

Paper-ID: VGI\_197401



## Absolute und relative Genauigkeit beim Messen

Kornelius Peters <sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Institut für Landesvermessung an der Technischen Hochschule Wien, A-1040 Wien, Gußhausstraße 25-29*

Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen und Photogrammetrie **62** (1, 2, 3),  
S. 2–15, 60–71, 110–124

1974

Bib<sub>T</sub>E<sub>X</sub>:

```
@ARTICLE{Peters_VGI_197401,  
Title = {Absolute und relative Genauigkeit beim Messen},  
Author = {Peters, Kornelius},  
Journal = {{\u}sterreichische Zeitschrift f{\u}r Vermessungswesen und  
Photogrammetrie},  
Pages = {2--15, 60--71, 110--124},  
Number = {1, 2, 3},  
Year = {1974},  
Volume = {62}  
}
```



## Absolute und relative Genauigkeit beim Messen

Von *Kornelius Peters*, Wien

*Die vorliegende Arbeit, sie ist die erweiterte Fassung des Vortrages „Typenvergleich der Meßgenauigkeit“, gehalten am 13. Dezember 1972 an der TH Wien im Rahmen des Kolloquiums der Assistenten der Studienrichtung Vermessungswesen (siehe Geowissenschaftliche Mitteilungen, Heft 1, S. 131), geht weit über den Themenrahmen der ÖZfVWuPH hinaus. Da sie aber in der universellen Schau ihrer Betrachtungen nicht nur von der Geodäsie ausgeht, sondern auch die jeweiligen Analogien in der Geodäsie hervorhebt, erschien sie wertvoll, in unserer Zeitschrift abgedruckt zu werden, um die allgemeinen Zusammenhänge und Grenzen jeder Meßtechnik und ihre Problematik zu zeigen.*

*Die Schriftleitung*

### Einleitung

Unsere Studienrichtung ist die einzige, welche die Wortwurzel „Messen“ in ihrem Namen führt, wenn auch mit der fatalen Vorsilbe „Ver-“. Ebenso ist der Geometer der einzige Beruf, der durch das Suffix „-meter“ gekennzeichnet ist, während sonst nur Meßgeräte auf dieses Silbenpaar auslauten (Thermometer, Kalorimeter, Anemometer . . .). Dieses einseitig festgelegte Prestige hat die Wirkung einer schwer durchlässigen Membran: einerseits beginnt sich von außen her erst langsam die Erkenntnis durchzusetzen, daß wir außer den geläufigen Landmesserarbeiten auch sonst viele Messungen und vor allem die Verarbeitung dieser Daten zu sinnvollen Entscheidungsgrundlagen beherrschen, andererseits denken auch wir häufiger daran, daß auch außerhalb unseres Bereiches vorerst ideell, doch vielleicht später auch materiell interessante Meßaufgaben warten.

Es dient nicht nur das experimentelle Messen zunehmend in fast allen Wissenschaften als Bestätigung bereits gewonnener bzw. als Anstoß zur Erlangung neuer Theorien, es spielt auch das gewöhnliche Messen im täglichen Leben seit alters her eine tragende Rolle, so gab es z. B. im alten Rom schon genaue Wasserzähler. Hier soll nun untersucht werden, ob unsere außergewöhnliche Stellung in der Meßtechnik durch die Qualität und Quantität unserer Produktion gerechtfertigt ist.

In vielen Fällen wird dabei auf die Strenge der Darstellung zugunsten eines breit gestreuten Beispielfeldes verzichtet werden. Aber auch die Auswahl dieser Beispiele kann nur sehr begrenzt sein, z. B. fehlen fast alle für den Umweltschutz wichtigen Messungen (Schadstoffkonzentration, Strahlung usw.) sowie die gesamte Werkstoffprüfung.

Daß die vorliegenden Darstellungen Kritik, aber auch Anregungen hervorrufen werden, ist klar und wird dankbar erwartet. Nicht durch Literaturzitate belegte Angaben entstammen oft Auskünften von in diesem Fachbereich erfahrenen Assistentenkollegen und den besonders fruchtbaren Aussprachen mit Präsident *Eidherr* vom Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, mit W. Hofrat *Rotter*, dem Leiter der Gruppe Eichwesen dieses Amtes, sowie mit o. Prof. *Bretterbauer* und a. o. Prof. *Mitter*.

### 1. Begriffe

#### 1.1. Genauigkeit

Unser Verhältnis zur Genauigkeit scheint auf den ersten Blick wesentlich unkomplizierter als jenes anderer Meßtechniker. Wegen der (auch im übertragenen

Sinne) horizontal großen Ausdehnung unserer Messungen haben wir Fehlertheorie und Ausgleichsrechnung so gründlich angewendet, daß diese unser Monopol zu sein scheinen. Weiters haben wir unsere Messungen so angelegt, daß wir ihre Resultate normalverteilt annehmen. Wir können daher zu jedem Wert den mittleren Fehler angeben, sei er auch noch so aufwendig abgeleitet. Unser Denken ist stochastisch, nicht deterministisch.

Doch leider teilen die wenigsten dieses Denken. Bei einem Fertigteilbau sind unsere Fehlerüberlegungen wohl zur Anlage unserer eigenen Grundlagen wichtig, doch in Wirklichkeit kommt es darauf an, ob die Elemente zusammenpassen oder nicht. Die Fläche eines Grundstückes, einziges unserer Produkte mit Verkehrswert, liegt ausdrücklich außerhalb unserer Haftung.

Eine allgemeine Abhängigkeit der Genauigkeit vom Wert der Meßgröße oder den Kosten der Messung ist nicht festzustellen, denn mit einem hölzernen Zollstock mißt man auf 1‰, mit einem Belichtungsmesser in der Photographie auf 100% genau. Mit Juwelier- und Steinbruchwaagen mißt man jeweils Millionenwerte, doch unterscheiden sich ihre relativen Genauigkeiten um mehrere Zehnerpotenzen.

Die Anzeigegenauigkeit eines Autotachometers hängt vom Reifenumfang, der Temperatur und der Geschwindigkeit selbst ab. Ersterer steigt und fällt mit dem Innendruck der Reifen via Füllung, Lufttemperatur und Erhitzung durch Geschwindigkeit. Temperatur und Geschwindigkeit wirken sich aber auch direkt über die Drehspule im Anzeigergerät aus. Meist zeigt ein Tacho bei 50 km/h ziemlich genau, überhält dann aber bis 20%. Würde man den Tachogang aus den Parametern Temperatur und Geschwindigkeit kennen, ließe sich für jede angezeigte Geschwindigkeit eine wesentlich bessere Genauigkeit erzielen, doch ist dies unrationell. Ähnliches gilt für die Korrektur von Sperrmaßen mit den Werten aus der Komparierung von Meßbändern.

Konsequent wird zwischen Instrumenten- und Verfahrensfehler unterschieden. Ist die Temperaturunruhe der Luft  $\pm 0,30$ , so hilft das auf  $\pm 0,010$  komparierte Thermometer nichts. Bei einer durchschnittlichen Böigkeit der Windstärke von 1,7 erscheint die Windgeschwindigkeit als zackengekröntes Band auf dem Schreiber, doch interessieren nicht nur die Mittel-, sondern auch die Maximalwerte, und gerade diese genau. Diese Unbestimmtheit der Meßgröße als Fehlerquelle kennen wir z. B. bei Tachymeteraufnahmen im Schnee, Schichtenlinienauswertungen von photogrammetrischen Modellen in Gebieten mit unregelmäßigem Bewuchs usw.; in der Meßtechnik macht sie unter anderem bei Härteprüfungen zu schaffen.

Die skeptische Beziehung des Meßtechnikern zur Genauigkeit äußert sich unter anderem auch in der Verbannung dieses Wortes aus dem offiziellen Wortschatz ([6]). „Genau“ heißt nur ein Wert ohne Fehler und den kann es nicht geben. Statt dessen sollte man im Zusammenhang mit Fehlerangaben immer die Bezeichnungen „unsicher auf  $\pm \dots$ “ bzw. „die relative Meßunsicherheit beträgt  $\pm \dots \%$ “ verwenden.

Leider ist aber der Begriff hinter dem „ $\pm$ “ in keiner Weise definiert. Hier herrscht wesentlich größere Verwirrung als in unserer Fachsprache.

Es können verwendet werden:

- 1.1.1 Die Standardabweichung eines gemessenen Wertes; der Vertrauensbereich des Mittelwertes, wobei 95 %, 99 % und 99,73 % möglich sind; Fehlergrenzen (vgl. 1.3).
- 1.1.2 Die Fehlergröße 1.1.1 kann abgeleitet sein aus Messungen unter „Wiederholbedingungen“ (ein Beobachter unter ein- und denselben Bedingungen, dieselbe Meßgröße mit ein- und demselben Meßgerät am selben Ort) oder unter „Vergleichbedingungen“ (verschiedene Beobachter in verschiedenen Laboratorien mit verschiedenen Meßgeräten gleicher Bauart).
- 1.1.3 Die Messungen 1.1.2 können bloß an ein- und demselben Meßgegenstand oder auch als Vergleich mit ein- und demselben Normal ausgeführt sein.

Wollen wir die Vertrauenswahrscheinlichkeit der Einfachheit halber auf 95 % beschränken, gibt es noch immer 12 Möglichkeiten, ein- und dieselbe Zifferngröße aufzufassen. Eine Verpflichtung, die näheren Umstände der Definition der Unsicherheit anzugeben, besteht in den DIN nicht.

In der Geodäsie weiß man hingegen, daß der Wert hinter dem „±“ die Standardabweichung, unter Vergleichbedingungen an einem Normal berechnet, bedeutet. Auch die „relative Meßunsicherheit“ kann zweierlei bedeuten: der Zähler ist in beiden Fällen die „absolute Meßunsicherheit“, der Nenner entweder der „richtige Wert“ oder die „Skalenlänge“; im letzteren Fall ist das Ergebnis optisch günstiger.

Der Ordnung halber sei auf die Ambivalenz des Begriffes „relativer Fehler“ in der Vermessungstechnik hingewiesen: verbreitet meint man damit den „Variationskoeffizienten“, also Standardabweichung gebrochen durch gemessenen Wert (dieser wird dem „richtigen“ gleichgesetzt). Doch die von der Niederländischen Schule eingeführte „relative Fehlerellipse“ bezeichnet keinen dimensionslosen Ausdruck, sondern ist die Standardfehlerellipse der Koordinatendifferenzen zweier benachbarter Punkte.

Da in der Meßtechnik systematische Fehler häufig nicht aufzuspüren bzw. auszuschalten sind, erweitert man manchmal das aus der Versuchsmessung ermittelte Vertrauensintervall um einen geschätzten Betrag, um dadurch die Unsicherheit eines speziellen Endergebnisses zu charakterisieren.

Wie umstritten Zahlen und Genauigkeitsangaben in der Meßtechnik sind, möge das geläufige Beispiel der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum, zitiert aus vier anspruchsvoll-populären Büchern, etwa gleichen Erscheinungsdatums, belegen. (Vgl. auch 2.3.2 dieser Arbeit.)

Sie beträgt laut [ 6], S. 95:  $(2,997\ 90 \pm 0,000\ 06) \cdot 10^8$  m/sec  
 laut [43], S. 353:  $(2,997\ 93 \pm 0,000\ 01) \cdot 10^8$  m/sec  
 laut [26], S. 405:  $(2,997\ 925 \pm 0,000\ 003) \cdot 10^8$  m/sec  
 laut [13], S. 80:  $(2,997\ 924 \pm 0,000\ 0015) \cdot 10^8$  m/sec

Abgesehen davon, daß die relativen Genauigkeiten zwischen  $5 \cdot 10^{-7}$  und  $2 \cdot 10^{-5}$ , also mehrere Zehnerpotenzen differieren, sei auf die korrekte Notation durch Angabe der letzten noch sicheren Ziffer hingewiesen, welche gleichzeitig eine kurzgefaßte Unsicherheitsangabe gewährt.

Im erstgenannten Fall ist sogar die Null nicht unbedingt anzuschreiben, da ihre Unsicherheit mehr als fünf Einheiten dieser Stelle beträgt.

## 1.2 Einheiten

Es bürgert sich mehr und mehr ein, physikalische Gesetze nur noch in der Form von Größengleichungen zu schreiben. Dadurch treten die früher so heftig erörterten und zum Teil stark umstrittenen Einheitensysteme in den Hintergrund ([6], S. 46, 47). In [13] werden noch vier verschiedene Einheiten des Druckes und drei Einheitensysteme der Mechanik angeführt.

1954 wurden aber auf der X. Generalkonferenz für Maß und Gewicht die „SI-Einheiten“ (Système International des Unités) angenommen ([43]).

Hier gibt es sechs Basiseinheiten, welche ausschließlich durch ursprüngliche „Étalons“ (Normalmaße) definiert sind: Länge (Meter), Masse (Kilogramm), Zeit (Sekunde), elektrische Stromstärke (Ampère), Temperatur (Grad Kelvin), Lichtstärke (Candela). Die étalons sind freilich cum grano salis zu verstehen, denn derzeit ist nur mehr das Kilogramm durch ein Normalmaß gegeben, während Meter und Sekunde aus Strahlungsdaten, das Ampère aus der Permeabilität des Vakuums, das Grad Kelvin aus der willkürlichen Festsetzung des „Tripelpunktes“ des Wassers mit  $+ 273^{0}16$  sowie die Candela aus Lichteigenschaften des „Schwarzstrahlers“ abgeleitet sind, sich also die restlichen fünf Basisgrößen aus physikalischen Normalmethoden bzw. -eigenschaften ergeben. Sodann kennt man *abgeleitete Einheiten*, welche sich aus den Grundeinheiten aus allgemeinen physikalischen Erfahrungen ohne spezielle Konstante oder Normen ergeben. So verwendet z. B. die Definition des Newton einen Körper von der Masse 1 kg, dem die Beschleunigung von  $1 \text{ m} \cdot 1 \text{ sec}^{-2}$  erteilt wird.

Außerdem werden noch *Ergänzungseinheiten* verwendet, welche unabhängig von irgendwelchen physikalischen Konstanten oder besonderen Materialien sind. Hier sind nur die Einheiten des ebenen Winkels (Radiant) und Raumwinkels (Steradian) zu erwähnen. (Vgl. [57]). Die Darstellung von Maßen aus Natur- bzw. körperlichen Normalen wechselte im Lauf der Geschichte in steter Verzahnung. So folgte der Ableitung von Körperteilen (Elle, Fuß) die Verkörperung durch gesetzliche Normalmaße, welche streng verwahrt wurden, dann sollte das Meter direkt aus den Erddimensionen abgeleitet werden, welchem Bemühen wir die ziffernmäßige Übereinstimmung von  $\rho^{oc}$  und dem Erdradius verdanken; es folgten die Maßverkörperungen durch „Urmeter“ usw., bis jetzt wieder unveränderliche, jederzeit reproduzierbare physikalische Vorgänge den Sieg über körperliche Normale errungen haben, welche doch allzusehr der Zerstörung, Beschädigung und Veränderung ausgesetzt sind und Transportschwierigkeiten verursachen. Außer dem Gewinn an Zuverlässigkeit ist dadurch auch ein Plus an Genauigkeit zu verzeichnen:

Die früheren *Längennormale* (Urmeter und nationale Derivate) änderten ihre Länge im Bereich von etwa  $1 \cdot 10^{-7}$  bis  $6 \cdot 10^{-7}$ ; die Anschlußgenauigkeit lag im selben Bereich. Die Wellenlänge der orangefarbenen Spektrallinie des Krypton-Isotops 86 kann unter den nötigen Voraussetzungen auf  $10^{-8}$  ihres Wertes jederzeit reproduziert werden, allerdings nur mit einer Kohärenzlänge von etwa 80 cm; mit einem Helium-Neon-Laser-Interferometer kommt man nur auf etwa  $\pm 2 \cdot 10^{-8}$  relative Unsicherheit, aber über wesentlich längere Strecken! ([26], [43]).

Die *Masse* des Kilogramm-Prototyps ist auf  $10^{-9}$  ihres Wertes bekannt und kann auf  $10^{-7}$  ihres Wertes reproduziert werden. Puristen bemängeln, daß in der Bezeichnung hier bereits mit „Kilo“ eine Vervielfachung vorliege, die nicht im Sinne einer Basiseinheit sei! Die verschiedenen abgeleiteten Prototypen schwankten im Lauf der Zeit bis etwa  $7 \cdot 10^{-8}$ , im Schnitt um  $3 \cdot 10^{-8}$ . Für den Vergleich der Massen ist die Kenntnis der Schwere nicht erforderlich, natürlich aber zur Definition des Gewichtes usw. Vergleichbar dem Meter, welches dann auch nicht „genau“ der zehnmillionste Teil des Erdmeridianquadranten wurde, ist auch das endgültige Kilogramm nicht „genau“ gleich der beabsichtigten Größe. 1 kg luftfreies, reines Wasser nimmt bei seiner größten Dichte unter atmosphärischem Normaldruck ( $1,000\,028 \pm \pm 0,000\,003$ )  $\text{dm}^3$  ein, dies ist gleichzeitig die 1964 aufgegebene Definition des Liters.

Zur Realisierung der (*Zeit*-)Sekunde mit nennenswerter Genauigkeit muß ein genügend langes Ephemeridenzeitintervall (mehrere Jahre) entsprechend der Sekundendefinition geteilt werden. Auch nach der Annahme der „atomaren“ Definition der Sekunde (durch Zuordnung einer bestimmten Frequenz in Hz = Schwingungen pro *Sekunde* zur Periode des Hyperfeinstrukturüberganges zwischen  $F = 4$  und  $F = 3$  im Cäsiumatom) bleibt die Anzahl der Ephemeridensekunden im tropischen Jahr 1900 eine der Fundamentalkonstanten des SI-Systems ([26] S. 115, 116). Die primären Cäsium-Atomstrahl-Etalons der metrologischen Institute stimmen relativ bis auf etwa  $10^{-11}$  überein, wenn auch die Frequenzzuordnung zur astronomischen Definition nur mit der relativen Unsicherheit von  $10^{-9}$  möglich ist. (Das Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen besitzt bekanntlich seit April 1972 ein solches Cäsium-Normal).

Die abstrakte Definition der Einheit der *Stromstärke* (z. B. [43] S. 110) ist nicht ohne weiters zur Darstellung geeignet. Die Realisierung durch Kraftmessung führt im günstigsten Fall zu einer relativen Unsicherheit von  $10^{-5}$  bei konstantem Gleichstrom, bei hochfrequenten Wechselströmen bis auf eine solche von  $10^{-2}$ .

Die „Praktische Internationale *Temperaturskala*“ ist durch eine Anzahl fester und stets wiederholbarer Gleichgewichtstemperaturen reiner Stoffe gegeben. Nicht ohne Grund hat man den Tripelpunkt des Wassers zur Definition herangezogen: in seiner Umgebung läßt sich die Temperatur auf  $\pm 10^{-4}$  Grad bestimmen. Bereits  $-30^\circ\text{C}$  wie auch  $+100^\circ\text{C}$  lassen sich nur mehr auf  $\pm 10^{-3}$  Grad bestimmen und vor allem in den Hochtemperaturbereichen nimmt die Genauigkeit rasch ab ( $+2000^\circ\text{C}$  auf  $\pm 5^\circ$ ).

