apparatebau und die Verbrauchsgüterindustrie, insbesondere die chemische Industrie. Die verschiedene Schreibweise der Gleichungen und die unterschiedlichen Einheiten erschweren die gegenseitige Verständigung zwischen Ingenieur, Physiker und Chemiker.

Auch der Studierende des Maschinenbaus hat unter den verschiedenen Maßsystemen zu leiden. Im Laufe seines Studiums wird er von Physikern in den Grundlagen der Physik ausgebildet, die dabei gewohnterweise nicht das technische Maßsystem benutzen. So muß er in späteren Semestern wieder umlernen und sich mit der Tatsache abfinden, daß manche Symbole und sogar der Name einer Grundeinheit zwei voneinander völlig abweichende Bedeutungen haben können.

Im folgenden soll die Frage untersucht werden, ob diese unbefriedigende Situation sich nicht beseitigen läßt und wie man dabei, auch unter Berücksichtigung einer Übergangsregelung, etwa vorgehen könnte.

Größensystem und Einheitensystem

Beim Vergleich des technischen Maßsystems mit den beiden anderen metrischen Systemen, dem physikalischen Maßsystem, auch CGS-System genannt, und dem schon erwähnten MKS-System, das als MKSA-System auch mit Giorgi-System bezeichnet wird, stößt man auf die Doppeldeutigkeit des Wortes „Maßsystem", das sowohl für „Größensystem" wie für „Einheitensystem" gebraucht wird. Eine Aufstellung der Grundgrößen und der

*) Der Verf. dankt Herrn Dr. *W. Lode*, Leverkusen, für anregende Diskussionen.

[1]) Für die Lichtstärke.

Benutzte Formelzeichen

a	Temperaturleitzahl $a = \lambda/c_i\,\varrho = \lambda/c_{fn}\,\gamma_n$
b	Beschleunigung
c, c_p	Spezifische Wärme
g	Örtliche Fallbeschleunigung
g_n	$= 9{,}80665$ m/s² Norm-Fallbeschleunigung
G	Gewicht (Ortsgewicht)
G_n	Normgewicht
$\dot{G}_n$	Normgewichtstrom je Einheit der Wandbreite
l	Bezugslänge
m	Masse
$\dot{M}$	Massenstrom je Einheit der Wandbreite
p	Druck
Δp	Druckdifferenz
q	Staudruck
Q	Wärmemenge
R	Individuelle Gaskonstante
s	Filmdicke
T	Temperatur vom absoluten Nullpunkt aus
ΔT	Temperaturdifferenz
U	Innere Energie
v	Spezifisches Volum
V	Volum
w	Geschwindigkeit
y	Längenkoordinate
α	Wärmeübergangszahl
β	$= 9{,}806\,65$ Zahlenwert
γ	Wichte (Ortswichte)
γ_n	Normwichte
δ	Thermische Ausdehnungszahl
ε	$= 1/426{,}935$ Zahlenwert
ζ	Widerstandszahl
η	Dynamische Viskosität
λ	Wärmeleitzahl
ν	Kinematische Viskosität $\nu = \eta/\varrho$
ϱ	Dichte
τ	Schubspannung

Indices

i	Auf Masse bezogen
f	Auf Gewicht bezogen
fn	Auf Normgewicht bezogen

Grundeinheiten der drei Systeme ergibt folgende Tabelle, wenn man sich dabei auf das Gebiet der Mechanik beschränkt:

Maßsystem	Grundgrößen	Grundeinheiten
Technisches Maßsystem . . .	Länge Kraft Zeit	m kp s
MKS-System	Länge Masse Zeit	m kg s
Physikalisches Maßsystem (CGS-System)	Länge Masse Zeit	cm g s

Das technische Maßsystem hat also andere Grundgrößen als die beiden anderen Systeme. Dieser Unterschied ist viel bedeutsamer als die Abweichung in den Einheiten, denn er hat zur Folge, daß im technischen Maßsystem viele abgeleitete Größen anders definiert sind als im MKS- und im CGS-System. Leider werden diese Unterschiede dadurch verschleiert, daß oft die gleichen Symbole für Größen verschiedener Art benutzt werden.

Da die Verwendung gleich definierter Größen die Voraussetzung für die gleiche Schreibweise der Größengleichungen ist, können wir auf die Frage der Überschrift bereits jetzt eine Teilantwort geben: Will man die in der Einleitung geforderte Verständigung zwischen Technik und Naturwissenschaft erleichtern, so muß man vom technischen Größensystem abgehen und bei den Grundgrößen die Kraft durch die Masse auch im technischen Schrifttum ersetzen.

Der Vorschlag liegt nahe, daß die Physiker sich der Grundgrößen des technischen Größensystems bedienen sollten. Diese Möglichkeit ist durch die historische Entwicklung verbaut, denn seit der 1. Generalkonferenz im Jahre 1889 sind die Grundgrößen Länge, Masse und Zeit zugleich mit der Festlegung ihrer Einheiten international vereinbart und seitdem immer wieder bestätigt worden. Nach menschlichem Ermessen ist diese Festlegung als endgültig zu bezeichnen. Auch die Mitgliedstaaten der Meterkonvention, also praktisch alle Kulturstaaten, sind dieser Vereinbarung gefolgt und haben sie in ihre nationalen Gesetze aufgenommen. Es folgt daraus auch die zu wenig beachtete Tatsache, daß das technische Maßsystem schon in seinen Grundgrößen gesetzlich nicht festgelegt ist.

Die technische Krafteinheit

In der obenstehenden Tabelle ist die technische Krafteinheit mit Kilopond (kp) bezeichnet. Über diesen Namen ist lange und heftig diskutiert worden. Heute herrscht weitgehende Einigkeit darüber, daß die technische Krafteinheit nicht mehr mit Kilogramm bezeichnet werden sollte, da es auf die Dauer als unbefriedigend angesehen wird, das Prinzip der Eindeutigkeit ausgerechnet bei den Grundeinheiten zu verletzen, obwohl es zu den Grundlagen unseres Denkens überhaupt gehört.

Die Anerkennung einer neuen Bezeichnung muß man den zuständigen internationalen Gremien überlassen, deren Entscheidung in absehbarer Zeit zu erwarten ist. Neben dem Kilopond (kp) werden auch Kilogrammfors (kgf) und Kilofors (kf) in die Diskussion einbezogen[2]). Das Kilopond allein ist in mehreren Ländern schon eingeführt und wird seit 1955 auch in den deutschen Normblättern verwendet.

Die Einwände gegen das Kilopond richteten sich zum Teil gegen das Wort selbst; hierauf sei nicht weiter eingegangen. Von grundsätzlicher Natur war jedoch die Bemerkung, daß Handel und Wirtschaft von jeher Gewichte in Kilogramm angegeben haben und daß eine Neubenennung der technischen Krafteinheit, etwa mit Kilopond, eine völlige Verwirrung stiften würde. Bei diesem Einwand gegen das Kilopond ist offenbar von der Voraussetzung ausgegangen, daß das Gewicht einer Stoffmenge die Kraft ist, mit der sie auf ihre Unterlage drückt, wie es sowohl von der 3. Generalkonferenz (1901) wie durch das Normblatt DIN 1305 (2. Ausg., Juli 1938) festgelegt wurde.

Die Frage: „Was ist Gewicht?" ist schon vor über 20 Jahren in Deutschland durch eine Rundfrage behandelt worden [1; 2]. In Wissenschaft und Technik wird Gewicht (in den meisten Fällen) eindeutig im Sinne des Normblatts DIN 1305 gebraucht. Im täglichen Leben tritt das Gewicht vorwiegend als Maß für die Stoffmenge auf, wenn diese durch Wägung bestimmt wird. Da das Wiegen den Vergleich einer Stoffmenge mit geeichten Gewichtstücken darstellt — unmittelbar auf der Hebelwaage oder nach Eichung einer Federwaage — und da Gewichtstücke in Masseneinheiten geeicht sind, wird auch das Ergebnis der Wägung als Gewicht angesehen und in Masseneinheiten angegeben.

Dagegen verwenden die Ingenieure bis heute als Maß für die Stoffmenge vorwiegend das Gewicht im Sinne von DIN 1305, genauer gesagt, das Normgewicht. Dieses Normgewicht geben sie (statt in Kilopond) in Kilogrammkraft an. Hieraus kann aber nicht etwa geschlossen werden, daß auch Handel und Wirtschaft eine Stoffmenge mit deren Normgewicht messen und dieses in Krafteinheiten angeben, daß also das Kilogramm des täglichen Lebens eine verkappte Krafteinheit sei, die bei der Einführung des Kilopond ebenfalls geändert werden müßte oder auch nur dürfte.

