12. .

Temperatur und Thermie.
Überdruck oder Differenzdruck?
Die Thermie im Gymnasialunterricht

12.1. Es ist noch das Umgehen mit denjenigen Zeichen (Namen und Symbolen) zu besprechen, die (vor allem) Terminen, Pegeln und Temperaturen zugeordnet werden:

- 3 Uhr mitteleuropäischer Zeit (MEZ), 3 Stunden nach MEZ-Null, 3 ^{h}MEZ,
- 3 Meter über Normalnull, 3 ^{m}NN,
- minus 3 Grad Celsius, 3 Grad unter Celsiusnull, - 3 °C.

Diese Zeichen sehen aus wie Größenzeichen, und zwar wie mehr oder weniger deutlich formulierte Dreifaktorenprodukte (-3 °C); und sie werden von vielen Autoren auch für Zeichen von Größen gehalten. Kienle nennt diese ausdrücklich "Skalengrößen" /6/.- Diese vermeintlichen Größen setzen einer korrekten mathematischen Behandlung auffallende, wenn meistens auch stillschweigend übergangene (und im Unterabschnitt 12.2 zu besprechende) Schwierigkeiten entgegen. Sie gehorchen nicht den Regeln des Größenkalküls und sollten deshalb auch nicht als "Größen" bezeichnet werden. Ich trennte sie deshalb in früheren Arbeiten /24, 26/ als "Skalenwerte" von den tatsächlichen Kalkülgrößen ab. - Den Namen "Skalenwert" kann ich aber nicht mehr benutzen, seit ich im ersten Teil dieser Untersuchung /27/ das Wort "Größenwert" durch den Namen "Größenausmaß" ersetzt habe, weil Größen nicht bewertet, sondern gemessen werden. Auch ˙Skalenwerte˙ (zum Beispiel "15 Uhr") werden nicht gewertet; als Punkte auf einer (einachsigen) Skala sind sie aber auch nicht meßbar; sie stehen vielmehr völlig außerhalb des Größenkalküls und dienen lediglich der Kennzeichnung von Punkten auf einer Skalenachse: "3 Uhr" und "3 h" sind punktuelle Angaben, also Namen, die wir einem Skalenpunkt (und nicht einer durch eine Strecke oder einen Pfeil abbildbaren) Größe zuordnen.

Die Diskussion der in diesem Abschnitt zu klärenden Probleme leidet darunter, daß zwei Sachen und eine Größe oft nicht deutlich genug unterschieden werden.

(1) Die erste Sache ist ein **Punkt** auf einer Skala, der zum Beispiel mit "3 h(MEZ)" bezeichnet wird ("Wir treffen uns [beispielsweise zu einer Bergbesteigung] genau um 3 Uhr [um Punkt 3 Uhr]"), oder auch ein Bereich auf der Skala ("am 3. Mai"; "im Jahre 1945"). Die Skalenpunkte und Skalenbereiche sind unbestritten Sachen (und nicht Größen).

Um nicht immer "Skalenpunkte und Skalenbereiche" sagen zu müssen, werde ich - so lange kein geeigneter zusammenfassender Obername gefunden ist - beide Sachen mit dem Namen "Skalenpunkt" bezeichnen. Das ist semantisch unbefriedigend, sollte aber vorübergehend ebenso annehmbar sein wie die ˙Gleichsetzung˙ des Ortes eines Dinges mit dem Ort seines Schwerpunkts. So wie man den Schwerpunkt eines Dinges bei vielen Betrachtungen als dessen Repräsentanten ansehen kann, kann man auch unter einem Skalenpunkt sowohl einen tatsächlichen Punkt verstehen wie auch den Repräsentanten eines Skalenbereichs. - Wesentlich für die mit dem Obernamen "Skalenpunkt" gemeinten Sachen ist nicht, ob sie selber nicht meßbar sind (wie ein geometrischer Punkt) oder ob sie selber ein meßbares Ausmaß haben (wie ein Bereich); wesentlich ist vielmehr, daß sie als Sachen (und nicht als Größen) gemeint sind, daß also zum Beispiel die Terminangabe "15. Mai" die Sache "15. Mai" meint und nicht die Größe "134 Tagesdauern", die (in einem Nichtschaltjahr) zwischen dem Jahresbeginn und dem 15. Mai liegt.

Das Wort "Tag" sollte - bei sorgfältiger terminologischer Differenzierung - nur eine Sache meinen (wie zum Beispiel in der Aussage "Heute ist ein schöner Tag"), und zwar gleichgültig, wie wir diese definieren. Diese Forderung wird nicht dadurch widerlegt, daß wir an Stelle des Namens "Tagesdauer im allgemeinen nur das Wort "Tag" benutzen und dieses dann wie einen Einheitennamen gebrauchen ("Die

Sommerspiele dauern 10 Tage"). - Entsprechend ist zum Beispiel auch die Sache "Jahr" etwas anderes als die Dauer eines Jahres, die im allgemeinen ebenfalls nur als "Jahr" bezeichnet wird.

Symbole der Art "3 hMEZ" ordne ich im Folgenden ausschließlich den Skalenpunkten selbst zu und nicht den Größen, die den Abstand eines Skalenpunkts vom Skalennullpunkt angeben.

(2) Die zweite Sache ist der **Koordinatenpfeil**, das heißt: der Pfeil zwischen den Skalenpunkten "0 hMEZ" und "3 hMEZ". Dabei ist wesentlich, daß dieser Pfeil im Nullpunkt der Skala "verankert" ist. Der Pfeil kann von diesem Punkt aus sowohl zum positiven wie auch zum negativen Pol der Zeitachse weisen (nach/vor Mitternacht; nach/vor Christi Geburt) und ist eben deshalb ein (orientierter) Pfeil und nicht eine Strecke. - Ich werde diesen Pfeil ausdrücklich "Koordinatenpfeil" (und nicht einfach "Koordinate") nennen.

(3) Die **physikalische Größe** ist das von der Länge dieses Pfeils dargestellte Ausmaß des zeitlichen Abstands der Termine "0hMEZ" und "3 hMEZ", also die **Dauer** "3 Stunden" (3 h). Ich bezeichne diesen Abstand ausdrücklich als "Koordinatengröße" (und nicht ebenfalls nur als "Koordinate"). Diese Größe kennzeichnet nur das Ausmaß der vom Koordinatenpfeil dargestellten Größe und hat nichts damit zu tun, daß der Koordinatenpfeil im Nullpunkt der Skala verankert ist. Wird ein (Axor-)Pfeil auf der Skalenachse verschoben, ändert sich nicht sein Ausmaß, sondern nur seine Stelle (sein nichtpunktueller Ort) auf der Achse. - Die Verhältnisse liegen hier völlig gleich wie bei den - im Abschnitt 8 nicht erwähnten - **Ortsvektoren**, die ebenfalls im Koordinatenursprung verankert sind. Auch von einem Ortsvektor geht in eine Rechnung nur sein Ausmaß (und sein Anstiegswinkel beziehungsweise dessen Winkelfunktion) ein, nicht aber seine Bindung an einen bestimmten Nullpunkt. Man kann deshalb die (auf der Skalenachse liegende) Koordinatengröße auch als "**Ortsaxor**" bezeichnen.

Gegen die Zuordnung von Symbolen der Art "3 hMEZ" zu Skalenpunkten (und nicht zu Koordinatengrößen) könnte eingewendet werden, daß zur Kennzeichnung von Skalenpunkten implizit Größen verwendet werden (3 Stunden) und diese Symbole deshalb doch «Skalengrößen» kennzeichnen. Ein solcher Einwand wäre nicht stichhaltig, weil zur Kennzeichnung eines Skalenpunkts meistens zwar wohl eine Größe mit verwendet wird, diese Größe aber nur eine von drei Konstituenten der Skalenpunktbezeichnung ist: 3 Stunden (und nicht 5 Stunden) nach (und nicht vor) Mitternacht (und nicht Mittag), 3 hMEZ.

Um zu begründen, warum in Skalenpunktbezeichnungen fast immer Größenangaben enthalten sind, mache ich die beiden folgenden Anmerkungen.

(1) In Skalenpunktkennzeichen brauchen grundsätzlich keine Größenangaben enthalten zu sein. Man kann auch verabreden "am ersten Sonntag nach dem ersten Frühlingsvollmond"; "wenn (an einem bestimmten Tag) die Sonne am höchsten steht"; "wenn der Schatten eines bestimmten Stabes 3 m lang ist"; "wenn der Hahn zum dritten Mal kräht"; "wenn der Wasserstand eine bestimmte Pegelmarke (einen bestimmten Strich auf der Pegellatte) erreicht"; "wenn Wasser erstarrt"; "wenn Zinn schmilzt". Bei der Festlegung der Skalennullpunkte kann man gar nicht anders verfahren: 0 hMEZ ist der Termin, zu dem die Sonne im Mitternachtsmeridian von Görlitz steht; 0 mNN ist der Pegel des (in bestimmter Weise definierten) Meerwasserspiegels in Amsterdam; 0 °C ist die Temperatur, bei der (reinstes) Wasser erstarrt. - In den so definierten Skalenpunkten kommt eine Größenangabe nicht einmal andeutungsweise vor.

(2) Es ist nicht möglich, beliebige Termine, Pegel und Temperaturen auf eine derartige Weise zu kennzeichnen. Sehr einfach ist es dagegen, solche Angaben nach der Festlegung eines Skalennullpunktes unter Heranziehung von Größenangaben zu machen: "3 Stunden nach dem Durchgang der Sonne durch den Mitternachtsmeridian", "3 Meter über Normalnull", "3 Grad unter Celsiusnull (unter der Erstarrungstemperatur von Wasser)". In diesen Fällen wird also der

jeweilige Skalenpunkt durch das schon angedeutete Kombinat dreier Angaben gekennzeichnet: durch die Angabe eines Sagittars (zum Beispiel "3 Stunden"), einer Relation ("nach") und eines Nullpunkts ("MEZ-Null", im allgemeinen verkürzt zu "MEZ"). Die Größenangabe wird also gemacht, damit sie im Verein mit der Relations- und der Nullpunktangabe einen Skalenpunkt bezeichne. Und es wird nicht eine Skalenpunktangabe gemacht, damit diese eine im Größenkalkül behandelbare Größe kennzeichne.

Bevor ich im einzelnen zeigen kann, wie die angedeuteten Schwierigkeiten vermieden werden können, sind diese selbst näher zu beschreiben.

12.2. (1) Eine Größe, zum Beispiel die Länge eines Stabes, kann in verschiedenen Bezugsgrößen (Einheiten) angegeben werden, weil zwischen dem Ausmaßfaktor einerseits und dem Ausmaß der Bezugsgröße andererseits eine gegenläufige Beziehung besteht:

(12.1) $3\ \mathrm{m} = (100 \cdot 3) \cdot (1/100)\ \mathrm{m} = 300\ \mathrm{cm}$

(«Invarianz einer Größe gegenüber einem Einheitenwechsel»).

Werden die beiden Größen in der Gleichung "3 m = 300 cm" mit ein und derselben Zahl multipliziert, ergibt sich wieder eine Gleichung, weil Gleiches mit Gleichem multipliziert Gleiches ergibt:

(12.2) $2 \cdot 3\ \mathrm{m} = 2 \cdot 300\ \mathrm{cm}$.

Würde man versuchen, zwei Skalenpunkte, zum Beispiel zwei Termine, die ein und demselben Ereignis zugeordnet sind, einander gleich zusetzen:,

(12.3) $3\ {}^{\mathrm{h}}\mathrm{WEZ} \stackrel{?}{=} 4\ {}^{\mathrm{h}}\mathrm{MEZ}$,

ergäbe die Multiplikation dieser 'Gleichung' mit einer Zahl eine Schriftfigur, die auf keinen Fall eine Gleichung wäre:

(12.4) $2 \cdot 3\ {}^{\mathrm{h}}\mathrm{WEZ} \neq 2 \cdot 4\ {}^{\mathrm{h}}\mathrm{MEZ}$.