Die Einheit der *Lichtstärke* wird mit Hilfe eines Schwarzen Strahlers bei der Temperatur des erstarrenden Platins dargestellt. Der Anschluß an das Etalon wird mit  $\pm 10^{-3}$ , die Weitergabe mit  $\pm 5 \cdot 10^{-3}$  relativer Unsicherheit angenommen [43].

Die Schwierigkeit, eine Basiseinheit an und für sich darzustellen, wird oft durch *Korrelation* mit der nötigen Meß- und Erstellungsgenauigkeit weiterer Basisgrößen, welche auf die Etalonverkörperung oder -methode einwirken, gesteigert. So wirkt die Temperatur sehr unangenehm auf Längenmaßstäbe, weniger kritisch auf Vergleichswaagen, etwas schlimmer auf Schweremessungen mit ein und demselben Massenetalon an ein und demselben Ort (selbes  $g$ ) zur Überprüfung der Massenkonstanz ein.

In der folgenden Tabelle 1 soll die gegenseitige Beeinflussung von Basisgrößen dargestellt werden, wobei nur die extremsten Werte ziffernmäßig ausgewiesen werden. Abgeleitete, wirksame Einheiten sollen durch die dort markanteste Basiseinheit symbolisiert werden, z. B. die Stromdichte  $A\ m^{-2}$  durch die Stromstärke  $A$ .

Tabelle 1

Einwirkende Basisgröße	Darzustellende Basisgröße	Länge	Masse	Zeit	Stromstärke	Temperatur	Lichtstärke	Anmerkungen	
Länge	(Normalmaß)	m	$10^{-7}m$	—	—	$20^0 \pm 0.01^0$	—		
Länge	(Wellenlänge)	m	$10^{-8}m$	×	—	×	$-210^0 \pm 1^0$	—	Druck = $\pm 0,03$ atm
Masse	(Normalmaß)	kg	×	$10^{-9}kg$	—	—	×	—	Oberflächen eben
Zeit (Atomuhr)	s	×	—	$10^{-11}s$	×	×	—	—	
Stromstärke	(Kraftmessung)	A	$10m^{-7}m$	×	—	$10^{-5}A$	×	—	
Temperatur	$^0C$	×	×	—	×	$0^0 \pm 10^0-4$	—	—	
Lichtstärke	cd	—	×	—	×	×	$10^{-3}cd$	—	Schwarzstrahlg.100% Reinheit des Platins

Mit der Unsicherheit der Realisierung der Basisgröße ist aber die innere Genauigkeit einer Messung noch nicht charakterisiert. So gibt es Längen, die man wesentlich genauer als auf  $10^{-7}$  messen kann, wenngleich ihnen wegen der Abnahmeunsicherheit vom Urmeter (bzw. der Lichtgeschwindigkeit, vgl. 2.1.1) ein „Maßstabsfehler“ anhaftet. Andererseits werden in der Praxis niemals Massen in der Genauigkeit der Basisgröße ( $10^{-9}$ ) benötigt.

### 1.3 Toleranzen

In der Meßtechnik ist der Begriff der „Fehlergrenzen“ wesentlich klarer umrissen als in der Vermessungstechnik; entsprechend schwierig ist es auch, Außenstehenden unsere weder statistisch noch vom Bedarf her gedeckten Toleranzvorstellungen zu erklären. Allerdings sind dort die Messungen für den täglichen Gebrauch nicht so verwickelt wie derzeit noch bei uns (Polygonzüge, Netze, Nivellementschleifen ...), sondern die Messung führt unkompliziert zum Resultat wie bei uns etwa die Polarmethode bei fest vorgegebenem, fehlerfreien Festpunktfeld oder die Bauabsteckung vom genauen Werksnetz aus usw. Man muß also nicht über komplizierte Modellvorstellungen vom Instrumenten- über den Verfahrensfehler zur Unsicherheit des Resultates gelangen. Das begriffliche Chaos, das bei uns in den Toleranzen steckt, liegt dort in den Genauigkeitsangaben und damit umgekehrt zu den Verhältnissen bei uns.

Unter 1.1.1 wurde bereits die Verwendung der 95%-, 99%-Sicherheit sowie sogar der  $3\sigma$ -Grenze für die Unsicherheitsangaben in der Meßtechnik erwähnt,

wobei die letztgenannte laut [6] angeblich bei Basisgrößen und Fundamentalkonstanten verwendet wird (ich fand allerdings keine konkrete Erwähnung bei den entsprechenden Werten).

*Fehlergrenzen* sind streng zu unterscheiden von Meßunsicherheiten. Hier versteht man die vereinbarten oder garantierten zugelassenen äußersten Abweichungen nach oben oder nach unten von der Sollanzeige oder vom Nennmaß oder von einem sonst vorgeschriebenen Wert der Meßgröße. Zwei wichtige Sonderfälle sind die Garantiefehlergrenzen (vom Hersteller des Meßgerätes für festgelegte Bedingungen garantiert) und die Eichfehlergrenzen (größten Abweichungen, die nach der geltenden Eichordnung beim Vergleich mit einem Normal noch zulässig sind).

Die Meßunsicherheit soll laut [6] erheblich geringer sein als die Fehlergrenze, möglichst nicht größer als ein Fünftel der Toleranz.

Diese Forderung stammt daher, daß bei der „Unsicherheit“ oft nicht die systematischen Fehleranteile enthalten sind.

Garantie-Fehlergrenzen bei Vermessungsgeräten sind nicht üblich, da solche sehr einfache, normierbare Bedienung durch einen eng abgegrenzten Benutzerkreis voraussetzen oder notwendigerweise verkaufsfördernd eingesetzt werden können.

Wohl aber sind die Prospektangaben der seriösen Firmen als realistisch zu betrachten, da diese eigene kostspielige Testabteilungen unterhalten. Der Benutzerkreis wird als so sachverständig angesehen, daß er die Prospektangaben in zielführende Messungsanordnungen umsetzen kann.

#### 1.4 *Eichen*

Unter „Eichen“ versteht man den Vergleich von im öffentlichen Verkehr befindlichen Meßgeräten mit den Normalen des Eichamtes und die Stempelung nach der eichtechnischen Prüfung. Meßgeräte, deren Richtigkeit durch ein rechtlich geschütztes Interesse gefordert wird, sind eichpflichtig, eichfähig solche, deren physikalische Grundlage und technische Ausführung die Richtigkeit und Zuverlässigkeit dieser Geräte mindestens für die Dauer der Nacheichfrist gewährleisten [41]. Wer ein eichpflichtiges Meßgerät anwendet oder bereit hält, ist dafür verantwortlich, daß das Meßgerät geeicht ist.

Eichpflichtig sind: Meßgeräte im öffentlichen Verkehr (worunter auch jene bzw. solche, die zum Messen der Länge, der Fläche oder des Raumes dienen, fallen — [41] § 8 (1); im Gesundheitswesen; im Sicherheitswesen (hier [41] § 13 (1) 4. Meßgeräte für verkehrspolizeiliche Zwecke — wenn ihre unrichtige Anzeige unmittelbar oder mittelbar eine Gefährdung von Personen oder Sachen zur Folge haben kann). Verkehrsraddargeschwindigkeitsmesser fallen nicht unter die Eichpflicht, wohl aber Personenwaagen in Bädern ... Eine Eichordnung parallel zur Vermessungsverordnung gibt es in Österreich nicht, großteils gilt die Deutsche Eichordnung [8].

Von den oben erwähnten Längen- und Flächenmeßgeräten, soweit sie im Vermessungswesen verwendet werden, sind eichpflichtig laut [8]: Meßbänder, Gliedermaßstäbe, Planimeter. Die Fehlergrenzen werden allgemein unterteilt in Eichfehlergrenzen (bei Neueichung), Nacheichfehlergrenzen (bei Wiederholung der Eichung eines bereits gebrauchten Meßzeuges), Verkehrsfehlergrenzen (die im eichpflichtigen



Verkehr zulässigen Abweichungen von der Richtigkeit). Die letztgenannten betragen meist das Doppelte der Eichfehlergrenzen, wohl wegen der rauheren Einsatzbedingungen und Unbestimmtheit der Meßgröße. Die Nacheichfehlergrenzen ergeben sich aus den aus der physikalischen Grundlage und technischen Ausführung zu erwartenden Fehlerwanderungen der Geräte.

Beispiele hierfür zeigt Abb. 1:

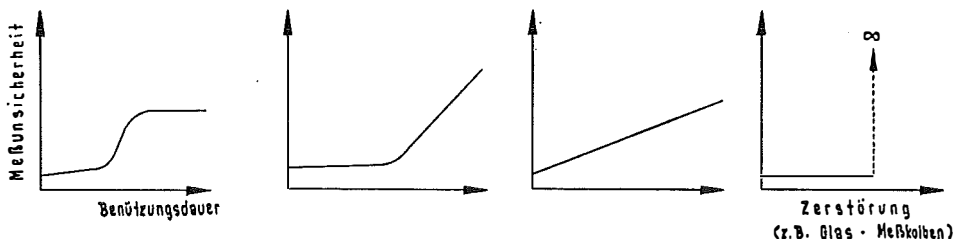


Abb. 1

Die *Eichfehlergrenzen* enthalten konsequenterweise auch Vorschriften über Nachbargenauigkeit: z. B. bei Gliedermaßstäben aus Holz für den Abstand beliebiger Metermarken gleich  $10^{-3}$  dieses Abstandes, von Zwischenmarken vom nächsten Meter 1 mm, für den gegenseitigen Abstand zweier aufeinanderfolgender cm- und mm-Marken 0,2 mm; bei Fieberthermometern: an keiner Stelle mehr als  $0,08^{\circ}$  zu viel oder  $0,10^{\circ}$  zu wenig (!), der Unterschied der Fehler zweier Skalenstellen bei Abstand bis  $1^{\circ}$  darf höchstens  $\pm 0,05^{\circ}$ , bei mehr als  $2^{\circ}$   $\pm 0,15^{\circ}$  betragen; die *Verkehrfehlergrenze* darf aber allgemein  $0,10^{\circ}$  betragen. Viele Eichvorschriften sind natürlich komplizierter als diese anschaulichen Trivialbeispiele. Oft bestehen schon Normen für die Ausgestaltung und Dimensionierung jedes Teiles des Meßzeuges, z. B. bei Meßkluppen in der Forstwirtschaft.

Zum Abschluß noch ein Zitat aus dem Eichgesetz ([41] § 42): „Fehlergrenzen dürfen nicht vorsätzlich einseitig ausgenutzt werden.“

## 2. Beispiele für die Messungsunsicherheit physikalischer Größen

### 2.1 Längen und abgeleitete Daten

#### 2.1.1 Längen

In der Meßtechnik ist die Unterscheidung in „Längen“ und „Höhen“, wie sie in der praktischen Vermessungskunde manchmal üblich ist, nicht geläufig. Trotzdem sollen aus Gründen der Anschaulichkeit diese Begriffe manchmal getrennt werden.

##### 2.1.1.1 Schätzen, Näherungsmaße

Längen und Längendifferenzen sind auch außerhalb der Vermessungstechnik die häufigst benötigten Größen. Es ist daher interessant, wie genau sie ohne irgend ein konkretes Hilfsmittel bestimmt werden können.

Zuerst wollen wir das absolute Schätzen betrachten, die Ergebnisse Ungeübter sind hier erstaunlich schlecht. Versuche an Soldaten und Studenten ergaben im vergangenen Jahrhundert Unsicherheiten über 30% [21]; Selbstversuche zeigten zu

meiner größten Überraschung für den Bereich von 1 mm bis 500 m kein besseres Resultat! Nur im Bereich von 1 bis 4 m, wo Körpergröße bzw. die imaginäre 4 m-Nivellierlatte als Erfahrungsnormale dienen, bewegte sich die relative Unsicherheit bei  $\pm 10\%$ . Viel weiter dürfte es auch ein geübter Schätzer nicht bringen.

Zu Zeiten, als zackiges Marschieren noch hoch im Kurs war, gab man die Genauigkeit des individuellen Schrittmaßes mit 3 bis 5% an [22].

Ist ein Normal zur Stelle, ist die Schätzung einfacher. Nach dem „Weber’schen Gesetz“ [18] ist pro Reiz die differentielle Unterscheidungsmöglichkeit konstant, etwa Tonhöhe  $3\%$ , Gewichte gehoben  $19\%$ , Länge von Strecken  $25\%$ ; Strecken von 40 und 41 cm können gerade noch durch Augenvergleich (ohne Nebeneinanderlegen) als kürzer bzw. länger beurteilt werden (die angegebenen Werte sind nach Übung und Erfahrung des Individuums variabel).

Die Schätzung in ein bestehendes Intervall hinein geschieht üblicherweise auf Zehntel; die Unsicherheit hängt von der Definition und Ruhe des Zeigers bzw. Intervalls, wie auch von bestimmten persönlichen Neigungen des Beobachters für Ziffern ab.

Bei einer schwankenden Tachymeterlatte  $\pm 30\%$ , bei der Amplitudenskala eines Kreiselhöhenwinkels  $\pm 3\%$  des Intervalls, dürften die Extreme der Schätzunsicherheit betragen.

Als Beispiel für besonders geschickte Anwendung der Intervallschätzung möge [12] gelten: Mit dem Feldstecher beobachtete Satellitendurchgänge zwischen Fixsternen, wobei der Satellitenort auf der Verbindungslinie der Sterne in Prozent des Abstandes zur Durchgangszeit geschätzt wird, ersetzen wesentlich aufwendigere Verfahren fast vollwertig.

### 2.1.1.2 Messen

Die kleinsten bekannten Längenmaße sind die Dimensionen des Atomkerns bzw. seiner Bestandteile in der Größenordnung von  $10^{-15}$  m: Atomkern  $\varnothing = 10^{-14}$  m, Kernkräfte wirken auf  $3 \cdot 10^{-15}$  m, „klassischer Elektronenradius“  $1,42 \cdot 10^{-15}$  m; diese Maße wurden aber mittelbar aus Energieüberlegungen (Elektron als Kugelkondensator) gewonnen ([66] S. 488). Die genauesten Maßverkörperungen der Länge auf direktem Weg sind durch Endmaße der Stufe 00 möglich, welche ein Fehlergesetz von  $\pm (5 \cdot 10^{-8} + 10^{-6} S_m)$  m angeben ([13] S. 25).

Gängige Endmaßsätze erreichen noch immer  $\pm (10^{-6} + 2 \cdot 10^{-5} S_m)$  m, also noch immer die relative Genauigkeit einer DI 10-Strecke auf cm- bis Meterlänge!

Die bekannten Meßuhren liefern etwa  $10^{-5}$  m (Relativunsicherheit ca.  $2 \cdot 10^{-3}$ ), genaue Schiebelehren bei 10 cm Länge  $\pm 0,06$  mm, 1 m auf 0,15 mm (relativ ca.  $2 \cdot 10^{-4}$ , vergleichbar einer Meßbandpolygonseite!)

Optische Meßzeuge verschiedenster Art erreichen eine Absolutgenauigkeit von  $\pm 10^{-6}$  m, manche davon in zwei Koordinatenrichtungen („Vergleichsokulare“, [5] S. 52).

Die praktische Grenze von Komparatoren auf mechanisch-optischer Vergleichsbasis liegt bei  $\pm 10^{-6}$  Relativunsicherheit, von Interferenzkomparatoren bei  $10^{-7}$ ; die maximalen Streckenlängen liegen bei ca. 1 m bis 6 m. Diese Relativgenauigkeit entspricht unseren besten Draht-Basismessungen (bzw. Lasergeodimeterstrecken).

Durch stete Versechsfachung der Interferenzkomperator-Grundläge konnten in der Geodäsie allerdings schon Strecken bis 864 m unter größtem Aufwand auf besser als  $10^{-7}$  gemessen werden ([5] S. 426).

Überaus große relative Genauigkeiten werden auch mit Dehnungsmeßstreifen erfaßt. Diese sprechen bereits auf Zug-Druckspannungen von  $1 \text{ kp/cm}^2$  an, was bei Elastizitätsmoduln von  $1000 \text{ t/cm}^2$  einer Längenänderung des beanspruchten Streifens von  $10^{-6}$  entspricht ([13] S. 93). Langzeitmessungen sind allerdings nicht möglich.

Die bekannten geodätischen Deformationsmessungen an Staumauern erzielen ebenfalls relative Meßunsicherheiten zwischen  $10^{-5}$  und  $10^{-6}$ , wenn man die Ambitionen der Verfasser in ihren Veröffentlichungen in äußere Genauigkeiten übersetzt. Die Unsicherheit der häufigsten photogrammetrischen Messungen kann man als  $10^{-4}$  ( $= 0,1\%$  von *HüG*) annehmen, für die terrestrische Photogrammetrie wird die relative Unsicherheit kleiner als  $10^{-3}$  gefordert.

Die absolute Lagegenauigkeit in unseren topographischen Karten kann man mit  $0,2 \text{ mm}$  mal Maßstabszahl ansehen, wenn man von Generalisierungsfragen absieht ( $\pm 10 \text{ m}$  in  $1:50000$ ); in technischen Plänen, welche händisch matriziert wurden, dürfte die graphische Genauigkeit bei  $0,3 \text{ mm}$  mal Maßstabszahl liegen (eigene Sperrmaßkontrolle). Beide Werte gelten für Nachbargenauigkeit.

Karten, erstellt mittels SLAR bzw. Remote Sensing und damit vom „Sehen und Gesehenwerden“ des Flugzeuges unabhängig, haben eine durchschnittliche Lageunsicherheit von  $\pm 2 \text{ mm}$  mal Maßstabszahl.

Die Streckenfehler benachbarter Punkte liegen im günstigsten Fall zwischen  $20$  und  $100 \text{ m}$  bei  $5000 \text{ m}$  Flughöhe [29].

Für die Streckenmessung für Zwecke der Landesvermessung bzw. Erdmessung strebt man derzeit  $\pm 5 \text{ cm/25 km}$ , d. s.  $2 \cdot 10^{-6}$  an, was bei genauen meteorologischen Messungen und unseren derzeitigen Kenntnissen der Atmosphäre noch einzuhalten ist (z. B. *Mitter*).

Als Hauptaufgabe der Meeresgeodäsie gilt zur Zeit die geodätische Lagebestimmung auf dem Meer. Mit Shoran, Hiran (Linienkreuzen) und Hyperbelverfahren Hifix erzielt man Reichweiten von  $200$  bis  $800 \text{ km}$ , Bestwerte ca.  $\pm 10^{-5}$  rel. Unsicherheit; mit weiteren Hyperbelverfahren, z. B. Omega  $8000 \text{ km}$  auf  $\pm 1$  bis  $2 \text{ km}$  ( $2 \cdot 10^{-4}$ ), aber Nachbargenauigkeit  $\pm 150 \text{ m}$  [34], mit Satellitennavigation integriert in Doppler-Sonarmethode auf hoher See  $\pm 15 \text{ m}$  innere Genauigkeit.