Eine solche Folgerung würde den wirklichen Zusammenhängen widersprechen. Die gesetzliche Masseneinheit, das Kilogramm mit seinen dezimalen Unterteilungen und Vielfachen, ist gerade dazu geschaffen worden, um Stoffmengen durch Wägung, also durch Massenvergleich, bestimmen zu können. Es wird (hoffentlich) niemand auf den Gedanken kommen, in Zukunft eine Ware in Kilopond anzubieten oder ein Kilogrammgewichtstück mit „1 kp" zu beschriften. Das Ergebnis einer Wägung ist und bleibt eine Masse und muß laut Gesetz in Masseneinheiten angegeben werden. Das gilt auch unter Berücksichtigung der Tatsache, daß beim Wiegen die Kraftwirkung auf die Unterlage als Meßprinzip benutzt wird.

Aus der durch Wägung ermittelten Masse kann man andere Größen berechnen, z. B. das örtliche Gewicht bei Kenntnis der örtlichen Fallbeschleunigung, das Normgewicht durch Verwendung von g_n, das Volum bei Kenntnis der Dichte u. a.

Wenn der Gesetzgeber [3] die Masseneinheiten unter der Überschrift „Gewichte" aufgeführt hat, so ist dieser Ausdruck nur im Sinne von „Gewichtstücke" zu verstehen, niemals im Sinne von DIN 1305 als Kräfte. Ein Gewichtstück kann aber vernünftigerweise nur in Masseneinheiten geeicht werden.

Die Neubenennung der technischen Krafteinheit (etwa mit Kilopond) würde demnach in Handel und Wirtschaft kaum bemerkt werden, sondern vorwiegend eine Sache von Technik und Naturwissenschaft bleiben. Wenn andererseits die Ingenieure die Masse als Grundgröße wählen und Stoffmengen durch deren Masse messen würden (statt wie bisher durch das Normgewicht), so wäre damit nicht nur eine Übereinstimmung mit Physik und Chemie erzielt, sondern ebenso auch mit den Bestimmungen des Gesetzes und den Gewohnheiten des täglichen Lebens.

Die doppelte Bedeutung des Wortes Gewicht wollen wir uns an folgender Aufstellung nochmal vor Augen führen:

a) Gewicht gleich Kraft auf die Unterlage
entspricht DIN 1305 und ist die im technischen und physikalischen Schrifttum übliche Definition.

b) Ergebnis der Wägung gleich Masse
entspricht der Messung von Stoffmengen durch Wägung. Die Masse als Maß der Stoffmenge wird in Masseneinheiten (z. B. Kilogramm) angegeben.

c) Gewicht gleich Ergebnis der Wägung gleich Masse
führt zum Widerspruch zu DIN 1305, ist aber in Handel und Wirtschaft und manchmal auch in der Wissenschaft (Molgewicht, Gewichtanalyse) üblich.

So sehr die unter c) genannte Gleichsetzung sprachlich nahezuliegen scheint, ist sie doch strenggenommen nicht

[2]) In englischer und französischer Schreibweise: kilogrammeforce bzw. kiloforce.

zulässig, weil das Wort Gewicht bereits als Kraft gemäß a) festgelegt worden ist. Es wird allerdings kaum gelingen, die Bedeutung des Wortes Gewicht im täglichen Leben zu ändern, was auch seit 1901 (3. Generalkonferenz) bis heute nicht gelungen ist. Im wissenschaftlichen Schrifttum sollte man aber das Wort Gewicht nicht gebrauchen, wenn die Masse gemeint ist.

Aus dieser nicht sehr sorgfältigen Ausdruckweise in Handel und Wirtschaft das technische Maßsystem rechtfertigen zu wollen, hieße, aus der unerlaubten Gleichsetzung von a) mit b): Gewicht gleich Ergebnis der Wägung gleich Kraft die ungesetzliche Benutzung des Kilogramm als Krafteinheit abzuleiten. Man würde also einen laxen Sprachgebrauch gerade im falschen Sinne auslegen, sich dann auf das Normblatt DIN 1305 berufen[3]) und daraus das Recht herleiten, die gesetzlichen Masseneinheiten in Krafteinheiten umzudeuten. Ein solches Vorgehen muß als unzulässig bezeichnet werden.

Die Anerkennung der Masse als Grundgröße durch den Ingenieur, d. h. der Verzicht auf das technische Größensystem, ist von viel tieferer Bedeutung als die Neubenennung der technischen Krafteinheit. Trotzdem muß diese Neubenennung vorangehen, denn um sich überhaupt über Fragen der Maßsysteme verständlich zu machen, muß man zuerst eine eindeutige Benennung der Einheiten herstellen.

Das im folgenden für die technische Krafteinheit ausschließlich verwendete Kilopond (kp) ist durch die Einheitengleichung

$$\mathrm{kp} = \mathrm{kg} \cdot g_\mathrm{n} \quad \text{. . . . .} \quad (1)$$

definiert, worin $g_\mathrm{n} = 9{,}80665\ \mathrm{m/s^2}$ die seit 1901 international vereinbarte Norm-Fallbeschleunigung bedeutet. 1 Kilopond ist also das Normgewicht einer Stoffmenge von der Masse 1 Kilogramm. Die Einheit Kilogramm wird im folgenden im Sinne der gesetzlichen Festlegung nur für die Masse verwendet, das Wort Gewicht hat nur noch die Bedeutung einer Kraft auf die Unterlage gemäß DIN 1305.

Größe, Größengleichung, Zahlenwertgleichung

Eine physikalische Größe [4], die auch kurz „Größe" genannt wird, hat zwei kennzeichnende Eigenschaften, eine qualitative, die ihre Art beschreibt, und eine quantitative, die ihre Ausdehnung angibt. Diesen zwei Eigenschaften wird man dadurch gerecht, daß man eine Größe als Produkt aus Zahlenwert (auch Maßzahl genannt) und Einheit auffaßt:

Größe gleich Zahlenwert mal Einheit.

Nach den Empfehlungen des AEF[4]) kann symbolisch für eine Größe G geschrieben werden [5]:

$$G = \{G\} \cdot [G] \quad \text{. . . . .} \quad (2).$$

Ist beispielsweise $G = 6{,}5$ kp, so ist der Zahlenwert $\{G\} = 6{,}5$ und die Einheit $[G] =$ kp.

Eine Gleichung zwischen Größen ist eine Größengleichung, und zwar im besonderen Falle eine allgemeine Größengleichung, wenn sie außer den Größen keine Einheiten und keine Umrechnungszahlen zwischen Einheiten enthält, sondern nur solche Zahlenwerte, die durch mathematische Operationen, z. B. Integrationen, entstehen. Eine allgemeine Größengleichung ist vor allen übrigen Gleichungsarten dadurch ausgezeichnet, daß sie unabhängig von der späteren Wahl der Einheiten und unempfindlich (invariant) gegen deren Wechsel ist. Sie allein entspricht der Forderung, daß ein Naturgesetz nicht von der Wahl unserer Einheiten abhängen darf, und legt den Benutzer nicht auf bestimmte, auch nicht auf kohärente Einheiten fest.

So ist z. B. die allgemeine Größengleichung für die Temperaturerhöhung durch adiabaten Aufstau

$$\Delta T = \frac{w^2}{2\,c_\mathrm{p}},$$

die heute die Probleme des Schnellfluges beherrscht (Wärmemauer), nur die abgekürzte Schreibweise für folgende umständlichere Ausdrucksweise: Die freiwerdende kinetische Energie je Masseneinheit $w^2/2$ muß wegen der Adiabasie im Gas bleiben und tritt als Wärmeenergie in der Form $c_\mathrm{p}\,\Delta T$ auf. Mit der Wahl bestimmter Einheiten hat diese Gesetzmäßigkeit überhaupt nichts zu tun.