Die Skalenpunktzeichen in der 'Gleichung' 12.3 können also nicht Gleiches bedeuten. Und in der Tat ist der Punkt auf der WEZ-Skala, dem das Zeichen "3 ${}^{\mathrm{h}}$WEZ" zugeordnet ist, nicht der gleiche Punkt wie der Punkt auf der MEZ-Skala, dem das Zeichen "4 ${}^{\mathrm{h}}$MEZ" zugeordnet ist. Zwei Punkte auf verschiedenen Skalen können nicht der gleiche Punkt sein. [Was tatsächlich - mit sich selbst - identisch ist, wird im Unterabschnitt 12.3(1) geklärt werden.] - Außerdem bleibt in der 'Gleichung' 12.4 offen, was das Doppelte eines (zum Beispiel) mit "3 hMEZ" bezeichneten Punktes sein soll - wohlgemerkt: das Doppelte des so bezeichneten Skalenpunkts und nicht das Doppelte des zeitlichen Abstands dieses Punktes vom Punkt "0 hMEZ".

Entsprechende Ungleichungen ergäben sich, wenn man versuchte, 'Gleichungen' zwischen Pegelangaben oder zwischen Temperaturangaben mit einer Zahl zu multiplizieren:

(12.5) $1000\ {}^{\mathrm{m}}\mathrm{NN} \stackrel{?}{=} 500\ {}^{\mathrm{m}}\mathrm{TS}(1)$ [${}^{\mathrm{m}}$TS(1): Meter über Talsohle 1],

(12.6) $2 \cdot 1000\ {}^{\mathrm{m}}\mathrm{NN} \neq 2 \cdot 500\ {}^{\mathrm{m}}\mathrm{TS}(1)$;

(12.7) $3\ °\mathrm{C} \stackrel{?}{=} 276{,}15\ °\mathrm{K}$ (°K: Grad Kelvin),

(12.8) $2 \cdot 3\ °\mathrm{C} \neq 2 \cdot 276{,}15\ °\mathrm{K}$.

Zu den letzten beiden Gleichungen ist Folgendes anzumerken. In den einschlägigen Normen, zum Beispiel in DIN 1301 /9/ und in DIN 1345 /19/, wird die vorstehend geschriebene ˙Einheit˙ "1 Grad Kelvin" (1 °K) in Übereinstimmung mit internationalen Vereinbarungen nicht aufgeführt. Die Einheit der sogenannten thermodynamischen Temperatur T hat normgemäß das Symbol "1 Kelvin" (1 K); die weiterhin zugelassene «Celsiustemperatur t» hat (nach wie vor) die Einheit "1 Grad Celsius" (1 °C). - Um das Problem der Skalenpunktangaben hinreichend differenziert darstellen und lösen zu können, ist es erforderlich, außer den Zeichen "1 Kelvin" und "1 K" vorübergehend auch die Zeichen "1 Grad Kelvin" und "1 °K" zu benutzen. - Die im Folgenden verwendeten Namen "Celsiusskala" und "Kelvinskala" werden in den einschlägigen Normen überhaupt nicht verwendet.

(2) Eine weitere Schwierigkeit tritt auf, wenn eines der beiden Skalenpunktzeichen wie ein Zeichen für eine Einheit aussieht; denn dann erhielte man bei einer ˙Gleichsetzung˙ von Temperaturen zum Beispiel die (der ˙Gleichung˙ 12.7 entsprechende) ˙Skalenpunktgleichung˙

(12.9) $1\ °C \overset{?}{=} 274{,}15\ °K$;

dies wäre mit der oft verwendeten Einheitengleichung

(12.10) $1\ °C \overset{?}{=} 1\ °K$

unverträglich.

Obwohl die letzten beiden ˙Gleichungen˙ nicht in Ordnung sind, können sie uns doch zu einer ersten Klärung verhelfen. - Was ist mit ihnen tatsächlich gemeint? Die ˙Gleichung˙ 12.9 soll offenbar besagen, daß der mit "1 °C" bezeichnete Punkt auf der Celsiusskala dem mit "274,15 °K" bezeichneten Punkt auf der Kelvinskala **entspricht** (Bild 12.1).

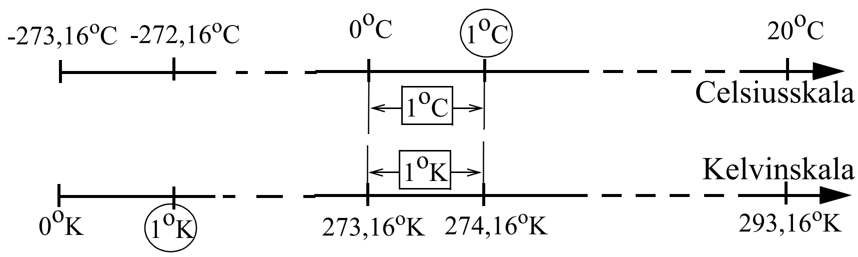

Bild 12.1. "1 °C" und "1 °K" als Symbole sowohl für zwei verschiedene, auf der Celsius- und auf der Kelvinskala als Punkte dargestellte Temperaturen wie auch für zwei als Strecken oder Pfeile darstellbare identische Größen(einheiten) - Um die miteinander identischen (und mit "1°C" beziehungsweise "1°K" bezeichneten) Einheiten ist ein Rechteck gezeichnet, während um die einander nicht entsprechenden und ebenfalls mit "1°C" beziehungsweise "1°K" bezeichneten Skalenpunkte ein Kreis gezeichnet ist.

Die Symbole "1 °C" und "274,15 °K" bezeichnen in der ˙Gleichung˙ 12.9 also **zwei Punkte** auf verschiedenen Temperaturskalen, die einander entsprechen, und nicht zwei gleiche (durch Strecken oder Pfeile abbildbare) Größen. Sie können deshalb nicht in einer Gleichheits-, sondern nur in einer Entsprechungsrelation miteinander verbunden werden. Die vermeintliche Gleichung 12.9 ist deshalb durch eine (im Größenkalkül nicht behandelbare) Entsprechung zu ersetzen:

(12.11) $1\ °C \mathrel{\widehat{=}} 274{,}15\ °K$.

Das Entsprichtzeichen in der Gleichung 12.11 hat eine Bedeutung, die über die in DIN 1302 /10/ genormte Bedeutung hinausgeht. Das genormte Zeichen, zum Beispiel in der Entsprechung "x ≙ y" (x entspricht y), hat die Bedeutung "y wird durch x dargestellt" oder "y wird durch x interpretiert": "1 cm ≙ 1 km" bedeutet "1 cm (in der topografischen Karte) entspricht 1 km (in der Natur)", "1 cm ≙ 5 m/s" bedeutet "1 cm (in einer grafischen Darstellung) entspricht einer Geschwindigkeit von 5 m/s".

Die Gleichung 12.10 soll dagegen besagen: Der mit "1 °C" symbolisierte Temperaturunterschied ist ebenso groß wie der mit "1 °K" bezeichnete (Bild 12.1).

Die früher ebenfalls benutzte Temperatureinheit "1 Grad Réaumur" (1 °R) und die (außerhalb des SI-Systems) in großen Teilen der Welt noch heute benutzte Temperatureinheit' "1 Grad Fahrenheit" (1 °F) haben andere Ausmaße als die mit "1 °C" beziehungsweise "1 °K" bezeichnete Temperatureinheit.

Obwohl die Symbole "1 °C" und "1 °K" in der Gleichung 12.10 ein und derselben Größe(neinheit) zugeordnet sind, darf doch nicht die Gleichung "1 °C = 1 °K" (12.10) geschrieben werden; diese würde im Verein mit 12.9

die Gleichung "1 °K = 274,15 °K" beziehungsweise die Gleichung "1 °C = 274,14 °C" ergeben.

Es wäre kein gangbarer Ausweg, die unzutreffende Gleichung 12.10 durch eine Entsprechung zu ersetzen: Die sich dabei ergebende Schriftfigur

(12.12) 1 °C $\overset{?}{\wedge}$ 1 °K

stünde in Widerspruch zur (zutreffenden) Entsprechung 12.11.

So lange die Symbole "1 °C" und "1 °K" in jeweils zwei verschiedenen Bedeutungen verwendet werden, müßte man auch Sätze bilden, in denen ein und dasselbe Symbol (zum Beispiel "15 °C") sowohl einer Größe (also einer meßbaren Eigenschaft) wie auch einem Skalenpunkt (also einer Sache) zugeordnet ist: "Der Temperaturunterschied zwischen den Skalenpunkten (Sachen) 30 °C und 15 °C ist die physikalische Größe (Eigenschaft) 15 °C". - Um diese Doppeldeutigkeit zu vermeiden, könnte man fordern, für Temperaturen und Temperaturdifferenzen verschiedene Einheiten zu verwenden, also zum Beispiel für die Temperaturdifferenzen die an keinen Nullpunkt gebundene Einheit "1 Kelvin" (nicht "1 Grad Kelvin"), und zu sagen "Die Temperaturdifferenz zwischen den Temperaturen 30 °C und 15 °C ist 15 Kelvin" (30 °C - 15°C=15 K). Eine Forderung dieser Art vertrüge sich aber nicht mit dem Größenkalkül, nach dem eine Größendifferenz in einer Einheit der gleichen Art anzugeben ist wie der Minuend und der Subtrahend: 30 kg - 15 kg = 15 kg. Jeder Grundschüler lernt schon, daß man nur «gleichnamige Zahlen» addieren und subtrahieren dürfe und daß das Ergebnis einer derartigen Rechnung eine wiederum «gleichbenannte Zahl» ist. Mit dieser Einsicht verträgt sich weder die vorstehende Subtraktion noch deren Umkehrung (15 K + 15 °C = 30 °C). Die Doppeldeutigkeit ist deshalb auf eine andere Weise zu beseitigen.

Das Wort "Temperaturdifferenz" steht zwischen Unkorrektheitszeichen, weil man von Temperaturen, die als Skalenpunkte verstanden werden, keine Differenz bilden kann. Die Differenz zwischen zwei Punkten ist allenfalls ein Punkt, aber nicht eine physikalische Größe. (Fragen der im Gymnasialunterricht nicht behandelten Punktgeometrie bleiben hier außer Betracht.)

Die hier in Rede stehende Doppeldeutigkeit liegt auch vor,

- wenn für Toleranzbereiche und Meßunsicherheiten Angaben der Art "350 °C ± 5 °C" gemacht werden oder

- wenn gesagt wird "Die mittlere Junitemperatur beträgt 15 °C ± 5 °C" oder
- wenn (in einem US-amerikanischen Atlas) erläutert wird "Isothermal climates: annual ranges less than 5 °C (9 °F)".

Die Angabe "15 °C" in der Aussage hinter dem zweiten Spiegelstrich ist einem Skalenpunkt zugeordnet, während die Angabe "5 °C" sowohl in dieser Aussage wie auch in der Aussage hinter dem dritten Aufzählungszeichen eine (durch eine Strecke oder einen Pfeil abbildbare) Größe bezeichnet (Bilder 12.1 und 12.2).

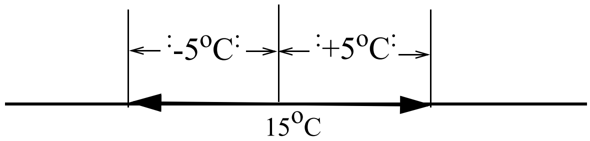

Bild 12.2. "15 °C" als Symbol für einen Skalenpunkt und "5 °C" als Symbol für eine Größe

Im Gegensatz zu der hier vertretenen Auffassung, daß Skalenpunktzeichen keine Größenzeichen sind, vertreten andere Autoren die Meinung, daß sie doch Größen bezeichnen, mit denen man nach den Regeln des Größenkalküls rechnen könne, und daß Symbole der Art "1 °C" Größeneinheiten symbolisieren. Kienle /6/ formuliert deshalb ˙Gleichungen˙ der Art

(12.13) «25 müNN + 15 müNN = 40 müNN» und

(12.14) «38 °C + 2 °C = 40 °C».