Alle genannten Genauigkeiten sind aber der Erdmessung noch nicht voll zunutze gemacht worden. Aus nicht-geometrischen Gründen bringen die lokalen (kontinentalen) Triangulierungen ganz verschiedene Resultate. So unterscheiden sich die Ellipsoide von Bessel (1841), Hayford (1909) und Krassowsky (1939) um  $96 \text{ m}$  bzw.  $237 \text{ m}$  im Äquatorhalbmesser ( $-1,6 \cdot 10^{-5}$  bzw.  $-4 \cdot 10^{-5}$ ) und die Abplattungen um  $7\%$  bzw.  $3\%$ . Die aus den jüngsten Satellitenmessungen anfallenden Werte liegen ca.  $1 \cdot 10^{-5}$  bzw.  $2\%$  bei Krassowsky. Für projektierte Weltnetze erhält man gemäß dem Standardwerk [48] folgende Genauigkeitsvoranschläge: Reine Stellartriangulierungsnetze mittlerer Punktfehler  $\pm 30 \text{ m}$ ; reine Streckennetze mittlerer Punktfehler  $\pm 0,7$  des mittleren Streckenfehlers; angeschlossene Richtungs- und Streckennetze mit bekannten Höhen der Bodenpunkte (Zielpunkte natürlich Satelliten) mittlerer Streckenfehler einer Diagonale  $\pm 0,1$  des mittleren Streckenfehlers.

Als Streckenfehler a priori wurde in den praktischen Beispielen  $\pm 10$  m, als Richtungsfehler a priori  $\pm 0,2''$  angenommen.

Die jüngste Instrumentenentwicklung hat indessen eine sensationelle Wendung genommen. Bereits 1966 wurden für Laser-Impuls-Entfernungsmesser Standardabweichungen von  $\pm 0,6$  m auf Reichweite angegeben [30].

Dieser Voranschlag beruhte auf der mittleren Impulsdauer des Rubinlasers von 10 Nanosekunden ( $10^{-8}$  sec). Nunmehr glaubt man diesen Fehlereinfluß (der Impuls ist von stochastischer Intensität) noch um mehr als  $10^{-1}$  drücken zu können, so daß als Streckenfehler für Messungen nach Satelliten und zu Mondreflektoren nur mehr der Einfluß der Atmosphäre von  $\pm 0,15$  m übrigbleibt. (Laut *Bretterbauer* ist der Einfluß der Atmosphäre bei Zenitmessungen nach außerirdischen Zielen wie jener auf eine 8 km lange terrestrische Strecke). Mit dieser Streckengenauigkeit könnten größte Distanzen auf der Erde im Bereich von  $\pm 0,40$  m, die Erddimensionen im Dezimeterbereich, genau berechnet werden [46].

Die relative Unsicherheit der Entfernung Impulslaser-Mondreflektor beträgt  $4 \cdot 10^{-10}$ , ist also um  $10^{-3}$  geringer als jene von eigentlichen Maßverkörperungen der Länge! Den Nachweis von Kontinentaldriften, deren Dimensionen seit etwa 90 Jahren immer laut Berechnung gerade so nahe an den Meßmöglichkeiten liegen, daß sie nicht signifikant sind, erhofft man sich ebenfalls aus dieser Methode.

Auch andere Distanzmeßverfahren auf unkonventioneller Basis erzielen Erfolge: das früher nur zu Navigationszwecken verwendete Hyperbelverfahren kann auch in der Ingenieurvermessung zur Distanzmessung nach einer Vielzahl von Punkten berührungsfrei verwendet werden, welche nur durch ein entsprechendes elektrisches Feld signalisiert sein müssen; die relative Meßunsicherheit konnte auf  $\pm 5 \cdot 10^{-6}$  gesenkt werden [20].

Die Verfahren der Radioastronomie versprechen eine Genauigkeit von  $\pm 10$  cm für die Bestimmung der irdischen Entfernung der beiden Radioteleskope des Interferometers, welches die Radiostrahlung von Quasaren und interstellaren Masern auflöst. Hierfür ist eine Katalogisierung der Positionen der benutzten Himmelskörper auf  $0,5''$  nötig [65]. Es sei hier betont, daß sich die zitierten Genauigkeitsangaben hauptsächlich auf a priori-Berechnungen der entsprechenden Verfasser stützen.

Vor den Laser-Messungen war die Entfernung Erde-Mond auf Grund eines dynamischen Verfahrens auf etwa  $\pm 3 \cdot 10^{-6}$  bekannt. Die „absoluten“ Höhen der Mondberge wurden durch stereoskopische Parallaxen der angezielten Punkte unter Zuhilfenahme der Libration des Mondes auf  $\pm 1$  bis 2 km bestimmt (Perpendikel zu  $0,1''$  auf die Mondentfernung). Relative Höhen, auf 15% ihres Wertes unsicher, wurden aus Schattenlängen und parallaktischen Winkeln an der Lichtgrenze ermittelt [19].

Die Durchmesser der Gestirne im Winkelmaß wurden bei einigen relativ nahen Riesensternen interferometrisch auf etwa  $\pm 0,005''$  (!) genau bestimmt, d. i. etwa 10% relative Unsicherheit des Winkelwertes. Diese Gestirne haben Größen bis zum 800fachen des Sonnendurchmessers (in Längeneinheiten).

Eine weitere Methode beruht auf der Strahlungsenergie über Vergleich der Flächenhelligkeit mit jener der Sonne.

Die Entfernungen der Sterne wurden aus den verschiedenartigsten Parallaxen berechnet. Trigonometrische Parallaxen haben als mittleren Fehler des parallaktischen Winkels bestenfalls  $\pm 0,03''$  zu bieten, wobei die Extreme der Erdbahn um die Sonne der „Basislatte“ entsprechen.

Ist die „absolute Helligkeit“ aus Linienintensitätsverhältnissen des Spektrums bekannt, ist über das Gesetz der Lichtausbreitung im leeren Raum auch die Entfernung bekannt — mit jeder Zunahme des Entfernungsmoduls (scheinbare minus absolute Helligkeit) verzehnfacht sich die zugehörige Entfernung. Die Entfernungen extragalaktischer Gestirne, wie oben, nur über die Perioden-Helligkeit bestimmt, sind um mehr als 100% ihres Wertes unsicher [17].

### 2.1.1.3 *Abstecken*

Der inverse Vorgang zur Messung wird in der Regel als mit größerer methodischer Unsicherheit behaftet angesehen, kann aber durch Rückkopplung mit Messungen sehr genau gestaltet werden.

Die Fertigung von Serienteilen wird ähnlich gesteuert wie eine vermessungstechnische Absteckung.

Genaue Arbeiten sind hier z. B. im Schiffsbau nötig, für welchen als Fertigungstoleranz  $\pm 1$  cm in Lage und Höhe über den gesamten Aufbau gelten ( $\pm 10^{-4}$ ).

Die geforderten und eingehaltenen Toleranzen bei Teilchenbeschleunigern waren aus Übervorsicht und mangelnder Anwendung der Fehlerrechnung seitens der Physiker anfangs utopisch, bis sich aus dem Gespräch mit dem Geodäten plausiblere Beträge ergaben [26]. Immerhin werden im Schnitt Lageunsicherheiten von  $\pm 0,1$  mm gefordert, was relativ ca.  $10^{-6}$  bedeutet und an die Einzelmessung noch bedeutendere Anforderungen als an das Resultat stellt. Die Längenmessungen erfolgten teils mit Invardrähten (teilweise CERN-Basisapparat), teils mit dem legendären Mekometer. Auch bei anderen Arbeiten im Zusammenhang mit Untersuchungen kernphysikalischer Vorgänge bildet das Zehntelmillimeter die Scheidemünze und erfordert nicht nur geometrisches, sondern auch physikalisches Einfühlungsvermögen.

### 2.1.1.4 *Kartierung — Digitalisierung*

Die Kartierung ist der Absteckung bzw. Fertigung (Produktion), die Digitalisierung der Aufnahme zu vergleichen.

Die Kartiergenauigkeit mit Handkoordinatographen ist durch die Teilungsgenauigkeit und Temperaturkonstanz begrenzt und liegt bei 0,2 mm absolut, maximal ca.  $3 \cdot 10^{-4}$ , wenn auch der Zehntelmillimeter noch verlässlich eingestellt werden kann. Diese Genauigkeit kann durch ungeeignete Zeichenträger und Reproduktion stark absinken (bis auf Werte von  $10^{-2}$  herab bei Lichtpausen und Xeroxkopien).

Die Unsicherheit automatischer Kartiergeräte ist primär nicht viel günstiger als die manueller, wohl aber ihre Zuverlässigkeit und die Möglichkeit, Kontinua aufzutragen.

Fräsmaschinen kommen auf  $\pm 0,005$  mm, Präzisions-Kartiertische  $\pm 0,01$  mm, Incrementalplotter  $\pm 0,025$  bis  $\pm 0,1$  mm, Elektronenstrahlplotter  $\pm 0,25$  mm. Die relative Unsicherheit kann bei den zweit- und drittgenannten Geräten wegen

der Größe der behandelten Fläche als extrem klein angesehen werden (zwischen  $10^{-5}$  und  $10^{-6}$ ) und wird von der Temperaturkonstanz und vom Zeichenträger in Bereiche von ca. 2 bis  $5 \cdot 10^{-5}$  gedrängt [10].

Invers zur vermessungstechnischen Praxis ist die Digitalisierung noch nicht so extrem genau möglich. Konventionelle Digitizer sind auf  $\pm 0,1$  bis  $0,5$  mm unsicher, Spitzenfabrikate auf  $\pm 0,04$  mm (relativ  $2 \cdot 10^{-5}$ !). Die oben gemachten Einwände hinsichtlich der mechanischen Fehlereinflüsse bleiben bestehen, ob es sich um Abnahme von Fahrarmen oder von der als empfindliche Matrix ausgebildeten Unterlage handelt. Beachtlich ist die Genauigkeit dreidimensionaler Digitizer, welche mit einem Meßfühler bestückt sind und z. B. im Karosseriebau der Automobilindustrie Verwendung finden. Als „Gesamtgenauigkeit“ in einer Werksmittteilung in „tb-report 2/71“ wird  $\pm 0,2$  mm angegeben ( $\pm 2 \cdot 10^{-5}$  relativ).

#### 2.1.1.5 Höhen- und Tiefenmessung

Betrachtet man die Erde als Kugel, so geben Auswertungen der Laufzeit der Longitudinal-(P-)Wellen seismischer Ereignisse einen deutlichen Knick ab der Entfernung von  $20^\circ$  entlang des Großkreises (ca. 2200 km). Daraus schließt man mit relativ sehr geringer Unsicherheit, ca.  $\pm 5\%$ , auf die Existenz und Tiefe des Erdkerns in 2900 km.

In dieser Tiefe werden ein Dichtesprung und eine korrespondierende un stetige Änderung der Wellengeschwindigkeit um 40% angenommen ([62] S. 370).

Die Mohorovičić-Diskontinuität wird mit ca. 1% unsicher angenommen, echte Genauigkeitsangaben liegen aber nicht vor, da ihre Tiefe von den lokalen Verhältnissen abhängt (vgl. [17] S. 75).

Erdbebenherde lokalisiert man aus der dreidimensionalen Erfassung des Eintreffens der Primärwelle, und zwar aus dem Intensitätsverhältnis in  $y$  und  $x$  das Azimut, aus dem Depressionswinkel die Entfernung, aus der Aufeinanderfolge verschiedener Wellenzüge die Tiefe. Die beiden ersten Größen sind um ca. 10 bis 20%, die dritte bis 100% unsicher ([62] S. 229–240).

Während die Erdbebenforschung aus bekannten Modellen zunächst unbekannte Ereignisse sondiert, schließt man bei Aufschließungsseismik aus bekannten Ereignissen auf zunächst unbekannte Strukturmodelle der Tiefe. Die Aussagen sind hier eher qualitativ als quantitativ, ebenso bei der Lagerstättengravimetrie. (Dichteschwankungen ein und desselben Gesteins bereits 10%.) Sogar Probebohrungen erfordern zur Konstruktion plausibler Profile viel Erfahrung und geologische Hilfsmodelle. Geoelektrische Sondierungsverfahren halten die Mitte zwischen rein mechanischen Probebohrungen und physikalischen Fernmethoden ohne Berührung. Für die Eismächtigkeit von Gletschern wurde z. B. eine Faustformel von *Brückl* mitgeteilt, wonach sie indirekt proportional der Oberflächenneigung sei (der Proportionalitätsfaktor ist großräumig verschieden). Diese Formel sowie seismische Tiefenmessungen sind auf etwa  $\pm 10\%$  unsicher. Der mittlere Fehler der Dicke der gesamten antarktischen Eisdecke wird noch mit  $\pm 100$  m ( $\pm 5\%$ ), des erdweiten Landeises mit  $\pm 200$  m ( $\pm 12\%$ ) angegeben [25].

Die Unsicherheit von Echolot-Tiefenmessungen beträgt je nach der Reliefenergie des Untergrundes 1% bis mehr als 10% und wird durch gleichzeitige Ver-

wendung und automatischer Verarbeitung mehrerer Frequenzen kleiner gehalten. Ultraschall-Echolotungen lassen sich im Gegensatz zu Tonloten bündeln und richten (vgl. den Trend zu kürzeren Wellen bei Mikrowellen-Distanzern). Für genaue Messungen sind nicht nur die bekannten Modelle für Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit von Temperatur und Tiefe, sondern auch Vergleichsmessungen nötig [1].

Für flächenhafte Unterwasseraufnahmen sind Zweimedienphotogrammetrie und Side Looking Sonar (Unterwasser-Remote Sensing) vorgesehen, doch liegen hier noch keine Genauigkeitsdaten vor [34].

Die absoluten Unsicherheiten der konventionellen geodätischen Höhenmeßverfahren sind bekannt; relative anzugeben, scheint auf Grund der mittelbaren Messung nicht sinnvoll. Interessant sind vielleicht die hydrostatischen (Schlauchwaagen) und hydrodynamischen Nivellements (Spiegel strömender Gewässer).

Erstere besitzen eine innere Genauigkeit von  $\pm 0,01$  mm je Einzelmessung (Schlauchverbindung); die äußere ist jedoch besonders von der Temperatur und mechanischen Einflüssen, wie Winddruck, nachteilig beeinflusst [56]. Schlauchwaagensysteme sind günstig zur Bauwerksüberwachung zu verwenden.

Nach komplizierten Reduktionen konnte für den Übergang über den Ärmelkanal mittels hydrodynamischen Nivellements eine Unsicherheit von  $\pm 7$  cm angegeben werden [24]. Die Genauigkeit, mit der vertikale Erdkrustenbewegungen in Europa signifikant erfaßt werden können, liegt bei sehr beachtlichen  $\pm 1$  bis 2 mm pro Jahr ([2] S. 34),  $\pm 0,5$  mm/Jahr durch 50 Jahre hindurch ([2] S. 17).

Großräumige Nivellements-Widersprüche liegen trotzdem noch bei mehreren Dezimetern ([2] S. 15).

Ähnlich den „Geodolite 3“-Laserprofilrekordern, welche etwa auf  $\pm 10^{-4}$  genau aus Flugzeugen kontinuierliche Aufnahmen unsignalisierter Geländeschnitte erzeugen konnten, erhofft man von der Satelliten-Altmetrie absolute Höhenunsicherheiten von  $\pm 1$  m der Distanz „Satellit — jeweiliger Lotfußpunkt“, nicht zuletzt sowohl Stützung der Satellitenbahndaten als auch Aussagen über kontinuierliche Meeresoberflächen und das Geoid ([2] S. 47). Die relative Genauigkeit dieser projektierten Messung würde an die  $10^{-6}$  betragen.

#### 2.1.1.6 Oberflächenprüfung

Die Oberflächenprüfung in der Meßtechnik entspricht dem Flächennivellement in der Vermessungstechnik. Im extremsten Bereich verwendet man Lichtschnittmikroskope, Abtastgeräte und Interferenz-Oberflächenprüfer; die erstgenannten im Bereich von  $10^{-3}$  mm, das letzte noch eine Dimension genauer [13]!

Für weniger anspruchsvolle Aussagen auf größeren Flächen genügt ein Präzisions-Flächennivellement oder ein profilweises Polygonisieren mittels Autokollimationsfernrohr und Aufsatzspiegel. Bei einer Richtungsunsicherheit von  $\pm 0,2''$  und 14 Polygonseiten à 20 cm erhält man als Höhengenaugigkeit eines gemessenen Punktes  $\pm 5 \cdot 10^{-4}$  mm ([44] S. 14).

*(Fortsetzung folgt)*

- [2] *Behrendt, W.*: Ein Beitrag zur Refraktion im Nivellement. Deutsche geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 28, 1958.
- [3] *Brocks, K.*: Meteorologische Hilfsmittel für die geodätische Höhenmessung. Z. f. V., 75 (1950), S. 71–76, 110–116, 145–152.
- [4] *Brunner, F. K.*: Beiträge zum trigonometrischen Nivellement im Gebirge, Dissertation der Fakultät für Naturwissenschaften der Technischen Hochschule Wien, 1972.
- [5] *Brunner, F. K.*: Lotabweichungseinfluß bei der trigonometrischen Höhenmessung mit steilen Visuren. Ö.Z.f.V., 61 (1973), Nr. 4, S. 126–134.
- [6] *Hallermann, L.*: Überblick über die auf dem Markt befindlichen Nahbereichsentfernungsmesser und deren Einsatz bei der Punktaufnahme. AVN, 79 (1972), S. 41–59.
- [7] *Hradilek, L.*: Höhenbestimmung aus elektrooptisch gemessenen Längen. Studia geophysica et geodetica, 2 (1958), S. 206–211.
- [8] *Kukkamäki, T. J.*: Über die Nivellitische Refraktion. Veröff. d. Finn. Geod. Inst. Nr. 25, Helsinki 1938.
- [9] *Niethammer, Th.*: Das astronomische Nivellement im Meridian des St. Gotthard — Die berechneten Geoiderhebungen und der Verlauf des Geoidschnittes. Astronomisch-geodätische Arbeiten in der Schweiz, 20/II, 1939.
- [10] *Tarczy-Hornoch, A.*: Über die mittleren Fehler des Endpunktes bei offenen Kreiselpolygonzügen. Mitteilungen aus dem Markscheidewesen, 76 (1969), S. 115–121.
- [11] *Tegeler, W.*: Untersuchungen zur Genauigkeit der trigonometrischen Höhenmessung im Flachland und Mittelgebirge. Dissertation; Wissenschaftliche Arbeiten der Lehrstühle für Geodäsie, Photogrammetrie und Kartographie an der Technischen Universität Hannover Nr. 45, 1971.

## Absolute und relative Genauigkeit beim Messen

Von *Kornelius Peters*, Wien

(Fortsetzung)

### 2.1.2. Flächenbestimmung

Auf die relativ schwierigen, besonders von *R. Förstner* [9] untersuchten Fehlerformeln für Flächen soll hier nicht eingegangen werden. Man soll jedenfalls auch von aus Koordinaten berechneten Flächen nicht zu viel erwarten.

Stimmen die Maße zwischen Grenzmarken auf  $\pm 10$  cm nicht mit den Koordinaten-Sperrmaßen überein, ist die aus Koordinaten gerechnete Fläche eines  $50 \times 15$  m Bauplatzes unsicher auf  $\pm 3,6$  m<sup>2</sup>, d. s.  $\pm 5\%$ . Hier liegt offenbar eine „Unbestimmtheit der Meßgröße“ vor.