Diese allgemeinen Größengleichungen sind dann besonders geeignet, wenn es auf universelle Verständlichkeit ankommt, etwa zwischen den Angehörigen verschiedener Disziplinen, die mit unterschiedlichen Einheiten zu rechnen gewohnt sind, wie es bisher bei Physikern und Ingenieuren der Fall war und noch ist. Leider erfüllt sich die Erwartung nicht, daß allein durch Benutzung allgemeiner Größengleichungen die Unterschiede zwischen technischem und physikalischem Maßsystem bzw. MKS-System verschwinden. Durch die Benutzung verschiedener Grundgrößen (Masse und Kraft) haben auch manche allgemeine Größengleichungen eine verschiedene Form, hervorgerufen durch die unterschiedliche Definition abgeleiteter Größen. Das Abgehen vom technischen Größensystem und die Anerkennung der Masse als Grundgröße muß als Voraussetzung dafür gefordert werden, daß für den Physiker wie für den Ingenieur wenigstens die allgemeinen Größengleichungen in gleicher Weise lesbar sind.

Da es die Aufgabe des Ingenieurs ist, Maschinen und Apparate zu berechnen, zu bauen und zu betreiben, muß er von seinen Gleichungen auch verlangen, daß sie ihm unmittelbar als Rechenvorschrift für die Zahlenwerte der gesuchten Größen dienen. Dazu ist eine Umwandlung der Größengleichung in eine Zahlenwertgleichung erforderlich, in der ein Symbol G nur noch den Zahlenwert $\{G\}$ bedeutet, auch wenn die geschweiften Klammern weggelassen werden. Über die Einheit $[G]$ muß dann bereits verfügt sein. Die Zahlenwertgleichung unterscheidet sich von der allgemeinen Größengleichung meistens durch Umrechnungszahlen, nur bei Verwendung kohärenter Einheiten sind beide äußerlich miteinander identisch, wenn auch die Symbole ihre Bedeutung gewechselt haben. Einheiten dürfen in einer Zahlenwertgleichung nicht als Faktoren vorkommen, vielmehr muß die zu jedem Zahlenwert $\{G\}$ gehörige Einheit $[G]$ gesondert, d. h. außerhalb der Gleichung, angegeben werden.

Als Beispiel diene wieder die Gleichung für die Temperaturerhöhung durch adiabaten Aufstau. Sie lautet als Zahlenwertgleichung

$$\Delta T = \frac{1}{8373{,}6}\;\frac{w^2}{c_\mathrm{p}}$$

mit der Einheitenvorschrift $[\Delta T] =$ grd, $[w] =$ m/s und $[c_\mathrm{p}] =$ kcal/kg grd. Aus einer allgemeinen Größengleichung kann man so viele Zahlenwertgleichungen ableiten, wie man Einheitenkombinationen aufstellt.

Beide Gleichungstypen erfüllen die zwei gestellten Anforderungen in idealer Weise: Die allgemeine Größengleichung beschreibt ein Naturgesetz in klarster und übersichtlichster Form, die Zahlenwertgleichung ist das reine Rechenrezept unter Verzicht auf Verständlichkeit des physikalischen Zusammenhangs. Dazwischen gibt es verschiedene Mischtypen, z. B. die Größengleichung in aufgespaltener Form, etwa gemäß Gl. (2), und die zugeschnittene Größengleichung [6]. Letztere soll besonders dazu geeignet sein, beide genannten Anforderungen gleichzeitig zu erfüllen, mindestens bei nicht zu umfangreichen Ausdrücken. Bei Gleichungen, in denen viele Größen vorkommen, wird es übersichtlicher sein, die allgemeine Größengleichung und die Zahlenwertgleichung getrennt anzuschreiben, sofern nichtkohärente Einheiten verwendet werden.

[3]) Im täglichen Leben wird das Wort Gewicht häufig auch im Sinne von DIN 1305 gebraucht.

[4]) AEF: Ausschuß für Einheiten und Formelgrößen im Deutschen Normenausschuß.

Spezifische Größen, Dichte, Wichte, Normwichte

Ob die Stoffmenge als Größe eigener Art angesehen werden muß, ist noch strittig. In Physik und Technik ist es jedenfalls üblich, als Maß für die Stoffmenge eine ihr proportionale Größe zu nehmen, vorwiegend die Masse, das Gewicht oder das Volum. Während die Masse m — jedenfalls im Rahmen der klassischen Physik — eine unveränderliche Eigenschaft einer Stoffmenge ist, hängt das Gewicht G von der örtlichen Fallbeschleunigung g ab. Um trotzdem eindeutige Gewichtangaben machen zu können, ist die Norm-Fallbeschleunigung $g_n = 9{,}80665\ \mathrm{m/s^2}$ verabredet, womit sich das Normgewicht G_n durch folgende Gleichung definieren läßt:

$$G_n = m \cdot g_n \quad . \;.\; .\; .\; .\; .\; .\; .\; . \quad (3).$$

Da im technischen Größensystem die Kraft eine Grundgröße ist, bezieht der Ingenieur die spezifischen Stoffgrößen auf das Normgewicht. Die Zahlenangaben der Wichte eines Stoffes in einem Tabellenwerk bedeuten also nicht die örtliche Wichte $\gamma = \varrho g$, sondern stets die Normwichte $\gamma_n = \varrho g_n$, und es wäre zweckmäßig, dies auch immer durch den Index n zum Ausdruck zu bringen. Die örtliche Fallbeschleunigung auf Meereshöhe variiert zwischen Pol und Äquator um etwa $5^0/_{00}$. Andererseits ist die Wichte von Wasser oft mit 5 gültigen Ziffern angegeben. Eine solche Genauigkeit wäre ohne zusätzliche Ortsangabe sinnlos, wenn nicht die Norm-Fallbeschleunigung g_n stillschweigend vorausgesetzt, also eben die Normwichte $\gamma_n = \varrho g_n$ gemeint wäre.

Zwischen der Dichte ϱ in $\mathrm{kg/m^3}$ und der Normwichte γ_n in $\mathrm{kp/m^3}$ besteht die wichtige Beziehung, daß beide Zahlenwerte einander gleich sind, obwohl es sich um Größen verschiedener Art handelt. Es bestehen also nebeneinander die Zahlenwertgleichung[5])

$$\{\gamma_n\}_{\mathrm{kp/m^3}} = \{\varrho\}_{\mathrm{kg/m^3}} \quad . \;.\; .\; .\; .\; .\; .\; . \quad (4)$$

und die allgemeine Größengleichung

$$\gamma_n = \varrho g_n \quad . \;.\; .\; .\; .\; .\; .\; .\; . \quad (5).$$

Gl. (4) beruht auf der Definition des Kilopond als dem Normgewicht des Kilogrammprototyps und damit jeder Stoffmenge mit der Masse 1 kg.

Daß gleichbenannte Größen im technischen und im physikalischen Größensystem verschieden definiert werden, zeigt sich schon an einer so elementaren Größe wie dem spezifischen Volum v. Für den Physiker ist selbstverständlich $v = 1/\varrho$, für den Ingenieur ebenso selbstverständlich $v = 1/\gamma_n$. Zur Unterscheidung (wenigstens im Rahmen unserer Betrachtung) empfehlen sich die Indices i (inertia) für auf die Masse und f (fors) für auf das Gewicht bezogene Größen. Da außerdem noch zwischen Gewicht und Normgewicht zu unterscheiden ist, kommt man zu folgender exakter Schreibweise:

$$v_i = 1/\varrho; \quad v_f = 1/\gamma; \quad v_{fn} = 1/\gamma_n.$$

Hier ist v_i eine Größe anderer Art als v_f und v_{fn}, genau wie Masse und Kraft verschiedenartige Größen sind.

Ähnliches gilt auch für die übrigen spezifischen Stoffgrößen: die spezifische Wärme, die Verdampfungswärme, die individuelle Gaskonstante, die Enthalpie usw. Sie alle werden im technischen Größensystem anders definiert als im physikalischen Größensystem. Nur ihre Zahlenwerte sind — vorausgesetzt, daß die Normgewichte in kp und die Massen in kg gemessen sind — paarweise einander gleich.

Vorschläge für eine Übergangsregelung

Kilopond als nichtkohärente Krafteinheit

Damit die allgemeinen Größengleichungen für Ingenieure und Physiker gleich lauten, ist — wie bereits festgestellt — die Benutzung gleicher Grundgrößen erforderlich, wofür nach Lage der Dinge nur die Größen Länge, Masse, Zeit für den Bereich der Mechanik in Frage kommen. Als Bezugsgröße für die spezifischen Größen dient die Masse[6]) anstelle des Normgewichts. Der Ingenieur würde damit das Größensystem des Physikers benutzen.