Derartige ˙Gleichungen˙ sind nicht korrekt: In allen ˙Größenangaben˙ der ˙Gleichung˙ 12.13 ist der gleiche Nullpunkt "0 müNN" (Schreibweise von Kienle) vorausgesetzt und in allen ˙Größenangaben˙ der ˙Gleichung˙ 12.14 der gleiche Nullpunkt "0 °C". Deshalb beginnen zum Beispiel die 15 müNN, die Kienle zu den 25 müNN addieren möchte, ebenfalls bei 0 müNN und nicht bei 25 müNN. Wenn man mit Skalenpunktzeichen so wie mit Größenzeichen rechnen könnte, könnte man allenfalls die ˙Gleichung˙

(12.15) 25 müNN + 15 mü (25 müNN) = 40 müNN schreiben, aber nicht die ˙Gleichung˙ 12.13.

Kienle versucht deshalb, ˙Gleichungen˙ der Art 12.13 durch Benutzung des mißverständlichen Ausdrucks "Verlegbarkeit des Nullpunkts" zu rechtfertigen. Auch für Kienle liegt der Startpol beider Summanden-Pfeile beim Punkt "0 müNN" beziehungsweise beim Punkt "0 °C"; das «Vollziehen der Addition» ist dann aber das «Hochheben und Aufsetzen» des zweiten Pfeils auf den ersten. Beim zeichnerischen Addieren wird zweifellos der zweite Axorpfeil auf der Achse verschoben; dabei darf man aber nicht übersehen, daß dieser Pfeil beim Verschieben seinen ˙Charakter˙ als Ortsaxor verliert, ihm also nicht weiterhin mit dem Symbol "15 müNN" eine Bindung an den Achsennullpunkt "0 müNN" zugesprochen werden darf. Bei der Verschiebung bleiben nur Ausmaß und Orientierung des Axors erhalten, nicht aber die Nullpunktbindung. Deshalb kann in die Rechnung wohl mit dem Axor "+15 m" eingegangen werden, nicht aber mit dem Ortsaxor, für den eine Bindung an den Nullpunkt konstitutiv ist. Da den ˙Gleichungen˙ 12.13 und 12.14 jeweils eine einzige Achsenskala zu Grund liegt, implizieren die beanstandeten ˙Gleichungen˙, daß sich der Punkt "0 müNN" sowohl an seinem tatsächlichen Ort auf der Skala befinden kann wie auch an beliebigen anderen, von der Länge des ersten Pfeils abhängigen Orten.

Von einer «Verlegbarkeit des Nullpunktes» sollte man allenfalls beim Übergang von einer Skala mit einem bestimmten Nullpunkt zu einer Skala mit einem anderen Nullpunkt sprechen, also zum Beispiel beim Übergang von der Celsiusskala zur Fahrenheitskala (aber eben nicht, wenn man nur eine einzige Skala benutzt).

Außerdem ist zu betonen, daß die in Rede stehenden Pfeile Größen abbilden und nicht ˙Skalengrößen˙ in der Bedeutung von Skalenpunkten.

(3) Auch die einschlägigen Normen, in denen die «thermodynamische Temperatur T» und die «Celsiustemperatur t» unterschieden werden, bringen keine Klarheit, sondern stiften eher weitere Verwirrungen. In ihnen wird zunächst - zu Recht - nur eine einzige, als "1 Kelvin" bezeichnete Größeneinheit definiert: «1 Kelvin ist der 273,16te Teil der thermodynamischen Temperatur des Tripelpunkts von Wasser» (13. Generalkonferenz für Maß und Gewicht [CGMP], 1967, Resolution 14; DIN 1301, Teil 1, Anhang A).

Der mit großer Genauigkeit ermittelbare Tripelpunkt von Wasser ist die Temperatur, bei der Eis. (flüssiges) Wasser und Wasserdampf bei einem Druck von 6,105 ... hPa (= 4,58 Torr) nebeneinander beständig sind. Diese Temperatur liegt bei 0,01 °C beziehungsweise 273,16 °K. - Die als Nulltemperatur der Celsiusskala dienende Erstarrungstemperatur von Wasser liegt bei Normdruck (1013 hPa) genau bei 0 °C beziehungsweise 273,15 °K.

Der Name "Erstarrungstemperatur" wird (auch in der Wissenschaftssprache) dem Namen "Gefriertemperatur" vorgezogen, weil eine Aussage der Art "Wasser erstarrt bei 0 °C" weniger merkwürdig klingt als eine Aussage der Art "Gold gefriert bei 1063 °C".

Dann aber heißt es in einer Anmerkung zum Haupttext der Norm DIN 1301: «Bei der Angabe der Celsius-Temperatur

$t = T - T_0$

mit

$T_0 = 273{,}15\ \mathrm{K}$

wird der Einheitenname Grad Celsius (Einheitenzeichen °C) als besonderer Name für das Kelvin benutzt. Eine Differenz zweier Celsius-Temperaturen darf auch in Grad Celsius angegeben werden.»

Diese Anmerkung ist dem Unverbildeten unverständlich. Dieser würde die Differenz der ˙Temperaturen˙ T und T_0 nicht mit "t", sondern mit "ΔT" symbolisieren,

(12.16) $T - T_0 = \Delta T$,

und würde diese Differenz nicht in der ˙Einheit˙ "1 ^{o}C", sondern in der Einheit "1 K" angeben:

(12.17) 293,15 K - 273,15 K = 20,00 K.

Der Unverbildete könnte nicht verstehen, warum er statt "20,00 K" "20,00 °C" schreiben sollte, wenn "Grad Celsius" nur ein anderes Wort für den Namen "Kelvin" wäre: In der Norm fehlt jeder Hinweis darauf,

- daß es verschiedene Temperaturskalen gibt (es wird auch die Celsiusskala verschwiegen),
- daß man die ˙Einheit˙ "1 °C" beibehalten möchte, weil eine Angabe der Art "20 °C" (vor allem für Nichtfachleute) praktikabler ist als eine Angabe der Art "293 K" und
- daß man mit dem Beibehalten dieser Einheit auch die Celsiusskala beibehält.

Im übrigen trägt auch wenig zur Klarheit bei, wenn einerseits gesagt wird, daß «eine Differenz zweier Celsius-Temperaturen ... auch in Grad Celsius angegeben werden (darf)», und wenn andererseits in der ‚Gleichung‘ "$t = T - T_0$" die Differenz zweier thermodynamischer Temperaturen steht.

Schwerer wiegt etwas anderes. Die Festlegung, daß die Zeichen "1 Kelvin, 1 K" und "1 Grad Celsius, 1 °C" (nur) verschiedene Zeichen für ein und denselben Begriff seien, nämlich für eine mit sich selbst identische Einheit, impliziert, daß die in dieser Einheit angegeben Größen "thermodynamische Temperatur *T*" und "Celsiustemperatur *t*" ebenfalls identisch sein müßten. Im Gegensatz dazu suggerieren sowohl die unterschiedlichen Einheitenzeichen wie auch die unterschiedlichen Größenzeichen, daß es doch ‚Temperatureinheiten‘ und ‚Temperaturen‘ zweier Arten gebe. Und tatsächlich werden mit dem Wort "Temperatur", dem nur zwei verschiedene Attribute zugefügt werden, zwei kategorial verschiedene Begriffe benannt [Unterabschnitt 12.3 (3)].

Ich habe diese Ungereimtheiten vergleichsweise ausführlich herausgestellt, um zu verhindern, daß sie weiterhin ignoriert werden. So lange sie weiter tradiert werden, zwingen sie die Lehrer, die Lernenden jeder neuen Schülergeneration so lange an sie zu gewöhnen, bis die Schüler nicht mehr merken, daß sie die Sachverhalte nach wie vor nicht wirklich verstehen.

Um das Problem des Umgehens mit Skalenpunktzeichen deutlich bewußt zu machen, beginne ich dessen Klärung mit einer Einordnung der Namen "Termin", "Pegel" und "Temperatur" in ihr jeweiliges (terminologisches) Umfeld.

12.3. (1) Der Name "**Termin**" gehört in das Umfeld des Wortes "**Zeit**". Dieses wird bis heute in mehreren Bedeutungen verwendet. Um diesen semantisch unbefriedigenden Zustand zu vermeiden, bezeichne ich als "Zeit" nur die nicht definierbare Anschauungsform (im Sinne Kants), in die für unser Anschauungsvermögen die Ereignisse und Vorgänge ‚zeitlich eingebettet‘ erscheinen. Diese Zeit fließt stetig: von der Vergangenheit über die Gegenwart in die Zukunft; sie ist unendlich und hat dem entsprechend kein meßbares Ausmaß. Man sollte deshalb von einem Vorgang nicht sagen, daß er eine bestimmte (also eine gemessene und damit meßbare) «Zeit», zum Beispiel 3 Stunden, benötige, wie das beispielsweise in dem Satz "Die Fahrzeit (Die Reaktionszeit) ‚beträgt‘ 3 Stunden" der Fall ist. Wenn wir über die Sache selbst und nicht über eine ihrer Eigenschaften reden, sagen wir zutreffend "Die Fahrt (Die chemische Reaktion) **dauert** 3 Stunden". Wir sollten deshalb, wenn wir eine Aussage über die Eigenschaft als solche machen, diese ausschließlich als "**Dauer**" (und nicht auch als "Zeit") bezeichnen: Die Fahrdauer (Die Reaktionsdauer) ist 3 Stunden. **Nur die Dauer kann** verschieden große (meßbare) Ausmaße haben und damit **in den Größenkalkül eingehen**. Für die Kalkülsprache ist deshalb auch nur der Name "Dauer" von Bedeutung. Das impliziert, daß der Name "Zeit" (und der Name "Zeitdauer") in den Normen nicht mehr als Größenname genannt werden sollte. - Für die (stetig fließende) Zeit kann nicht nur deshalb keine Dauer angegeben werden, weil sie für unsere Anschauung unendlich ist, sondern auch deshalb nicht, weil es - eben wegen der Unendlichkeit der Zeit - keine absolute Null-Zeit: gibt, von der aus die Dauer der Zeit gemessen werden könnte. Wegen des Fehlens eines naturgegebenen Zeit-Nullpunktes können vor allem auch die Ereignisse und Vorgänge nicht (ohne besondere Vereinbarungen) im Fluß der Zeit positioniert werden.

Um die Ereignisse und Vorgänge in den Ablauf der Zeit ‚zeitlich‘ einordnen zu können, ist es erforderlich, **Terminskalen** mit konventionell vereinbarten Null-Terminen zu verwenden, zum Beispiel die Terminskala mit dem Nullpunkt "0 Uhr mitteleuropäischer Zeit ($0\ ^{h}$MEZ) am 07.11.1994 nach Christi Geburt" oder die Terminskala mit dem Nullpunkt "0 Uhr westeuropäischer Zeit (0 ^{h}WEZ) am ...".

Auch ein Termin sollte nicht als eine "Zeit" bezeichnet werden, wie das beispielsweise in dem Satz "Die Abfahrtszeit (Die Ankunftszeit) ist 15 Uhr" der Fall ist. "15 Uhr" ist nicht der Name einer Zeit, sondern der eines Termins (Abfahrtstermin/Ankunftstermin).

Während die Anschauungsform "Zeit" allenfalls durch eine (beidseitig unbegrenzte) Gerade mit einem Gleitsinn (also durch einen Strahl oder eine Achse) veranschaulicht werden kann, wird eine Dauer (eine Zeitspanne) durch eine Strecke mit Gleitsinn, also durch einen Pfeil dargestellt und ein Termin (Zeitpunkt) durch einen Punkt auf einer (unbegrenzten) Terminskala (Terminachse).