Flächen werden außerhalb des Vermessungswesens sehr häufig benötigt, sei es für Raumplanung, Geographie (Dichteangaben), Wasserbau (Einzugsgebiete) oder für alle Arten der graphischen Integration in Mathematik, Maschinenbau, Physik. Laut [13] S. 120 erreicht man mit den äußerst trivial klingenden Auswiege- bzw. Auszählverfahren bis zu 1%, sicher aber nur bei entsprechend großem Meßwert.

Auch mit Planimetern (Scheibenrollplanimetern) erreicht man diese Genauigkeit. Die Eichfehlergrenzen für Planimeter und auch Stoff- und Ledermeßmaschinen sind jeweils mit 1% festgesetzt ([8], S. 46, 48).



### 2.1.3 Volumina

2.1.3.1. Die für uns interessantesten Fehler bei Volumensbestimmungen sind jene der Erdmassenabrechnung. Bei einem Profilverstand von 25 m, alle 4 m ein Meßpunkt, Höhenunsicherheit  $\pm 5$  cm, Planumbreite 30 m, Planumhöhe 2 m, beträgt der Volumenfehler wegen Näherungsansatz des Mittelprofils 0 bis 2%, wegen Unsicherheit der aufgenommenen Punkte 0,2%, wegen Idealisierung des Geländes 2,5%; bei dichter Punkt- und Profilverfolge sinkt der Gesamtfehler auf etwa 1%. Der Fehlereinfluß von der nicht plangemäßen Ausführung des Kunstkörpers ( $m = \pm 25$  cm) von 0,6% bei der zuerst genannten Punktdichte geht unter, eine Schlußvermessung in dieser Hinsicht ist also nicht nötig [51]. Der zuerst genannten Genauigkeit der Erdmassenbestimmung entspricht ziffernmäßig die Verkehrsfehlergrenze eines 50 l-Bierfasses von 3% ([8], S. 118).

Medizinische Spritzen entsprechen denselben Genauigkeitsanforderungen ([8] S. 301).

#### 2.1.3.2 Mengenstrommessung

Hier unterscheidet man direkte Messung des durchströmenden Mediums (z. B. Flügelradzähler, Ovalradzähler, Membranzähler, Ringkolbenzähler) sowie indirekte durch Druckänderung bei Durchströmen eines verengten Querschnittes ([13] S. 205 ff.). Da hier Gas- und Flüssigkeitszähler anfallen, handelt es sich um Vorrichtungen von großer wirtschaftlicher Bedeutung. Leider sind die Genauigkeiten nicht sehr groß, auch durch Wiederholungsmessungen oder Benützung des Quadratwurzelgesetzes durch Aneinanderreihen, wie beim Nivellieren, kann man sich nicht helfen ([42] S. 123). Die Unsicherheit der Gaszähler wird mit 1%, die Eichfehlergrenze für die entsprechenden Verdrängungsgaszähler mit 2%, die Verkehrsfehlergrenze mit 3 bis 4% festgesetzt.

Bei Wasserzählern für Versorgungs- und Verrechnungszwecke liegen die Eichfehlergrenzen zwischen 1% und 10% (die relative Genauigkeit steigt mit der Durchflußmenge) [8]. Die Eichfehlergrenzen der Zapfsäulen betragen 2,5%; bei den großen Raffinerien und Pipelines kämpft man eben die Unsicherheit der Messung der riesigen durchzuschleusenden Mineralölmengen von 1% auf 0,5% herab, teilweise unter Verwendung von Doppelmessungen durch Hintereinanderschalten.

#### 2.1.3.3 Niederschlag, Verdunstung

Die Komponenten der wirtschaftlich so wichtigen Abflußbilanz der Gewässer sind: Niederschlag, Verdunstung, Unterirdischer Abfluß, Oberirdischer Abfluß.

Während man den Betrag des unterirdischen Abflusses nur schätzen kann und für Verdunstungsmessungen keine Genauigkeitsangaben möglich sind, liegen für den Niederschlag Erfahrungswerte und den oberirdischen Abfluß exakt ermittelte Genauigkeitsdaten vor.

Die Unsicherheit der Niederschlagsmessung ist vom Instrument (Querschnitt, Wandbenetzung), Umwelteinflüssen (Windexposition, Verdunstung) sowie von der nötigen Extrapolation der punktförmigen Meßstelle auf die Umgebung beeinflusst. Sie beträgt etwa  $\pm 5\%$  der Jahressumme ( $\pm 30\%$  des Ereignisses) für das Gerät und wird mit ca.  $\pm 10\%$  von der Aufstellung (Umwelt) im Jahr beeinflusst. Die Extrapolation bringt an Unsicherheit je behandelte Fläche für ca. 100 km<sup>2</sup> minde-

stens 30% des Jahresniederschlages, systematische Einflüsse sind der Richtung des Vorzeichens, nicht aber dem ungefähren Betrag nach bekannt.

Abflußmessungen sind je nach den Voraussetzungen bei der Einzelmessung 2% bis 8% genau, bei Meßreihen jedoch 5% bis 15%.

(Diese Angaben stammen von den Kollegen *Gutknecht* und *Reitinger*.)

#### 2.1.4 Modellversuche

Modellversuche erweisen sich besonders in Wasserbau und Statik als nützliches Mittel, eine auch jetzt noch a priori zu komplizierte numerische Untersuchung zu ersetzen. Bei hydrologischen Versuchen zeigt sich große Abhängigkeit vom Maßstab und auch der Ausführung als Schnitt- oder Vollmodell. Im ersten Fall ist die 3. Dimension, im zweiten Fall die Lage genauer. Bei Durchströmversuchen soll ja auch nur geklärt werden, bei welcher Ausgestaltung des Tosbeckens die Energie des Wassers, welches durch das geöffnete Wehr strömt, vernichtet wird. Ähnlich liegt der Fall bei den Überflutungssimulationen, wie sie etwa bei den DoKW ausgeführt werden [59]. Die Reliefgenauigkeit läßt sich gut angeben, doch hängt die tatsächliche Genauigkeit (sofern überhaupt eine anzugeben ist — meinen wir die der Pegelstände oder die der Lage der Benetzungslinie?) von der Nachbildung des Rauigkeitsbeiwertes und von der jeweiligen Wasserhöhe ab; eine Rückkopplung mit bekannten Wasserstandganglinien abgelaufener Hochwässer ist möglich.

Bei statischen Modellversuchen rechnet man mit einer Genauigkeit von 3% bis 5% [2], diese Angaben gelten auch für Belastungsversuche von Dammbalken in der Hydraulik. In Sonderfällen, wie beim Zuschnitt des Münchener Zeldaches, gelten aber andere Überlegungen: bei 1:200 Modellmaßstab entspricht 0,2 mm Meßgenauigkeit bereits mehr als die halbe elastische Längenänderung eines 50 m-Seiles von Null auf die gewünschte Vorspannung [31]. Modellversuche im weiteren Sinne sind auch Simulationen sozioökonomischer Vorstellungen durch Planspiele, Monte-Carlo-Methoden usw., sind aber nicht Gegenstand dieser Arbeit. Die zuerst erwähnten Modellversuche kann man als Analogrechenanlagen auffassen, deren Aussage häufig nur qualitativ sein kann, aber schon auf dieser Stufe für einen iterativen Verbesserungsprozeß sehr wertvoll ist.

## 2.2 Winkel

### 2.2.1 Parallaktische Winkel

In der Industrievermessung sehr verbreitet, ist das Autokollimationsfernrohr bei uns kaum bekannt, da von speziellem Zuschnitt. Die Meßunsicherheit am Okular (Strichkreuz) beträgt  $\pm 0,2''$  (!), die echte Genauigkeit hängt von der mechanischen Aufbringung des Spiegels am zu vermessenden Objekt ab [44].

Eine fast unglaubliche Genauigkeit kann mit Interferometern in direkter Messung erreicht werden, nämlich  $\pm 0,005''$  [61]. Dies soll in der Geodäsie zur Bestimmung von Refraktionskoeffizienten durch gleichzeitige Messung mit mehreren Wellenlängen von Laserlicht verwendet werden. Bisher konnte man die minimalen Zenitdistanzunterschiede nicht messen. Mit Interferometern kann der Brechungsindex auf  $10^{-7}$  bestimmt werden [26].

### 2.2.2 *Astronomische Ortsbestimmung, Erdmessung, absolute Richtungen*

Die besten erreichbaren Genauigkeiten betragen derzeit

für ein Azimut	$\pm 0,35''$ ,
für die geographische Breite	$\pm 0,25''$ ,
für die geographische Länge	$\pm 0,15''$ [33], [55].

Die Länge war lange das Stiefkind der geographischen Ortbestimmung, da sie eng mit der Zeitübertragung verbunden ist. Aus demselben Grund ist sie es jetzt nicht mehr. Interessant in der zahlenmäßigen Übereinstimmung ist der mittlere Fehler einer stationsausgeglichenen Richtung im österreichischen Dreiecksnetz I. Ordnung von  $\pm 0,36''$  [4].

Abgesehen von der astronomischen Azimutbestimmung verwendet man noch die gyroskopische und magnetische. Die derzeit genauesten Kreiseltheodolite orientieren  $\pm 35^\circ$  ( $10''$ ) unsicher ([45] S. 380), unter Laborbedingungen lt. *Gregerson* noch eine Dimension genauer.

Magnetische Orientierungen sind schon von der Instrumentenseite her mit einer Unsicherheit von etwa  $\pm 10^\circ$  behaftet ([5] S. 111); die genaue Bestimmung der magnetischen Deklination ist sehr aufwendig und erfolgt im Labor mittels „Deklinationen“ auf weniger als  $\pm 1^\circ$ .

### 2.2.3 *Winkelmessung in der Physik*

Die Geräte mit konventionellen Teilkreisen zeigen auch dieselben Genauigkeitskriterien wie konventionelle Theodolite. Mit Spektrometern kann man Winkel von Prismen und Spiegeln (so entsprechend definiert) auf etwa  $\pm 5''$  messen; die zugehörigen Brechungsindizes fallen auf  $10^{-5}$  an (vgl. Stellenzahl von trigonometrischen Tafelwerken!)

Der Drehungswinkel der Polarisationssebene wird mit dem Polarimeter auf  $\pm 25''$  bestimmt ([26] S. 108, S. 30, S. 75).

In der „Längenmeßtechnik“ verkörpert man Winkel durch Sinuslineale und Tangenslineale, welche durch Aufleger auf Meßrollen und Endmaße über die entsprechende Funktion den Winkel herstellen: Genauigkeit besser als  $\pm 30''$ .

Für uns überraschend genau ist die Winkelmessung und -bewahrung in der Elektrotechnik. Meßwandler der genauesten Klasse dürfen einen Fehlwinkel von höchstens  $\pm 5'$  erzeugen; ein Fehlwinkel des transformierten Stromes bedeutet, daß der Strom nicht in gleicher Phase auf den sekundären Belastungskreis übertragen wird ([3] S. 347).

Schließlich sei an den von den Geodimetern bekannten Phasenschieber erinnert. Die von *Mitter* mitgeteilte Faustformel für die optimale Auflösung des Phasenwinkels des Auflösungsstromes von  $\lambda/3000$  bzw.  $\pm 0,12^\circ$  Winkelfehler ([23] S. 324, 325) liegt ziffernmäßig genau bei dem oben angegebenen Wert.

### 2.2.4 *Fluchtgenauigkeit*

Maschinengroßteile, z. B. in der Papierindustrie, sollen auf besser als  $\pm 1$  cm Querabweichung ausgerichtet sein (ca.  $\pm 5 \cdot 10^{-5}$ ); Achsen von 1 bis 5 m Länge auf 0,1 mm ( $\pm 5 \cdot 10^{-5}$ ); Brückenschläge haben laut *Zimmermann* eine Quertoleranz

von  $\pm 1$  cm (ca.  $\pm 5 \cdot 10^{-6}$ ); ein Tunnelquerfehler von 10 cm bei 10 km Länge bedeutet eine relative Unsicherheit von  $\pm 2 \cdot 10^{-5}$ .

### 2.2.5 Horizontal- und Vertikalstellen

Hier soll von Einflüssen der Lotstörung abgesehen werden.

Die Genauigkeit der besten Nivellier-Kompensatoren liegt bei  $\pm 0,2''$  ([17] S. 284), das ist  $\pm 10^{-6}$ ; jene von optischen Präzisionsloten bei  $\pm 10^{-5}$  ([17] S. 165); um diese Werte einhalten zu können, sind sehr viele andere Bedingungen einzuhalten.

Der mittlere Fehler der mechanischen Ablotung wächst mit der Teufe.

Eingewichtslotung auf 900 m Teufe ist auf etwa  $0,2''$  unsicher, Mehrgewichts- lotung ist sogar um das Vierfache genauer! Auf das Perpendikel umgerechnet, geben die  $0,2'' \pm 0,9$  mm; aus einem Doppellotungs-Richtungsanschluß folgern daraus noch immer  $\pm 2'$  Richtungsfehler auf 2 m Länge [38].

Mittels Klinometern, die mechanische Verbindung zweier Meßpunkte mit einer äußerst genauen Libelle, lassen sich Neigungen auf 1 m benachbarter Punkte auf  $\pm 2''$ , das ist  $10^{-5}$  oder 0,01 mm, messen [11].

Gegenüber den herkömmlichen Röhrenlibellen ist bei der elektronischen Libelle ein Pendelkörper der eigentliche Neigungsmesser, dessen Ausschläge in eine elektrische Größe umgewandelt und gemessen werden. Im Labor ergab sich für die beiden engeren Empfindlichkeitsbereiche ein Einstellfehler von  $\pm 0,07''$  bzw.  $\pm 0,14''$  (auf  $50''$  bzw.  $100''$ ), welcher auch unter extremen Temperaturbedingungen nicht wesentlich überschritten wurde; im Bereich  $\pm 8'$  betrug der Einstellfehler  $\pm 2''$  [35]. Dieses Gerät ist für technische Feinmessungen gut geeignet.

Wesentlich geringer als vielleicht zu erwarten, sind die Ausrichtegenauigkeiten von Raumflugkörpern und deren Abschußstellen, da der Flug selbst kontinuierlich nachkorrigiert werden kann [58]. Jede Messung der Position wird als Realisierung in einem stochastischen Prozeß aufgefaßt und viele Messungen während eines Fluges können noch signifikanter verarbeitet werden als eine in jeweils vielen Flügen [14].

Das Vertikalstehen beim Start muß jedenfalls nicht durch technische Feinmessungen überprüft werden.

## 2.3 Zeit und zeitrelevante Daten

### 2.3.1 Zeit

Wie schon aus 1.2 ersichtlich, kann die Zeit unter allen Basiseinheiten mit der größten Genauigkeit gemessen und bewahrt werden. Dies beruht einerseits auf der Konstanz jener periodischen Erscheinungen, welche zur Definition der Zeiteinheit dienen und somit den ziffernmäßig großen Nenner bei der Relativunsicherheit liefern, andererseits auf der Genauigkeit der Frequenzmessung. Die Frequenz ist ja der Reziprokwert der Zeit.

Bereits mit serienmäßigen, handelsüblichen Frequenzzählern sind relative Genauigkeiten zwischen  $10^{-6}$  und  $10^{-9}$  möglich ([27] S. 160).

Die Empfindlichkeit und Reaktionsgeschwindigkeit von photographischen Schichten reicht aus, um bis zu  $3 \cdot 10^6$  Bilder/sec zu belichten.

Die Frequenz quantenmechanischer Schwingungen von Atomen, welche ihr Energieniveau ändern, wird auf  $10^{-11}$  bis  $10^{-12}$  sicher bestimmt ([13] S. 225, 226). Sogenannte Atomuhren liefern die Nanosekunde ( $10^{-9}$  sec) scharf, Quarzuhren erhalten noch immer eine Frequenzkonstanz von etwa  $10^{-9}$  bis  $10^{-10}$ . Die genauesten Unruheuhren mit Chronometerhemmung driften mit 0,1 sec/Tag ( $\approx \pm 10^{-6}$ ), mit Ankerhemmung 4 sec/Tag ( $\approx \pm 4 \cdot 10^{-5}$ ) ([13] S. 219, 220).

Bei Präzisionspendeluhren kann man zwar tägliche Gangschwankungen von nur etwa  $\pm 0,002$  sec erreichen, das sind  $\pm 2 \cdot 10^{-8}$ , doch ist der Messungsaufwand wesentlich größer als bei den Zeitmeßgeräten auf molekularer bzw. atomarer Basis.

Im Alltag ist die relative Zeitgenauigkeit nicht so bedeutend. Hier herrschen Anforderungen um  $10^{-3}$  bis  $10^{-4}$  vor, ob es sich um einen Eisenbahnfahrplan (1 min/Tag oder um Wintersportveranstaltungen (0,01 sec auf 2 min) handelt.

Geologische oder nicht belegte geschichtliche Daten konnte man vor Einführung der Halbwertzeiten in ihrer Abfolge nur qualitativ bestimmen; in Ausnahmefällen durch Auszählen von Jahresringen oder Strukturveränderungen. Seit etwa 30 Jahren kann man aus dem Verhältnis von Ausgangs- und Endprodukt radioaktiven Zerfalls über bekannte Halbwertszeiten auf sehr lange Zeitintervalle schließen.

Das Alter der Erde wird mit ca. 20% Unsicherheit zu  $4,5 \cdot 10^9$  Jahren bestimmt (Rubidium-Strontium-Methode), einige historische Daten auf  $\pm 100$  Jahre genau mittels der C 14-Methode (1% Unsicherheit) ([13] S. 226, 227).

Sternalterbestimmungen junger Sterne (Dimension Millionen Jahre) streuen um  $\pm 55\%$  ([17] S. 251, 252). Die ältesten Gestirne (Kugelhaufen) sind an die 6 Milliarden Jahre alt (nur 50% älter als die Erde!); das „Weltalter“ beträgt etwa 10 Milliarden Jahre  $\pm 25\%$ . Diese Zahl kann auch aus der „Hubbleschen Konstanten“ gewonnen werden, wenn man eine lineare Expansion des Weltalls voraussetzt [17]. Diese Konstante  $H$  kommt in der Beziehung  $V$  (Radialgeschwindigkeit eines Gestirns) =  $H \cdot r$  ( $r$  = Entfernung) vor, welche mit einer Unsicherheit von  $\pm 150$  km/sec (das ist 0,5% der Lichtgeschwindigkeit) behaftet ist.

### 2.3.2 *Geschwindigkeit*

Die Geschwindigkeit kann man nicht nur, wie meist angenommen, aus Weg und Zeit, sondern auch aus Masse und Energie aus Grundgesetzen ableiten.

Darüber hinaus finden Dopplereffekt, Druckdifferenzen sowie verschiedenste Formen der Winkelgeschwindigkeitsmessung Anwendung.

Im ersten, trivialen Fall ist für die Genauigkeit natürlich die relative Unsicherheit von Zähler und Nenner maßgeblich. Bei Bestimmungen von Kontinentaldriften müssen sowohl die Entfernungsdifferenzen genau als auch die Messungsreihen lang sein, um quantitativ die Bewegung in cm/Jahr angeben zu können. Signifikante Werte dieser Art liegen noch nicht vor.