Da die allgemeinen Größengleichungen völlige Freiheit in der Wahl der Einheiten lassen, treten diese erst beim Zahlenrechnen, also bei der Umwandlung in Zahlenwertgleichungen in Erscheinung. Die konsequente Verwendung kohärenter Einheiten des MKS-Systems ist ein erwünschtes Endziel, das man aber wahrscheinlich erst nach einer Übergangszeit allmählich erreichen kann. Bei manchen Problemen wären kohärente Einheiten des MKS-Systems auch unpraktisch; man gibt z. B. Teilchengrößen eines bestimmten Bereichs lieber in μ als in m an und den Ausstoß einer Anlage besser in t/Tag als in kg/s.

Die im MKS-System kohärente Krafteinheit ist das Newton (N), das durch die Gleichung $\mathrm{N} = \mathrm{kg\,m/s^2}$ definiert ist. Zum Kilopond besteht die Beziehung

$$\mathrm{kp} = 9{,}80665\ \mathrm{N} = \beta\,\mathrm{N} \quad . \;.\; .\; .\; .\; . \quad (6),$$

worin zur Abkürzung der Zahlenwert $\beta = 9{,}806\,65$ eingeführt ist[7]). In dieser Bedeutung ist das Kilopond eine nichtkohärente Krafteinheit des MKS-Systems. Es hat den Charakter der Grundeinheit verloren, bleibt aber insofern eine Einheit des metrischen Systems, als es durch einen festen Umrechnungsfaktor (β) an eine metrische Einheit (N) angeschlossen ist.

In diesem Sinne sollte das Kilopond mindestens für eine Übergangszeit beibehalten werden, ebenso die aus ihm abgeleiteten Druckeinheiten $\mathrm{kp/m^2}$ und $\mathrm{kp/cm^2} = \mathrm{at}$. Ob man nach dieser Zeit mit dem Newton als einziger Krafteinheit auskommt, braucht im Augenblick nicht entschieden zu werden. Man kann vermuten, daß bei reinen Schwerkraftproblemen, z. B. im Bereich der Statik, das Kilopond weiterhin schwer entbehrlich sein wird.

Mit dieser Regelung würde man die technischen Grundgrößen ersetzen durch die des MKS-Systems mit den Grundgrößen Länge, Masse, Zeit und den Grundeinheiten m, kg, s. Als Maß für die Stoffmenge dient die Masse. Das technische Einheitensystem würde eine Zeitlang im Kilopond (kp) als einer nichtkohärenten abgeleiteten Krafteinheit ($\mathrm{kp} = g_n\,\mathrm{kg} = \beta\,\mathrm{N}$) weiterleben.

Das mechanische Wärmeäquivalent

Der erste Hauptsatz der Wärmelehre läßt sich als allgemeine Größengleichung

$$\mathrm{d}Q = \mathrm{d}U + p\,\mathrm{d}V \quad . \;.\; .\; .\; .\; .\; .\; . \quad (9)$$

schreiben. Die drei Summanden haben die Dimension einer Energie und können in beliebigen Energieeinheiten angegeben werden, z. B. Joule, kWh, PSh, kp m, kcal, erg usw. Will man speziell $\mathrm{d}Q$ und $\mathrm{d}U$ in kcal und $p\,\mathrm{d}V$ in kp m messen, so kann man Gl. (9) in aufgespaltener Form wie folgt schreiben:

$$\{\mathrm{d}Q\}_{\mathrm{kcal}} \cdot \mathrm{kcal} = \{\mathrm{d}U\}_{\mathrm{kcal}} \cdot \mathrm{kcal} + \{p\,\mathrm{d}V\}_{\mathrm{kp\,m}} \cdot \mathrm{kp\,m} \quad (9a).$$

Zwischen den nichtkohärenten Einheiten besteht die Beziehung

$$\mathrm{kcal_{IT}} = 426{,}935\ \mathrm{kp\,m} = \frac{1}{\varepsilon}\ \mathrm{kp\,m} \quad . \;.\; .\; . \quad (10),$$

worin unter $\mathrm{kcal_{IT}}$ die internationale Tafelkalorie verstanden, und $1/\varepsilon$ als reine Zahl zur Abkürzung eingeführt sei. Damit entsteht aus Gl. (9) die Zahlenwertgleichung

$$\mathrm{d}Q = \mathrm{d}U + \varepsilon p\,\mathrm{d}V \quad . \;.\; .\; .\; .\; . \quad (11)$$

[5]) Die Indices an den geschweiften Klammern bedeuten die Einheiten, für welche die Zahlenwerte gelten.

[6]) Diese Bezugsgröße müßte nicht unbedingt zugleich eine Grundgröße sein, sie ist es jedoch im technischen wie im physikalischen Maßsystem, was zweckmäßig und konsequent ist. Wir nehmen daher an, daß mit der Wahl der Grundgrößen zugleich auch das Maß für die Stoffmenge festliegt.

[7]) Diese Bezeichnung hat auch *J. Fischer* verwendet (Hütte, 28. Aufl., Bd. I, S. 238/63, Berlin 1955).

mit $[dQ] = [dU] = \mathrm{kcal_{IT}}$ und $[p\,dV] = \mathrm{kp\,m}$. Andere Einheiten erfordern andere Zahlenwerte anstelle von ε.

In manchen Lehrbüchern der Wärmelehre, insbesondere in der älteren Literatur, findet man den ersten Hauptsatz in der Form

$$dQ = dU + Ap\,dV \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (12)$$

angegeben, worin A das mechanische Wärmeäquivalent bedeutet:

$$A = \frac{1}{426{,}935}\,\frac{\mathrm{kcal}}{\mathrm{kp\,m}} = \varepsilon\,\frac{\mathrm{kcal}}{\mathrm{kp\,m}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (13).$$

In Gl. (12) sind Wärme und Arbeit als Größen verschiedener Art aufgefaßt, die Wärme ist also als zusätzliche Grundgröße eingeführt. Um zwischen diesen Größen überhaupt eine Gleichung aufstellen zu können, bedarf es der Größe A, die zwischen den einander fremden Dimensionen ausgleicht. Auch Gl.(12) ist — ebenso wie Gl.(9) — eine allgemeine Größengleichung und zugleich ein Beispiel dafür, wie die Auswahl der Grundgrößen die Form der Gleichungen beeinflußt. Da das „Prinzip von der Erhaltung der Energie" feststellt, daß sich alle Energiearten untereinander umwandeln lassen, müssen sie auch Größen gleicher Größenart sein. Das mechanische Wärmeäquivalent ist daher eigentlich gegenstandslos geworden; seine Beibehaltung wäre nur noch historisch zu rechtfertigen.

Eine entsprechende Entwicklung haben auch die Einheiten durchgemacht. Das Kilopondmeter war und ist an die Grundeinheiten des MKS-Systems angeschlossen, die Kilokalorie war dagegen durch die Wärmekapazität des Wassers definiert. Zwischen ihnen eine eindeutige Umrechnungszahl zu ermitteln, bedeutete zugleich einen experimentellen Beweis des Energiesatzes; die Versuchsergebnisse von *J. R. Mayer*, *Joule* und anderen haben daher für die Entwicklung der Wärmelehre grundlegende Bedeutung. Inzwischen (1956) ist die internationale Tafelkalorie an die absoluten elektrischen Einheiten angeschlossen worden durch die Einheitengleichung

$$\mathrm{kcal_{IT}} = 4186{,}8 \text{ Joule}.$$

Dabei ist Joule gleich Newtonmeter gleich Wattsekunde die im MKS-System kohärente Energieeinheit. Die Definition der Kilokalorie durch die Stoffeigenschaften des Wassers ist aufgegeben. Der Zahlenwert von Gl. (10) oder (13) folgt aus der Beziehung

$$\mathrm{kcal_{IT}} = \frac{4186{,}8}{9{,}806\,65}\,\mathrm{kp\,m} = 426{,}935\,\mathrm{kp\,m}$$

und ist nicht das Ergebnis neuerer unmittelbarer Versuche.