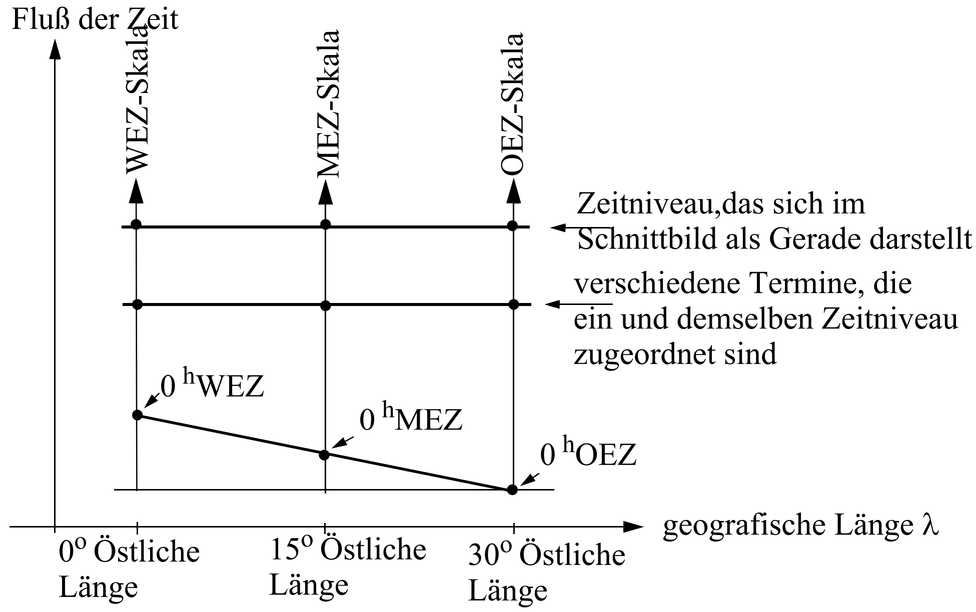

Bild 12.3. Zur Unterscheidung der Begriffe "Zeitniveau" und "Termin" - In das Koordinatensystem mit Achsen für den Fluß der Zeit und für die geografische Länge X sind einige Zeitniveaus und einige Terminskalen eingezeichnet. - Näheres im Text

Da von einem Ereignis sowohl gesagt werden kann, daß es um 4 ^{h}MEZ stattfindet, wie auch, daß es um 3 ^{h}WEZ erfolgt, tritt die Frage auf, ob die Symbole "4 ^{h}MEZ" und "3 hWEZ" den gleichen Termin kennzeichnen oder nicht. Sie kennzeichnen nicht den gleichen Termin: Das erste Symbol bezeichnet ja einen Zeitpunkt auf der MEZ-Skala, während das zweite einen Punkt auf der WEZ-Skala symbolisiert. Die beiden Symbole meinen aber ein und dieselbe, mit sich selbst identische Sache. Wie ist diese zu benennen? Die Antwort auf diese Frage finden wir, wenn wir zum geläufigen Bild des Zeitpunkts, der sich mit konstanter Geschwindigkeit durch die Zeit bewegt, ein Bild hinzunehmen, das den Sachverhalt treffender abbildet. Es bewegt sich ja nicht ein Zeitpunkt 'durch die Zeit', sondern ein Zeitniveau. Dieses erfüllt den 'Zeitraum' in dessen ganzer 'Breite'. Jedes Zeitniveau bewegt sich (bei einer quasieuklidischen Betrachtung) als eine ebene 'Zeitfläche', die sich im 'Schnittbild' als eine (quer zum Zeitablauf liegende) Gerade darstellt (Bild 12.3).

Dieses Bild verdeutlicht, daß ein und demselben Zeitniveau auf Terminskalen mit verschiedenen Nullpunkten verschiedene Termine zugeordnet sind. Nur das Zeitniveau ist - unbeschadet des physikalischen Problems, wie man die Gleichzeitigkeit zweier Ereignisse feststellen kann, die an zwei weit voneinander entfernten Orten stattfinden - mit sich selbst identisch, während die an zwei verschiedene Nulltermine gebundenen Zeitpunkte nicht miteinander identisch sind. Die Symbole "4 ^{h}MEZ" und "3 ^{h}WEZ" meinen also ein und dasselbe Zeitniveau, bezeichnen aber nicht ein und denselben Termin. Ein Termin ist gewissermaßen der Durchstoßpunkt einer (bestimmten) Terminskala durch eine Zeitniveaufläche und folglich etwas anderes als ein Zeitniveau.

Daß wir ein und demselben Zeitniveau überhaupt verschiedene Termine zuordnen, liegt bekanntlich daran, daß die Sonne auf verschiedenen geografischen Längen zu verschiedenen Zeiten ihren Höchststand erreicht (senkrecht über dem jeweiligen Mittagsmeridian steht) und daß gerade der Stand der Sonne den Ablauf unseres täglichen Lebens entscheidend mitbestimmt.

Damit können wir abschließend feststellen: Wenn wir die Sachverhalte hinreichend differenziert beschreiben wollen, brauchen wir insgesamt die Namen "Zeit", "Zeitniveau", "Termin" und "Dauer". Von diesen ist nur der letzte ein Größenname.

(2) Der Name "**Pegel**" gehört in das Umfeld des Namens "Höhe" in der (eingeschränkten) Bedeutung "**Pegelhöhe**". - So wie man ein und demselben Zeitniveau verschiedene Termine zuordnen kann, kann man ein und demselben **Höhenniveau** verschiedene Pegel (Höhenpunkte) zuordnen, zum Beispiel einen mit "500 m über Normalnull" (500 mNN) bezeichneten oder einen mit "150 m über der Talsohle 1" [150 mTS(1)] signierten (Bild 12.4).

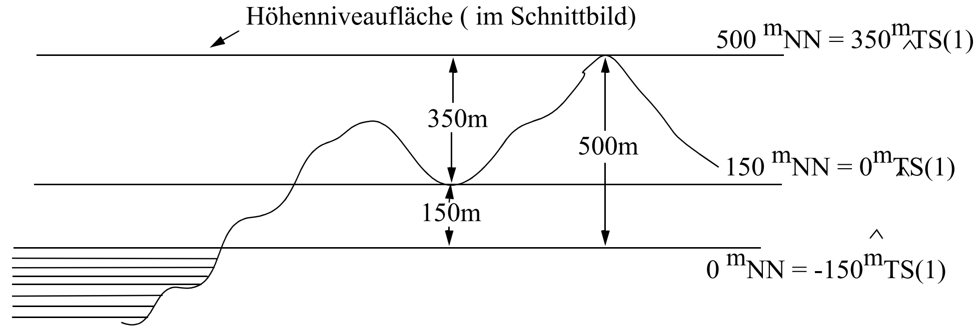

Bild 12.5. Höhenniveau und Pegel bei lokalen Betrachtungen

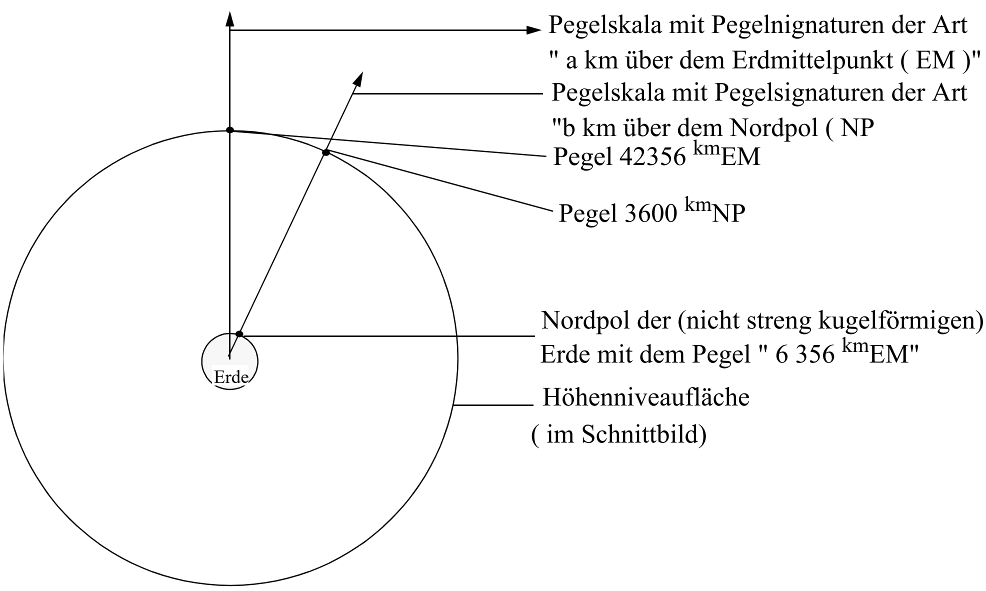

Bild 12.5. Höhenniveau und Pegel bei globalen Betrachtungen

Die Höhenniveauflächen sind - auf der global betrachteten Erde - in erster Näherung Kugelflächen, die konzentrisch um den Erdmittelpunkt angeordnet sind und die sich im Schnittbild als Kreise darstellen (Bild 12.5); bei lokalen Betrachtungen sind sie horizontal liegende Ebenen, die sich im Schnittbild als Geraden darstellen (Bild 12.4). Ein Pegel kann als Durchstoßpunkt einer (bestimmten) Pegelskala durch eine Höhenniveaufläche betrachtet werden und ist damit etwas anderes als ein Höhenniveau. - Der für regionale und lokale Betrachtungen wichtigste Pegel ist der schon bekannte, als "Normalnull" (NN) bezeichnete Pegel des mittleren Meerwasserspiegels bei Amsterdam.

Viele Staaten haben eigene Höhennullpunkte auf dem Festland, mit deren Hilfe ein sogenannter Normalhöhenpunkt (NH) festgelegt wird. - Der deutsche Normalhöhenpunkt ist bei Hoppegarten (an der Straße Berlin/Müncheberg) festgelegt. Er liegt 37 m über dem Amsterdamer Nullpegel. - Die durch den Normalhöhenpunkt eines Staates gehende Höhenniveaufläche wird als "Landeshorizont" bezeichnet.

Der dem Namen "Zeitniveau" entsprechende Name "Höhenniveau" besagt, daß dem Namen "Zeit" der Name "Höhe" entspricht. Die Entsprechung ist aber nur formaler (und nicht sachlicher) Art. Die als Strecke oder Pfeil darstellbare Höhe ist eine klar definierbare Sache, nämlich der (geometrische) Abstand zweier Höhenniveaus beziehungsweise zweier Pegel (Höhenpunkte) voneinander, während die Zeit eine nicht definierbare Anschauungsform ist. Außerdem ruht jedes auf die Erde bezogene Höhenniveau relativ zur Erde (die sich selber durch den Raum bewegt), während sich alle Zeitniveaus 'mit dem Fluß der Zeit' mitbewegen.

Die in Rechnungen eingehende Größe ist allein die Länge des geometrischen Abstandes zwischen zwei Pegeln (zum Beispiel "3 m") während die Pegelangaben (zum Beispiel "3 mNN") keine Größenangaben, sondern Zeichen für Punkte (also für Sachen) auf einer Pegelskala sind.

Da die Höhenniveauflächen (in erster Näherung) konzentrisch um den Erdmittelpunkt liegen, geht jede Gerade, auf der eine Höhenstrecke liegt, (in erster Näherung) durch den Erdmittelpunkt. Man könnte deshalb fragen, ob man nicht die Längen aller Höhen so angeben könnte, als wären sie vom Erdmittelpunkt aus gemessen, als gäbe es also auf der Erde für alle Höhenangaben einen naturgegebenen Nullpunkt. Diese Frage wäre aus meßtechnischen Gründen zu verneinen. (Man denke auch daran, daß die Erde keine geometrische Kugel ist. Außerdem erforderten die [hypothetisch] vom Erdmittelpunkt aus angegebenen Höhen zu ihrer Darstellung Zahlen mit unpraktikabel vielen Stellen; sie wären damit auch viel zu unanschaulich.) Deshalb ist es unumgänglich, mit dem Begriff des Pegels und mit bestimmten Nullpegeln, an die die Höhenangaben gebunden sind, zu arbeiten.