Beispiele für Geschwindigkeitsmessung im Alltag:

Kraftfahrzeuge über Zählung der Umdrehungen und den bekannten Radumfang; eichpflichtigen Anlagen (z. B. in Verbindung mit Fahrtenschreibern) wird eine Eichfehlergrenze von 5% der Anzeige und der Aufzeichnung für die oberen zwei Drittel des Meßbereiches gesetzt ([8] S. 43).

Flugzeuge z. B. über Staurohre (Unsicherheit der Anzeige  $\pm 1\%$ , hiezu noch Unsicherheit wegen Windeinfluß), aus Positionsdifferenzen und Zeitmessung, durch Integration der Daten aus Beschleunigungsmessern, aus identifizierbaren Bodenpunkten usw.

Schiffe mittels Log (mißt durch Umdrehungszählung relative Geschwindigkeit), aus Positionsdifferenzen, durch Dopplermessungen (u. a. auch nach Satelliten).

Bei Flug und zur See war früher die Geschwindigkeit zur sogenannten Koppelnavigation erforderlich; aus Geschwindigkeit, Zeit und Kurswinkel konstruierte man den vermutlichen Polygonzug des Kurses, welcher hauptsächlich durch astronomische Messungen gestützt wurde. Die Genauigkeit des Polygons betrug einige Prozente.

Radargeschwindigkeitsmessungen beruhen im Gegensatz zu Radarentfernungsmessungen nicht auf Impulszählungen, sondern auf dem Dopplerprinzip. Die bekannten Verkehrsradaranlagen sind vor allem wegen Unbestimmtheit der Meßgröße auf etwa  $\pm 20\%$  unsicher. In der Navigation ist die Genauigkeit wesentlich größer; die Dopplernavigation ist eine automatisierte Koppelnavigation, wobei Abdrift und Kurswinkel über Kreisel gemessen werden [13], [34].

Die Geschwindigkeitstoleranzen im Raumflug entsprechen ungefähr den Richtungstoleranzen; für einen Mondtreffer wurden etwa  $0,01^0$  ( $\sim 10^{-4}$  des rechten Winkels) sowie  $1,2 \text{ m sec}^{-1}$  ( $\approx 10^{-4}$  der Fluchtgeschwindigkeit) gefordert [58].

Die Schallgeschwindigkeit unter Wasser kann man besser als auf  $\pm 5 \text{ m sec}^{-1}$  (das sind  $3^0/00$ ) messen. Die exakte Bestimmung der jeweils aktuellen Lichtgeschwindigkeit in der Atmosphäre ist das große Problem der elektrooptischen und elektronischen Entfernungsmessung.

Die Refraktion wirkt auch auf die Genauigkeit der Zeitübertragung durch Mikrowellen ein. Die Zeitübertragung auf dem Funkweg ist auf  $\pm 10^{-3} \text{ sec}$  unsicher. Die Reflexionen an den verschiedenen Zwischenschichten der Atmosphäre, die von den Frequenzen abhängige Ausbreitungsgeschwindigkeit  $278000$  bis  $292000 \text{ km/sec}$  sowie die Signalverspätung sind zu beachten [13].

Die Lichtgeschwindigkeit im fiktiven Vakuum wurde jüngst wieder einmal neu bestimmt, und zwar von *Bjerhammar* durch zweiwöchige Laser-Geodimetermessungen in Finnland ([2] S. 12). Sein Wert beträgt  $(2,99792375 \pm 0,000000060) 10^8 \text{ m/sec}$  und liegt damit knapp an dem 1955 von *Schöldström* mittels Geodimeter 2A ermittelten Betrag.

In der folgenden Abb. 2 wird eine Übersicht über die zunehmende äußere und innere Genauigkeit der Lichtgeschwindigkeitsbestimmungen als repräsentativ für den Fortschritt der Meßtechnik gegeben (vgl. [23] S. 150, 151), der Maßstab der Abbildung ist verzerrt.

Die Geschwindigkeit von geladenen Teilchen wird mit Laufzeitmethoden ermittelt, nicht anders als jene von Leichtathleten.

Die mittlere Molekulargeschwindigkeit  $\bar{c}$  bei der Brown'schen Molekularbewegung ist der Wurzel aus der absoluten Temperatur direkt und der Wurzel aus dem Molekulargewicht umgekehrt proportional. Aus dieser Formel ergibt sich die Genauigkeit abhängig von der Temperaturermittlung und der stochastischen Eigenschaft des Gases. Luft von  $0^0 \text{ C}$  hat z. B.  $\bar{c}$  von  $485 \text{ m/sec}$  ([66] S. 329).

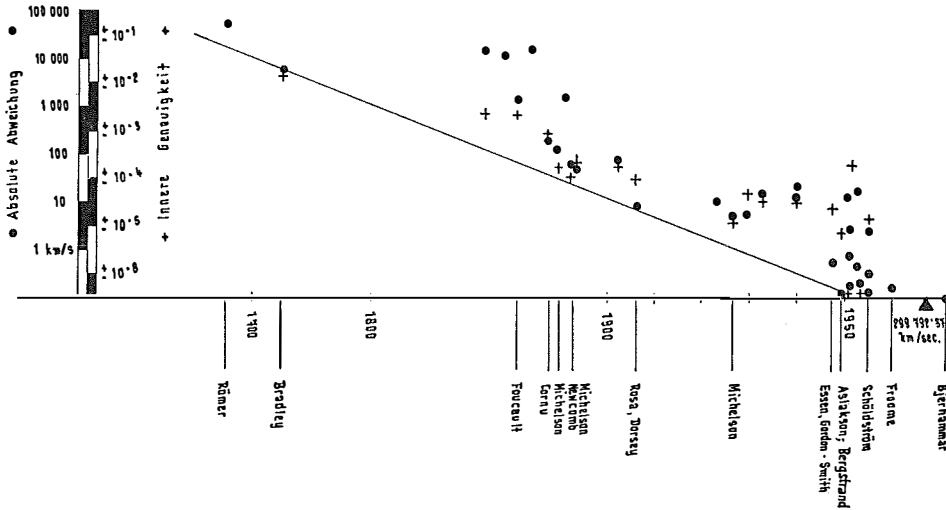


Abb. 2

Die Bahngeschwindigkeiten der Elektronen um den Atomkern ergeben sich aus ihren Energieniveaus und der „Sommerfeld’schen Feinstrukturkonstanten“, welche die Bahngeschwindigkeit auf dem kleinsten Bohr’schen Kreis des Wasserstoffatoms zur Lichtgeschwindigkeit mit  $1/137$  in Relation setzt ([66] S. 636).

Die Gesetze des Makrokosmos hinsichtlich der Relativbewegungen im Sonnensystem sind mit großer Genauigkeit erfaßt, außerdem durch die Formeln der Stellarodynamik verbunden.

Die weiteren Gestirnbewegungen werden in tangentialer Richtung durch wiederholte Winkelmessungen, Ortsbestimmungen usw. klassisch gemessen, in radialer Richtung unter Verwendung des Dopplereffektes bestimmt. Positive Radialgeschwindigkeit (zentrifugal genau vom Beobachter weg gerichtet) bewirkt Rotverschiebung der Spektrallinien. Die relative Wellenlängenverschiebung  $\Delta\lambda/\lambda$  ist gleich der Radialgeschwindigkeit gebrochen durch die Lichtgeschwindigkeit; bei Licht von  $5 \cdot 10^{-7}$  m Wellenlänge deutet eine Verschiebung um  $2 \cdot 10^{-12}$  m auf eine Geschwindigkeit von 1 km/sec ([17] S. 169). Die Verschiebung wird bezogen auf die im irdischen Laboratorium festgelegte Nulllage der Spektrallinien. Die oben angegebene Genauigkeit ist wohl die größtmögliche einer Bestimmung; für 59% aller bekannten Sterne wird eine Radialgeschwindigkeit unter 20 km/sec angenommen.

Die Beziehung zwischen Radialgeschwindigkeit und Entfernung wurde empirisch in der Hubble’schen Konstante niedergelegt, vgl. 2.3.1 dieser Arbeit.

Die größten in jüngster Zeit beobachteten Geschwindigkeiten von Gestirnen (Quasaren) lagen an 80% der Lichtgeschwindigkeit (z. B. [53]).

### 2.3.3 Beschleunigung

Beschleunigungsmessungen haben in der Technik große Bedeutung, weil Beschleunigungen Kräfte erzeugen, die diesen proportional sind und umgekehrt Beschleunigungen als Folge von Kräfteinwirkungen auftreten. Als Einheiten dienen

oft die aus der Geophysik bzw. Geodäsie bekannten Größen  $g$  oder Gal; die Schwerebeschleunigung soll aber unter 2.4.2 behandelt werden.

Beschleunigungen werden entweder als Differentiale von Geschwindigkeitsmessungen oder als wirksam werdende Trägheitskraft einer vorgegebenen Masse bestimmt.

Federpendel-Beschleunigungsmesser erfassen vor allem oszillatorische Bewegungen aus der Gleichgewichtsbedingung von Trägheitskraft und Federkraft. Der Meßbereich umfaßt je nach Federkrümmung und Vergrößerungsmaßnahmen Beschleunigungen zwischen  $10^{-6} g$  bis  $5 \cdot 10^3 g$ , das sind fast 10 Dimensionen. Piezoelektrische Beschleunigungsmesser beruhen darauf, daß die beim Schwingen eines Quarzes erzeugten Ladungen seiner mechanischen Verformung proportional sind. Mit Ladungsverstärkern mißt man bis zu  $50 g$  ab  $3 \cdot 10^{-4} g$  (relative Unsicherheit  $< 10^{-5}$ !) bzw. bis zu  $50000 g$  ab  $0,06 g$  ( $\sim 10^{-6}$ ).

Außer diesen beiden klassischen Methoden ([13] S. 237–240) in jüngster Zeit in der Raumfahrt verwendete Systeme wie Magnet-Stabilisierungskugeln haben noch keine praktische Bedeutung erlangt, obwohl sie theoretisch bestechend konstruiert sind.

## 2.4 Masse und abgeleitete Daten

### 2.4.1 Masse

Im Zwiespalt, Masse oder Gewicht als Basiseinheit zu wählen, entschied man sich für die Masse. In der Definition unabhängig von der Schwere, bedarf sie ihrer Wirkung dennoch bei der Messung; ein und dieselben Massen wiegen bekanntlich an Orten verschiedener Schwere verschiedene Gewichte. Vergleichswaagen sind nur abhängig von Massenormalen, Meßwaagen auch von der Schwerebeschleunigung.

Konventionelle Analysenwaagen auf dem Vergleichsprinzip messen zwischen  $\pm 10^{-5}$  und  $10^{-6}$  ihrer Anzeige unsicher, wobei die Meßbedingungen schon sehr anspruchsvoll sind ([13] S. 153).

Die Eichfehlergrenzen gebräuchlicher Waagen lauten laut [8]:

für Gewichte im Handel etwa 0,4%,

Handelswaagen aller Art etwa 1% (die genannten Genauigkeiten sind noch abhängig vom Meßwert),

Waagen über 20 kg Belastung 0,5%.

Zur Schnellwägung bedarf es elektrischer Meßmittel. Elektronische Waagen nach dem Tauchspulenprinzip gewähren Anzeigegeauigkeiten von  $10^{-5}$  Pond (ziffernmäßig 1 p = 1 g) bei 100 p Höchstlast ( $\pm 10^{-7}$  relative Unsicherheit) ([13] S. 155).

Die Masse eines Elektrons wird aus seiner Ablenkung im Magnetfeld bestimmt. Sie beträgt laut [43], S. 353  $9,1 \cdot 10^{-31}$  kg und ist auf etwa 1% ihres Wertes unsicher.

Das Produkt aus Erdmasse mal Gravitationskonstante läßt sich aus Schweremessungen, den Erddimensionen und dem Gravitationsgesetz sehr genau berechnen.

Da jedoch die Gravitationskonstante auf ca.  $\pm 1\%$  unsicher ist, kann die Erdmasse selbst auch nicht genauer angegeben werden (ca.  $6 \cdot 10^{24}$  kg), vgl. [52].



Die Masse von Sternen läßt sich überall dort bestimmen, wo die Wirkungen der Masseanziehung beobachtet werden können. Aus einem empirischen Masse-Leuchtkraft-Diagramm (Hertzsprung-Russell-Diagramm) können dann die Massen aller Gestirne aus bolometrischen Messungen berechnet werden. Die Genauigkeit dieser Daten ist allerdings sehr gering; die Temperatur geht in die strahlungsenergetisch bestimmten Dichten mit der 6. Potenz ein.

Die Dichte (Masse pro Volumen) ist natürlich auch von der Größenbestimmung her beeinflusst.

Die größten gemessenen Massen betragen etwa das 25fache der Sonnenmasse; diese beträgt  $2 \cdot 10^{30}$  kg.

Die Dichten der Gestirne variieren aber in unvorstellbarem Ausmaß; die Werte liegen zwischen den Grenzen  $10^{-4} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  und  $4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , bei den „Weißen Zwergen“ in der Größenordnung  $10^5$  bis  $10^7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ .

Als Vergleich die Dichte der Erde  $5.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , die der Sonne  $1.4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  ([17] S. 73, 179–181).

Nur Gestirne von geringerer als ursprünglich der 1,2fachen Sonnenmasse können den stabilen Zustand der „Weißen Sterne“ erlangen, welche durch Ausglühen schließlich so wärmeenergiearm werden, daß sie bis zur Unsichtbarkeit abkühlen. Sie bestehen aus entartetem Fermigas, bei welchem die Elektronen von den Atomkernen „abgequetscht“ sind. Ist aber die Masse so groß, daß die Energie des „entarteten Elektronengases“ zum Eindringen der Elektronen in die Kerne und „Verschlucken“ der Elektronen führt, erfolgt ein Gravitationskollaps, welcher den Sterndurchmesser auf weniger als ein Hundertstel reduziert und die Dichte auf  $10^{14} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  erhöht. Diese sogenannten Neutronensterne oder Pulsare wurden schon theoretisch vorhergesagt, bevor die Erscheinung von Supernovae als Explosion durch Freiwerden von Gravitationsenergie beim Zusammenbruch eines Sterns zu Neutronendichten gedeutet wurde. Doch Neutronensterne können noch immer instabil sein; der Gravitationskollaps der überkritischen Masse verursacht eine immer stärker werdende Raumkrümmung, welche den Stern „wie eine Blase abschnürt und aus dem Weltall ausschließt“ [64].

Diese Sterne besitzen eine so gewaltige Oberflächenschwerkraft, daß sie keine elektromagnetische Strahlung mehr verlassen kann, nur die Schwerkraftwirkung bleibt bestehen. Diese Phänomene wurden allerdings noch durch keine Beobachtung belegt (1972).

#### 2.4.2 Schwere

Die Schwere soll hier behandelt werden, obwohl ihre Einheit die Dimension einer Beschleunigung aufweist. Der korrekte Ausdruck lautet demnach auch „Schwerebeschleunigung“. Absolutbestimmungen der Schwere werden mit Pendeln bzw. durch Mehrpunktlaufzeitmessungen von Freiwurf- und Freifallexperimenten durchgeführt; relative Werte werden gravimetriert, wobei die Messungsanordnung ähnlich dem Nivellement Linien- und Flächennetze, lokale für Ingenieurzwecke und an Absolutwerte angeschlossene für wissenschaftliche Untersuchungen vorsieht.

Die genauesten Absolutbestimmungen der jüngsten Zeit zeigen innere Genauigkeiten von  $\pm 0,3 \text{ mGal}$  (Pendel) bis  $\pm 0,003 \text{ mGal}$  (Tripelprisma als Fall-

körper, interferometrische Fallwegmessung [2] S. 24). Dies entspricht relativen Unsicherheiten von  $3 \cdot 10^{-7}$  bis  $3 \cdot 10^{-9}$ , welche natürlich nur für den Beobachtungsort gelten.

Die sphäroidischen Schwerekorrekturen haben eine Schwankungsweite von  $5 \text{‰}$ , die Höhenkorrekturen von  $3 \text{‰}$ , die Anomalien von  $0,5 \text{‰}$ . Die Genauigkeit von Langstreckengravimetermessungen liegt bei  $\pm 0,1 \text{ mGal}$  [63], das sind bei Schwankungsweiten von maximal  $1 \text{ Gal}$  etwa  $10^{-4}$  relative Unsicherheit, zu deren Erlangung aber noch die sorgfältigsten topographischen Reduktionen angebracht werden müssen.

Schweremessungen zur See sind neuerdings auf 2 bis 3 mGal, in der Luft 5 bis 8 mGal ungenau; Hubschraubergravimetrie direkt über dem Boden ist wegen besserer Lagegenauigkeit nur  $\pm 1 \text{ mGal}$  unsicher ([2] S. 26, 27).

Die Maximaleinwirkung der *Erdzeiten* auf geodätische Messungen liegt für alle Komponenten über der Meßgenauigkeit (Lotrichtung  $0,03''$ , Höhen  $0,5 \text{ m}$ , Schwere  $0,2 \text{ mGal}$ ) wirkt sich aber wegen der großräumigen Art des Auftretens hauptsächlich auf absolute Schweremessungen aus. Daher werden meist auch nur die Komponenten der Schwereänderungen (mittels Horizontalpendelregistrierungen) meßtechnisch erfaßt [47]. Die charakteristischen Werte der Tiden werden aus komplizierten harmonischen Analysen berechnet und waren in Graz mit einer inneren Unsicherheit von etwa 1% behaftet; die Abweichung von den theoretisch vorausgerechneten Werten überstieg aber oft die Signifikanzgrenze und betrug für die Sonneneinflüsse das Mehrfache des Sollwertes.

### 2.4.3 Druck

Für die Angabe relativ kleiner Drucke wird als Einheit das Torr (1 mm Hg-Säule), für größere  $1 \text{ at}$  ( $1 \text{ kp} \cdot \text{cm}^{-2}$ ) = 760 Torr verwendet. Absolute Druckwerte können nicht sehr genau, relative (Druckänderungen) wesentlich schärfer gemessen werden.

Die geringsten gerätetechnisch zu realisierenden Vakua betragen  $10^{-13}$  Torr; sie werden über verschiedene Ionisations-Vakuummeter Typen im Bereich  $10^{-3}$  bis  $10^{-13}$  Torr mit Unsicherheiten größer als 1% des Wertes bestimmt.

Der Luftdruck für meteorologische und Höhenmessungen wird mit Quecksilberbarometern auf 0,1 Torr genau, mit Aneroiden auf 0,01 bis 0,03 Torr und mit Siedethermometern auf 0,2 Torr unsicher bestimmt, dies entspricht im günstigsten Fall ca.  $\pm 2 \cdot 10^{-5}$  relativer Unsicherheit. Dem „Quecksilber“-Maßstab (Torr-) steht in der Physik noch das strenge Druckmaß des C.G.S.-Systems als Kraftmaß (Dyn), bezogen auf die Flächeneinheit ( $\text{cm}^2$ ), gegenüber: 1 Dyn drückt auf  $1 \text{ cm}^2$  mit 1 bar. In der Meteorologie wird aus Zweckmäßigkeitsgründen der Druck von  $10^6$  Dyn als bar bezeichnet. Damit ergibt sich die bekannte Beziehung

$$760 \text{ mm Hg} = 1013,25 \text{ mbar (Millibar)}$$

mit den Umrechnungswerten

$$1 \text{ mm Hg} = 1,3332 \text{ mbar und } 1 \text{ mbar} = 0,75006 \text{ mm Hg.}$$

Die höchsten meßbaren Drucke liegen bei  $10^5$  at; sie werden durch polymorphe Umwandlung von Substanzen in Verbindung mit einem Widerstandmanometer ( $\pm 0,5\%$ ) gemessen. Die Fixpunkte der Höchstdruckskala sind etwa 5% ungenau.