Will man für die Wärmelehre eine eigene Festlegung der Grundgrößen (außer dem Kelvingrad) vermeiden, so muß man eine Schreibweise nach Gl. (9) benutzen. Sollen beim Zahlenrechnen nichtkohärente Einheiten verwendet werden, so erhalten (hier wie in allen Fällen) die Zahlenwertgleichungen Umrechnungsfaktoren nach Art von ε in Gl. (11). Es würde aber genügen, diese Faktoren in der Schlußgleichung anzubringen, ohne die ganze Ableitung damit zu belasten, insbesondere auch deswegen, weil z. B. Gl. (9) zum Zahlenrechnen ohnehin ungeeignet ist.

Einheiten des MKS-Systems

Schreibt man Formeln als allgemeine Größengleichungen, so hat man in der Wahl der Einheiten völlig freie Hand. Das ist besonders deswegen wichtig, weil man in der Praxis mit kohärenten Einheiten nicht in allen Fällen auskommen wird. Dennoch sollte man kohärente Einheiten soweit wie möglich anstreben und überlegen, ob man nicht einige technische Einheiten, die im MKS-System nicht kohärent sind, nach und nach aufgeben kann, insbesondere die Atmosphäre, die Kilokalorie und die Stunde. Ein solcher Einheitenwechsel wird um so einfacher sein, je weniger die Umrechnungszahlen von Eins verschieden sind, weil dann die gewohnte Größenordnung der Zahlenwerte erhalten bleibt. In der Tabelle 1 sind einige Umrechnungszahlen zwischen dem MKS- und dem technischen Einheitensystem zusammengestellt.

Diese Zahlenwerte zeigen, daß nur bei Benutzung des Kilojoule als Energieeinheit statt der Kilokalorie eine stärkere Umgewöhnung erforderlich ist, da jetzt die Zahlenwerte der

Tabelle 1. Umrechnungen zwischen MKS- und technischem Einheitensystem.

MKS-Einheit		Technische Einheit
bar = 10^5 N/m²	=	1,019 716 kp/cm²
0,980 665 bar (genau)	=	kp/cm² = at
kJ = 1 000 Joule	=	0,238 84 $\mathrm{kcal_{IT}}$
4,1868 kJ (genau)	=	$\mathrm{kcal_{IT}}$
Joule/s = Watt	=	0,859 84 $\mathrm{kcal_{IT}}$/h
1,163 Watt (genau)	=	$\mathrm{kcal_{IT}}$/h

spezifischen Wärmen und der Umwandlungswärmen (Verdampfungswärme, Schmelzwärme usw.) rund viermal so groß werden wie früher.

Die spezifische Wärme von Luft bekommt den Wert $c_p = 1{,}00_5$ kJ/kg grd anstelle von 0,240 kcal/kg grd. Damit ist das Kilojoule nicht minder anschaulich als die alte Wasserkalorie. Die meisten übrigen thermischen Größen, wie innere Energie, freie Energie, Entropie usw., treten vorwiegend als Differenzen auf, so daß die geänderten Zahlenwerte dem Benutzer nicht so stark bewußt werden. Bei der Druckeinheit bar bleiben die Zahlenwerte gegenüber dem kp/cm² fast ungeändert. Sie liegen zwischen denen in technischen und in physikalischen Atmosphären (1 bar = 750,062 Torr).

Besonders günstige Verhältnisse ergeben sich bei den auf die Zeit bezogenen thermischen Größen. Da der Zahlenwert 4186,8 von der gleichen Größenordnung wie 3600 ist, wird J/s $\approx$ kcal/h. Es bietet sich damit die Möglichkeit, bei annähernd den gewohnten Zahlenwerten die unbequeme Zeiteinheit Stunde zu beseitigen, die in der Lehre von der Wärmeübertragung besonders deswegen stört, weil in der Strömungslehre überwiegend die Sekunde gebraucht wird. Dieser glückliche Zufall wird bei Größen, wie Wärmestrom, Wärmestromdichte (Heizflächenbelastung), Wärmeleitzahl, Wärmeübergangszahl, Wärmedurchgangszahl u. a., die Einführung der MKS-Einheiten erleichtern.

Wenn auch hier ausdrücklich für eine Übergangsregelung eingetreten wird, seien damit die Schwierigkeiten der Umstellung keinesfalls überschätzt. Als das Meter gesetzliche Längeneinheit wurde und unsere Vorfahren sich von Elle und Fuß trennen mußten, ging es nicht ohne Proteste ab, die die Einführung des metrischen Systems allerdings nicht verhindert haben. Je früher auf Schulen und Hochschulen die neuen Einheiten gelehrt werden und je eher Autoren und Schriftleitungen sie anwenden, desto rascher werden sie in der Praxis Eingang finden. Der wissenschaftlich arbeitende Ingenieur wird dem technischen Maßsystem ohnehin keine Träne nachweinen.

Andere Möglichkeiten zur Lösung der Einheitenfrage

Eine andere Möglichkeit, technisches und physikalisches Maßsystem einander zu nähern, besteht in der Annahme von vier Grundgrößen für den Bereich der Mechanik: Länge, Masse, Kraft, Zeit. Ein solches System ist nach heutiger allgemeiner Ansicht überbestimmt, da drei Grundgrößen ausreichen; die vierte Grundgröße erfordert die Einführung einer zusätzlichen Ausgleichgröße im Grundgesetz der Mechanik. Im amerikanischen Schrifttum [7] wird unter der Bezeichnung „English Engineering System, New Version" neuerdings ein solches System benutzt [8], das aber für deutsche Verhältnisse nicht empfohlen werden kann.

Spezifische Größen, Dichte, Wichte, Normwichte

Ob die Stoffmenge als Größe eigener Art angesehen werden muß, ist noch strittig. In Physik und Technik ist es jedenfalls üblich, als Maß für die Stoffmenge eine ihr proportionale Größe zu nehmen, vorwiegend die Masse, das Gewicht oder das Volum. Während die Masse m — jedenfalls im Rahmen der klassischen Physik — eine unveränderliche Eigenschaft einer Stoffmenge ist, hängt das Gewicht G von der örtlichen Fallbeschleunigung g ab. Um trotzdem eindeutige Gewichtangaben machen zu können, ist die Norm-Fallbeschleunigung $g_n = 9{,}80665\ \mathrm{m/s^2}$ verabredet, womit sich das Normgewicht G_n durch folgende Gleichung definieren läßt:

$$G_n = m \cdot g_n \quad \text{(3).}$$

Da im technischen Größensystem die Kraft eine Grundgröße ist, bezieht der Ingenieur die spezifischen Stoffgrößen auf das Normgewicht. Die Zahlenangaben der Wichte eines Stoffes in einem Tabellenwerk bedeuten also nicht die örtliche Wichte $\gamma = \varrho g$, sondern stets die Normwichte $\gamma_n = \varrho g_n$, und es wäre zweckmäßig, dies auch immer durch den Index n zum Ausdruck zu bringen. Die örtliche Fallbeschleunigung auf Meereshöhe variiert zwischen Pol und Äquator um etwa $5^0/_{00}$. Andererseits ist die Wichte von Wasser oft mit 5 gültigen Ziffern angegeben. Eine solche Genauigkeit wäre ohne zusätzliche Ortsangabe sinnlos, wenn nicht die Norm-Fallbeschleunigung g_n stillschweigend vorausgesetzt, also eben die Normwichte $\gamma_n = \varrho g_n$ gemeint wäre.

Zwischen der Dichte ϱ in $\mathrm{kg/m^3}$ und der Normwichte γ_n in $\mathrm{kp/m^3}$ besteht die wichtige Beziehung, daß beide Zahlenwerte einander gleich sind, obwohl es sich um Größen verschiedener Art handelt. Es bestehen also nebeneinander die Zahlenwertgleichung[5])

$$\{\gamma_n\}_{\mathrm{kp/m^3}} = \{\varrho\}_{\mathrm{kg/m^3}} \quad \text{(4)}$$

und die allgemeine Größengleichung

$$\gamma_n = \varrho g_n \quad \text{(5).}$$

Gl. (4) beruht auf der Definition des Kilopond als dem Normgewicht des Kilogrammprototyps und damit jeder Stoffmenge mit der Masse 1 kg.