Damit kann festgehalten werden: Da wir nicht mit einem naturgegebenen Höhen-Nullniveau arbeiten können, benötigen wir auch im Bereich der Höhenangaben vier Namen: "Höhe", "Höhenniveau", "Pegel" und "Länge". Von diesen bezeichnet nur der letzte eine Größe.

(3) Die Namen "Termin" und "Dauer" verdeutlichen (ebenso wie die Namen "Pegel" und "[Höhen-] Länge"), daß wir auch in der Thermometrie ('Wärmelehre') nicht nur den dem Namen "Termin" entsprechenden Namen "Temperatur" benötigen, sondern auch einen eigenen Namen für die (der Dauer entsprechende) Größe, mit deren Hilfe der thermische Zustand eines Dinges oder der thermische Abstand zweier Temperaturen voneinander beschrieben wird und die zum Beispiel im Falle der Temperaturen "40 °C" und "38 °C" nach der hier vertretenen Auffassung nur mit "2 K" (und nicht auch mit "2 °C") zu bezeichnen ist. Der für diese Größe bis jetzt benutzte Name "thermodynamische Temperatur" ist semantisch unbefriedigend: Man sollte zwei Begriffe ("Celsiustemperatur t" und "thermodynamische Temperatur T'), die unter die katego-

rial verschiedenen Oberbegriffe "Sache" (Skalenpunkt) und "Eigenschaft" (Größe) fallen, nicht mit dem gleichen Wort "Temperatur" bezeichnen, dem nur zwei unterscheidende Attribute zugefügt werden. So etwas führt zu Unklarheiten und Fehldeutungen. Ich benenne die Größe deshalb seit 1968 /24/ mit dem griechisch-stämmigen Wort "**Thermie**" (Οχππιχξψ [thermos]: warm, heiß). Als Symbol dieser Größe wird (weiterhin) der Buchstabe "*T* verwendet.

Der semantisch unglücklich gewählte Name "Temperatur" (lateinisch) bedeutet wörtlich "gehörige Mischung, Zubereitung, Beschaffenheit".

Entscheidend für meine Wahl des Größennamens "Thermie" war die Tatsache, daß in allen einschlägigen zusammengesetzten Fachwörtern nur das Wort "Thermie" (und nicht auch das Wort "Temperatur") verwendet wird. Insbesondere ist daran zu erinnern, daß das Wort "Thermometer" mit dem Wort "Thermiemesser" (und nicht mit dem Wort "Temperaturmesser") zu übersetzen ist. Weitere hier zu nennende Namen sind zum Beispiel die wahllos herausgegriffenen Namen "thermische Erscheinungen", "thermische Daten", "Thermodynamik", "thermische Energie", "Thermokraft", "Thermoskop", "Thermostat", "Thermosphäre", "Isotherme", "thermisches Tief", "thermischer Aufwind", "Thermochemie", "thermische Reaktion", "thermische Dissoziation", "thermoplastisch", "Thermosflasche" und - um auch einige weniger geläufige Namen zu nennen - "carbothermische Reduktion", "Thermoisoplethen-Diagramm" und "thermischer Pinch".

Es wäre sicherlich auf weniger Widerstand gestoßen, wenn ich 1968 den geläufigen Namen "Temperatur" für die Größe gewählt und für den Skalenpunkt einen neuen Namen vorgeschlagen hätte. Ich entschied mich aber trotzdem für den semantisch geeigneten Größennamen "Thermie", da ich bei der angestrebten grundsätzlichen Klärung der noch offenen Probleme möglichst alle Gesichtspunkte, also auch semantische, berücksichtigen und mich nicht durch Fragen der Durchsetzbarkeit (Akzeptanz) von Namen beeinflussen lassen wollte. Die vorstehende Auflistung dürfte belegen, wie sehr der Name "Temperatur" das Desiderat der semantischen Konstanz verfehlt.

Zu Beginn der Thermometrie wußte man noch nicht, ob es eine absolute Nulltemperatur gibt und wie weit diese - wenn es sie gibt - zum Beispiel von der Erstarrungstemperatur von Wasser thermisch entfernt ist. Man mußte deshalb so wie bei den Terminen und Pegeln verfahren und eine Temperaturskala mit einem vereinbarten Nullpunkt einführen. Tatsächlich arbeitete man bald mit drei verschiedenen Skalen. In diesen wurden nicht nur drei verschiedene ⁚Temperatureinheiten⁚ verwendet (⁚1 °F °R, 1 °C⁚), sondern auch zwei verschiedene Nulltemperaturen; diese wurden mit drei verschiedenen Symbolen bezeichnet (0 °F, 0 °R, 0 °C). (Der Punkt "0 °R" auf der Reaumurskala entspricht dem Punkt "0 °C" auf der Celsiusskala.) Als man später erkannte, daß es eine ⁚absolute Nulltemperatur⁚ gibt und daß diese beim Punkt "-273,15 °C" liegt, wurde noch die Kelvinskala als vierte Temperaturskala eingeführt. Der Nullpunkt dieser Skala wurde mit "0 °K ("0 °abs")" bezeichnet. Die Fixtemperaturen der Celsiusskala wurden beibehalten und ebenso die Unterteilung der ⁚Temperaturspanne⁚ zwischen diesen beiden Temperaturen in 100 gleiche Teile. Die mit "1 °K" bezeichnete ⁚Einheit⁚ war also mit der ⁚Einheit⁚ "1 °C" identisch. Damit lag (und liegt) die Erstarrungstemperatur von Wasser bei 273,15 °K und die Siedetemperatur bei 373,15 °K. - Man konnte (und kann) nun nicht nur sagen "Die Erstarrungstemperatur von Wasser ist 0 °C", sondern auch "Die Erstarrungstemperatur von Wasser ist 273,15 °K".

Es wurde also nicht eine neue ⁚Temperatureinheit⁚ eingeführt, sondern (nur) ein neues Zeichen für die schon verwendete und mit "1 °C" bezeichnete Einheit. Neu eingeführt wurde eine Skala mit einem neuen, und zwar naturgegebenen Nullpunkt.

Würde man nur mit der Kelvinskala arbeiten, könnte man an Stelle von Angaben der Art "20 °C" (die nicht nur im Alltagsleben viel verwendet werden) nur die etwas weniger praktikablen Angaben der Art "293 K" machen. Das wollte man offenbar vermeiden und ließ die Verwendung des ˙Einheitenzeichens˙ "1 °C" weiterhin zu. Diese Regelung sollte korrigiert werden: Um Temperaturangaben mit praktikablen Zahlen machen zu können, ist es nicht erforderlich, neben der Einheit "1 Kelvin" noch eine ˙Einheit˙ "1 °C" beizubehalten; erforderlich ist vielmehr, die (in den Normen nicht erwähnte) Celsiustemperaturskala beizubehalten, aber den Skalenstrichen nicht Temperaturzeichen der Art "3 °C", sondern Zeichen für **Celsiusdifferenzthermien** (also Zeichen der Art "3 K") zuzuordnen. - Als "Celsiusdifferenzthermie" wird diejenige Differenzthermie bezeichnet, deren Subtrahend die Erstarrungsthermie von Wasser (273,15 K) ist. Wenn diese mit "ΔT_c" bezeichnet wird, geht eine ˙Gleichung˙ der Art

(12.18) t (Wasserportion 1) = 20 °C über in die Gleichung

(12.19) ΔT_c (Wasserportion 1) = 20 K.

Diese ist also zu lesen: Die Celsiusdifferenzthermie der Wasserportion 1 ist 20 Kelvin.

Der Wunsch, mit praktikabel kleinen Zahlen arbeiten zu können, kann also auch durch eine größtentheoretisch einwandfreie Gleichung erfüllt werden.

Die Verwendung des Namen "Celsiusdifferenzthermie" und des Zeichen "ΔT_c" ist insofern annehmbar, als wir Anders Celsius (1701 bis 1744) die Wahl der beiden wichtigsten Fixtemperaturen und die Unterteilung des Abstandes dieser beiden Temperaturen in 100 Teile verdanken. Aber sie ist insofern bedenklich, als Celsius der Erstarrungstemperatur von Wasser meines Wissens nicht das Symbol "0 °", sondern das Symbol "100 °" zuordnete. Die heute gültige Zuordnung schlug meines Wissens Karl von Linne (1707 bis 1778) vor.

Die Celsiusdifferenzthermie ΔT_c ist eine Relationsgröße - so wie auch die Celsiustemperatur t, wenn diese (nicht als Skalenpunktbezeichnung, sondern) als Größe gemeint ist. Im Index eines Symbols für eine sachgebunden angegebene Relationsgröße sind zwei Sachsymbole (und nicht nur eines) zu notieren:

(12.20) T (Wasserportion 1) - T (erstarrendes Wasser) =
ΔT (Wasserportion 1/erstarrendes Wasser).

Diese Gleichung macht deutlich, daß die Symbole beider Sachen beim Symbol für die sachgebunden angegebene Differenzgröße zu notieren sind. Dieser Forderung wird die ˙Gleichung˙ 12.18 nicht gerecht. In dieser steht das eine Sachsymbol ("Wasserportion 1") beim Zeichen für die sachgebundenen angegebene Größe und das andere ("0") beim Symbol für die einheitengebunden angegebene Größe.

Zur Verwendung des Symbols "ΔT_c" ist noch Folgendes anzumerken. Die Sache "erstarrendes Wasser" ist vergleichsweise oft zu notieren; es ist deshalb zweckmäßig, für sie in einem ersten Schritt ein möglichst einfaches Symbol (wie den hier verwendeten Buchstaben "C") einzuführen,

(12.21) ΔT (Wasserportion 1/erstarrendes Wasser) -› ΔT (Wasserportion 1/C),

und in einem zweiten Schritt dieses Symbol aus der Klammer zu nehmen und (tiefgestellt) unmittelbar an das Größenzeichen zu schreiben:

(12.22) ΔT (Wasserportion 1/C) -› ΔT_c (Wasserportion 1).

Erst das letzte Symbol entspricht dem zugehörigen, zwanglos zu bildenden Namen "Celsiusdifferenzthermie".

Mit der hier vorgeschlagenen Schreib- und Sprechweise kann vermieden werden, daß ein Symbol der Art "20 °C" in zwei Bedeutungen verwendet wird: Dieses symbolisiert ja einerseits bei Verwendung der Celsiusskala nach wie vor den Skalenpunkt, der 20 K ("20 Grad") vom Nullpunkt der Celsiusskala thermisch entfernt ist, und andererseits - nach der heute gültigen normativen Festlegung - auch den thermischen Abstand aller Temperaturpaare, die thermisch 20 K voneinander entfernt sind - also gleichgültig wo diese auf der Skala positioniert sind.

Die Schreibweise der Gleichung 12.19 kann auch im Falle einer Gleichung der Art

(12.23) $\Delta T_c(38\ °C) + 2\ K = \Delta T_c(40\ °C)$

angewendet werden. Diese besagt (in erster Näherung): Wenn sich die Celsiusdifferenzthermie, der die Temperatur "38 °C" zugeordnet ist, um 2 K vergrößert, ergibt sich die Celsiusdifferenzthermie, der die Temperatur "40 °C" zugeordnet ist. "$\Delta T_c(38\ °C)$" steht also nicht für "38 °C", sondern für "38 K", so daß sich als Gleichung mit den einheitengebunden angegebenen Größen nicht die Gleichung 12.14 ergibt, sondern die Gleichung

(12.24) $38\ K + 2\ K = 40\ K$,

also die Gleichung, mit der auch jeder Laie - unbewußt - größtentheoretisch zutreffend rechnet. Er sagt nur nicht "Kelvin", sondern "Grad" (38 Grad + 2 Grad = 40 Grad) und ist sich wohl nicht bewußt, daß die 38 Grad und die 40 Grad seiner Rechnung nicht Eigenschafts-, sondern Relationsgrößen sind, daß also beispielsweise das Symbol "38 Grad" nicht einer bestimmten Thermie $T(1)$, sondern einer bestimmten Differenzthermie $\Delta T(1)$ zugeordnet ist. - Die kompliziert erscheinenden Verhältnisse sind in Wahrheit so einfach, daß in der Praxis niemand ernsthafte Schwierigkeiten beim Umgang mit Thermien hat. Schwierigkeiten bereitet nur die Beseitigung der tradierten Ungereimtheiten.