Die Drucke im täglichen Leben (Überdruckschleuse, Reifenmanometer, Verdichtung beim PKW) werden mit höchstens  $\pm 10\%$  genau gemessen.

Druckdifferenzen werden mit Flüssigkeitssäulen auf etwa  $10^{-6}$  at bis  $10^{-8}$  at ( $10^{-5}$  Torr) bestimmt; Relativgenauigkeit ca.  $\pm 10^{-4}$  ([13], [26]).

#### 2.4.4 Leistung

Als Beispiel für Leistung sei nur jene von Kraftfahrzeugen bzw. Eisenbahntriebfahrzeugen angeführt. Beide werden mittelbar gemessen.

Beim Kraftfahrzeug wird das Drehmoment bei verschiedenen Drehzahlen an einem „Bremszäum“ (Leistungsbremse) ermittelt. Die bekannte Formel „Leistung = Drehmoment mal Drehzahl“ gestattet es, die Motorleistung oder auch die Nettoleistung, je nachdem die Bremse angelegt wird, auf 0,1 PS unsicher zu bestimmen, das sind etwa  $\pm 10^{-3}$ . Die Drehzahlmessung als Frequenz kann als fehlerfrei angenommen werden. Innerhalb einer Serie streuen aber verschiedene Motoren bei gleicher Einstellung bis 10% des Nennwertes. Daß man aus den Leistungsdaten nur sehr bedingt auf Beschleunigung und Spitze schließen darf, ist bekannt.

Noch weniger zulässig ist ein solcher Schluß bei Eisenbahntriebfahrzeugen. Zum Beispiel sah das Pflichtenheft der seit 1952 gebauten Ae 6/6 der SBB die Beförderung von 600 t bei 70 km/h über die maximal 26% der Gotthard-Südrampe vor; für die Lok wurden 6000 PS angegeben. Die 103 der DB (ab 1965 gebaut) von 14000 PS befördert laut Pflichtenheft ebenfalls 600 t mit 70 km/h über die fünfmal so kurze und krümmungsmäßig günstigere Geislinger Steige mit 23% Größtneigung.

Die Leistungsmessung erfolgt entweder aus bekannten Dimensionen der Motoren und Stromaufnahme oder über die Daten der Strecke, Reibungswerte und Anhängelast über die Beziehung Leistung = Zugkraft mal Geschwindigkeit. Für die Genauigkeit und Serienkonstanz gelten ähnliche Werte wie bei den PKW. Vor allem muß der Zeitraum, in dem die Leistung zu erbringen ist, wegen der verschiedenartigen Belastbarkeit abgegrenzt werden; man erwähnt hauptsächlich Spitzenleistung, Stundenleistung und Dauerleistung. (Schluß folgt)

## Der programmierbare Microcomputer HP 65 — eine für das Vermessungswesen interessante Neuerung

Von Gerhard Krajicek, Graz

### Zusammenfassung

Es wird ein Überblick über die Funktionsweise des neuartigen programmierbaren Microcomputers HP-65 gegeben. Um seine potentielle Leistungsfähigkeit für den Bereich der Geodäsie anzudeuten, wird ein Programmierbeispiel „Flächenpunktkoordinaten aus Polaraufnahme inklusive Flächenberechnung und Sperrmaßberechnung“ gegeben, welches die Kapazität der Maschine nahezu erschöpft.

Wie leicht nachweisbar, gilt

$$\begin{cases} m\beta_{B4}^2 > m\beta_A^2 \\ m\gamma_{B4}^2 > m\gamma_A^2. \end{cases}$$

Folglich kann die Ausgleichung mit Zwangsbedingungen *nicht* zu minimalen Dispersionen führen.

## 8.

Wir haben hier die Ausgleichung in zwei Ordnungen durchgeführt. Wir wollen annehmen, daß wir eine Ausgleichung in mehreren Ordnungen haben. Es ist klar, daß es bei einer Ausgleichung vermittelnder Beobachtungen mit *Bedingungen*, die gegebene Ausgangsgrößen enthalten, *nicht möglich* ist, die Ergebnisse mit minimalen Dispersionen der Unbekannten zu erhalten.

Wenn wir jedoch eine Ausgleichung nur vermittelnder Beobachtung haben, so ist es bei der Ausgleichung in *mehreren Ordnungen* nicht möglich, a priori zu sagen, was das Ergebnis sein wird. Indem wir die Ordnungen mit römischen Ziffern bezeichnen, erhalten wir die folgenden Fälle bei der Ausgleichung der III. Ordnung: III aus I; III aus II; III aus I und II; bei der Ausgleichung der IV. Ordnung: IV aus I; IV aus II; IV aus III; IV aus I und II; IV aus I und III; IV aus II und III; III aus I, II und III.

Wie man sieht, ist die Theorie der Ausgleichung durchaus nicht erschöpft und es sind noch viele Fälle zu klären.

Eine äußerst wichtige Aufgabe ist die *optimale Verteilung* in Ordnungen: einerseits widerspricht die Aufteilung der Ausgleichung in Ordnungen theoretisch dem Geiste der Methode der kleinsten Quadrate, andererseits kann man sie aber in der Praxis nicht vermeiden.

## Absolute und relative Genauigkeit beim Messen

Von *Kornelius Peters*, Wien

(Schluß)

### 2.5 Wärmedaten

Hier soll nur die eigentliche „Thermometrie“ (Temperaturmessung), nicht aber die „Kalorimetrie“ (Messung der Wärmemengen in Energie-Einheiten) kurz besprochen werden.

Die Temperatur beeinflusst viele Gebiete der Meßtechnik durch Ausdehnung der Maßverkörperung sowie über Refraktionseinflüsse, weiters auch über alle elektrischen Meßvorrichtungen. Sie muß deshalb in vielen Bereichen nicht nur als Selbstzweck beobachtet werden. Dies gelingt auch punktförmig mit sehr guten Genauigkeiten, leider liegthier wie bei kaum einer anderen Meßgröße oft weitreichende Unbestimmtheit vor, wie wir sie z. B. bei der Temperaturerfassung von Meßbändern, Basisdrähten, dem Profil elektronischer Distanzmessung u. a. m. kennen.

Vom absoluten Nullpunkt bis  $1^0$  K (Helium-Verdampfungspunkt) lassen sich Tiefsttemperaturen mit Hilfe magnetischer Suszeptibilität an einem paramagnetischen Salz bestimmen. Darüber kommen Gasthermometer zur Anwendung, welche wegen des geringen thermischen Rauschens bald auf  $0,001^0$  genau sind. Sehr groß ist der Meßbereich von Widerstandsthermometern, besonders mit Platindrähten ( $-2000$  bis  $+550^0$  C), welche mit  $10^{-3}$  bis  $10^{-4}$  Grad die größte Genauigkeit besitzen.

Von den Flüssigkeitsthermometern sind die mit Quecksilber wegen der Nichtbenetzung am beliebtesten, sie messen Temperaturen zwischen  $0^0$  und  $100^0$  auf  $10^{-2}$  Grad genau. Die Meßunsicherheit gut gealterter Bimetallthermometer beträgt etwa 1 % des Skalenumfanges; jene von Thermoelementen, wie sie z. B. zur Messung von Meßband-Temperaturen verwendet werden,  $0,2^0$  bis  $1^0$ .

Außer den bisher erwähnten Berührungsthermometern werden bei höheren Temperaturen berührungsfreie Strahlungs-Pyrometer angewendet; die Strahlungsintensität steigt mit der vierten Potenz der Temperatur an und erreicht erst bei Werten von mehreren hundert Grad meßtechnisch einfach verwertbare Beträge. Die Genauigkeit aller Pyrometer ist auf einige Grad begrenzt ([13], [26]).

In der Meteorologie mißt man im allgemeinen auf  $0,1^0$ , da die Unbestimmtheit der Meßgröße wesentlich höher liegt. So ist z. B. die Differenz zwischen „Gartenhütte“ und „Hannhütte“, beide im Bereich der Hohen Warte (ZAFMuG), für verschiedene zweijährige Mittelwerte zwischen  $-0,33$  und  $+0,85$  Grad gelegen. Gewaltig ist vor allem der Einfluß des Mikroklimas (Kältepol Gstettneralm bei Lunz mit regelmäßigen Minima unter  $-50^0$ ). Die Jahresmitteltemperaturen sind in keiner Weise normal verteilt, so liegen in Wien z. B. zwischen 1775 und 1971 16 Jahre, das sind 8,2 % außerhalb der  $2\sigma$ -Grenze. Die Temperaturgenauigkeit von Radiosondaufstiegen ist sehr hoch und wird nur durch die mangelnde Höhengenaugigkeit auf  $0,1^0$  beschränkt.

Die Temperaturverteilung des Erdinnern ist noch weitgehend ungeklärt — aus Bohrungen wurde die thermische Tiefenstufe der obersten Schichten mit ca.  $300^0/\text{km}$  bestimmt, in Südafrika liegt sie aber bei  $90^0/\text{km}$ . Bis 100 km Tiefe ist die Temperatur etwa 10 % unsicher, gegen den Erdkern hin etwa 50 %. Temperaturen von  $9000^0$  bis  $12.000^0$  werden diskutiert ([1] S. 106).

Die Temperatur der Gestirne kann auf 5 verschiedene Arten definiert und gemessen werden; sie ist mehr als  $\pm 10\%$  unsicher ([17] S. 158–161). Die höchsten an Gestirnen gemessenen Temperaturen betragen an die  $25.000^0$ ; es gibt aber auch relativ kühle mit unter  $3000^0$ .

Die hohe Temperatur der Gestirne ist durch ihren Aggregatzustand erklärbar. Weit aus der größte Teil der Materie des Weltalls (99,8 %) befindet sich im „vierten Aggregatzustand“, dem Plasma. Wird ein Gas in den Plasmazustand überführt, enthält es außer den elastisch neutralen Atomen auch Ladungsträger. Die Überführung kann durch Anlegen einer entsprechend hohen Spannung oder durch Zufuhr von Wärme erfolgen. Den ersten Fall kennen wir z. B. von der Quecksilberdampf-Hochdrucklampe der Geodimetertypen 4 und 6. In den Achsen dieser Entladungen liegen die Temperaturen zwischen  $5000^0$  C und  $10.000^0$  C. Die größten errechneten Temperaturen haben die Kerne der schon früher erwähnten „Weißen Zwerge“, nämlich  $10^8$  Grad. Das Höchsttemperaturplasma dieses vollionisierten Gases wird

auch als fünfter Aggregatzustand bezeichnet. Die Plasmaphysik benötigt nach ihren Theorien ebensolche Temperaturen, um experimentell das „Wasserstoffbrennen“ auszulösen, welches die Energieerzeugung revolutionieren soll [54].

## 2.6 Elektrische Daten

Die elektrische Meßtechnik ist eine Wissenschaft für sich; mit ihr beschäftigen sich sicherlich mehr Fachkräfte als unsere Kollegen in der Geodäsie mit der Vermessungstechnik. Elektrische und elektronische Meßelemente werden allgemein zur Anzeigeverstärkung, Übertragung und Digitalisierung in der Meßtechnik verwendet und sind deshalb von äußerst umfassendem Interesse. Hier soll nur ganz kursorisch auf ihre Problematik eingegangen werden. Alle Genauigkeitsangaben wurden [27] entnommen, wenn nicht anders angegeben. Es sei noch auf den hohen Stand der Normierung, der Toleranzen und Fehlergrenzen im elektrischen Meßwesen hingewiesen, der sich allerdings auch aus der Notwendigkeit häufiger Nacheichung aller Geräte ergibt.

### 2.6.1 Gleichstrom

#### 2.6.1.1 Stromstärke

Die untere Nachweisgrenze liegt bei  $10^{-18}$  A, im Hochstromgebiet sind Ströme von  $10^5$  A noch mit einer Unsicherheit von  $10/100$  meßbar. Meßunsicherheiten von  $10^{-5}$  kann man bei entsprechendem Aufwand zwischen  $10^{-3}$  A und 1 A erreichen und unterschreiten. Die Stabilität von Konstantstromquellen in 24 h zwischen 1 bis 0,1 A beträgt  $10^{-5}$  bis  $10^{-6}$ .

#### 2.6.1.2 Spannung

Die meßtechnisch erfaßbaren Bereiche erstrecken sich von einigen  $10^{-10}$  V bis zu  $10^6$  V. Die Unsicherheit der genauesten Geräte bei analoger Darstellung liegt bei  $10^{-3}$ , bei digitaler bei  $10^{-5}$ . Die unteren Grenzen der Genauigkeit ergeben sich aus der Konstanz der Widerstandsverhältnisse.

Die Stabilität der Spannungsquellen läßt sich auf  $10^{-4}$  des Sollwertes steigern.

#### 2.6.1.3 Widerstand

Der Meßbereich liegt zwischen  $10^{-6}$   $\Omega$  und  $10^{15}$   $\Omega$ , wobei die relative Unsicherheit im untersten Teil des Meßbereiches bei  $10^{-4}$ , bei 1  $\Omega$  ca.  $5 \cdot 10^{-7}$ , im Hochohm-bereich bei  $10^{-2}$  liegt. Zwischen  $10^{-3}$   $\Omega$  und  $10^9$   $\Omega$  verwendet man hauptsächlich die „Wheatstone’sche Brücke“ zur Widerstandsmessung, welche für viele elektrische Meßgeräte das Grundelement bildet und bis zu  $10^{-6}$  relativ genau ist, wenn die äußeren Einflüsse, besonders die Temperatur, entsprechend kalibriert sind [13].

### 2.6.2 Wechselstrom

Hier wirken mannigfache Fehlereinflüsse auf den Meßwert ein, wie Temperatur, Eigenstromverbrauch, Trägheit des Meßmittels, Wirbelströme u. a. m. Außerdem ist die Genauigkeit von der Frequenz des Wechselstromes beeinflusst.

### 2.6.2.1 *Strom und Spannung*

Die Genauigkeit ist im allgemeinen schlechter als 1 % des Endausschlages, außer bei sehr aufwendigen elektrostatischen Geräten mit 2 ‰ Unsicherheit.

Stromwandler hingegen erzeugen Strom- und Spannungsfehler von nur 1 ‰ Unsicherheit, Normalwandler sogar von nur  $10^{-5}$  relativer Unsicherheit, Hochspannungen bis etwa  $5 \cdot 10^5$  V werden mit elektrostatischen Meßwerken auf 2 % genau gemessen.

Mit Nullelementen können bei 50 Hz (Industriefrequenz) noch Ströme von  $10^{-9}$  A und Spannungen von  $3 \cdot 10^{-7}$  V nachgewiesen werden.

### 2.6.2.2 *Zähler*

Elektrizitätszähler sind integrierende Meßgeräte, die den Leistungsverbrauch über die Zeit summieren. Ihre Anzeigefehler liegen in der Größenordnung von Prozent, und auch nur, wenn sie mit Nennspannung und -Frequenz betrieben werden. Nur Prüfzähler liegen innerhalb einer Fehlergrenze von 3 ‰.

### 2.6.2.3 *Oszillographen*

In vielen Fällen dient der Kathodenstrahl-Oszillograph der Aufzeichnung periodischer Vorgänge. Hierzu wird der Strahl in der  $x$ -Richtung (der geod.  $y$ -Richtung); von einer der Zeit proportionalen Spannung periodisch mit einer wählbaren Ablenkfrequenz über den Schirm geführt, während die vertikale  $y$ -Ablenkung durch die Meßspannung bewirkt wird. Die Zeit-Ablenkspannung muß mit der Frequenz der Meßspannung synchronisiert oder getriggert, d. h. ihr Start durch den Nulldurchgang der Meßspannung ausgelöst werden, um auch bei wechselnder Frequenz stehende Bilder zu erhalten. Die Genauigkeit der Darstellung ist vom einzustellenden Maßstab abhängig.

## 2.7. *Weitere physikalische Daten*

### 2.7.1 *Schall*

#### 2.7.1.1 *Begriffe*

Die drei grundsätzlich möglichen Schallarten werden als Ton, Klang und Geräusch bezeichnet. Beim Ton haben die Schallfeldgrößen eine sinusförmige Zeitabhängigkeit. Der Klang ist darstellbar als eine Summation von reinen Tönen, seine Frequenzanalyse ergibt ein Linienspektrum. Das Geräusch im eigentlichen Sinne ist völlig unperiodisch und entspricht einem kontinuierlichen Spektrum (im Extremfall „weißes Rauschen“ genannt). Als Schallfeldgrößen bezeichnet man Schalldruck (Amplitude der Druckschwankungen um den im Ruhezustand vorhandenen Gleichdruck) und Schallschnelle (Wechselgeschwindigkeit der Mediumteilchen). Da beide Größen eindeutig verknüpft sind, genügt es, eine von beiden zu messen ([26] S. 192, 193).

Der *Schalldruck*, auch Schallpegel genannt, ist hierbei das bevorzugte Objekt. Die Meßeinheit ist das „Dezibel“ (dB); es handelt sich dabei um keine Meßgröße in unserem Sinn, sondern um eine Verhältniszahl. Ein „Bel“ (B) ist der in dekadischen Logarithmen ausgedrückte Quotient zweier Meßgrößen. 10 dB bedeuten, daß die Meßgröße 10 mal größer, 30 dB, daß sie 1000 mal größer als das Normal ist. Ist eine

Meßgröße mit 25 dB, eine andere mit 30 dB gemessen, beträgt die zweite das  $\sqrt{10}$ -fache der ersten. Als Normal wird  $p_0 = 2.10^{-7}$  Millibar  $= 2.10^{-10}$  at angenommen;

für den Schalldruck gilt der Ausdruck  $L = 20 \lg \frac{P}{p_0}$  dB ([66] S. 292, 293).

Weiterhin gibt es den Begriff der *Lautstärke*. Gleiche Schalldrücke erzeugen bei verschiedenen Tonfrequenzen verschiedene Lautstärken. Als Einheit der Lautstärke gilt das phon, das ist der jeweilige Schalldruck in dB bei der Frequenz von 1000 Hz. Die häufigsten Lautstärken von 60 phon entsprechen zwischen 2 Hz und 5000 Hz ziffernmäßig ungefähr den Schalldrücken.

Der physische Eindruck der *Lautheit* wird in sone gemessen; ein sone = 40 phon, (Wohngeräusche) 2 sone = 50 phon, 4 sone = 60 phon, 8 sone = 70 phon u.s.w. gemäß dem empfindungsproportionalen Zusammenhang, daß einer Zehnerpotenz der Lautstärke eine Verdoppelung der Lautheit entspricht.