Daß gleichbenannte Größen im technischen und im physikalischen Größensystem verschieden definiert werden, zeigt sich schon an einer so elementaren Größe wie dem spezifischen Volum v. Für den Physiker ist selbstverständlich $v = 1/\varrho$, für den Ingenieur ebenso selbstverständlich $v = 1/\gamma_n$. Zur Unterscheidung (wenigstens im Rahmen unserer Betrachtung) empfehlen sich die Indices i (inertia) für auf die Masse und f (fors) für auf das Gewicht bezogene Größen. Da außerdem noch zwischen Gewicht und Normgewicht zu unterscheiden ist, kommt man zu folgender exakter Schreibweise:

$$v_i = 1/\varrho; \quad v_f = 1/\gamma; \quad v_{fn} = 1/\gamma_n.$$

Hier ist v_i eine Größe anderer Art als v_f und v_{fn}, genau wie Masse und Kraft verschiedenartige Größen sind.

Ähnliches gilt auch für die übrigen spezifischen Stoffgrößen: die spezifische Wärme, die Verdampfungswärme, die individuelle Gaskonstante, die Enthalpie usw. Sie alle werden im technischen Größensystem anders definiert als im physikalischen Größensystem. Nur ihre Zahlenwerte sind — vorausgesetzt, daß die Normgewichte in kp und die Massen in kg gemessen sind — paarweise einander gleich.

Vorschläge für eine Übergangsregelung

Kilopond als nichtkohärente Krafteinheit

Damit die allgemeinen Größengleichungen für Ingenieure und Physiker gleich lauten, ist — wie bereits festgestellt — die Benutzung gleicher Grundgrößen erforderlich, wofür nach Lage der Dinge nur die Größen Länge, Masse, Zeit für den Bereich der Mechanik in Frage kommen. Als Bezugsgröße für die spezifischen Größen dient die Masse[6]) anstelle des Normgewichts. Der Ingenieur würde damit das Größensystem des Physikers benutzen.

Da die allgemeinen Größengleichungen völlige Freiheit in der Wahl der Einheiten lassen, treten diese erst beim Zahlenrechnen, also bei der Umwandlung in Zahlenwertgleichungen in Erscheinung. Die konsequente Verwendung kohärenter Einheiten des MKS-Systems ist ein erwünschtes Endziel, das man aber wahrscheinlich erst nach einer Übergangszeit allmählich erreichen kann. Bei manchen Problemen wären kohärente Einheiten des MKS-Systems auch unpraktisch; man gibt z. B. Teilchengrößen eines bestimmten Bereichs lieber in μ als in m an und den Ausstoß einer Anlage besser in t/Tag als in kg/s.

Die im MKS-System kohärente Krafteinheit ist das Newton (N), das durch die Gleichung $\mathrm{N} = \mathrm{kg\,m/s^2}$ definiert ist. Zum Kilopond besteht die Beziehung

$$\mathrm{kp} = 9{,}80665\ \mathrm{N} = \beta\,\mathrm{N} \quad \text{(6),}$$

worin zur Abkürzung der Zahlenwert $\beta = 9{,}806\,65$ eingeführt ist[7]). In dieser Bedeutung ist das Kilopond eine nichtkohärente Krafteinheit des MKS-Systems. Es hat den Charakter der Grundeinheit verloren, bleibt aber insofern eine Einheit des metrischen Systems, als es durch einen festen Umrechnungsfaktor (β) an eine metrische Einheit (N) angeschlossen ist.

In diesem Sinne sollte das Kilopond mindestens für eine Übergangszeit beibehalten werden, ebenso die aus ihm abgeleiteten Druckeinheiten $\mathrm{kp/m^2}$ und $\mathrm{kp/cm^2} = \mathrm{at}$. Ob man nach dieser Zeit mit dem Newton als einziger Krafteinheit auskommt, braucht im Augenblick nicht entschieden zu werden. Man kann vermuten, daß bei reinen Schwerkraftproblemen, z. B. im Bereich der Statik, das Kilopond weiterhin schwer entbehrlich sein wird.

Mit dieser Regelung würde man die technischen Grundgrößen ersetzen durch die des MKS-Systems mit den Grundgrößen Länge, Masse, Zeit und den Grundeinheiten m, kg, s. Als Maß für die Stoffmenge dient die Masse. Das technische Einheitensystem würde eine Zeitlang im Kilopond (kp) als einer nichtkohärenten abgeleiteten Krafteinheit ($\mathrm{kp} = g_n \mathrm{kg} = \beta\,\mathrm{N}$) weiterleben.

Das mechanische Wärmeäquivalent

Der erste Hauptsatz der Wärmelehre läßt sich als allgemeine Größengleichung

$$\mathrm{d}Q = \mathrm{d}U + p\,\mathrm{d}V \quad \text{(9)}$$

schreiben. Die drei Summanden haben die Dimension einer Energie und können in beliebigen Energieeinheiten angegeben werden, z. B. Joule, kWh, PSh, kp m, kcal, erg usw. Will man speziell $\mathrm{d}Q$ und $\mathrm{d}U$ in kcal und $p\,\mathrm{d}V$ in kp m messen, so kann man Gl. (9) in aufgespaltener Form wie folgt schreiben:

$$\{\mathrm{d}Q\}_{\mathrm{kcal}} \cdot \mathrm{kcal} = \{\mathrm{d}U\}_{\mathrm{kcal}} \cdot \mathrm{kcal} + \{p\,\mathrm{d}V\}_{\mathrm{kp\,m}} \cdot \mathrm{kp\,m} \quad \text{(9a).}$$

Zwischen den nichtkohärenten Einheiten besteht die Beziehung

$$\mathrm{kcal_{IT}} = 426{,}935\ \mathrm{kp\,m} = \frac{1}{\varepsilon}\ \mathrm{kp\,m} \quad \text{(10),}$$

worin unter $\mathrm{kcal_{IT}}$ die internationale Tafelkalorie verstanden, und $1/\varepsilon$ als reine Zahl zur Abkürzung eingeführt sei. Damit entsteht aus Gl. (9) die Zahlenwertgleichung

$$\mathrm{d}Q = \mathrm{d}U + \varepsilon p\,\mathrm{d}V \quad \text{(11)}$$

[5]) Die Indices an den geschweiften Klammern bedeuten die Einheiten, für welche die Zahlenwerte gelten.

[6]) Diese Bezugsgröße müßte nicht unbedingt zugleich eine Grundgröße sein, sie ist es jedoch im technischen wie im physikalischen Maßsystem, was zweckmäßig und konsequent ist. Wir nehmen daher an, daß mit der Wahl der Grundgrößen zugleich auch das Maß für die Stoffmenge festliegt.

[7]) Diese Bezeichnung hat auch *J. Fischer* verwendet (Hütte, 28. Aufl., Bd. I, S. 238/63, Berlin 1955).

die benutzte Einheit anzudeuten, ist die Feststellung wichtig, daß eine solche Kennzeichnung nur für den Zahlenwert $\{\eta\}$ erlaubt ist, da die Größe η, die in Technik und Physik gleich definiert ist, von jeder Einheitenvorschrift freibleiben muß[8]). Derartig gekennzeichnete Symbole dürfen daher in Größengleichungen nicht verwandt werden.

Andererseits muß die Größengleichung (20) für beliebige Einheiten $[\eta]$ eine sinnvolle Aussage ergeben. Setzt man z. B. in Gl. (20) die Einheit $[\eta]$ = kg/m s ein, so erhält man für die Schubspannung τ die Einheit

$$[\tau] = \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}^2} = \frac{\mathrm{kg\ m/s}}{\mathrm{m}^2\,\mathrm{s}} = \left[\frac{\text{Impuls}}{\text{Fläche mal Zeit}}\right];$$

die Schubspannung läßt sich hiernach anschaulich als die Dichte eines Impulsstromes deuten, der infolge der Reibung von der Flüssigkeit an die Wand abgegeben wird.