Das im Index einer Thermie T oder einer Celsiusdifferenzthermie ΔT_c stehende Temperatursymbol (Gleichung 12.23) meint also nicht eine Temperatur als solche, sondern eine Sache, und zwar einen thermischen Zustand, dem eine bestimmte Temperatur zugeordnet ist. Die vorstehend angeführte Lesart der Gleichung 12.23 ist also tatsächlich - wie in der Klammer gesagt - nur in erster Näherung zu verwenden; zutreffend ist sie etwa zu lesen: Wenn sich die Celsiusdifferenzthermie eines Fieberzustandes, dem wir die Temperatur "38 °C" zuordnen, um 2 K vergrößert, ergibt sich ein Fieberzustand, dem wir die Temperatur "40 °C" zuordnen.

Etwas Ähnliches ist auch im Abschnitt 8 zur Sprache gekommen. Dort bezeichnete zum Beispiel das Symbol "*cos*(a)" nach der hier vertretenen Auffassung ebenfalls nicht (im wörtlichen Sinn) den Kosinus des Winkels α, sondern das Verhältnis der Längen zweier bestimmter Seiten eines rechtwinkligen Dreiecks mit dem Winkel α.

Vorstehend wurde gesagt, daß die hier vorgeschlagene Schreibweise mit dem Symbol "ΔT_c" die Doppeldeutigkeit von Symbolen der Art "20 °C" vermeidet. Es ist aber vielleicht noch nicht deutlich genug gesagt worden, wodurch diese Doppeldeutigkeit tatsächlich vermieden wird, nämlich dadurch, daß überhaupt keine Temperaturangaben (in der Bedeutung von Skalenpunktangaben) gemacht werden. Die Aussage "Die (Celsius-)Temperatur der Wasserportion 1 ist 20 °C" ist neben der Aussage "Die Celsiusdifferenzthermie der Wasserportion 1 ist 20 K" völlig überflüssig.

Diese Aussage darf nicht übersehen lassen, daß in der Wissenschaftssprache nicht nur das Reden über Temperaturen, sondern auch das Reden über Celsiusdifferenzthermien überflüssig ist. Statt zu sagen "Die Celsiusdifferenzthermie der Wasserportion 1 ist 20 K", kann ja gesagt werden "Die Thermie der Wasserportion 1 ist 293 K". In die Rechnungen der Thermodynamik gehen seit jeher nur die Thermien (thermodynamischen Temperaturen) ein, weshalb Angaben von Celsiustemperaturen (Celsiusdifferenzthermien) seit jeher in Thermieangaben umzurechnen sind.

Ich komme noch einmal auf die in der Thermometrie benötigten Namen zurück. - Da die Namen "Thermie" und "Differenzthermie" meßbare Größen bezeichnen, sind in der Kalkülsprache Namen, die den Namen "Zeit" und "Zeitniveau" entsprechen würden, nicht erforderlich. Tatsächlich sind sie nicht einmal erlaubt, da sie - im Gegensatz zu den Namen "Zeit" und "Zeitniveau" - keinen sinnvoll denkbaren Begriffen zugeordnet werden können. Solche Namen wären allenfalls erforderlich, wenn man meinen sollte, auf Temperaturangaben weiterhin nicht verzichten zu können. Man sollte dann aber bedenken, welche Konsequenzen die Verwendung von Temperaturangaben grundsätzlich nach sich ziehen müßte. Wenn man den Hilfsbegriff der Temperatur weiterhin verwendet, ignoriert man gewissermaßen die im Verlauf der Entwicklung der Thermometrie erarbeitete Einsicht, daß die Thermie eine Größe ist, zu deren Angabe kein konventionell festgelegter Nullpunkt erforderlich ist; man geht dann gewissermaßen weiterhin von der Auffassung aus, daß wir eine Nulltemperatur vereinbaren müßten, von der aus die (den Dauern entsprechenden) Thermien angegeben werden (können). Das Beibehalten der Temperaturangaben bedeutet deshalb - wenn wir konsequenter sind, als es die Väter der Thermometrie waren - daß wir grundsätzlich auch eine der Anschauungsform "Zeit" entsprechende Quasianschauungsform konstruieren müßten; diese könnte zum Beispiel als "Wärme" bezeichnet werden. (Die Bedeutung dieses Wortes als Name der Quasianschauungsform wäre nicht definierbar.) Mit dem so bezeichneten Scheinbegriff ("Wärme") wären auch die (den Begriffen "Zeitniveau" und "Zeitniveaufläche" entsprechenden) Scheinbegriffe "Wärmeniveau" und "Wärmeniveaufläche" zu konstruieren. Die einander entsprechenden Temperaturen (˙Wärmepunkte˙, zum Beispiel 100 °C, 80 °R, 212 °F) wären gewissermaßen die Durchstoßpunkte verschiedener Temperaturskalen durch ein und dieselbe ˙Wärmeniveaufläche˙. - Diese Ausführungen dürften erkennen lassen, daß es sich bei den Namen "Wärme" und "Wärmeniveau" in der Tat um Scheinbegriffe handelt, die weder realen Sachen noch sinnvoll denkbaren Begriffen zugeordnet werden können, und daß man deshalb sorgfältig prüfen sollte, ob der Name "Temperatur" in der Wissenschaftssprache noch verwendet werden sollte.

(4) Was vorstehend zum Umgehen mit Temperaturen und Thermien gesagt wurde, gilt auch für das unkorrekte Rechnen mit Terminen und Pegeln und das größenrichtige Rechnen mit Dauern und (Höhen-) Längen. - Auch die - im Gegensatz zu den Temperaturen - unentbehrlichen Termine und Pegel gehen nicht in den Größenkalkül ein: Sie sind Bestandteil des Kontextes, nicht aber Angaben, die in der Rechnung zu berücksichtigen wären, da es für die Rechnung ohne Belang ist, wo die Start- und die Zielpole der zu addierenden Axoren liegen. Gerechnet wird ausschließlich mit Differenzdauern und Differenzlängen.

Ist zum Beispiel aus dem Abfahrtstermin "15 ^{h}MEZ" und dem Ankunftstermin " 20 ^{h}MEZ" die Fahrdauer zu errechnen, wird weder mit der ˙Gleichung˙

(12.25) $20\ ^{h}\mathrm{MEZ} - 15\ ^{h}\mathrm{MEZ} = 5\ ^{h}\mathrm{MEZ}$

noch mit der ˙Gleichung˙

(12.26) $20\ ^{h}\mathrm{MEZ} - 15\ ^{h}\mathrm{MEZ} = 5\ \mathrm{h}$

gerechnet, sondern - kalkülgerecht -ausschließlich mit der Gleichung

(12.27) $\Delta t(20\ ^{h}\mathrm{MEZ}/0\ ^{h}\mathrm{MEZ}) - \Delta t(15\ ^{h}\mathrm{MEZ}/0\ ^{h}\mathrm{MEZ}) = 20\ \mathrm{h} - 15\ \mathrm{h} = 5\ \mathrm{h}$.

Steigt ein Wasserspiegel vom Pegel "3 ^{m}NN" um 2 m auf den Pegel "5 ^{m}NN", ist entsprechend zu rechnen:

(12.28) $\Delta t(3\ ^{m}\mathrm{NN}/0\ ^{m}\mathrm{NN}) + 2\ \mathrm{m} = 3\ \mathrm{m} + 2\ \mathrm{m} = 5\ \mathrm{m}$.

Die Vorschrift für das Aufbereiten einer Skalenpunktangabe für kalkülgemäße Rechnungen ist also sehr einfach: Es ist nicht mit dem Skalenpunkt als solchem (3 K über CN, 3 h nach MEZN, 3 m über NN) zu rechnen und auch nicht mit der Koordinatengröße, also mit dem vom Skalennullpunkt bis zu dem in Rede stehenden Skalenpunkt reichenden Ortsaxor; es ist vielmehr die Nullbindung aufzugeben und nur mit dem Axor als solchem (+3 K, +3 h, +3 m) zu rechnen, also mit der Größe, die zur Kennzeichnung des Skalenpunkts mit verwendet wird. Vor dem Rechnen sind also die Übergänge

"3 K über CN --> 3 K", "3 h nach MEZN --> +3 h", "3 m über NN --> +3 m"

zu vollziehen, also - formal gesehen - die in den Skalenpunktangaben enthaltenen Nullpunktbindungen einfach wegzulassen.

12.4. Es ist also angebracht, in der Wissenschaftssprache ebenso von Temperaturangaben zu Angaben von Differenzthermien überzugehen, wie man schon vor einigen Jahrzehnten bei den Drücken von Angaben der Art "p(1) = 4 atü" (zunächst) zu Angaben der Art "$p_{ü}(1)$ = 4 atm" übergegangen ist (p: Druck; $p_{ü}$: Überdruck; atm: Atmosphäre; atü: Atmosphäre Überdruck).

Die normgemäße Pluralform "Drücke" klingt vielleicht ungewohnt, ist aber durchaus auch Duden-gemäß. Die gewohnte Pluralform "Drucke" wird nach Duden nur in Wörtern wie "Farbdrucke" und "Stoffdrucke" verwendet.

Gemäß DIN 1314 /15/ ist heute statt "$p_{ü}$" zu schreiben "p_e" (e: excedens [lateinisch], überschreitend; p_e: den Umgebungsdruck übersteigender Druck). Wenn wir semantisch konsequent sein wollen, müssen wir statt "p_e" "ΔP_e" schreiben (über den Umgebungsdruck hinausgehender Differenzdruck).

Außerdem ist heute nicht mehr die Einheit "1 atm" zu verwenden, sondern die SI-Einheit "1Pascal" (1 Pa) oder eine Zehnerpotenz dieser Einheit, zum Beispiel
10^5 Pa = 1 bar. Die Umrechnungsbeziehung lautet: 1 atm = 1,013 • 10^5 Pa = 1,013 bar.

Symbole der Art "4 atü" und "5 ata" (ata Atmosphäre absolut) kennzeichneten zwei einander entsprechende Punkte auf Skalen mit verschiedenen Nulldrücken und nicht einheitengebunden angegebenen Größen.

Eine entsprechende Indexverschiebung setzte sich auch bei elektrischen Größen durch. Sagte man früher zum Beispiel in unangemessener Weise "Die Spannung ist 220 Volt effektiv" (U = 220 V_{eff}), so sagt man seit einigen Jahrzehnten zutreffend "Die Effektivspannung ist 220 Volt" (U_{eff} = 220 V).

So erfreulich die erforderliche und jetzt in der Norm verankerte Indexverschiebung ist, so mißglückt scheint mir in der Norm eine semantische Regelung zu sein. Ich muß deshalb auf diese noch eingehen. - In der Norm wird - offenbar wieder der Kürze des Ausdrucks wegen - nicht nur das Zeichen "Δpe" vermieden, sondern auch festgelegt, daß (an Stelle des vorstehend benutzten Wortes "Differenzdruck") nur das Wort "Überdruck" und nicht auch das Wort "Unterdruck" zu verwenden sei. (Wenn Mißverständnisse nicht zu befürchten sind - wie bei den in /15/ als Beispiele angeführten Wörtern "Blutdruck" und "Reifendruck" -, kann gemäß der Norm an Stelle des Namens "Überdruck" auch das Wort "Druck" allein verwendet werden.) In einer Anmerkung wird ausdrücklich gesagt, daß das Wort "Unterdruck" «nicht mehr als Benennung einer Größe, sondern nur noch für die qualitative Bezeichnung eines Zustandes verwendet werden (darf). Beispiele: "Unterdruckkammer"; "Im Saugrohr herrscht Unterdruck"».