#### 2.7.1.2 Relationen

Es ist bekannt, daß einer Verdoppelung der Tonfrequenz das Intervall einer Oktave entspricht. Das menschliche Ohr kann 10 Oktaven (20 bis 20.000 Hz) aufnehmen, die Töne des Klaviers liegen zwischen 275 und 3520 Hz.

Die Hörschwelle der Lautstärke liegt bei 0 phon, die Schmerzschwelle bei 120 phon. Das sind 12 Zehnerpotenzen; die entsprechenden Schalldrücke reichen von  $2.10^{-10}$  at bis  $2.10^{-4}$  at (bei 1000 Hz), die Lautbreiten von  $10^{-3}$  bis  $10^3$  sone.

Das *Zusammenwirken* mehrerer Schallquellen wird natürlich durch logarithmische Additionen berechnet. Zwei Schallquellen von je 80 phon ergeben 83 phon, zwei von je 1 phon aber 4 phon (in jedem Fall werden 3 phon = 3 dB addiert; 0,3 ist ja der dekadische Logarithmus von 2). Die *Schalldämmung* von Wänden, Decken und dgl. wird gekennzeichnet durch die Differenz der beiderseitigen Schallpegel in dB, wenn auf der einen Seite ein entsprechend starker Schall abgegeben wird, ist also eine Verhältniszahl. Eine 27 cm starke Vollziegelwand hat eine mittlere Dämmzahl von 50 dB, von nur  $1/4$  Stein voll verputzt von 38 dB. Daraus resultiert das Nachbarschaftsgefühl in Neubauwohnungen der fünfziger Jahre, daß Umgangssprache (60 dB) noch als „deutliches Flüstern“ durchkommt [66].

#### 2.7.1.3 Messen, Anwendungen

Der Schalldruck wird meist mittels Kondensatormikrofonen gemessen (die bei den Schallsendern verwendeten elektromechanischen Wandlerprinzipien sind auch für Schallempfänger geeignet). Die absolute Kalibrierung dieser Geräte mittels elektrostatischem oder elektrodynamischem Schallwandler ist aufwendig. Bei der Messung selbst sind Reduktionen wegen Schallfrequenz, Richtcharakteristik und Raumgestalt anzubringen. Bei sehr hohen Schalldrücken kommt bereits der piezoelektrische Effekt zur Anwendung. Bei Messung des Schalldruckes von Geräuschen ist ein subjektiver Vergleich zwischen einem reinen Ton bei 1000 Hz, dessen Schallpegel genau eingestellt werden kann, und dem zu messenden Geräusch nötig. Beim „Präzisions-Schallpegelmesser“ werden elektrische Filter eingeschaltet, deren Charakteristik jeweils mehr oder weniger frequenzabhängig ist. Dadurch wird das Lautempfinden des Beobachters zwischen Normalfrequenz und den zu beurteilenden



Frequenzen unterstützt. Trotzdem können noch Meßunsicherheiten von 10 dB auftreten, das sind etwa 100% der Lautheit.

Die Lautstärke eines Frequenzspektrums kann auf zwei Arten, aus gestaffelter Herausfilterung der Lautstärken einzelner Frequenzen oder empirischer Lautheitsmessung berechnet werden. Die mittlere Differenz beträgt nur etwa  $\pm 3$  phon, eine Folge des Glättungseffektes durch Mittelung über die Einzelwerte des Spektrums ([26] S. 199, 223–226).

Die Stabilität von Magnetbandgeräten ist ein Anwendungsbeispiel für weitere Genauigkeitsdaten der Akustik. Bei Studiogeräten liegt die Gleichlaufgenauigkeit bei  $1^0/00$ , bei Heimgeräten zwischen 2% und 6%. Die Fehler aus dem Frequenzgang liegen im ersten Fall bei 3 dB, im zweiten bei 6 dB; die nichtlinearen Verzerrungen (Klirrfaktor), bei max. 3% bzw. 5%. Das Signal-Rauschverhältnis wird mittels Wiedergabe- und Ruhespannungsmessung charakterisiert und beträgt ca. 50 dB, d. h. der Schalldruck in Ruhe ist 50 phon kleiner oder das  $10^{-5}$ fache als bei maximaler Lautstärke ([26] S. 208–210). Die Rauschzahl bei Mikrowellendistanzern liegt je nach Trägerfrequenz zwischen 6 und 16 dB.

## 2.7.2 *Licht*

### 2.7.2.1 *Begriffe*

Die Lichtstärke, Einheit 1 Candela (cd) ist eine gerichtete Größe, da sie durch die Abstrahlung senkrecht zur Oberfläche des Strahlers definiert ist. Der Lichtstrom hingegen, Einheit 1 Lumen (lm) ist ein Skalar, nämlich die Abstrahlung einer Lichtquelle von 1 cd in die Einheit des Raumwinkels (1 cd strahlt in alle Richtungen insgesamt  $4\pi$  lm). Das mechanische Äquivalent von 1 Lumen = 1/682 Watt.

Die Einheit der Beleuchtungsstärke, welche uns hauptsächlich interessiert, ist 1 Lux (lx) = 1 lm · m<sup>-2</sup>. Schließlich kennt man noch die gerichtete Leuchtdichte cd · m<sup>-2</sup> ([66] S. 426–432; [49]).

### 2.7.2.2 *Relationen*

Der Spielraum des menschlichen Auffassungsvermögens beträgt 14 Zehnerpotenzen, vom Aufleuchten eines Zündholzes in 80 km Entfernung bis zur hell bestrahlten Schneedecke im Hochgebirge (von  $10^{-9}$  lx bis  $10^5$  lx). Die untere Grenze entspricht 10 Lichtquanten pro 10 Stäbchen der Netzhaut ([18] S. 136, 137).

Die Empfindlichkeitsschwelle für Unterschiede der Wellenlänge (Farbenunterscheidung) hat 4 sekundäre Maxima und Minima; die Empfindlichkeitskurve des Dämmerungssehens mittels der enger beisammenstehenden Stäbchen hat bei kürzeren Wellenlängen ihr Maximum als die des Tagessehens, ebenso erscheint einem Blau bei gleicher objektiver Helligkeit heller als Rot.

Die Lichtausbeute von Beleuchtungskörpern schwankt von 7 lm/W bei Tageslichtglühbirnen über 15 lm/W bei konventionellen Glühlampen bis zu 40 lm/W bei Leuchtstofflampen. Die Beleuchtungsstärke im Alltag liegt zwischen 2 lx (Straßenbeleuchtung) und 100 lx (Technisches Zeichnen).

### 2.7.2.3 *Messungen*

Die optimale Meßgenauigkeit sowie Konstanz der Meßgrößen ist aus [50] er-

sichtlich. Der mittlere Fehler des Lichtstroms liegt bei 1,5% bei Leuchtstofflampen, bei 3% bei Quecksilberdampfhochdrucklampen. Dafür liegt die Stabilität im ersten Fall bei etwa 3%, im zweiten bei 0,4%.

Für unsere Distanzer ist vor allem die Genauigkeit von Photozellen wichtig ([28] S. 104–111, [66] S. 569). In der Vakuumzelle ist der Photostrom proportional dem Lichtstrom, in einer gasgefüllten Zelle steigt er stark mit wachsender Spannung. Außerdem ist er bei jeder Art von Photokathode von der Wellenlänge des Lichtes abhängig.

Die empfindlichsten Photozellen emittieren 20–150  $\mu\text{A}/\text{lm}$ ; da bereits  $10^{-18}$  A gemessen werden können, bedeutet das eine Empfindlichkeit von  $10^{-14}$  lm. Gekoppelt mit Sekundärelektronenvervielfachern steigt die Emission auf 100 A/lm, also auf das  $10^6$ fache.

Die beim Geodimeter noch nachweisbare Grenzbeleuchtungsstärke beträgt in Übereinstimmung mit diesen Überlegungen  $5 \cdot 10^{-14}$  lm ([23], S. 209–214).

Die maximal tolerierbare Verminderung des ausgestrahlten Lichtstromes, die noch eine erkennbare Beleuchtungsstärke am Empfänger verursacht, ist etwa  $3 \cdot 10^{-8}$  (= Extinktion 3.107).

### 2.7.3 Dosimetrie

Ziel der Dosimetrie ist die Bestimmung einer physikalischen Größe, auf welche die beobachteten, z. B. biologischen, medizinischen oder chemischen Wirkungen einer ionisierenden Strahlung bezogen werden können ([27] S. 525ff.).

Zum Strahlenschutz wurden bereits Toleranzen für in bestimmten Zeiträumen noch zulässige Strahlendosen ausgearbeitet. Ihre Einheit ist 1 rem (1 Röntgen pro Mann;  $1 \text{ R} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ C/kg}$ ;  $1 \text{ C} = 1$  Ampèresekunde), welche dann noch auf die Zeit bezogen werden muß.

Die genauesten Dosimeter, welche sich der Luftionisation bedienen, sind auf 1% unsicher; Personendosismessungen mittels Kernspurdosismessungen streuen 10% bis 15% bei einem Meßbereich von 0 bis 0,2 R. Maximaldosis pro Mann 5 R/Jahr, 3 R/13 Wochen.

### 2.7.4 Luftverunreinigung

Auf den weiten Bereich chemischer Meßverfahren kann hier nicht eingegangen werden. Ein Beispiel für Immissionsmessungen:

Von der Lehrkanzel Prof. Wagner der Technischen Hochschule Wien wurden am Getreidemarkt  $\text{SO}_2$ -Messungen während eines Winter- und während eines Sommertages vorgenommen. Im Winter wurde sowohl die Kurzzeittoleranz von  $0,75 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  Luft, als auch die Dauertoleranz von  $0,4 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  (während 30 min.) teilweise überschritten. Im Sommer blieben die Resultate sowohl absolut als auch hinsichtlich kurzperiodischer Änderungen um eine Zehnerpotenz darunter.

Die Messung erfolgte mit einem selbstschreibenden Zählgerät auf Widerstandsbasis, Unsicherheit 1 bis 2%.

## 2.8 Statistische Qualitätskontrolle in der Industrie

1967 startete das Österreichische Produktivitätszentrum eine Umfrage, an der sich 302 Betriebe beteiligten [40], jedoch von diesem sicher schon überzufällig interessierten Kollektiv haben 11% noch keine festgelegte Qualitätskontrolle, 63% kontrollieren ohne statistischen Einsatzplan, 71% ohne Schulung des entsprechenden Personals, 37% ohne irgendwelche detaillierten Vorschriften.

Die Prüf- und Fehlerkosten sind nur 40% vollständig bekannt.

Hier können wir Vermessungstechniker auf unsere strenge Normierung stolz sein.

Gerippe der Qualitätskontrolle ist vorerst die Vorschreibung von Toleranzen als Ausschußgrenze, sodann die Überlegung, ob die Produktion zu 100% zu prüfen ist. Sie ist es etwa bei uns im Falle von Urkundmessungen. Ist die Vollkontrolle technisch nicht möglich, z. B. bei Serienfertigung, bei nicht zerstörungsfreier Untersuchung und dgl., ist die wirtschaftliche Zulässigkeit zu berechnen. Bei Kontrollkosten von S 1, — je Stück und S 50, — Verlust durch Nichtausscheiden eines fehlerhaften Erzeugnisses darf man z. B. bei einem Ausschußprozentsatz von weniger als 2% keine Vollkontrolle mehr vornehmen — Überlegungen, die sich manchem bei Plandurchsicht anlässlich violetter Änderungen aufdrängen mögen. Entschließt man sich zur Stichprobenkontrolle, so sind das Risiko des Produzenten sowie das des Käufers festzulegen (z. B. [60]) und dann der Stichprobenplan iterativ so anzulegen, daß die Annahmekennlinie zwischen Annahme- und Rückweisgrenze möglichst steil verläuft (dann sind beide Risiken möglichst klein) und der Stichprobenumfang möglichst gering wird.

Die Denkungsweisen der industriellen Fertigungskontrolle haben u. a. *Baarda* (Zuverlässigkeit) und *Böhm* (Fehlergrenzen) der Vermessungstechnik nahe gebracht.

## 3. Beispiele für die Messung sozioökonomischer Größen

In Wechselwirkung mit der Entwicklung der mathematischen Statistik wurden deskriptive bzw. erfahrungsbetonte Randwissenschaften zu Emporkömmlingen und Musterschülern der messenden Naturwissenschaften. Man hat jetzt aber immerhin von der ersten Begeisterung genug Distanz bekommen, um die straffe Abhängigkeit der „Meßresultate“ vom zugrundeliegenden subjektiven Modell zu erkennen, seien es marxistische Wirtschaftspläne, McNamaras Vietnamkriegsspieltheorie oder Diskussionen um die Richtigkeit der Wettervorhersage.

Betrachten wir gleich die Kurzfristprognose als Beispiel! Man sagt, 50% Treffsicherheit sei die der Blindlingsvorhersage, bei uns wegen der Erhaltungstendenz sogar 66% (wenn man sagt, morgen wird es so schön wie heute); laut offiziellen Statistiken (*Reuter*) werden 75% bis 80% Treffsicherheit angegeben. Doch was ist „richtig“? Die Isobarenverteilung innerhalb gewisser Toleranzen zu berechnen, die Temperatur, die Bewölkung, den Niederschlag, für welche Landesteile? Die Antwort ist entweder sehr eng begrenzt mit Wetterlagentypen oder ufert in riesige Korrelationstabellen aus.

### 3.1 Psychologische Tests

Während man am Beginn der Testpsychologie aus der Messung weniger scharf

ausgeprägter Merkmale auf eine Vielzahl von Begriffen schließen wollte, glaubte man später aus vielen scheinbar nicht unmittelbar relevanten Erscheinungen eine konkrete Eigenschaft berechnen zu können. Jetzt begnügt man sich wieder mit einfacheren Schlüssen und eindeutigerer Zuordnung. Beispiele: frühe Intelligenztests, welche noch sehr auf konventionellen Lernstoff zugeschnitten waren sowie Persönlichkeitstests aus Deutungsfragen; Berechnung der Intelligenz aus Faktorenanalyse; Begabungsforschung. Die psychologischen Eignungstests befinden sich in einer gewissen Sackgasse, da nachweislich jeder durchschnittlich gesunde und intelligente Mensch jedem Beruf gewachsen ist (horizontale Vielfalt). Scharf davon zu trennen ist allerdings die angebliche Notwendigkeit, die mögliche Stellung innerhalb des Berufes anzugeben (vertikale Enge). Bei psychologischen Tests unterscheidet man Verlässlichkeit (reliability, vergleichbar unserer inneren Genauigkeit) und diagnostische Valenz (validity, äußere Genauigkeit). Beide Daten werden durch Korrelationskoeffizienten gekennzeichnet. Die Verlässlichkeitskorrelationen sollen  $r_{xx} = 0,85$  nicht unterschreiten.  $r_{xx}$  wird durch Vergleich mit einer Parallelförmigkeit des gleichen Tests oder Korrelation zwischen beiden Hälften des Tests errechnet. Die Valenz wird durch Korrelation zwischen Test- und Ist-Resultat berechnet. Die diagnostischen Valenzen auch der am besten durchgebildeten Tests überschreiten selten  $+ 0,60$ ; wer wagt es, an die Korrelation zwischen Staatsprüfungsnote und Einkommen nach 10 Jahren zu denken?

Zahlenbeispiel: Der Wert  $1 - r_{xx}$  entspricht dem Gewichtskoeffizienten  $Q_{xx}$ .

Beträgt bei einem Intelligenztest die Standardabweichung 16 Einheiten und die Verlässlichkeit nur  $r_{xx} = 0,64$ , wird der mittlere Fehler für einen Probanden mit IQ 103 immerhin  $16 \cdot \sqrt{0,36} = 10$  Einheiten; damit würden die Maßeinheiten von fast der Hälfte aller Probanden ununterscheidbar (vgl. Normalverteilung,  $x_0 = 100$ ,  $\sigma = 16$ ).

Für  $r_{xy} = 0,70$  folgende Zahlenwerte: Von 1000 Berufsanwärtern, darunter 200 laut Test geeignete, sind 200 anzustellen. Später stellt sich heraus, daß von den 200 angestellten 112 geeignet sind ([18] S. 292, 293). Auch hier müßte man noch den Einfluß der Intuition berücksichtigen, wie beim Wetter die Erhaltungsneigung, welche den Nullpunkt noch in Richtung Resultat hin verschiebt.

Die Theorien über Intelligenztests haben eine reiche Geschichte ([18] S. 175–177). Derzeit wird die „multiple Faktoren“-Theorie bevorzugt, und zwar mit einem dreidimensionalen Strukturmodell von  $4 \times 5 \times 6$  Kategorien, deren aber erst 98 „nachgewiesen“ wurden. Die anschaulicheren Intelligenztests von *Wechsler* bzw. *Stanford-Binet* arbeiten mit 11 bzw. 2 Fähigkeiten, aber beide nach derselben Skala des „IQ“ (geistiges Alter/Lebensalter in %). Sie haben naturgemäß denselben Erwartungswert, der erstgenannte aber eine kleinere Streuung, er ist eher normalverteilt als der einfachere [15].

### 3.2. Verbrauchsanalysen und Prognosen

Genauigkeitsdaten von Verkehrsprognosen nur aus der Literatur zu finden, ist fast unmöglich. So einfach es scheint, schon im Interesse des Systems selbst, ein Verfahren z. B. nach 10 Jahren durch die seither eingetretene Erfüllung zu testen bzw. zu eichen, so wenig wird dies in der Praxis durchgeführt! Zum ersten besitzen viele

Verfahren nach einem Intervall, das eine sinnvolle Eichung zulassen würde, nur mehr historischen Wert, zum zweiten will sich kein Verfasser der fast sicheren Dokumentation einer Fehlerprognose aussetzen, zum dritten ist die Genauigkeit großräumiger Verkehrsprognosen eng mit jener von Wirtschaftsvorhersagen korreliert, wenn auch noch mit einem Maßstabsfaktor, der das Irrationale des Autofetischismus beinhaltet. Vom Wirtschaftswachstum gehen ein: Bruttonationalprodukt, Beschäftigung u. a. m.; die Unsicherheit von Wirtschaftsprognosen selbst beträgt 20%–40%.

Man unterscheidet folgende Verfahren der Verkehrszählungen:

diskret, durch Querschnittszählungen (händisch oder automatisch)

oder durch Quell-, Ziel-Untersuchungen;

oder durch Bildauswertungen. Hier ist vor allem *Döhler's* Methode bestechend [7].

Durch „scanning“ verschiedener Helligkeitswerte werden die Arten der Verkehrsteilnehmer identifiziert, durch geeignete Rechenprogramme entzerrt und schließlich aus Folgebilddaten die Geschwindigkeits- und Abstandsverteilung mit 1% bzw. 50 cm Genauigkeit geplottet.

Die einzige mir zugängliche Arbeit über die Extrapolationsgenauigkeit von Verkehrszählungen war [37]. Die statistischen Verfahren ihres Verfassers sind zwar etwas unorthodox, doch waren sie immerhin so erfolgreich, daß sie den Zeitaufwand von Querschnittszählungen durch Ermittlung geeigneter Korrelationskoeffizienten auf ein Viertel des früheren Wertes senken konnten.