Zwischen den Zahlenwerten $\{\eta\}_{\mathrm{kg}} = \{\eta\}_{\mathrm{kg/m\,s}}$ und $\{\eta\}_{\mathrm{kp}} = \{\eta\}_{\mathrm{kp\ s/m^2}}$ besteht gemäß der obigen Einheitenbeziehung die Umrechnungsgleichung

$$\{\eta\}_{\mathrm{kg}} = \beta\ \{\eta\}_{\mathrm{kp}}\,.$$

Will man η in Dekapoise = kg/m s in Gl. (20) einsetzen und τ in kp/m² erhalten, so ist aus der Größengleichung (20) nach der β-Merkregel die Zahlenwertgleichung

$$\beta\,\{\tau\} = \{\eta\}_{\mathrm{kg}} \left\{\frac{\mathrm{d}w}{\mathrm{d}y}\right\} \quad \text{(20a)}$$

zu bilden. Man wird jedoch die Einheit $[\eta]$ = kp s/m² dann bevorzugen, wenn unmittelbar Schubspannungen oder Drücke auszurechnen sind. Häufiger tritt die dynamische Viskosität η zusammen mit anderen Größen auf, deren Dimension die Masse enthält. Das ist z. B. bei der kinematischen Viskosität

$$\nu = \eta/\varrho \quad \text{(21)}$$

der Fall, die im technischen wie im physikalischen Größensystem durch dieselbe Gleichung (21) definiert ist. Die Dichte ϱ tritt hier nicht als Maß für eine Stoffmenge, wie etwa in der Gasgleichung (19a), sondern als Kennzeichnung der trägen Masse auf, da die kinematische Viskosität ν aus den Navier-Stokes-Gleichungen abgeleitet ist. Mit $[\eta]$ = kg/m s und $[\varrho]$ = kg/m³ ergibt sich unmittelbar ν in m²/s. Will man hier $\{\eta\}_{\mathrm{kp}}$ beibehalten, so muß man die Zahlenwertgleichung

$$\{\nu\} = \beta\ \{\eta\}_{\mathrm{kp}}/\{\varrho\} \quad \text{(21a)}$$

benutzen, wenn die übrigen Einheiten gleichbleiben. Im technischen Maßsystem wird die Größengleichung

$$\nu = g_{\mathrm{n}}\,\eta/\gamma_{\mathrm{n}} \quad \text{(21b)}$$

verwendet. In den heutigen Tabellenwerken ist η vorwiegend in Poise (oder Zentipoise) bzw. in kp s/m² angegeben. Die Einheit kg/m s = Dekapoise verdient mehr Beachtung, da sie im MKS-System kohärent ist.

Dimensionslose Kennzahlen

Ein Potenzprodukt aus physikalischen Größen, dessen Dimension Eins wird, nennt man eine dimensionslose Kennzahl. Für die Kennzahl K ergibt sich danach

$$K = \{K\} \cdot 1.$$

Der Zahlenwert $\{K\}$ ist von den verwendeten Einheiten unabhängig. Gemäß dieser Gleichung läßt sich K als Größe mit der Einheit Eins, ebenso aber auch als reine Zahl auffassen. Beide Auffassungen sind berechtigt und haben ihre Anhänger; wir bevorzugen die erstgenannte, weil K aus Größen zusammengesetzt ist und oft nach einer dieser Größen aufgelöst wird. In Zahlenwertgleichungen wird K wie die anderen Größen in $\{K\}$ verwandelt.

[8]) Beachte demgegenüber, daß v_{i} und v_{fn} verschiedenartige Größen sind.

Die Tabelle 2 enthält einige Kennzahlen der Wärmeübertragung in der Schreibweise des physikalischen und des technischen Größensystems. Außerdem ist die heute im technischen Schrifttum übliche Schreibweise angegeben.

Tabelle 2. Kennzahlen der Wärmeübertragung mit Masse und Kraft als Grundgrößen.

Kennzahl	Symbol	Grundgrößen: Länge, Masse, Zeit	Länge, Kraft, Zeit	Übliche Schreibweise (statt Spalte 3)
	1	2	3	4
Reynolds	Re	$\frac{w\,l}{\nu} = \frac{w\,l\,\varrho}{\eta}$	$\frac{w\,l\,\gamma_{\mathrm{n}}}{\eta\,g_{\mathrm{n}}}$	$\frac{w\,l\,\gamma}{\eta\,g}$
Prandtl	Pr	$\frac{\nu}{a} = \frac{\eta\,c_{\mathrm{i}}}{\lambda}$	$\frac{\eta\,c_{\mathrm{fn}}\,g_{\mathrm{n}}}{\lambda}$	$\frac{\eta\,c\,g}{\lambda}$
Grashof	Gr*)	$\frac{g\,\delta\,\Delta T\,l^3}{\nu^2} = \frac{g\,\delta\,\Delta T\,l^3\,\varrho^2}{\eta^2}$	$\frac{g\,\delta\,\Delta T\,l^3\,\gamma_{\mathrm{n}}^2}{\eta^2\,g_{\mathrm{n}}^2}$	$\frac{\delta\,\Delta T\,l^3\,\gamma^2}{\eta^2\,g}$
Stanton	St	$\frac{\alpha}{w\,\varrho\,c_{\mathrm{i}}}$	$\frac{\alpha}{w\,\gamma_{\mathrm{n}}\,c_{\mathrm{fn}}}$	$\frac{\alpha}{w\,\gamma\,c}$

*) Die thermische Ausdehnungszahl ist hier mit δ (statt wie üblich mit β) bezeichnet, um eine Verwechslung mit dem Zahlwert β = 9,806 65 zu vermeiden.

Der Vergleich zwischen Spalte 2 und 3 zeigt die Unterschiede, die aus der Verwendung verschiedener Grundgrößen entstehen. Dabei ist in Spalte 3 zwischen γ und γ_{n}, g und g_{n}, c_{i} und c_{fn} unterschieden. Läßt man die Indices weg und kürzt ferner g gegen g_{n}, wie es heute fast ausnahmslos üblich ist, so entstehen die Ausdrücke der Spalte 4, die eine Schwäche des technischen Maßsystems offenbaren. Da der Leser nicht wissen kann, ob g oder g_{n} gemeint ist, erscheinen Re und Pr von der Fallbeschleunigung abhängig, was offensichtlich falsch ist. Die Grashofzahl Gr ist nach Spalte 4 umgekehrt proportional zu g, in völligem Gegensatz zur richtigen Definition nach Spalte 2.

Will man zu Systemen mit anderen Beschleunigungen als der Fallbeschleunigung g übergehen, z. B. zu Systemen mit einer Zentrifugalbeschleunigung b, so braucht man in Spalte 2 nur g durch b zu ersetzen. Die Ausdrücke in Spalte 4 sind dafür unbrauchbar; der Benutzer hieraus abgeleiteter Gleichungen muß den Rechnungsgang mit der Beschleunigung b von Anfang an wiederholen. Es liegt auf der Hand, daß es gerade für den Lernenden schwierig ist, die physikalische Bedeutung der Kennzahlen nach Spalte 4 zu erkennen.

Naturgemäß sind die Ausdrücke der Spalte 4 als Rechenvorschriften brauchbar, solange $g/g_{\mathrm{n}} \approx 1$ ist, also bei ruhenden Systemen auf der Erde. Man muß sie dazu als Zahlenwertgleichungen auffassen, die allerdings für eine Dimensionsanalyse nur bedingt brauchbar sind. Eine solche Auffassung liegt meist nicht in der Absicht der Verfasser, zumal dimensionslose Kennzahlen gerade aus einer Dimensionsanalyse hervorgehen. Zur zahlenmäßigen Berechnung der Kennzahlen nach Spalte 2 setzt man η zweckmäßigerweise in Dekapoise = kg/m s ein, weil diese Einheit im MKS-System kohärent ist.

Rieselfilm an der senkrechten Wand

Fließt eine Flüssigkeit an einer senkrechten Wand in einem laminaren Film der Dicke s herab, so besteht zwischen dem ablaufenden Massenstrom $\dot{M}$ (bezogen auf die Einheit der Wandbreite) und der Filmdicke s die allgemeine Größengleichung

$$\dot{M} = \frac{g\,\varrho^2\,s^3}{3\,\eta} \quad \text{(22).}$$

Mit den Einheiten des MKS-Systems, wozu auch $[\eta]$ = kg/m s gehört, ergibt sich $\dot{M}$ in kg/m s.

Der Ingenieur wünscht den Normgewichtstrom $\dot{G}_{\mathrm{n}} = g_{\mathrm{n}}\,\dot{M}$ auszurechnen und setzt $\varrho = \gamma_{\mathrm{n}}/g_{\mathrm{n}}$. Er erhält dann

$$\dot{G}_n = \frac{g\,\gamma_n^2\,s^3}{3\,g_n\,\eta} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (22a).$$

Mit den Grundeinheiten m, kp, s und mit $[\eta]$ = kp s/m² ergibt sich $\dot{G}_n$ in kp/m s. Unterscheidet man nicht zwischen g und g_n, so entsteht die heute meist gebrauchte Gleichung

$$\dot{G} = \frac{\gamma^2\,s^3}{3\,\eta} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (22b),$$

in der die Fallbeschleunigung nicht vorkommt, obwohl sie die Ursache des Strömungsvorgangs ist. Durch allzu weit gehendes Kürzen wird auch hier der physikalische Tatbestand verschleiert. Daran ändert auch der Einwand nichts, daß auf der Erdoberfläche g nur wenige Promille von g_n abweicht. Nur als Zahlenwertgleichung für das technische Einheitensystem ist Gl. (22b) zur Berechnung von $\dot{G}$ im Schwerkraftfeld brauchbar.