Diese Festlegung ist ein weiterer Beleg für den oft zu unbekümmerten Umgang mit unserer Sprache. - Wenn man das Wort "Überdruck" als differenzierenden Größennamen zuläßt, kann man den sprachlich zugehörigen (ebenfalls differenzierenden) Größennamen "Unterdruck" nicht von der Verwendung ausschließen. Ein solcher Ausschluß ist nicht nur sprachlich nicht zu rechtfertigen; er zwingt auch zu merkwürdigen Konsequenzen. So dürfte man zum Beispiel nicht mehr sagen "Der Unterdruck 'beträgt' 0,5 bar" sondern nur noch "Der Überdruck 'beträgt' - 0,5 bar". (Im übrigen kann man wohl nicht ausschließen, daß das Wort "Unterdruck" in Sätzen der Art "Im Saugrohr herrscht Unterdruck" als Name einer Größe aufgefaßt wird.) - Eine ganz andere Frage ist es, ob man in der Kalkülsprache überhaupt Namen wie "Überdruck" und "Unterdruck" verwenden sollte. Es ist nämlich sicherlich zweckmäßiger, in der Kalkülsprache nur undifferenziert von "Differenzdruck" zu sprechen. Dieser Größenname läßt - im Gegensatz zu den Namen "Überdruck" und "Unterdruck" -

(1) offen, ob der Differenzdruck hinsichtlich eines Bezugsänderungssinns positiv oder negativ orientiert ist; er überläßt die Auskunft über die Orientierung der einheitengebundenen Angabe des Differenzdrucks:

(12.29) $\Delta pe(1) = +3$ bar,

(12.30) $\Delta pe(2) = -0{,}5$ bar.

Und dieser Name schützt uns (2) davor, einen der beiden (grundsätzlich nur alternativ anwendbaren) Namen "Überdruck" und "Unterdruck" auch als Obernamen für beide Namen zu verwenden ("Der Überdruck ist - 0,5 bar") und uns damit nicht gerade rational auszudrücken. Außerdem würde die Verwendung des Wortes "Differenz" zur Vereinheitlichung und damit auch zum besseren Verständnis der Kalkülsprache beitragen. - Diese Ausführungen können bewußt machen, daß wir

(1) selbst dann, wenn es sich nicht um tatsächliche Alternativen handelt, oft so sprechen, als hätten wir es mit Alternativen zu tun (schnell/langsam, lang/kurz, groß/klein, ...), und daß wir

(2) einen der beiden pseudoalternativen Eigenschaftsnamen zu einem Namen substantivieren, der die beiden Gegensätze umfassen soll: Wir sprechen in der Fachsprache nur von "Geschwindigkeit", auch wenn die Bewegung nicht geschwind, sondern langsam erfolgt, und von Länge, auch wenn das Ding nicht lang, sondern kurz ist. Das hat auch zur Konsequenz, daß es nicht nur große Größen gibt (10 Tonnen), sondern - zur unausbleiblichen Erheiterung der Schüler im Physikanfangsunterricht - auch kleine Größen (1 Milligramm).

Um zu verdeutlichen, daß es sich hier nicht um eine pedantische Spitzfindigkeit, sondern um die Rationalität unserer Fachsprache handelt, sei ein aus der Alltagssprache bekanntes Beispiel angeführt.

Wenn wir von der **Sache** "Milch" sprechen, können wir zum Beispiel sagen "Die Milch 1 ist fettreich" und "Die Milch 2 ist fettarm". In Aussagen über die angesprochene **Eigenschaft** der

Milch müßte man demnach sagen "Der Fettreichtum der Milch 1 ist groß" beziehungsweise "Die Fettarmut der Milch 2 ist groß". Da der zweite Satz sehr merkwürdig klingt (und oft erst beim zweiten Lesen verstanden wird), sagt man lieber "Der Fettreichtum der Milch 2 ist klein" (und verdrängt damit das Wort "Fettarmut"). Im letzten Satz klingt wiederum merkwürdig, daß ein Reichtum klein sein soll. - Wollen wir uns sprachlich und sachlich einwandfrei ausdrücken, dürfen wir weder für ein und dieselbe Eigenschaft der Milch, nämlich für die Eigenschaft, (mehr oder weniger viel) Fett zu enthalten beziehungsweise (mehr oder weniger) f**etthaltig** zu sein, zwei verschiedene Namen ("Fettreichtum/Fettarmut") verwenden, noch dürfen wir dieser Eigenschaft einen Namen zuordnen, mit dem nur eines der beiden ˙Extremausmaße˙ bezeichnet werden sollte ("Reichtum"). Es ist also nur ein einziger Name zu verwenden, aber eben ein Name, der nicht von sich aus schon auf ein ˙Extremausmaß˙ hinweist. Ein solcher Name ist der Name "**Fettgehalt**": "Der Fettgehalt der Milch 1 ist groß"; "Der Fettgehalt der Milch 2 ist klein". Das (grammatische) Subjekt dieser Aussage ist hinsichtlich des Eigenschaftsausmaßes neutral; erst im (grammatischen) Prädikat wird gesagt, ob die Eigenschaft groß oder klein ist, ob also zum Beispiel der Fettgehalt der Milch 1 gleich 4 Prozent ist oder der der Milch 2 gleich 0,5 Prozent.

Dieses Beispiel kann erahnen lassen, daß wir von einer durchrationalisierten Fachsprache noch weit entfernt sind, in der auch Namen wie "Länge" und "Größe" (die von Namen abgeleitet sind, die nur eines von zwei ˙Extremausmaßen˙ [lang/kurz; groß/klein] bezeichnen) durch ˙Ausmaß-neutrale˙ Namen ersetzt sind.

Ich merke auch noch Folgendes an. - Ich plädiere hier nicht dafür, daß Namen wie "Fettreichtum", "Überdruck" und "Überthermie" überhaupt nicht mehr verwendet werden sollten; ich plädieren vielmehr dafür, daß es dann, wenn diese Namen zugelassen werden, auch erlaubt sein muß, von "Fettarmut", "Unterdruck" und "Unterthermie" zu sprechen.

12.5. Nach den vorstehenden, vorwiegend fachlichen Überlegungen ist noch zu besprechen, wie die Thermie im Unterricht eingeführt und behandelt werden kann.

(1) Der Begriff und der Name "Thermie" können zum Beispiel - wie vorstehend geschehen - in Analogie zum Begriff und zum Namen "Dauer" eingeführt werden. Die Einführung sollte so früh wie möglich erfolgen, damit das von den Schülern sicherlich in den Unterricht mitgebrachte Wort "Temperatur" bald nicht mehr verwendet werden muß. - Das Nichtweiterverwenden dieses Wortes würde die Schüler sprachlich nicht belasten: Wenn diese gelernt haben, mit Differenzgrößen umzugehen, verstehen sie die Aussage "Die Celsiusdifferenzthermie siedenden Wassers ist 100 Kelvin" [ΔT_c (siedendes Wasser) = 100 K] nicht weniger gut als die Aussage "Die Temperatur siedenden Wassers ist 100 Grad Celsius" [t (siedendes Wasser) = 100 °C].

(2) Auch die (bei der angestrebten Unterrichtsführung erforderliche) Benutzung von Thermometern, von denen Thermien und Differenzthermien (und nicht Temperaturen) abgelesen werden, ist kein Problem, da die Gradeinteilung auf dem Thermiemesser in grundsätzlich gleicher Weise erfolgt wie auf dem (vermeintlichen) Temperaturmesser. - Um das zu zeigen, erinnere ich an die Einführung des üblichen Quecksilberthermometers. Ein solches ist so gebaut, daß sich eine eingeschmolzene Quecksilberportion beim Erwärmen in eine Röhre genau gleichbleibenden Kalibers hinein ˙ausdehnen˙ kann und daß der Meniskus der Quecksilbersäule bei allen ˙Temperaturen˙, die mit dem Thermometer gemessen werden sollen, im Bereich der kalibrierten Röhre liegt. Der Ort des Meniskus bei der Temperatur erstarrenden Wassers wird mit "0 °C" markiert und der Ort des Meniskus bei der Temperatur siedenden Wassers mit "100 °C". Dann wird der Abstand dieser beiden Marken in 100 genau gleiche Teile unterteilt, und es werden an den einzelnen, so gewonnenen Strichmarken die Skalenpunktzeichen "1 °C", "2 °C", ..."99 °C"

notiert. Schließlich wird die Skala - so weit erforderlich - über die Marken "0 °C" und "100 °C" hinaus mit Strichmarken gleichen Abstandes erweitert. - Damit ist auch die (unzutreffend bezeichnete) Größeneinheit "1 °C" als der 100-ste Teil der Differenz der ·Temperaturen· von erstarrendem und von siedendem Wasser festgelegt.

Es sei angemerkt, daß ich im Vorstehenden das Wort "Kalibrieren" in der üblichen Bedeutung ("Kaliber eines Geschützrohres") und nicht in der im Normblatt DIN 1319, Blatt 1 /16/ festgelegten verwendet habe.

Beim geschilderten Vorgehen ist vorausgesetzt, daß sich die Länge der Quecksilbersäule beim Erwärmen und Abkühlen genau proportional mit der Temperatur ändert. Andernfalls wäre die Länge der Quecksilbersäule kein geeignetes Maß für die Temperatur: und wäre die Unterteilung des Abstandes zwischen den Temperaturmarken "0 °C" und "100 °C" in 100 genau gleiche Teile zu Unrecht erfolgt. (Ob die Voraussetzung erfüllt ist oder nicht, können erst spätere Überlegungen zeigen.)

Bei der angestrebten Unterrichtsführung wird dem thermischen Zustand eines Dinges von vornherein die Größe "Thermie" mit der Einheit "1 K" zugeordnet. Damit sind im Unterricht Thermometer mit einer anders beschrifteten Skala zu besprechen: Der Erstarrungsthermie von Wasser ist das Symbol "T_c" ("Celsiusthermie") zugeordnet und der Siedethermie das Symbol "T_c+100 K". Weitere Skalenstriche erhalten Marken der Art "T_c + 10 K", "T_c + 20 K", ... Es ist zunächst unbekannt, wie groß T_c ist; wir wissen wohl, daß es die Thermie erstarrenden Wassers ist, aber nicht, wie-viele Kelvin sie groß ist, können sie also nicht einheitengebunden ausdrücken (273,15 K).

Um das Arbeiten mit der Größe T_c zu vermeiden, führen wir noch den Begriff der Celsiusdifferenzthermie ΔT_c ein,

(12.31) $\Delta T_c(1) = T(1) - T_c$,

und eine entsprechende Thermometerskala. (Die - von der Industrie herzustellenden - Thermometer mit der neuen Skala müssen durch eine geeignete Aufschrift deutlich erkennen lassen, daß sie Celsiusdifferenzthermien - und nicht Thermien - messen.) Auf dieser Skala steht bei der Marke, die der Erstarrungsthermie von Wasser zugeordnet ist, "0 K",

(12.32) ΔT_c (erstarrendes Wasser) = $T_c - T_c = 0$ K,

und bei der Marke, die der Siedethermie zugeordnet ist, "100 K",

(12.33) ΔT_c (siedendes Wasser) = $(T_c + 100 \text{ K}) - T_c = 100$ K.

Ich verwende hier "T_c" als Symbol für die Thermie erstarrenden Wassers. Es wäre unzweckmäßig, das übliche Symbol "T_0" weiter zu verwenden, weil nicht eine Nullthermie, sondern eine bestimmte endliche Thermie, eben die von erstarrendem Wasser, zu symbolisieren ist.