Die Genauigkeiten der Verkehrszählungen nach diesem System liegen zwischen 3% (Stundenwerte reinen Berufsverkehrs) und 30 bis 50% (Monatswerte von Paßstraßen) und pendeln im wichtigsten Bereich, der Extrapolation von Tageswerten, um 10%. Dies deckt sich mit den Erkenntnissen *Knoflacher's* 12 Jahre später; bei ihm korrelieren die Unfallzahlen mit der Verkehrsbelastung (Variationskoeffizient 12 bis 14%); den engst gebündelten Variationskoeffizienten seiner Untersuchung fand er für Berufsverkehr nach Tagen zu 8%. Stichprobenerhebungen durch Umfragen können aber selbst bei 30% Stichprobenumfang noch durch unzulässige Schichtung (Anteile der Befragtengruppen) zu 50% ihres Wertes unsicher sein, vgl. 3.3.

### 3.3 Umfragen, Demoskopische Erhebungen

Was für die Genauigkeitsangaben der Verkehrstechniker gesagt wurde, gilt für die Soziologen in verstärktem Umfang; große Abhängigkeit von Modellen; keine Neigung zu offiziellen Eichungen der Methoden; Geheimhaltung der Erfahrungen. Die Fehlerspannen allein aus dem Stichprobenumfang heraus, wenn jeder Befragte exakt, richtig und zuverlässig antworten würde, sind beachtlich und noch von der Häufigkeit eines Merkmales in der Grundgesamtheit abhängig. Um 50% Anteil eines Merkmales auf  $\pm 2\%$  (zwischen 48% und 52%) placieren zu können, bedarf es eines Stichprobenumfanges von 2500; um 5% auf  $\pm 2\%$  (zwischen 3% und 7%) placieren zu können, allerdings nur 450 Einzelwerte (beides auf dem 95%-Niveau). Man denke an die große Bedeutung von  $\pm 2\%$  bei Wahlen zwischen gleichstarken Gegnern! ([39] S. 10 bzw. 108, 109). Dabei ist das die einzige von 5 Genauigkeitskomponenten oder Fehlerquellen, welche sich a priori festlegen lassen, nämlich die „Genauigkeit“ oder accuracy. Die weiteren sind:

Geringe Stimmigkeit, inconsistency (der Befragte antwortet nach den gegebenen Voraussetzungen richtig, doch die Voraussetzungen sind variabel).

Geringe Verlässlichkeit, reliability (beim Befragten: unzuverlässige, leichtfertige Antwort; beim Testinstrument: Formulierung mehrdeutig, nicht exakt (vor allem hinsichtlich der Befragtengruppe).

Geringe Gültigkeit, validity (geringe Signifikanz vom Thema her).

Geringe Präzision, precision (Fragebogen bzw. vom Interviewer nachlässig verarbeitet). Genauigkeit entspricht unserer Gewichtsfestlegung durch Wiederholungsmessungen, Präzision unserer Meßgenauigkeit vom Beobachter her und der Rechengenauigkeit; Stimmigkeit den Festpunktfehlern durch Verschiebung der Vermarkung; Verlässlichkeit der Netzkonfiguration bzw. „Inneren Genauigkeit“; Gültigkeit der „Zuverlässigkeit“ im Sinne *Baarda's* (vgl. [39] S. 255, 256).

Die einzelnen Komponenten können aber bei versteckten Modellfehlern zu absurden Testresultaten führen, welche dann wohl primär durch gesunden Menschenverstand, dann durch Korrelationsanalysen und Faktorenanalyse (nach dem „Störfaktor“) unter großem EDV-Aufwand verbessert werden müssen. Oft ist nicht einmal die qualitative Aussage zu verwenden.

Im allgemeinen wird man bei einem guten Test die Gesamtunsicherheit der doppelten „accuracy“ gleichsetzen können.

#### 4. Zusammenfassung

Bei Absolutmessungen ist die Anschlußgenauigkeit an das Normal zu beachten. Streng genommen ist auch die Unsicherheit der zugrundeliegenden Naturkonstanten wesentlich (z. B. Lichtgeschwindigkeit, Gravitationskonstante). Die Konstanz sogar dieser Größen wird jüngst in Frage gestellt. So soll es Teilchen geben, welche schneller als Licht sind (Tachyonen); weiters wurde eine angebliche Zunahme der Gravitationskonstanten beobachtet ([2] S. 24), wobei der Sinn der Änderung noch dazu im Widerspruch zur *Dirac'schen* Expansionshypothese liegt.

Für die Praxis sind zusätzlich die Art des Meßmittels und die Bestimmtheit der Meßgröße von Bedeutung. So wirkt sich die neuerdings große Genauigkeit der Zeitmessung via Frequenzzählung auch auf die Entfernungsmessung aus; der geschickte Einbau elektrischer bzw. elektronischer Meßteile kann die Unsicherheit der Messung entscheidend senken, obwohl diese Elemente selbst nicht sehr genau messen können. Differenzmessungen gegen ein Normal oder eine Ausgangsgröße und Inkaufnahmen eines „Maßstabsfehlers“ sind oft zielführender als Absolutbestimmungen und in ihrer Aussage auch wesentlicher (Bewegungsmessungen, Druckdifferenzen usw.).

Wie aus Tabelle 2 ersichtlich, welche allerdings weder vollständig hinsichtlich der Meßgrößen noch homogen hinsichtlich Spannweite der Meßbereiche zusammengestellt werden konnte, kann von allen Größen die Zeit mit der relativ kleinsten Unsicherheit gemessen werden. Es folgen Schwere und Länge und mit letzterer im Zusammenhang auch Winkel, wobei die maximale Längen- und Schweregenauigkeit beide in Zusammenhang mit der Zeitmessung stehen. Die größte Winkelgenauigkeit resultiert aus Längendifferenzen (Interferometrie), die Beziehung des Wertes von relativ  $\pm 0,005''$  auf den Vollkreis ist aber vielleicht nicht ganz korrekt.

Tabelle 2  
Alle Zahlenangaben in dekadischen Logarithmen (Exponenten der Zehnerpotenzen!)

Pkt. Nr.	Begriff	Spannweite	Relativgenauigkeit		Anmerkungen
			größte erreichbare	d. häufigsten Messungen	
2.1.1	Länge	41*)	— 9	— 5 bis — 3	*) Elektronenradius — Weltall
2.1.2, 2.1.3	Flächen, Volumina	n. a.	*)	— 3 bis — 2	*) aus Längen beliebig
2.2	Winkel	9	— 8*)	— 5 bis — 3	*) eigentlich Relativmessung
2.3.1	Zeit	40*)	— 12	— 4 bis — 3	*) Lebensdauer des $\pi$ -Mesons bis Weltalter
2.3.2	Geschwindigkeit	18	— 8	— 3 bis — 1	
2.3.3, 2.4.2	Beschleunigung, Schwere	16*)	— 9	— 6 bis — 4	*) irdischer Meßbereich
2.4.1	Masse	62*)	— 7	— 3	*) Elektron — massenreichste Gestirne
2.4.3	Druck	21*)	— 5	— 4 bis — 1	*) irdischer Meßbereich
2.5	Temperatur	8*)	— 4*)	— 3 bis — 2*)	*) nicht anschaulich wegen Art der Einheit
2.6	Elektrische Daten	23*)	— 6	— 4 bis — 2	*) Meßbereich Stärke des Gleichstroms
2.7.1	Schallpegel	12	— 3	0	
2.7.2	Licht	14	— 8*)	— 2 bis 0	*) nur qualitativ (Lichtstrom)
3.	Sozioökonomische Größen	2	n. a.	— 1	

In der Reihenfolge der am häufigsten verlangten Relativgenauigkeiten zeigt sich eine überraschende Übereinstimmung sehr vieler Meßbereiche um den Wert von  $10^{-4}$ , ob es sich bei der Längenmessung um Polygonzüge, Bauabsteckungen, Setzungsmessungen oder die Dimensionen eines Werkstückes handelt, um Winkel auf  $1^{\circ}$  genau, die Zeitnehmung bei Fahrplänen oder Sportveranstaltungen, die Schwere bei Gravimetrie, den Druck beim Aneroid oder die Anzeigegenauigkeit elektrischer Meßeinrichtungen höherer Güteklassen. Volumina, Flächen, Geschwindigkeiten, so nicht abgeleitet, sondern „direkt“ gemessen, liegen trotz großer wirtschaftlicher Bedeutung eine Stufe tiefer. Größen der unmittelbaren Sinneswahrnehmung (Schall, Licht) und auch die sozioökonomischen Größen sind trotz aufwendigster Meßanordnung am unsichersten zu bestimmen; besonders im letztgenannten Fall besteht aber noch Bedarf an Genauigkeitssteigerung. Die im Zuge *der weiteren Expansion von Grundlagen- und angewandter Forschung eventuell nötige Genauigkeitssteigerung in Breite und Spitze* wird durch *verstärkten Einsatz neuer mathematischer Modelle und der Rechentechnik*, doch hauptsächlich noch immer durch *die zielbewußte und schöpferische Anwendung der physikalischen Meßtechnik* erreicht werden.

#### Literatur

Die mit \* bezeichneten Bücher sind für meßtechnisch interessierte Leser besonders interessant.

- [1] *Bartels*: Fischer-Lexikon der Geophysik (Nr. 20).
- [2] Berichte zur 15. Generalversammlung der IUGG im Juli/August 1971 in Moskau, Sonderheft 15 der ZfV.
- [3] *Boveri, Wasserrab, Jauslin*: Fischerlexikon „Technik 3“.
- [4] *Bretterbauer*: Eine Statistik der Dreieckswidersprüche im Österr. Netz 1. Ordnung. ÖZfVW, 55 (1967), Nr. 2.
- [5] *Deumlich*: Instrumentenkunde. VEB Verlag f. Bauwesen, 4. Aufl., Berlin 1967.
- [6] DIN-Taschenbuch 22: Einheiten und Formelgrößen, Beuth-Vertrieb, 1969, S. 61–71, DIN 1319: Grundbegriffe der Meßtechnik.
- [7] *Döhler*: Straßenverkehrsuntersuchungen mittels photogrammetrischer Verfahren und elektronischer Datenverarbeitung. Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 52, Bonn 1966.
- [8] Eichordnung vom 24. Jänner 1942. Verlag Deutsches Reichsgesetzbuch, Berlin.
- [9] *Förstner*: Der Flächenfehler bei photogrammetrischen Koordinatenmessungen. BuL, Heft 2 und 3 aus 1957.
- [10] *Frantz*: Plotter in der Vermessungskanzlei. Vortrag, gehalten im Rahmen des Kolloquiums für Nat. W. an der TH Wien 17. 5. 1972.
- [11] *Ganser*: Die Meßeinrichtungen der Staumauer Kops. Die Talsperren Österreichs, Heft 16.
- [12] *Gerstbach*: Ortsbestimmungen mit künstlichen Satelliten. Der Sternenbote, Wien, Heft 5/72.
- \*[13] *Graf*: Meßtechnik für Maschinenbau und Feinwerktechnik. Hanser, München 1969.
- [14] *Grafarend*: Neuartige Navigationsprinzipien. ZfV, 5/1970, S. 180ff.
- [15] *Guilford*: Dimensionen und Elemente der Intelligenz. Bild der Wissenschaft, 4/1972, S. 330–339.
- [16] *Hagger*: Wellenlängenwahl für elektronische Distanzmeßgeräte. SZfVuPh, 1968, S. 226 bis 240.
- [17] *Horner, Schafers*: Meyers Handbuch über das Weltall. Bibliogr. Institut, 1960.



- [18] *Hofstätter*: Fischer-Lexikon der Psychologie (Nr. 6).
- [19] *Hopmann*: Mondvermessung und Mondkarten. AVN, 5/1971, S. 172—187.
- [20] *Huber*: Das Hyperbelverfahren, eine Methode zum berührungslosen Messen der Lage räumlich verteilter Punkte mit Hilfe eines elektromagnetischen Strahlungsfeldes. VI. Internationaler Kurs für Ing.-Mess. hoher Präz., Graz 1970; Themenkreis 1, S. 174.
- [21] *H. Jordan*: Schätzen von Entfernungen. ZfV, 1898, S. 57.
- [22] *W. Jordan*: Handbuch der Vermessungskunde (Aufl. 1897). 2. Bd., S. 67.
- [23] *Jordan, Eggert, Kneissl bzw. Rinner, Benz (Mitter)*: Handbuch der Verm.-Kunde, Band VI, 1966.
- [24] *Kempin*: Langstrecken-Stromübergang durch hydrodynamisches Nivellement. ZfV, 1970, S. 373ff.
- [25] *Kick*: Das Eis der Erde und die Geodäsie. ZfV, 11/1971, S. 476—488.
- [26] *Kohlrausch*: Praktische Physik. Bd. 1, Teubner 1968.
- [27] *Kohlrausch*: Praktische Physik. Bd. 2, Teubner 1968.
- [28] *Kondraschkow*: Elektrooptische Entfernungsmessung. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin.
- [29] *Leberl*: Untersuchung über die Geometrie und Einzelbildauswertung von Radarschrägaufnahmen. ITC 1971, gleichzeitig Dissertation an der TH Wien.
- [30] *Lehr*: Satellite Tracking with a Laser. Smithsonian Astrophysical Observatory, Special Report 236.
- [31] *Linkwitz, Preuss*: Die photogrammetrische Vermessung der Modelle der olympischen Dächer in München. BuL, 4/71, S. 147—155.
- [32] *Marzahn*: Aufgaben des Vermessungsingenieurs bei der Planung und beim Bau von Hochenergie-Beschleunigern. VI. Int. Kurs f. Ing.-Mess. hoher Präzision, Graz 1970, Themenkreis 7, Vortrag 8.
- [33] *Messerschmidt*: Genauigkeit von einigen Verfahren der astronomisch-geodätischen Azimut- und Breitenbestimmung. DGK, C/20, München 1956.
- [34] *Montag*: Stand und Entwicklungstendenzen in der Meeresgeodäsie. VT, 8/71, S. 281—285.
- [35] *Montag*: Untersuchung der elektronischen Libelle „Talyvel“. VT, 11/1964, S. 419—422.
- [36] *Müller*: Handbuch der Modellstatik. Springer-Verlag.
- [37] *Muranyi*: Methode zur Bestimmung des Verkehrsablaufs auf dem europäischen Straßennetz. Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen, Heft 39, Bad Godesberg 1960.
- [38] *Niemczyk, Emschermann*: Messungsgenauigkeiten und Fehlergrenzen im Markscheidewesen. Mitt. Marksch. W., 1942, S. 80—98.
- [39] *Noelle - Neumann*: Umfragen in der Massengesellschaft, Rohwolts Deutsche Enzyklopädie Nr. 177/178.
- [40] ÖPZ., Qualitätskontrolle in Industriebetrieben. Wien 1967.
- [41] Österr. Maß- und Eichgesetz. BGBl. Nr. 152/1950.
- [42] *Padelt*: Menschen messen Zeit und Raum. VEB Verlag Technik, Berlin 1971.
- [43] *Padelt - Laporte*: Einheiten und Größenarten der Naturwissenschaften. VEB Fachbuchverlag, Leipzig 1964.
- [44] *Peglow*: Autokollimationsfernrohr. Firmenschrift der Firma Leitz, Wetzlar.
- [45] *Pollmann*: Vermessungskreisel. VR 1971, div. Hefte.
- [46] *Rehse*: Die Bestimmung großer unzugänglicher Entfernungen mittels Lasermessungen zum Mond. VT, 11/1971, S. 406—408.
- [47] *Rinner*: Bericht über die Erdgezeitenstation im Grazer Schloßberg. Mitt. Geod. Inst. TH Graz, Folge 9, 1971.
- [48] *Rinner - Meissl - Killian*: Beiträge zur Theorie der geodätischen Netze im Raum. DGK, A/61, München 1969.

- [49] *Rotter*: Das Einheitensystem der Lichttechnik. Licht und Beleuchtung, Heft 1/1964.
- [50] *Rotter*: Aus der Arbeit der internationalen Beleuchtungskommission. Licht und Beleuchtung, Heft 1/2 aus 1966.
- [51] *Rudelstorfer*: Genauigkeit von Massenermittlungen im Straßenbau. FIG-Kongreß 1971, Vortrag 603.3.
- [52] *Sagitov*: Gravitationskonstante, Masse und mittlere Dichte der Erde. VT 2/1971, S. 59—63.
- [53] *Schmid*: Vom Anbeginn über Eratosthenes zum Weltnetz. Antrittsvorlesung an der TH Wien 1972.
- [54] *Schulz*: Plasma — der vierte Aggregatzustand. Bild der Wissenschaft, 6/1968.
- [55] *Sigl*: Über die Beobachtung genauer astronomischer Längen. DGK, C/41, München 1960.
- [56] *Spettmann*: Schlauchwaagenmessungen, Grenzen ihrer Genauigkeit und der Wirtschaftlichkeit ihres Einsatzes. FIG-Kongreß 1971, Vortrag 605.6.
- \*[57] *Squires*: Meßergebnisse und ihre Auswertung. De Gruyter 1971.
- [58] *Staritz*: Einführung in die Technik der Flugkörper. Schiele und Schön, Berlin 1966.
- [59] *Steinbauer*: Grundlagen beim Bau der Donaukraftwerke. 1. Österr. Fachtagung für Verm. W., Wien 1966, S. 103—114.
- [60] *Storm*: Wahrscheinlichkeitsrechnung, Math. Statistik, Statistische Qualitätskontrolle. VEB Fachbuchverlag Leipzig, 1969.
- [61] *Tengström*: Elimination of Refraction at Vertical Angle Measurements Using Lasers of Different Wavelengths. In "Proceedings of the International Symposium: Figure of the Earth Refraction". ÖZfV, Sonderh. 25.
- [62] *Toperczer*: Lehrbuch der allgemeinen Geophysik. Springer 1960.
- [63] *Torge*: Untersuchungen zur Genauigkeit moderner Langstreckengravimetermessungen. Hannover 1966 (Wiss. Arb. Nr. 29).
- [64] *Weidemann*: Vom Ende der Sterne. Bild der Wissenschaft, 7/1971, S. 670—681.
- [65] *Witte*: Möglichkeiten und Grenzen von radio-astronomischen Interferenzmessungen. AVN 11/1971, S. 417—425.
- \*[66] *Zeller - Franke*: Das physikalische Rüstzeug des Ingenieurs. Darmstadt 1966.

### Bemerkung zu Abschnitt 2.2.2 (Nr. 2, S. 63)

#### 2.2.2 *Astronomische Ortsbestimmung usw.*

Zu den dort angegebenen Zahlenwerten wurde mir von Herrn *Dr. Gerstbach* kollegialerweise folgende Information zur Verfügung gestellt:

Die auf ortsfesten Stationen an einem Beobachtungsende durchschnittlich erreichten mittleren Fehler der Breite und Länge betragen für

photographische Zenitteleskope	$\pm 0.''04$
visuelle Instrumente	$\pm 0.''07$ .

Wieweit sich die Genauigkeit durch längere Meßreihen steigern läßt, hängt hauptsächlich von äußeren Umständen (Atmosphäre) ab.

Auf Feldstationen können aus 3—4 Abenden etwa folgende äußere Genauigkeiten erreicht werden:

astronom. Azimut	$\pm 0.''3$
Breite und Länge	$\pm 0.''15$ .

*Peters*