Diese Beispiele sollten zeigen, daß sich die allgemeinen Größengleichungen im physikalischen und im technischen Größensystem voneinander unterscheiden und daß die heute übliche Schreibweise oft zu mißverständlichen Ausdrücken führt. An einigen Fällen wurde demonstriert, wie das Kilopond als nichtkohärente Krafteinheit und die Kilokalorie als nichtkohärente Energieeinheit des MKS-Einheitensystems weiterverwendet werden können, was mindestens für eine Übergangszeit erforderlich sein dürfte.

Schlußbetrachtungen

Eine Formelsprache zu besitzen, die für das ganze Gebiet der Naturwissenschaften und der Technik gilt, würde der übertriebenen Spezialisierung entgegen wirken und das Eindringen in Randgebiete erleichtern. Eine unmißverständliche und widerspruchsfreie Formelsprache setzt voraus, daß die Größen einheitlich definiert sind. Dazu müssen in allen Fachgebieten die gleichen Grundgrößen verwandt werden. Das technische Größensystem mit den Grundgrößen Länge, Kraft und Zeit hat zur Folge, daß die Technik (und nur diese) ihre eigene Formelsprache verwendet. Angesichts einer zunehmenden Verflechtung der Einzeldisziplinen sollte dieser störende Brauch so schnell wie möglich aufgegeben und auch in der Technik das physikalische Größensystem mit den Grundgrößen Länge, Masse und Zeit verwendet werden. Dazu gehört auch, daß die spezifischen Größen auf die Masse bezogen werden.

Da allgemeine Größengleichungen von der späteren Wahl der Einheiten ganz unabhängig sind, lassen sich ohne Schwierigkeit im MKS-System nichtkohärente Einheiten weiterverwenden, mindestens für eine Übergangszeit, z. B. das Kilopond und die Kilokalorie. Die entsprechenden Zahlenwertgleichungen lassen sich leicht aus den Größengleichungen ableiten, für das Kilopond z. B. mit Hilfe der β-Merkregel. Daß die technische Krafteinheit nicht mehr Kilogramm heißen darf, ist selbstverständliche Voraussetzung. Bis zur internationalen Regelung sollte man in Deutschland das Kilopond verwenden.

Als E n d z i e l ist die möglichst weitgehende Verwendung der im MKS-System kohärenten Einheiten anzusehen, also auch für die Kraft das Newton, für die Energie das Joule (oder das Kilojoule) und für den Druck das bar. Die Gewöhnung an die neuen Zahlenwerte dürfte nach einer Übergangszeit nicht allzu schwierig sein.

Die Frage der Überschrift wird danach so beantwortet: Das technische G r ö ß e n system sollte so schnell wie möglich aufgegeben werden; das technische E i n h e i t e n system kann für eine Übergangszeit weiterbestehen, wenn auch das Kilopond keine Grundeinheit mehr ist.

BWK 431

Schrifttum

[1] Was ist das Gewicht? Eine Rundfrage des Ausschusses für Einheiten und Formelgrößen. Z. VDI Bd. 77 (1933) S. 622.

[2] *J. Wallot*: Was ist das Gewicht? Eine Entscheidung des AEF. Z. VDI Bd. 78 (1934) S. 1225/26.

[3] Maß- und Gewichtsgesetz vom 13. Dezember 1935. Reichsgesetzblatt, Teil I (1935) Nr. 142, S. 1499/1508.

[4] Über die Größenlehre seien folgende neuere Bücher genannt:
E. Bodea: Giorgis rationales MKS-Maßsystem mit Dimensionskohärenz. Basel 1949.
U. Stille: Messen und Rechnen in der Physik. Braunschweig 1955.
G. Oberdorfer: Die Maßsysteme in Physik und Technik. Wien 1956.
J. Wallot: Größengleichungen, Einheiten und Dimensionen. 2. Aufl., Leipzig 1957.

[5] DIN 1313, Schreibweise physikalischer Gleichungen (Nov. 1931).

[6] *E. Flegler*: Warum Größengleichungen? Z. VDI Bd. 94 (1952) S. 928 bis 934.
Derselbe: Beispiele für zugeschnittene Größengleichungen. Z. VDI Bd. 94 (1952) S. 1009/12.

[7] Über den verschiedenen Einheitengebrauch des angelsächsischen Schrifttums berichtet ausführlich *A. Klinkenberg* in Chem. Engng. Sci. Bd. 4 (1955) S. 130/40 u. 167/77.

[8] Folgende neuere Bücher verwenden das Vierersystem:
J. H. Perry: Chemical Engineers Handbook. 3. Aufl., New York 1953.
W. H. Mc Adams: Heat Transmission. 3. Aufl., New York 1954.
W. L. Badger u. *J. T. Banchero*: Introduction to Chemical Engineering. New York 1955.

[9] *P. Grassmann*: Zur Frage nach dem zweckmäßigsten Maßsystem. VDI-Z. Bd. 98 (1956) S. 1829/34.

DK 662.932.13 : 662.642

Neue Braunkohlen-Rostfeuerungen

Im Verwendungsgebiet mitteldeutscher und niederlausitzer Braunkohle mußten nach 1945 viele Betriebe sich von Braunkohlenbriketts auf Rohbraunkohle umstellen, da Briketts an anderer Stelle die fehlende Steinkohle zu ersetzen hatten. Neuanlagen wurden ebenfalls mehr denn je für Rohbraunkohle vorgesehen. Dieser Umstand hat eine lebhafte und erfolgreiche Entwicklung neuer Rostfeuerungen für Rohbraunkohle ausgelöst. So wurde der weitverbreitete M u l d e n r o s t weiter verbessert und die Konstruktion des Feuerraumes neu gelöst [1]. Roste bis zu 2 m² Fläche herab werden mit h y d r a u l i s c h e m A n t r i e b ausgerüstet.

Eine neue Entwicklung der Treppenvorschubroste brachte der J u n g k - G e g e n s c h u b r o s t mit Unterwindzonen-Einteilung mit sich. Sein besonderes Merkmal war die gegenseitige Abdichtung der nebeneinanderliegenden Rostplatten durch zwischengelegte, freibewegliche Keile und die gegenläufige Bewegung der einzelnen Rostplattenreihen [2 bis 4].

Aus dieser Konstruktion ist ein anderer Gegenschubrost hervorgegangen, der heute vom Mitteldeutschen Feuerungsbau Greiz-Dölau, Werk Weimar, hergestellt wird [1; 5; 6]. Da er von Anfang an für eine besonders aschereiche und schwierige Kohle entwickelt wurde, bereitete er später bei besserer Kohle keine grundsätzlichen Schwierigkeiten mehr. Nach anfänglichem Mißerfolg wurde eine lange R ü c k f ü h r d e c k e eingebaut, die das Flammenzentrum nach der Brennstoffaufgabe hin verlagert. Der Brennstoff wird nicht mehr vorn direkt auf den Rost gegeben, sondern er fällt über ein Wehr aus einer gewissen Höhe auf den Rost, wo er einen kleinen Wall bildet, der sich sowohl in Richtung der Brennstoffvorschubrichtung als auch rückwärts nach dem Heizerstand abböscht. Dadurch bilden sich zwei Brennkanten aus. Die dem Heizerstand zu liegende gibt das Grundfeuer ab, das sich allmählich unter die frische Kohle schiebt.

Eine wesentliche Verbesserung erbrachten die sog. A u f s t e c k p i l z e. Weil das Grundfeuer durch die gegenläufige Bewegung der Rostplatten ständig gestört wurde, erhielten die Rostplatten an ihrem hinteren Ende wulstförmige Auflagen (Aufsteckpilze), so daß die dachziegelartig darüber liegende Platte nicht in ihrer ganzen Länge auf der unteren Platte gleitet, sondern sich auf die Wulst legt und bei der Vorwärtsbewegung