Wird ein solches Thermometer in eine Wasserportion gehalten, deren Temperatur (in alter Sprechweise) 20 °C ist, zeigt es eine Celsiusdifferenzthermie von 20 K an.

(3) Vor der Beschreibung der **Auswertung** gemessener Ausmaße (zur Auffindung thermischer Gesetze) sei daran erinnert, daß die ersten Gesetze, die im Wärmelehreunterricht (mehr oder weniger präzise) abgeleitet werden, traditionell in der folgenden Weise formuliert werden:

(12.34) $V_t = V_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t)$

(Volumen-Temperatur-Gesetz von Gay-Lussac),

(12.35) $p_t = p_0 \cdot (1 + ß \cdot t)$

(Druck-Temperatur-Gesetz von Amontons).

> V_t: Volumen einer Gasportion bei der Celsiustemperatur "t",
>
> V_0: Volumen der gleichen Gasportion bei der Temperatur "0 °C",
>
> α: eine bei der Auswertung der Meßergebnisse sich ergebende und als "Volumenausdehnungskoeffizient" bezeichnete Gesetzeskonstante;
>
> p_t: Druck einer Gasportion bei der Celsiustemperatur "t"
>
> p_0.: Druck der gleichen Gasportion bei der Temperatur "0 °C",
>
> ß: eine bei der Auswertung der Meßergebnisse sich ergebende und als "Druckkoeffizient" bezeichnete Gesetzeskonstante.

Die Gleichungen 12.34 und 12.35 sind semantisch unkorrekt, weil in ihnen die für "t" einzusetzenden Angaben der Art "20 °C" wie Skalenpunktbezeichnungen aussehen, aber als Größenangaben fungieren: Man kann nur mit Größen, aber nicht mit Skalenpunkten rechnen. Es führt deshalb nur ein für die Schüler nicht zu durchschauender Weg von diesen 'Gleichungen' zu den entsprechenden einwandfreien Gleichungen der Thermodynamik. Diese lauten in der hier praktizierten Schreibung:

(12.36) $V(T) = V(T_c) \cdot T / Tc = V_c \cdot T / Tc \; [V(T_c) \equiv V_c]$

(12.37) $p(T) = p_c \cdot T / Tc$.

Im Folgenden beschränke ich mich auf die Ableitung des Volumen-Thermie-Gesetzes, weil das Druck-Thermie-Gesetz ganz analog abgeleitet wird.

(4) Auf die Experimente zur Auffindung des Volumen-Thermie-Gesetzes brauche ich nicht einzugehen, da diese genau so durchzuführen sind wie sonst auch. Es handelt sich hier ja lediglich darum, den Begriffen angemessene Namen und Symbole zuzuordnen und die Gesetze in verständlicher Weise aus den Meßergebnissen abzuleiten.

(5) Zur Ableitung des Gesetzes nehme ich an, daß für die Größen "ΔT_c" und "$V(\Delta T_c)$" die in der Tabelle 12.1 notierten Ausmaße gemessen werden

	1	2
Nummer	ΔT_c in K	$V(\Delta T_c)$ in ml
1	0,0	60,0 (=V_c)
2	20,0	64,4
3	40,0	68,8
4	60,0	73,2
5	80,0	77,6
6	100,0	82,0

Tabelle 12.1. Zur Auffindung des Volumen-Thermie-Gesetzes gemessene Größen

Wenn die Schüler die Geradengleichung kennen und mit dieser umgehen können, erfolgt die Auswertung der Meßergebnisse zur Auffindung einer gesetzmäßigen Beziehung am einfachsten mit Hilfe einer grafischen Darstellung (Bild 12.6).

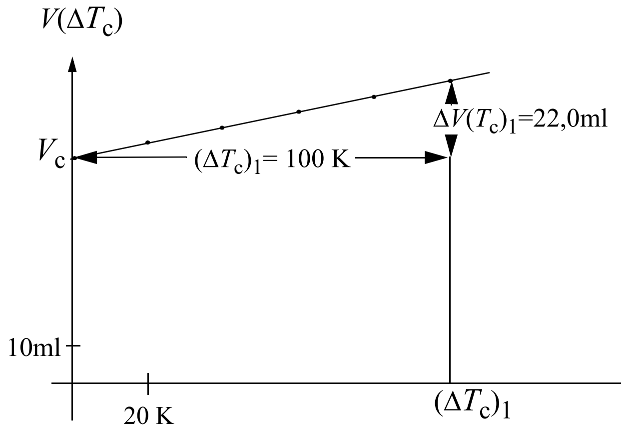

Bild 12.6. Zur Auswertung der in der Tabelle 12.1 notierten Meßergebnisse

Der Graph dieses Bildes ist eine Gerade, die nicht durch den Koordinatennullpunkt geht. Einem solchen wird in einem x-y-Koordinatensystem die Gleichung

(12.38) $y=m \bullet x+n$

zugeordnet, wobei

(12.39) $m = (\Delta x)_i / (\Delta y)_i$

den Anstieg der Geraden angibt und n die Ordinate im Punkt mit der Abszisse "x = 0".

Für das ΔT_c - V-Koordinatensystem ist folglich zu schreiben:

(12.40) $V(\Delta T_c) = \Delta V_i / (\Delta T_c)_i \bullet \Delta T c + V_c$

Diese Gleichung kann so umgeformt werden, daß sie der Gleichung 12.34 entspricht - im Gegensatz zu dieser aber größenrichtig ist.

Vorteilhafter ist es aber, die erhaltene Gerade bis zum Schnitt mit der ΔT_c-Achse zu verlängern

(Bild 12.7).

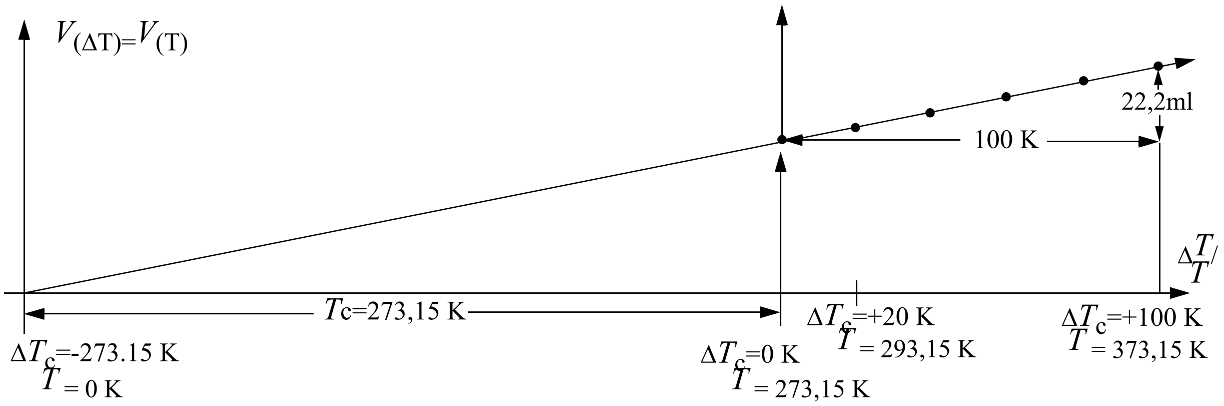

Bild 12.7. Fortsetzung der Auswertung der in der Tabelle 12.1 notierten Meßergebnisse

Der Schnittpunkt liegt bei sehr genauen Messungen bei ΔT_c = -273,15 K. (Das muß den Schülern mitgeteilt werden, weil sich so genaue Messungen mit Schulmitteln nicht durchführen lassen.)

Werden Versuche mit Gasportionen durchgeführt, deren Volumina V_c andere Ausmaße (als 60 ml) haben, ergeben sich Geraden, die die $V(\Delta T_c)$-Achse in anderen Punkten schneiden, die ΔT_c-Achse aber immer im Punkt mit der Abszisse "ΔT_c = -273,15 K".

Wird die Ordinatenachse so verschoben, daß sie durch diesen Punkt geht (Bild 12.7), und wird für den Anstiegsfaktor m = ΔV_i / ΔT_i " der Quotient V_c / T_c eingesetzt, kann der Geraden die Gleichung

(12.41) $V(\Delta T_c) = V_c / T_c \bullet (273{,}15\text{ K} + \Delta T_c)$

zugeordnet werden. Diese Gleichung besagt: **Für ΔT_c = -273,15 K wird V gleich null, und zwar bei allen Ausmaßen von V_c, also bei Gasportionen aller Größen**. Da ein Volumen nicht kleiner als null werden kann, scheint es keine negativ orientierte Celsiusdifferenzthermie zu geben, die größer als 273,15 K ist.

Wird in entsprechender Weise das Druck-Thermie-Gesetz abgeleitet, ergibt sich bei Versuchen (bei denen das Volumen konstant gehalten wird):

(12.42) $p(\Delta T_c) = p_c / T_c \bullet (273{,}15\text{ K} + \Delta T_c)$.

Da auch der Druck einer Gasportion nicht kleiner als null werden kann, zeigt auch diese Gleichung, daß ΔT_c = -273,15 K die größte negativ orientierte Celsiusdifferenzthermie ist. Daraus dürfen wir schließen, daß die Celsiusdifferenzthermie -273,15 K die Thermie "T= 0 K" ist. Damit ist

(12.43) $T_c = 273{,}15$ K

und

(12.44) $T = T_c + \Delta T_c = 273{,}15\text{ K} + \Delta T_c$.

Da das Volumen einer Gasportion bei (ΔT_c), identisch mit dem Volumen bei T ist, kann statt "$V(\Delta T_c)$" auch "$V(T)$" oder auch nur "V" geschrieben werden. Damit ergibt sich aus 12.41 und 12.44

(12.45) $V = (V_c / T_c) \cdot T$,

also die Gleichung 12.36 der Thermodynamik.

Entsprechend ergibt sich

(12.46) $p = (p_c / T_c) \cdot T$.

Diese Ableitungen sind nicht nur von jedem Schüler zu verstehen, sondern führen auch unmittelbar zu den größenrichtigen Gleichungen der Thermodynamik.

Es sollte ausdrücklich darauf hingewiesen werden, daß in den Gleichungen 12.45 und 12.46 jeweils nur drei veränderliche Größen stehen; T_c ist konstant und fungiert als Gesetzeskonstante ($V = 1 / T_c \cdot Vc \cdot T$; $p = 1 / T_c \cdot pc \cdot T$). - Falls die Schüler von den Gleichungen 12.34 und 12.35 schon gehört haben sollten, wird man ihnen mitteilen, daß die Konstante

(12.47) $1 / T_c = 1 / 273{,}15\ /\mathrm{K}$,

die als "Thermiekoeffizient" bezeichnet werden könnte, identisch ist mit dem Volumenausdehnungskoeffizienten α der Gleichung 12.34 und auch mit dem Druckkoeffizienten β der Gleichung 12.35. α und β sind also auch miteinander identisch.

Im weiteren Thermodynamikunterricht können nun Thermiemesser verwendet werden, auf deren Skalen der Erstarrungs- und der Siedethermie von Wasser die Symbole "273,15 K" beziehungsweise "373,15 K" zugeordnet sind. - Im übrigen kann der weitere Thermodynamikunterricht im Gymnasium wie auf der Hochschule inhaltlich wie bisher durchgeführt werden. Insbesondere ändert sich an der thermodynamischen Formeln nichts. Es ist lediglich für die mit dem Buchstaben "T" symbolisierte Größe an Stelle des Namens "thermodynamische Temperatur" der Name "Thermie" zu verwenden.

Um nicht noch stärker von den gewohnten Gleichungsbildern abzuweichen, habe ich in der vorstehenden Ableitung unterlassen, über die Zeichen für die Differenzgrößen (ΔV, ΔT, ΔT_0), die **Axoren** sind, auch die Axorpfeile zu schreiben. - Die Schüler, die von Anfang an an deren Schreibung gewöhnt sind, dürften keine Schwierigkeiten haben, an dieser Unterrichtsstelle zutreffend mit Axoren zu arbeiten.